



UNIVERSIDAD
POLITECNICA
DE VALENCIA

Aplicación de Nuevos Materiales en Productos Náuticos de Recreo

Tesis presentada en
la Escuela Superior de Ingeniería del Diseño
en la UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

En cumplimiento
de los requisitos para el grado de
Máster en Diseño y Fabricación Integrada
Asistidos por Computador

Por

ANTONIO JESÚS HIJANO MARTEL

Director: Dr. JUAN ANTONIO GARCÍA MANRIQUE

Codirector: RENÉ HOTO

DICIEMBRE 2011

Índice

I.	Agradecimientos.....	4
II.	Resumen:.....	5
III.	Lista de tablas.....	6
IV.	Lista de imágenes.....	7
0	Estado del Arte de los Materiales Compuestos.....	9
0.1	Introducción:.....	9
0.2	Características.....	10
0.3	Materiales compuestos tipo sándwich.....	11
0.3.1	Fibras.....	12
0.3.2	Matrices poliméricas.....	19
0.3.3	Núcleos.....	23
0.4	Propiedades mecánicas.....	25
0.5	Procesos de fabricación de materiales compuestos.....	27
0.6	Procesos de molde abierto.....	28
0.6.1	Laminado manual y proyección.....	28
0.6.2	Bobinado de filamentos.....	29
0.6.3	Pultrusión.....	30
0.7	Procesos de molde cerrado.....	31
0.7.1	Moldeado por compresión.....	31
0.7.2	VARI.....	32
0.7.3	Autoclave.....	33
1	Estado del Arte de los Procesos LCM.....	34
1.1	LCM.....	34
1.1.1	RTM.....	35
1.1.2	VARTM.....	36
1.1.3	SCRIMP.....	37
1.2	Objetivos de la tesina.....	39
2	Marco Teórico.....	40
2.1	Las teorías del refuerzo.....	40
2.2	El flujo en un medio poroso.....	47
2.2.1	Ley de Darcy.....	47
2.3	La permeabilidad del refuerzo.....	50
2.4	Los fenómenos térmicos.....	50
2.5	Viscosidad de la resina.....	55

3	Método de Elementos Finitos	57
3.1	Introducción	57
3.2	Descripción matemática del método	58
3.3	Método MEF en la práctica	60
3.4	Pre-procesado y generación de la malla	61
3.5	Cálculo y resolución de sistemas de ecuaciones	62
3.6	Post-procesado	63
3.7	Resultados del MEF	63
3.8	Limitaciones	64
4	Aplicación al Caso de Estudio	65
4.1	Análisis de resistencia de materiales compuestos	65
4.1.1	Pre-procesado	65
4.1.2	Cálculo	67
4.1.3	Resultados	68
4.2	Análisis de infusión de resina	72
4.2.1	Pre-procesado	73
4.2.2	Cálculo	75
4.2.3	Resultados	77
5	Conclusiones y Trabajos Futuros	80
	Bibliografía	81

I. Agradecimientos

En primer lugar me gustaría agradecer la oportunidad que me han dado mis padres de realizar los estudios universitarios, porque sin su apoyo tanto económico como emocional no habría tenido la posibilidad de realizarlos.

También quiero mencionar al Instituto de Diseño y Fabricación, y más concretamente a varios grupos de investigación. CompositeLab, dirigido por el Dr. Juan Antonio García Manrique, y al doctorando René Hoto por el asesoramiento. Y DibLab, dirigido por Manuel Martínez Torán y Andrés Conejero Rodilla de la división de Diseño del Producto, que me han dado la oportunidad de colaborar en el desarrollo de proyectos de investigación.

Por último agradecer a Ricardo Pinzón Director de la empresa Limit Waves, dedicada a la fabricación de tablas de surf con materiales compuestos, el cual me ha transmitido los conocimientos prácticos, tanto de geometrías como tipos de construcción aplicadas en las tablas de kitesurf, necesarios para el desarrollo de esta tesina.

II. Resumen:

Esta tesina es una parte del proyecto de colaboración, entre el Instituto de Diseño y Fabricación IDF, la empresa CAPE HORN ENGEENERING S.L. y Limit Waves, relacionado con el estudio de viabilidad de la aplicación de fibra de basalto en productos relacionados con el sector náutico. En esta tesina se muestran los materiales que se usan hoy día, para la creación de materiales compuestos, con el objetivo de que se pueda seleccionar la combinación más adecuada, obteniendo el material deseado para una aplicación concreta dentro de un proyecto industrial. También se abordan los procesos productivos que se aplican en la actualidad para la transformación de los materiales compuestos, con la finalidad de poder seleccionar el proceso más adecuado para la fabricación de un producto, para mejorar el rendimiento productivo y las características técnicas del objeto de diseño. Una vez realizado el acercamiento al campo de los materiales compuestos hay que simular tanto el comportamiento de resistencia de los materiales compuestos mediante el software de diseño paramétrico Unigraphics NX-7 que usa como algoritmo de cálculo el solver Nastran, mediante el método de elementos finitos con el objetivo de optimizar el espesor de las capas, el tipo de entramado, orientaciones y refuerzos necesarios para que el producto en estudio cumpla con las especificaciones de diseño. Después de seleccionar la composición que va a tener el laminado, hay que simular el proceso de fabricación aplicado a ese caso en concreto, pudiendo observar y analizar la evolución teórica del proceso mediante el software de simulación de infusión de resina PAM-RTM, con el fin de optimizar los parámetros del proceso para poder fabricar el componente con el mínimo tiempo y costo asociado al producto.

El objetivo principal de esta tesina es la aplicación de nuevos materiales y tecnologías en la producción de tablas de kitesurf. Para ello se van a realizar simulaciones con programas de elementos finitos de resistencia de materiales e infusión de resinas. Con la finalidad de establecer la composición y orientación de las capas de fibra, necesarias para que el producto cumpla con los requerimientos de diseño pudiendo así simular y optimizar el proceso de fabricación de las tablas de kitesurf por infusión de resina. En esta tesina se va a introducir un nuevo material de refuerzo de fibra de basalto en la fabricación de tablas de kitesurf, por ello hay que evaluar si las características del material son adecuadas para la aplicación en el producto y la composición del laminado. Una vez definida la composición del laminado se simula el proceso de infusión de resina para obtener los parámetros del proceso de fabricación.

III. Lista de tablas

Tabla 1: Propiedades materiales usados como matriz.....	26
Tabla 2: Propiedades materiales usados como fibra	26
Tabla 3: Propiedades fibra de basalto y vidrio	26
Tabla 4: Propiedades PVC espumado	27

IV. Lista de imágenes

Figura 1: Sección transversal de fibra de carbono reforzada con resina epoxi	10
Figura 2: Laminado tipo sándwich.....	11
Figura 3: Fibra de Vidrio	13
Figura 4: Fibra de Carbono	14
Figura 5: Fibra de Aramida.....	15
Figura 6: Cinta Prepeg Boro.....	16
Figura 7: Fibra de Basalto	17
Figura 8: Laminado manual y proyección	29
Figura 9: Esquema proceso de bobinado de filamentos.....	30
Figura 10: Esquema proceso de Pultrusión	31
Figura 11: Esquema proceso Moldeo por Compresión	32
Figura 12: Esquema proceso VARI.....	32
Figura 13: Esquema proceso autoclave.....	33
Figura 14: Proceso de moldeo por transferencia de resina (RTM).....	35
Figura 15: Esquema proceso SCRIMP	38
Figura 16: Variación de densidad de la resina epoxy reforzada con fibra de carbono.....	41
Figura 17: Módulo de corte de la resina epoxi reforzada con fibra de carbono	43
Figura 18: Variación de resistencia a la tracción de fibras	46
Figura 19: Frontera entre elementos.....	49
Figura 20: Escala característica de la forma elíptica de una fibra comprimida	53
Figura 21: Resistencia térmica de contacto	54
Figura 22: Malla tabla kitesurf 2D.....	66
Figura 23: Composición laminado tipo sándwich.....	66
Figura 24: Condiciones de contorno	67
Figura 25: Análisis de tensiones de la capa 1.....	69
Figura 26: Análisis de tensiones de la capa 2.....	69
Figura 27: Análisis de tensiones de la capa 3.....	70

Figura 28: Análisis de tensiones de la capa 4.....	70
Figura 29: Análisis de tensiones de la capa 5.....	71
Figura 30: Análisis de deformaciones tabla de kitesurf	72
Figura 31: Orientación de las fibras	73
Figura 32: Datos de materiales PAM - RTM	74
Figura 33: Vectores normales a la malla.....	75
Figura 34: Zonas creadas en PAM-RTM	75
Figura 35: Esquema flujos de resina.....	76
Figura 36: Esquema de impregnación del refuerzo	77
Figura 37: Sección del modelo de infusión de resina con PAM-RTM.....	77
Figura 38: Detalle del modelo de infusión de resina con PAM-RTM	78
Figura 39: Flujo longitudinal de resina con PAM - RTM.....	78
Figura 40: Flujo transversal de resina con PAM - RTM	79

Capítulo 0

Estado del Arte de los Materiales Compuestos

0.1 Introducción:

El término material compuesto se refiere generalmente a los materiales multi-fase que se obtienen por la combinación artificial de diferentes materiales con el fin de alcanzar propiedades que los componentes no pueden obtener por sí mismos [1]. En una escala macroscópica las fases son indistinguibles, pero a escala microscópica, las fases están claramente separadas, y cada fase tiene las características de los materiales puros.

En ingeniería, los materiales compuestos siempre se componen de una fase de refuerzo y una fase matriz. Las diferentes fases a escala microscópica se muestran en la Figura 1. El enlace entre las fases se crea durante la etapa de preparación del material compuesto y este vínculo debe tener un efecto fundamental sobre las propiedades mecánicas del material final. El propósito de la fase de refuerzo es asegurar la función mecánica del material compuesto, mientras que el papel de la fase matriz es proporcionar ante todo un vínculo entre la fibra de refuerzo (la cohesión de todas las fibras), así como distribuir las cargas mecánicas a través de la pieza y proteger las fibras contra la exposición ambiental [2]. La nomenclatura Matriz es un método de clasificación. Esto sirve para poder distinguir en diferentes categorías a la matriz de metal, la matriz de polímero, y compuestos de matriz cerámica. En esta tesina, nos centraremos en las matrices poliméricas.

Los compuestos de matriz polimérica (PCM) se utilizan ampliamente en la ingeniería de materiales y pueden ser considerados como la clase más grande de materiales compuestos. El enorme éxito de los PCM deriva de la amplia gama de propiedades que se pueden obtener y el bajo costo de las piezas finales. En la ingeniería, los materiales compuestos utilizados, por lo general contienen un alto porcentaje de fibras

continuas, orientadas y combinadas con una matriz de polímero para producir piezas de alta resistencia y rigidez. Esta clase de materiales compuestos se conoce como compuestos avanzados. Debe hacerse una distinción entre los plásticos reforzados y los compuestos avanzados. El término plástico reforzado se refiere a los materiales plásticos fabricados con un porcentaje de fibras discontinuas relativamente bajo, orientadas al azar, con propiedades más bien moderadas.

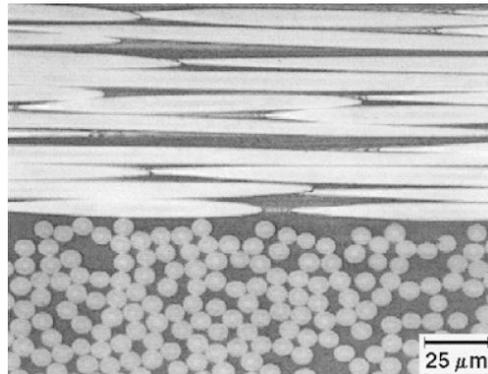


Figura 1: Sección transversal de fibra de carbono reforzada con resina epoxi.

0.2 Características

Hoy en día, los materiales compuestos se utilizan ampliamente en muchas aplicaciones industriales, por la necesidad de materiales resistentes y ligeros. Con el uso de los materiales compuestos, los ingenieros pueden mejorar las prestaciones de las piezas. El concepto de la mejora del rendimiento es amplio e incluye el aumento de fuerza, así como el aumento de la resistencia, disminución del coeficiente de expansión térmica, y el aumento de conductividad térmica o eléctrica.

Los compuestos pueden estar formados por una gran variedad de materiales. Una de las características principales de todos los compuestos es que tienen una fase de refuerzo distinta a la fase matriz. Las características de las dos fases se combinan para dar un compuesto con propiedades únicas. La unión entre las fibras y la matriz se crea durante la fase de fabricación del material compuesto. Esto tiene una influencia fundamental en las propiedades mecánicas del material compuesto.

0.3 Materiales compuestos tipo sándwich

Una estructura sándwich es una estructura constituida por dos capas resistentes entre las que se interpone un material ligero y, por lo general, de baja densidad. Este núcleo, aumenta el espesor y en mínima medida el peso de la nueva estructura comparada con una estructura simple, reporta grandes beneficios desde el punto de vista de la rigidez del conjunto.

Una estructura sándwich está compuesta por tres elementos fundamentales: Las capas exteriores o refuerzo, el núcleo del sándwich y la interfase de unión entre el núcleo y las capas, que generalmente es un adhesivo o también denominado fase matriz, ver Figura 2.

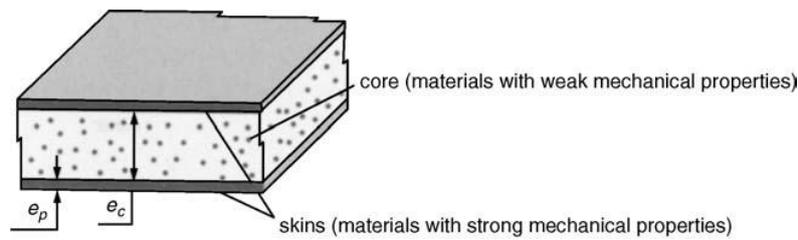


Figura 2: Laminado tipo sándwich

Cada uno de los elementos implicados cumple una función determinada. Las capas exteriores o refuerzos son los elementos resistentes, generalmente realizadas con materiales con mejores propiedades mecánicas que el resto; el núcleo, de material ligero, cuyas funciones principales son mantener separadas las capas exteriores, proporcionar aislamiento y transmitir los esfuerzos cortantes de una cara a la opuesta; y por último la interfase, que tiene como función principal mantener unido el conjunto. Si un panel sándwich es sometido a flexión, las capas exteriores experimentarán esfuerzos diferentes. Por ejemplo, si la capa superior está sometida a tracción, la capa inferior estará sometida a compresión.

El núcleo debe mantener la distancia relativa entre las capas y la distancia entre las capas y la línea neutra. El núcleo debe, por lo tanto, ser suficientemente resistente para poder soportar los esfuerzos de corte que se producen y evitar que se produzca un desplazamiento de las capas en el sentido longitudinal. Debe también soportar los esfuerzos de compresión perpendicular a las capas. Las capas deberán ser capaces

de resistir el esfuerzo de flexión, el cual genera tensiones de tracción y compresión. De modo que la nueva estructura sándwich, comparada con la estructura simple, será mucho más resistente con un mínimo aumento de peso.

En los siguientes puntos se describen las características y los diferentes materiales usados en la formación de los materiales compuestos, para poder distinguir los materiales usados como refuerzo, matriz y núcleo.

0.3.1 Fibras

Las fibras se componen de miles de filamentos, cada filamento con un diámetro de entre 5 y 15 micras. Los materiales más usados como material de refuerzo son el vidrio, los metales y los polímeros. No hay ningún tipo de refuerzo que se pueda decir que sea realmente superior al otro, cada uno tiene sus beneficios, así como deficiencias [2]. El refuerzo puede ser de muchas formas, como fibra continua, fibras cortas, tejido o partículas. Los criterios para seleccionar el tipo y forma del refuerzo dependen de los requisitos de diseño para cada componente. Sin embargo, las cualidades más deseables son las siguientes:

- Propiedades mecánicas elevadas.
- Propiedades físico-químicas de compatibilidad con la matriz.
- Fácil de usar.
- Buena repetitividad de las propiedades.
- Baja densidad.
- Bajo coste.

Las fibras aplicadas en polímeros compuestos son vidrios, carbones (también llamados grafitos), aramidas, el boro, basalto, etc... pero en esta tesina solo nos centramos en las fibras de vidrio, de carbono y basalto, para poder estudiar y comparar las características de cada una, para elegir el material adecuado para la aplicación en el producto.

0.3.1.1 Fibra de vidrio

Los refuerzos de fibra de vidrio representan el mayor volumen utilizado en la industria de los materiales compuestos. Las fibras se caracterizan por su bajo costo, color blanco, buenas propiedades mecánicas y eléctricas, alto contenido de humedad, resistencia química y excelente estabilidad dimensional en condiciones de servicio a 500 °C. La fabricación de las fibras se inicia con vidrio fundido y líquido a través de un elemento o pieza sumamente resistente, que además debe contar con diminutos orificios. A dicho elemento se lo conoce con el nombre de “espinnerette” que sirve para obtener una forma fibrosa que luego se enfría para asegurar la microestructura final amorfa antes de aplicar revestimientos finales o de tamaño.

Los tipos más comunes de fibra de vidrio disponibles son E-glass y S-glass, los cuales son bajos alcalinos boro-alúmina-silicato. La fibra E-glass, es la fibra con más bajo costo y se utiliza tanto en aplicaciones estructurales como eléctricas. La fibra S-glass proporciona una mayor resistencia a la tracción y el aumento de las propiedades como la resistencia a la temperatura necesaria para aplicaciones aeroespaciales y aeronaves.



Figura 3: Fibra de Vidrio

0.3.1.2 Fibra de Carbono

Hay seis grados diferentes de fibra de carbono: de modulo bajo, normal, medio, alto, ultra alto y de alta tenacidad. Las fibras de alta tenacidad tienen mayor resistencia específica, mientras que, las fibras ultra tienen mayor módulo de rigidez. Las fibras de carbono son conocidas por su alta resistencia y rigidez.

En comparación con el aluminio 6061, la fibra de carbono comercial estándar posee un módulo que es 7 veces más fuerte y 2 veces más rígido, sin embargo, 1,5 veces más ligero. Las fibras de carbono tienen propiedades a fatiga muy buenas y sus propiedades de resistencia no se degradan con la temperatura. A diferencia de las fibras de vidrio, fibras de carbono no son isotrópicas y son relativamente suaves en la dirección transversal. Estas fibras no logran fuertes lazos con la matriz, sino que dependen de una combinación de los enlaces químicos débiles y la mecánica con el material de la matriz. La superficie de las fibras de carbono debe ser tratada con grupos químicos activos para formar fuertes lazos entre las fibras y la resina. Las fibras de carbono son conductoras de la electricidad. En la Tabla 2 se comparan las propiedades mecánicas del E-glass, carbono y Kevlar. La resistencia a la tracción de cada uno de los materiales es similar. Sin embargo, el módulo de tracción y la densidad específica de cada uno de los materiales es muy diferente. El vidrio es mucho más pesado y menos rígido en comparación con las otras fibras, mientras que la fibra de carbono tiene una rigidez muy alta. Para aplicaciones muy ligeras, el Kevlar ofrece la mejor densidad específica.



Figura 4: Fibra de Carbono

0.3.1.3 Fibra de Aramida

Estas fibras se caracterizan por su baja densidad, color amarillo, blanco, propiedades de tensión muy alta, bajas a la compresión y que son difíciles de cortar mecánicamente. El proceso de fabricación de estas fibras consiste en pasos complejos de polimerización. Comienza con la expulsión del polímero líquido o hilado en forma de fibra, se lava en agua, se seca, y, finalmente, se le aplica un tratamiento térmico bajo tensión. El resultado es un sistema radial muy bien alineado de láminas plegadas axialmente en la microestructura. Las fibras de aramida son extremadamente útiles en aplicaciones de tensión crítica donde las debilidades intrínsecas a la compresión de la fibra no se pueden explotar. Conocido comercialmente como Kevlar, las aplicaciones más notables de fibras de aramida son chalecos antibalas (sin matriz).

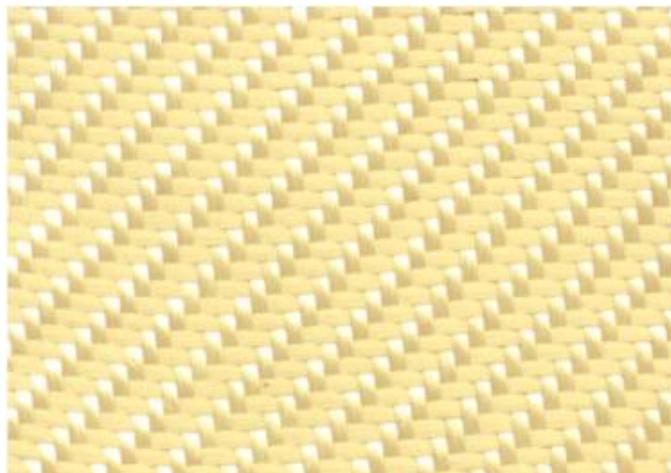


Figura 5: Fibra de Aramida

0.3.1.4 Fibras de Boro

Los refuerzos de boro se conocen como filamentos en lugar de fibras, ya que se crean por deposición de vapor químico de boro en un alambre de tungsteno. Este proceso de fabricación produce un refuerzo rígido, de gran diámetro y costoso que es algo difícil de manejar y producir en forma de productos posteriores como los tejidos y las estructuras de contorno. A pesar de esto los filamentos de boro poseen la combinación de alta resistencia y alto módulo específico que el vidrio no puede alcanzar, su uso se ha reducido a un nivel minúsculo. Ya que las variedades de fibra de carbono / grafito han suplantado al boro cuando se necesita un alto módulo específico.



Figura 6: Cinta Prepeg Boro

0.3.1.5 Fibras de Basalto

El basalto es la roca más común en la corteza terrestre. Es de color marrón a verde opaco en función del contenido en hierro. Las fibras de basalto están hechas de roca basáltica fundida entre 1300-1700 ° C [3, 4]. La composición química y las propiedades mecánicas de las fibras de basalto procedentes de diferentes fuentes difieren [5, 6, 7], probablemente debido a los diferentes componentes químicos y las condiciones de procesamiento. La resistencia a la tracción de la fibra de basalto tiende a incrementarse con el aumento de las temperaturas de producción, entre 1,5 y 2,9 GPa, entre 1200 ~ 1375 ° C. Esto se debe al aumento de la proporción de núcleos de cristal de basalto. El módulo de Young de la fibra de basalto Varía entre 78 y 90 GPa para las fibra de basalto procedentes de diferentes fuentes [5]. Además de buenas propiedades mecánicas, el basalto posee una elevada estabilidad química, térmica [6] y es un buen aislante eléctrico y acústico [8]. La capacidad de aislamiento térmico del basalto es tres veces mayor que el amianto, y debido a la propiedad de ser un buen aislante, el basalto se utiliza en la protección contra incendios.

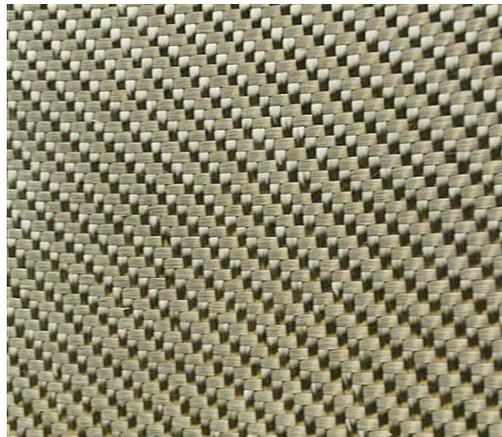


Figura 7: Fibra de Basalto

0.3.1.6 Comparativa fibra de vidrio y basalto

El basalto tiene propiedades de aislamiento eléctrico 10 veces superior al vidrio [9, 10]. En segundo lugar, el basalto tiene una resistencia mucho mejor a los productos químicos que la fibra de vidrio. Además, el basalto puede ser utilizado en un rango de temperatura más amplio, -260/-200 ° C a alrededor de 650/800 ° C en comparación con E-glass, -60 A 450/460 ° C [8, 10, 11, 12]. Y la sustitución de fibra de vidrio por la fibra de basalto puede reducir el riesgo de contaminación del medio ambiente con la alta toxicidad de metales y óxidos, que se emiten en la producción de la fibra de vidrio. Además, la fibra de basalto tiene una mayor rigidez y resistencia que la fibra de vidrio [13]. Por lo tanto, las fibras de basalto son cada vez más ampliamente utilizadas.

La fibra de basalto se produce en un proceso continuo, similar en muchos aspectos al que se utiliza para hacer fibra de vidrio. El proceso es en realidad más simple que el procesamiento de la fibra de vidrio debido a que la fibra de basalto tiene una composición menos compleja. El vidrio es típicamente 50 por ciento de arena de sílice en combinación con los óxidos de boro, aluminio y / o otros minerales - materiales que deben ser introducidos de forma independiente por un sistema de medición controlada antes de entrar al horno. A diferencia del vidrio, fibras de basalto no cuentan con los materiales secundarios. El proceso sólo requiere una línea de alimentación individual para llevar la roca triturada de basalto al horno de fusión. Por otro lado, los fabricantes de fibra de basalto tienen menos control directo sobre la pureza y la consistencia de la piedra de basalto. El vidrio fundido, al enfriarse, forma un sólido cristalino. El basalto, sin embargo, tiene una estructura cristalina que varía en función de las condiciones específicas del flujo de lava en cada ubicación geográfica. El basalto combina tres minerales de silicato - plagioclasa, piroxeno y olivino. La plagioclasa es un tipo de feldespato que consiste en sodio y silicato de calcio. Los piroxenos son un grupo de silicatos cristalinos que contienen dos de los tres óxidos metálicos, magnesio, hierro o calcio. El olivino es un silicato que combina magnesio y hierro - $(Mg, Fe) 2SiO_4$. Esta variedad de composición implica que los niveles de minerales y la composición química de las formaciones de basalto pueden diferir significativamente de un lugar a otro. Por otra parte, la velocidad de enfriamiento, cuando el flujo original llegó a la superficie de la tierra, también influyó en la estructura cristalina [14].

Las fibras de basalto presentan una carga de rotura y un módulo de Young superior (una medida de la rigidez de un determinado material) que la fibra de vidrio E-glass.

En un estudio de las fibras de basalto y las fibras de vidrio E-glass, dirigido por el profesor Ignaas Verpoest en el Departamento de Materiales Compuestos de la Universidad de Lovaina en Bélgica. Sometieron las piezas a una prueba de flexión de tres puntos (ISO 178) y a la prueba de ILSS (ISO 14130) para poner a prueba la resistencia y rigidez. Cada muestra tenía una fracción volumétrica de fibra de 40 por ciento, pero la fuerza de la muestra de basalto / epoxi fue 13,7 por ciento superior a la de la muestra de E-glass y mostró una rigidez 17,5 por ciento mayor, aunque la muestra de basalto fue un 3,6 por ciento más pesada que la muestra de E-glass.

Además, las fibras de basalto son naturalmente resistentes a los rayos ultravioleta (UV) y a la radiación de alta energía electromagnética, mantienen sus propiedades a bajas temperaturas, y presenta una mejor resistencia a los ácidos. El basalto también es superior en el ámbito de la seguridad de los trabajadores y también para la calidad del aire. Markuts señala que, dado que el basalto es un producto de la actividad volcánica, el proceso de fabricación es más ecológico y seguro que el de la fibra de vidrio. Los gases "de efecto invernadero" que podrían ser liberados durante el procesamiento de la fibra, dice, fueron emitidos millones de años atrás, durante la erupción de magma. Además, el basalto es 100 por cien inerte, es decir, no tiene ninguna reacción tóxica con aire o agua, y no es combustible.

0.3.2 Matrices poliméricas

Como se mencionó anteriormente, la matriz es la fase que mantiene la cohesión de la fase de refuerzo. Transfiere la carga aplicada a las fibras, manteniendo así la fibra en su posición y orientación. La Matriz también aísla al refuerzo de ambientes corrosivos y determina la temperatura máxima de servicio de los compuestos.

Aunque los materiales avanzados (por ejemplo, los componentes estructurales de los vehículos aeroespaciales) emplean la cerámica y metales como matriz para materiales compuestos, la mayoría de los compuestos actuales aún se basan en matrices poliméricas. A veces se añaden diluyentes, cargas, endurecedores y otros modificadores a la resina para alterar la viscosidad, aumentar la resistencia, modificar la reactividad de los polímeros o para cambiar las propiedades del polímero base, los ingenieros se refieren generalmente a la resina como "sistema de resina". Las matrices poliméricas se pueden clasificar en termoestables (polímeros termoestables) y termoplásticas (polímeros termoplásticos).

Los polímeros termoestables, especialmente las resinas epoxi y poliéster son los materiales más utilizados como matriz. Son cadenas poliméricas altamente entrecruzadas a partir de resinas de pequeño peso molecular y catalizadores. Los polímeros termoestables son ampliamente utilizados en los materiales compuestos, debido a su excelente estabilidad a altas temperaturas y al estrés físico. Cuando se calientan, no se descomponen. Así que la gran desventaja de los polímeros termoestables es que no pueden ser reprocesados. Los dos parámetros más importantes del procesamiento para los polímeros termoestables son la viscosidad inicial y el tiempo de curado. La viscosidad inicial determina la facilidad con la que la resina se puede incorporar al refuerzo. Además de resinas epoxi y resinas de poliéster, los plásticos termoestables también incluyen viniléster, bismaleimida, poliamida y resinas fenólicas.

Los termoplásticos son polímeros reticulados. Se ablandan y fluyen cuando se calientan. Antes del procesamiento, los termoplásticos por lo general se calientan hasta el punto de fusión, a continuación, se inyecta en un molde y se enfría para solidificar el polímero. Este proceso es completamente reversible. Los parámetros de procesamiento principales para los termoplásticos son la temperatura de fusión y viscosidad de fusión. Los polímeros termoplásticos son el polipropileno (PP), poliamida (PA), poliéter (PEEK), polieterimida (PEI), y poliamidaimida (PAI).

0.3.2.1 Matrices termoestables

Los plásticos termoestables son inicialmente moléculas de bajo peso molecular que son a menudo un líquido viscoso a temperatura ambiente, lo que comúnmente se denomina "resina". Los polímeros termoestables experimentan reacciones químicas irreversibles (polimerización) cuando se calientan (iniciado por alguna fuente de energía como la luz UV o un haz de electrones) y forman cadenas poliméricas reticuladas de alto peso molecular, esto se conoce como "Curado", es decir, la polimerización se lleva a cabo por el calor, la presión y por la adición de agentes de curado a temperatura ambiente. ¿Qué significa el término irreversible?, que los termoestables no pueden ser reprocesados térmicamente después de la polimerización (curado). Los materiales termoestables pueden ser clasificados en dos grupos dependiendo de las reacciones que se someten para formar su estructura de red. Por ejemplo, epóxidos y Poliésteres (estos nombres derivan de las características químicas reactivas de sus grupos) reaccionan para formar una estructura de red.

El hecho de que algunos termoestables formen productos volátiles implica que los ingenieros deben prestar atención a las técnicas de laminado, con el fin de prevenir la formación de huecos. Las matrices más ampliamente usadas para materiales compuestos avanzados han sido las resinas epoxi. Estas resinas son más caras que las de poliéster y no tienen un buen comportamiento a alta temperatura.

Sin embargo, son ampliamente utilizadas por las siguientes ventajas:

- Baja contracción durante el curado.
- Alta resistencia y la flexibilidad.
- Resistencia a los disolventes y productos químicos.
- La resistencia a la fluencia y la fatiga.
- Tasa de curación ajustable.

Las resinas epoxicas también tienen algunos inconvenientes:

- Las resinas y agentes de curado son tóxicos antes del proceso
- Alto coeficiente de expansión térmica.
- Puede ser sensible a la degradación por luz ultravioleta.
- Limitado a unos 200°C de temperatura máxima de uso.
- Es difícil combinar la dureza y resistencia a altas temperaturas.

Las matrices de poliéster también se utilizan en una amplia gama de aplicaciones. Las resinas de poliéster curan con la adición de un catalizador (generalmente un peróxido), resultando una reacción exotérmica, que puede ser iniciada a temperatura ambiente.

Para las altas temperaturas, los ingenieros suelen recurrir a los sistemas de resina basada en bismaleimidas y polimidas. Las bismaleimidas ofrecen propiedades mecánicas superiores a las resinas epoxicas a elevadas temperaturas. Las polimidas son polímeros de alta temperatura usados en compuestos avanzados con un rango de temperaturas entre 230 °C y 315 °C.

0.3.2.2 Matrices termoplásticas

Los termoplásticos son polímeros que están completamente formados antes de la elaboración de un compuesto, por lo que no requieren ninguna etapa de curado. Cuando se calienta a temperaturas superiores a su temperatura de transición vítrea, se funde y fluye durante el proceso, pero no hay reacciones que formen enlaces cruzados. Por lo general son llamados así por la construcción de bloques de repetición que caracterizan al grupo químico de los polímeros. En el que los enlaces covalentes de las cadenas principales se mantienen unidas por débiles enlaces secundarios. Sin embargo, debido a su alto peso molecular, la viscosidad de los termoplásticos es más alta que la de los termoestables, por lo que es más difícil hacer que el flujo llene los espacios vacíos entre las fibras de refuerzo. Los termoplásticos no reticulan durante el proceso, por lo que pueden ser reprocesados. Una de las ventajas más importantes de la utilización de materiales termoplásticos, es el reciclaje. Sin embargo, los termoplásticos también tienen varias limitaciones que han restringido su aceptación como matriz.

- Baja resistencia a los disolventes.

- Equipos de procesamiento más caros.

- Menos disponibilidad en el mercado de preformas de termoplástico.

Por estas razones tanto económicas como de rendimiento, los termoplásticos no son ampliamente utilizados como matriz para materiales compuestos avanzados de polímeros. La matriz influye en la temperatura de servicio y el proceso de fabricación de materiales compuestos. Como la matriz debe cumplir con el refuerzo y debe ser capaz de distribuir las cargas aplicadas a la composición, la compatibilidad con el refuerzo es una consideración muy importante en la selección de la matriz.

0.3.3 Núcleos

0.3.3.1 Maderas naturales

La madera de balsa

Es originaria del centro y sur de América. Considerada como madera dura, es entre todas ellas la más blanda y ligera (densidad entre 100 y 250 Kg/m³). Dada su alta rigidez, es difícil adaptarla a formas curvas, por lo que se suele emplear en forma de bloques unidos entre sí por un material de soporte, generalmente un tejido de poco gramaje. También existen paneles planos rígidos en los cuales los bloques de madera se encolan con adhesivos de madera estructurales. La disposición de las fibras de madera es siempre perpendicular al laminado, que es donde se obtienen las máximas propiedades mecánicas (esta configuración otorga excelente resistencia a la compresión). En las direcciones perpendiculares al grano, las propiedades mecánicas decrecen. La madera de balsa posee un módulo y resistencia a la compresión más elevados que el resto de materiales utilizados como núcleos. La madera de balsa para estructuras sándwich debe ser tratada antes de procesarse, eliminando la materia orgánica presente y reduciendo la humedad hasta el 10%. Humedades superiores provocan hinchazón y podredumbre de la madera, y pueden ocasionar deslaminaciones de las pieles exteriores. Posee, sin embargo, una capacidad de absorción de resina muy elevada, producto de su elevada porosidad, por lo que se recomienda sellar las superficies antes de proceder a su laminado.

El contrachapado marino

Es un tablero a partir de delgadas láminas de madera, denominadas placas o chapas estructurales, unidas para formar un tablero resistente. El número de hojas siempre es impar y la dirección de cada chapa es perpendicular a aquellas con las cuales está en contacto. En función de la cola utilizada existen diferentes grados, siendo el grado marino el que se confecciona con colas fenólicas que permiten soportar el ataque de hongos y de la humedad en ambientes marinos. Por lo general se utiliza en las estructuras sándwich como complemento de las espumas sintéticas, reemplazándolas en todas aquellas zonas donde ocurren esfuerzos de compresión o tracción excesivos. Existe una amplia variedad de contrachapados marinos derivados del uso, en su fabricación, de diferentes maderas. Las maderas más utilizadas son el okume, el iroko,

la teka, la caoba, el sapelli, el cedro, la acacia, el abeto, la píceas y pino de Oregón (Douglas spruce), y en menor medida el moabi, el sipo y la balsa. Los diferentes tableros contrachapados pueden ser contruidos con una única madera o pueden combinarse diferentes.

0.3.3.2 Espumas sintéticas

Todos aquellos plásticos en los cuales existe un gas incluido en forma de burbujas se denominan espumas plásticas. El volumen que ocupan estas burbujas puede alcanzar hasta el 95% dentro del total de la espuma. Cuando las burbujas interiores de gas presentes en la espuma se comunican entre sí, se denominan espumas de celda abierta; cuando cada burbuja interior se encuentra aislada, tenemos espumas de celda cerrada. Entre unas y otras, existen espumas plásticas en estados mixtos. La gran mayoría de los plásticos se pueden espumar, pero por cuestiones técnicas, económicas y prácticas, sólo se espuman un grupo reducido.

Espumas de policloruro de vinilo (PVC)

Se fabrican combinando un copolímero con plastificantes, agentes de entrecruzamiento y gasificantes. Se trata de un espumado químico con activación térmica. La mezcla de sustancias es calentada en un molde bajo presión para que se produzca la reacción de entrecruzamiento. Una vez realizada esta fase del proceso, se sumergen en agua caliente para continuar su expansión hasta obtener la densidad perseguida. Los diámetros de celda pueden variar de 0,254 mm hasta 2.5 mm. Se clasifican en función de la densidad (alta, media y baja densidad, densidades entre 40 y 210 Kg/m³) y por su estabilidad térmica. Las espumas de PVC presentan buena resistencia mecánica, buena resistencia térmica, poseen buenas características como aislante acústico y tienen una alta resistencia a la penetración del agua. Comparadas con el resto de espumas sintéticas, poseen la mejores propiedades, lo que, sumado a su adaptabilidad a las superficies con doble curva, los convierten en unos de los más utilizados

Espumas de poliuretano

Nos referimos al poliuretano con carácter termoestable. Los productos de partida para obtener espumas de poliuretano son un isocianato y un polioliol de tipo poliéter o

poliéster. Como los componentes son líquidos, se suele realizar la reacción de polimerización en el mismo instante que se moldea. Las espumas resultantes pueden ser de celda abierta o de celda cerrada. Las de celda abierta tienden a ser estructuras flexibles y las de celda cerrada, estructuras rígidas. Las densidades resultantes pueden ser muy amplias (desde 10 hasta 900 Kg/m³), y vendrán gobernadas por la proporción y composición química. Poseen peores características que las espumas de PVC, pero presentan una buena resistencia mecánica y tenacidad, resisten la abrasión, poseen buena resistencia química, baja conductividad térmica y elevada resistencia eléctrica. A temperatura ambiente trabajan mejor que las espumas de PVC y son más resistentes a las altas temperaturas.

Espumas de poliestireno (PS)

Como resultado de espumar el poliestireno se obtiene una espuma muy ligera, resistente a la absorción de agua y a los microorganismos. Sin embargo, debido a que dichas espumas son solubles al estireno, no se suelen utilizar con resinas de poliéster y viniléster. Poseen una reducida resistencia mecánica (no se utilizan como material estructural) y una baja conductividad térmica. Las densidades varían entre 10 y 45 Kg/m³.

0.4 Propiedades mecánicas

Como se mencionó anteriormente, los dos componentes principales que siempre están presentes en los materiales compuestos son la fase matriz y el refuerzo. Lo ideal sería que el refuerzo se distribuyera uniformemente a lo largo de la fase de la matriz. Las propiedades, la cantidad y la forma de la armadura de refuerzo aunado a las propiedades de la matriz, influye en las propiedades características del compuesto.

Las propiedades mecánicas de los materiales compuestos con matriz polimérica dependen sustancialmente de los métodos utilizados de procesamiento y fabricación, así como en la orientación de las fibras. Por lo tanto, los materiales estándar no existen y es difícil generalizar respecto a las propiedades. Los tres factores más importantes en la determinación de las propiedades son el tipo de fibra, la fracción volumétrica de fibra, y la orientación de la fibra. Las fibras de carbono de alto módulo de resistencia, por supuesto, producirán materiales compuestos más fuertes, más rígidos que los compuestos producidos a partir de fibra de vidrio. Igualmente, los compuestos con el 60% Vol. de fibra serán más fuertes y más rígidos que con el 30%

vol, y compuestos con fibras uniaxialmente alineadas tendrán las máximas propiedades a lo largo del eje de alineación, pero será muy anisotrópico, ya que tienen diferentes propiedades en las otras orientaciones. Las estructuras diagonales y laminados son los enfoques estándar para la reducción de la anisotropía. La tabla 1 y 2 muestran los valores típicos de algunas propiedades de los materiales de matriz y refuerzo más utilizados. Se puede observar que hay una amplia variación en los valores entre los distintos tipos de materiales de la matriz y de los refuerzos. Las propiedades son de resistencia a tracción (F^{tu}), Modulo de Young (E^t), la tensión de rotura (ε^t), el coeficiente de expansión térmica (α) y el peso específico.

Property	Epoxy	Polyimide	Polyester	PEEK	Al 2024	Ti 6-4
F^{tu} (MPa)	6.2-103	90	21-69	69	414	924
E^t (GPa)	6.2-103	90	21-69	69	414	924
ε^t (%)	4.5	7-9	0.5-5.0	2.0	10	8
$\alpha(10^{-6}mm^{-1}K^{-1})$	0.56	0.51	0.4-0.7	0.5	24	9.6
Specific Weight	1.20	1.43	1.1-1.4	1.2	2.77	4.43

Table 1: Matrix Materials

Property	Carbon	Graphite	Aramid	Alumina	E-Glass	S-Glass
F^{tu} (MPa)	0.4-3.4	0.81-3.6	2.8	1.4	3.4	4.6
E^t (GPa)	241-517	34-552	124	345-379	69	83
$\alpha(10^{-6}mm^{-1}K^{-1})$	-0.09	-0.09	-4.0	3.4	5.1	3.4
$\rho(gcm^{-3})$	1.55	1.55	1.60	3.90	2.55	2.5
Diameter($10^{-3}m$)	0.008	0.008	0.013	0.64	0.013	0.010
ε^t (%)	1.0-2.0	0.4-2.0	2.5	0.4	4.8	5.4

Table 2: Fiber Materials

Table 1.3 Comparison of properties between different fibers

Properties	Unit	Basalt	E-Glass	S-Glass
Density	g/cm ³	2.7	2.57	2.48
Thermal Linear Expansion Coefficient	ppm/°C	8.0	5.4	2.9
Tensile Strength	MPa	4840	3450	4710
Elastic Modulus	GPa	89	77	89
Elongation at break	%	3.15	4.7	5.6
Compression Strength	MPa	3792	3033	
Maximum application temperature	(°C)	982°	650°	
Sustained operating temperature	(°C)	820°	480°	
Minimum operating temperature	(°C)	-260°	-60	
Thermal conductivity	(W/m K)	0.031-0.038	0.034-0.04	
Melting temperature	(°C)	1450°	1120°	
Vitification conductivity	(°C)	1050°	600°	
Glow loss	(%)	1.91	0.32	
Filament diameter	(microns)	9-23	9-13	
Absorbion of humidity (65%RAH)	(%)	<0.1	<0.1	
Stability at tension (20 C°)	(%)	100	100	
Stability at tension (200 C°)	(%)	95	92	
Stability at tension (400 C°)	(%)	82	52	
% weight loss after 3 hrs boiling in:				
H2O	(%)	0.2	0.7	
2n NaOH (Sodium Hydroxide)	(%)	5.0	6.0	
2n HCl (Hydrochloric acid)	(%)	2.2	38.9	

Tabla 3: Características de la fibra de basalto

PVC ESPUMADO

GRUESO				
2-6 mm. 7-19 mm.				
Propiedades Físicas				
Densidad relativa – Masa volúmica (Método A)	0,7	0,6	g/cm ³	DIN 53479
Absorción de agua	< 1	< 1	Mg 1/0	DIN 53495
Propiedades Mecánicas				
Resistencia a la tensión	> 15	> 10	Mpa	DIN 53455
Alargamiento a la ruptura	> 15	> 15	%	DIN 53455
Módulo de elasticidad	800	700	Mpa	DIN 53457
Resistencia al choque con estalla	10	10	KJ/m ²	DIN 53453
Dureza Rockwell (Escala M)	55	50	-	DIN 53505
Propiedades Térmicas				
Coefficiente de dilatación lineal	7,10-3 0,07	7,10-5 0,07	K-1 Mm/m°C	DIN 53752
Temperatura de reblandecimiento VICAT	75	75	°C	DIN 53460
Conductividad Térmica	0,08	0,06	W/mk	DIN 52612
Otras Propiedades				
Clasificación al Fuego	B1 2-6 MM Clase 1	B2 Clase 2		DIN 4102 CSE RF 3777 MFP 92 501 BS 476 Part 7
	M1 Clase 1	M2 Clase 2		
Resistencia Química	Resistente contra los ácidos, causticos y todos los detergentes habituales.			
Resistencia en la superficie	> 1014	> 1014	Ω	DIN 53482

Tabla 4: Características del PVC espumado

0.5 Procesos de fabricación de materiales compuestos

La fabricación de componentes con materiales compuestos es algo diferente a la tradicional ingeniería de los materiales, ya que las propiedades de un compuesto son altamente dependientes de la geometría de la armadura. El diseñador estructural debe tener en cuenta las cuestiones relacionadas con el procesamiento de la parte compuesta para asegurar que la fracción volumétrica de refuerzo, la geometría de refuerzo, y otras propiedades del material se puedan producir económicamente. La diversidad de aplicaciones de los compuestos ha estimulado el desarrollo de una amplia gama de técnicas para la fabricación de estructuras con materiales compuestos. De hecho, una de las principales razones del éxito de los materiales compuestos es la facilidad de fabricación y los diferentes procesos existentes que están disponibles para su producción, muchos de ellos con diferentes niveles de sofisticación y costo. Los compuestos estructurales y decorativos se pueden fabricar con técnicas que van desde la laminación manual, sin moldes sofisticados, hasta técnicas con moldes complejos, tejidos de refuerzo con preformas 3D, guiados por inteligencia artificial controlada por ordenador y la infusión de resina. La configuración de la pieza, junto con las consideraciones básicas de fabricación, tales como el volumen, la velocidad de producción, y las condiciones del mercado, determinan si una

pieza se construirá en molde abierto o cerrado, mediante moldeo por compresión, o por un sistema automatizado. Las tecnologías de fabricación de materiales compuestos y la elección de la técnica adecuada se rigen por los factores antes mencionados. Podemos agrupar la mayoría de los de los procesos en dos clases:

- Procesos de molde abierto
- Procesos de molde cerrado

La diferencia principal es que en el proceso de molde abierto solo hay una parte del molde y la presión es mínima o nula, y en el proceso de molde cerrado están las dos partes del molde y se puede utilizar una presión mayor.

0.6 Procesos de molde abierto

El método más común para producir productos de materiales compuestos en molde abierto son procesos tales como: laminado manual, proyección, bobinado de filamentos, pultrusión o combinaciones de estas técnicas. Muchos productos se adaptan a estos métodos de fabricación, incluyendo las estructuras aeroespaciales, tanques, tuberías, cascos de barcos, componentes para vehículos recreativos, cabinas de camiones comerciales y componentes, tales como elementos estructurales, y aplicaciones como bañeras, duchas y piscinas.

0.6.1 Laminado manual y proyección

En el laminado manual, se coloca el refuerzo de fibra sobre la superficie del molde y luego se impregna con un polímero líquido, por lo general una resina de poliéster, que ha sido químicamente activa para realizar la polimerización (curado) sin la adición de calor. Se añaden múltiples capas de refuerzo para obtener el espesor y la resistencia necesaria para la pieza. En el proceso de proyección con un refuerzo, generalmente de fibra de vidrio, se proyecta simultáneamente la fibra impregnada con resina por medio de una pistola especial sobre la superficie del molde. Para ajustarse a los contornos de la superficie del molde. Las fibras son más cortas para permitir obtener un nivel mejor de detalles. La calidad del producto para ambos procesos depende en

gran medida de las habilidades de los operadores. Estos dos procesos requieren una baja inversión de capital y tienen la capacidad de producir productos de mayor tamaño que los otros procesos. Los Gelcoats se utilizan normalmente para proporcionar una cara con un buen acabado superficial, obtenido directamente desde el molde. Pueden incorporarse distintas inserciones, refuerzos y accesorios mecánicos en la etapa de moldeo, lo que reduce aún más las operaciones secundarias. El corte del borde final se realiza con una variedad de herramientas tales como routers, cortadora por chorro de agua, o abrasivos para definir las dimensiones requeridas. Los productos típicos realizados por laminación manual y proyección incluyen cascos de barcos, platos de ducha, muebles, juegos infantiles, partes de carrocerías de camiones, y tanques resistentes a la corrosión.

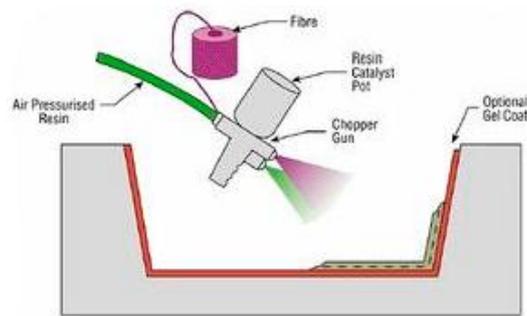


Figura 8: Laminado manual y proyección

0.6.2 Bobinado de filamentos

En cuerpos de revolución, como cilindros y capas esféricas se puede fabricar económicamente por medio del proceso de bobinado de filamentos. Los haces de fibra continua (TOWS) se enrollan sobre un mandril giratorio. Las fibras pueden ser impregnadas con resina justo antes de ser adheridas en el mandril (bobinado húmedo) o pueden estar preimpregnadas con una matriz parcialmente curada (Bobinado en seco). La colocación de las fibras se consigue por medio de un brazo de alimentación situado en frente del mandril giratorio. El ángulo de envoltura, es decir, el ángulo entre la fibra y el eje del mandril, por lo general se puede variar entre 0° y 90° , lo que permite componentes multi-direccionales. Una vez que el proceso de bobinado se termina, se cura en un horno con el fin de obtener las propiedades mecánicas deseadas y la integridad estructural. El mandril se retira por disolución (en mandriles de sal y arena), por fusión (para aleaciones de bajo punto de fusión), o el colapso y el

desmantelamiento (en mandriles de acero). El proceso de bobinado de filamentos requiere una inversión considerablemente mayor que los procesos convencionales de laminación manual y proyección. Sin embargo, el incremento de costes se compensa en parte por la mejor reproducibilidad de las piezas resultantes, así como por la mayor tasa de producción. Se pueden fabricar piezas con fracciones volumétricas de fibra de hasta un 60% por enrollamiento de filamentos. El procedimiento se utiliza a menudo para la fabricación de motores de cohetes, depósitos de almacenamiento resistentes a la corrosión y tuberías para aplicaciones subterráneas.

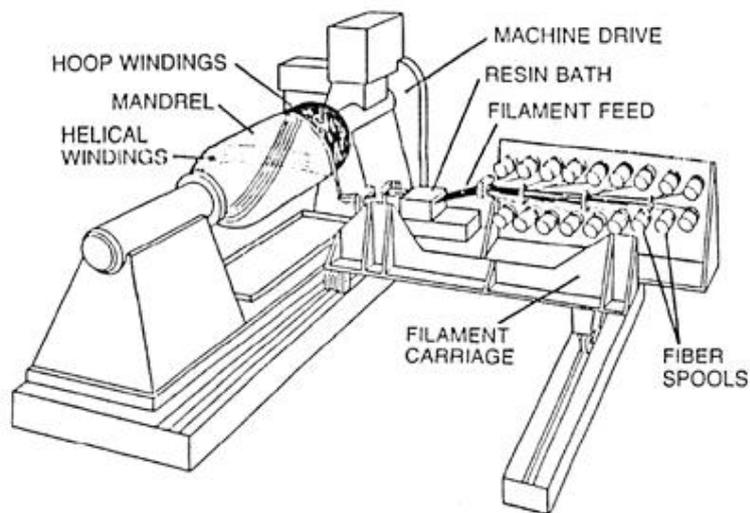


Figura 9: Esquema proceso de bobinado de filamentos

0.6.3 Pultrusión

El proceso de pultrusión es el proceso más maduro que se ha utilizado en aplicaciones comerciales ya desde la década de 1950. En el proceso de pultrusión, un refuerzo de fibra continua está impregnada de una matriz que continuamente se consolida en un compuesto sólido. Si bien hay varias variantes del proceso de pultrusión, el proceso básico de compuestos termoestables se muestra en la Figura 4. El refuerzo, por lo general mechas de fibra de vidrio, se desplaza hasta llegar a un baño de resina abierto, donde se impregna el refuerzo con la resina líquida. Después de salir del baño de resina, el refuerzo se dirige primero a través de una matriz de preformas que alinea las mechas dando forma a la pieza y luego lo guía a una piscina climatizada de sección constante, donde se cura a medida que avanza la pieza. El curado se lleva a

cabo desde el exterior de la pieza hacia el interior. Aunque inicialmente se calienta el molde, la reacción exotérmica resultante del curado de la resina también puede proporcionar una gran cantidad de calor necesario para el curado. La temperatura de pico causada por el desprendimiento de calor debe producirse dentro de los confines del molde. La pieza de material compuesto surge del molde completamente curada y se enfría a medida que la saca el mecanismo extractor. Finalmente, la pieza se corta a la longitud requerida por una sierra de corte.

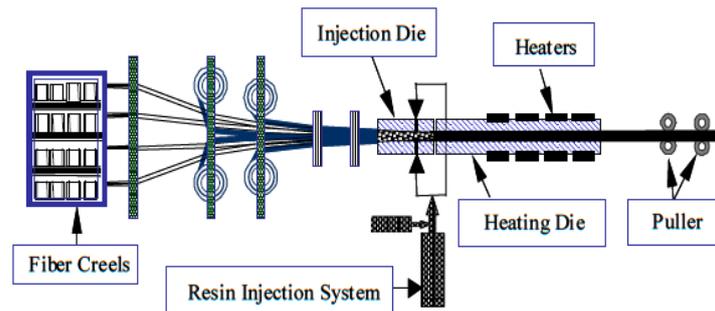


Figura 10: Esquema proceso de pultrusión

0.7 Procesos de molde cerrado

Los procesos de molde cerrado se utilizan cuando las piezas requieren de un buen acabado en ambas caras de la pieza, es decir necesitan dos partes de molde (el macho y la hembra) con el consecuente aumento de los costes debido al incremento de utillajes para la fabricación de la pieza. Entre estos procesos podemos encontrar el moldeo por compresión, la infusión de resina asistida por vacío (VARI), autoclave y el moldeo por transferencia de resina (RTM).

0.7.1 Moldeado por compresión

Este método de moldeo por compresión se utiliza para la fabricación de piezas pequeñas y medianas de alta calidad. Para el proceso de moldeo por presión se colocan en el molde inferior el número deseado de capas de material compuesto preimpregnado y el molde superior se baja hasta que se logra la presión requerida. El compuesto se calienta de acuerdo al ciclo requerido. Ciertos polímeros, tales como las resinas epoxi, durante el proceso fluyen. Por esta razón, los surcos de flash se suelen

mecanizar en el perímetro del molde inferior para recoger el exceso de resina. Con el fin de lograr una superficie de alta calidad, hay que tener gran cuidado en la fabricación de las superficies de los moldes. Después de un uso continuado, las superficies deben ser reemplazadas para mantener las tolerancias deseadas. A pesar de los costos involucrados en la producción y el mantenimiento del molde, el moldeo por compresión representa un medio relativamente barato y práctico para producir piezas de material compuesto de alta calidad.

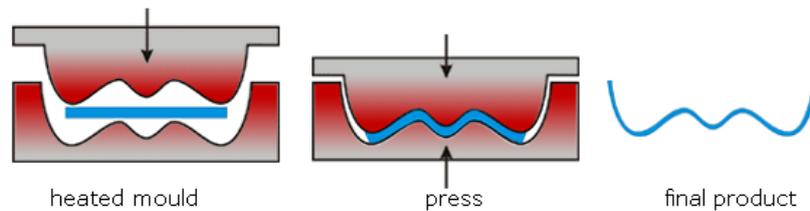


Figura 11: Esquema proceso moldeo por compresión

0.7.2 VARI

La infusión por vacío es un proceso muy adecuado para grandes componentes por muchas razones importantes. En la infusión por vacío se usa una membrana hermética sobre toda la pieza para proporcionar presión de vacío sobre el refuerzo y para evitar que los productos volátiles de la resina se escapen a la atmósfera. La resina se introduce después de situar el refuerzo sobre el molde y cerrar la membrana de vacío, lo que reduce algunos aspectos asociados al tiempo de trabajo de la resina antes de curar. Por último, se pueden alcanzar mayores fracciones volumétricas de refuerzo ya que el refuerzo se compacta por la presión de vacío y sólo se necesita añadir una mínima cantidad de resina. Se pueden alcanzar fracciones volumétricas de refuerzo de hasta el 70%.

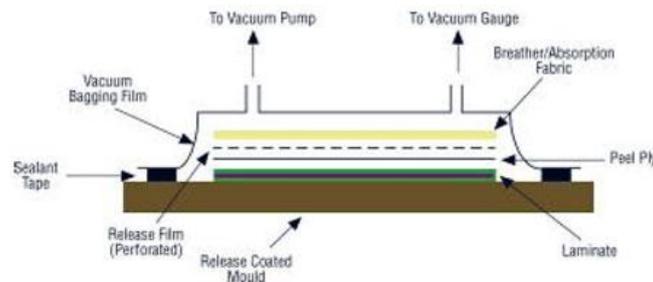


Figura 12: Esquema proceso VARI

0.7.3 Autoclave

Es una técnica que se utiliza ampliamente en la industria aeroespacial y es ligeramente diferente a los procesos anteriores. La diferencia de este proceso es que todo el ensamblaje (el laminado y el molde) se colocan dentro de un horno autoclave. Un horno autoclave es un habitáculo con sistemas controlados para proporcionar calor y presión al laminado durante el curado. Los hornos autoclaves suelen ser cilíndricos, con el fin de que se pueda abrir para permitir pleno acceso al interior. Poseen dispositivos que permiten programar la temperatura y la presión dentro del dispositivo para controlar todos los parámetros del proceso y así poder obtener la pieza con las características deseadas. Se usan sensores para controlar la temperatura de la pieza durante proceso. El curado se lleva a cabo bajo presión (1-10 bar), y a una temperatura elevada. El sistema de laminación es un poco diferente. La superficie superior del laminado está cubierta con un film perforado o poroso, y si es necesario, con tela absorbente para eliminar el exceso de resina. La aplicación de presión y el control de la temperatura puede ser un aspecto crítico. Este proceso ofrece un mejor control de calidad que otros procesos de moldeo a presión baja o nula.

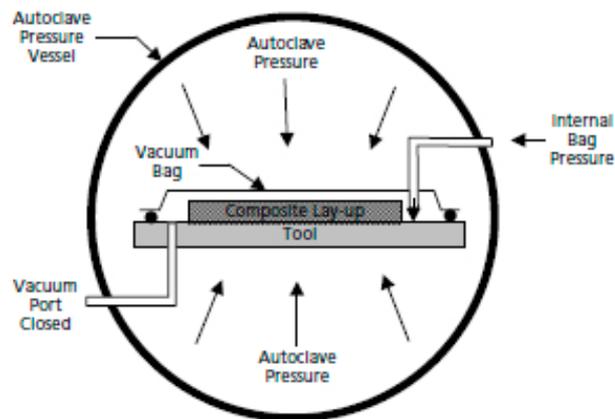


Figura 13: Esquema proceso autoclave

Capítulo 1

Estado del arte de los procesos LCM

Entre los procesos de fabricación de materiales compuestos, los procesos LCM (moldeo compuesto líquido) recientemente han ganado una rápida aceptación por el hecho de que tienen la capacidad de fabricar piezas de materiales compuestos con matriz polimérica de gran tamaño y formas complejas a bajo costo. Debido a este uso cada vez mayor y también porque aumentan los costos del molde por la complejidad de las piezas, son cada vez más importantes las simulaciones numéricas del llenado del molde en procesos de moldeo líquido compuesto. Las simulaciones virtuales del llenado del molde, son esenciales para la optimización del diseño de los moldes para LCM y para la predicción de los diferentes parámetros como la ubicación del punto o línea de entrada de resina, salida de aire, la presión de infusión de la resina, la fuerza de cierre del molde y la temperatura de la mezcla de resina. Las simulaciones permiten a los ingenieros acelerar el proceso desde la concepción hasta el desarrollo de prototipos y hacer que estos materiales y sus operaciones de procesamiento sean más competitivos en términos de costes. Sin embargo, para tener éxito deben utilizar datos de entrada fiables. Para los procesos de LCM, hay disponibles muchos paquetes de simulación de flujos. La conocida ley de Darcy se usa en todos estos software para modelar el flujo a través de las fibras de refuerzo. De acuerdo con la Ley de Darcy hay dos parámetros muy importantes, que son la permeabilidad de la preforma y la viscosidad de la resina que son necesarios para llevar a cabo las simulaciones.

1.1 LCM

En la actualidad, la familia de procesos de LCM es cada vez más popular. Este éxito es debido a su corto tiempo de ciclo, el bajo costo de las piezas y la capacidad para

fabricar piezas de materiales compuestos de alto rendimiento. En los procesos de LCM, las preformas de fibras secas se colocan en la cavidad del molde cerrado, y luego el molde se llena con el sistema de resina a través de la utilización de un gradiente de presión. Después de la etapa de curado, la pieza de material compuesto se desmoldea. LCM no es un proceso único, sino un conjunto de tecnologías genéricas para la fabricación de piezas con materiales compuestos, incluyendo el moldeo por transferencia de resina (RTM), moldeo por inyección reactiva estructural (SRIM), moldeo por transferencia de resina asistida por vacío (VARTM), proceso de moldeo por infusión de resina compuesta Seemann (SCRIMP).

1.1.1 RTM

El proceso de RTM en general, incluye cuatro fases, la primera fase es de preformado de la fibra, en la que las fibras de refuerzo se disponen y se combinan (posiblemente con inserciones y núcleos) en un esqueleto de la pieza real con el fin de satisfacer las necesidades microestructurales y geométricas. La preforma está situada en el molde y se cierra. La segunda fase, es el llenado del molde, se inicia cuando el molde se cierra y la resina entra en la cavidad del molde a través de uno o de los varios puntos de inyección. La resina debe impregnar la preforma, mientras que el aire se expulsa a través de las rejillas de ventilación estratégicamente colocadas. Una vez que el molde se llena con la resina, se inicia la fase de curado. Idealmente, esta fase no debe comenzar antes de llenar completamente la cavidad del molde. La extracción de la pieza es la fase final que se lleva a cabo después de la fase de curado. Las diferentes fases del proceso de RTM se ilustran en la Figura 14.

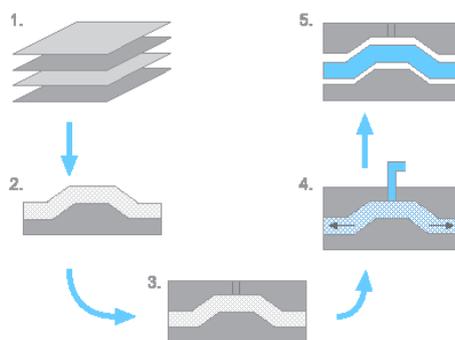


Figura 14: Proceso de moldeo por transferencia de resina (RTM)

Al proceso de RTM le influyen muchas variables que están relacionadas con el diseño de la pieza producida, la selección de los materiales constitutivos y el proceso de diseño del molde y el modelo. Algunas de estas variables son independientes y algunas tienen efectos más marcados que otros.

Entre las variables más importantes que pueden afectar al proceso de RTM se incluyen:

- El refuerzo utilizado (tipo de fibra, tratamiento de la superficie, la orientación, la secuencia de capas, la temperatura y la fracción volumétrica de fibra)
- Las características de la resina (viscosidad y cinética de la reacción)
- La geometría del molde, las características térmicas y la temperatura
- Presión de inyección

1.1.2 VARTM

Moldeado por transferencia de resina asistido por vacío (VARTM) es una versión alternativa del proceso de RTM. VARTM tiene ventajas sobre el RTM, principalmente el hecho de que sólo se necesita un molde rígido en lugar de los dos. Como resultado, el costo de infraestructura se reduce drásticamente teniendo en cuenta que solo se necesita una única parte del molde, que no requiere alta resistencia. Originalmente, el vacío se introdujo en el proceso de RTM para disminuir la presión de inyección necesaria y eliminar burbujas de aire al final del procesado del laminado compuesto. El proceso fue desarrollado por fabricantes de cascos de barcos con materiales compuestos, mediante la eliminación de la parte rígida superior del molde y su sustitución por un sistema flexible formado por una bolsa de polímero que permite realizar el vacío para la compactación de las fibras. La preforma de tejido se coloca en el molde rígido que tiene la forma de la pieza deseada. El tejido se sella en el molde con la bolsa de vacío y una cinta aislante. Luego se evacua el aire a través del venteo que sobresale de la bolsa sellada. El proceso típico de VARTM se muestra en la Figura 2.1. Con el aire evacuado por completo, la presión de compactación de la preforma es aproximadamente de 1 atm. Con resinas de baja viscosidad, normalmente

menos de 0,5 Pa, la resina se introduce en la preforma a través de un punto de infusión de resina, o varios, dependiendo del tamaño y la forma de la pieza.

La resina se introduce en la preforma utilizando sólo la presión atmosférica, debido a la diferencia de presión entre la preforma y la resina contenida fuera de la bolsa a 1,0 atm (101,5 kPa). El proceso de VARTM tiene ventajas similares a las del proceso de RTM. Así como proporcionar una alta fracción volumétrica de fibra, reducción del contenido de huecos o defectos y la reducción de la emisión de volátiles, lo que el método también requiere herramientas de moldeo menos rígidas debido a las bajas presiones involucradas. Sin embargo, hay varias desventajas en el proceso de VARTM. El sistema de resina que se utiliza debe tener baja viscosidad. Por lo tanto afectan al comportamiento mecánico del producto final. Por otra parte, la pieza final tiene un solo lado acabado de la superficie, debido a la utilización de un molde únicamente. La presión de compactación máxima es de 1 atm con lo que se limita la fracción volumétrica de fibra. Además, se desarrolla un gradiente de presión durante la infusión, lo que implica una variación de espesor a lo largo de la longitud de la pieza entre la inyección y las líneas de venteo. La variación de espesor afecta directamente a las variaciones de la fracción volumétrica de fibra en la pieza.

Es muy importante elegir adecuadamente la ubicación de los puntos de infusión para impregnar completamente la pieza, reducir la absorción de resina excesiva (es decir, minimizar el desperdicio), y evitar la creación de regiones secas de resina en zonas cercanas al venteo después de cerrar la entrada de resina.

1.1.3 SCRIMP

Debido a la baja presión de inyección y los largos tiempos de llenado del proceso VARTM, Seemann inventó un medio por el cual se podía transferir la resina más rápidamente en la preforma compactada. Para el proceso de moldeo por inyección de resina compuesta Seemann, se introduce un medio de distribución, o tejido SCRIMP, que se coloca en la parte superior de la preforma de fibra dentro de la bolsa de vacío. El tejido SCRIMP posee una alta permeabilidad en comparación con las preformas de fibra típicas o fibras de refuerzo. Esto permite a la resina fluir rápidamente a través de la superficie de la pieza y filtrar a través del espesor de la tela seca. Esto es ideal para muchas piezas de materiales compuestos, tales como cascos de los barcos o el fuselaje del ala de un avión, ya que la dimensión del espesor es mucho menor que las

dimensiones de longitud y anchura. Esto permite fabricar cascos de barcos enteros por infusión de resina con diversos puntos de entrada de resina. La pieza se puede curar a temperatura ambiente o bien en un horno, según el sistema de resina.

Toda la pieza está contenida en una bolsa de vacío, con lo que hay poca exposición a los volátiles involucrados en el manejo de otras materias primas, como los preimpregnados. La adecuada desgasificación del sistema de resina y una bolsa de vacío sin fugas asegura una alta calidad, fabricación de laminados libres de huecos. Porque VARTM es un proceso de infusión, de alto nivel y se pueden lograr piezas compuestas sin los grandes costes asociados a las herramientas para los preimpregnados, como el horno autoclave y compuestos fabricados [12]. Estas ventajas se encuentran en el proceso SCRIMP y lo hacen atractivo para la fabricación de grandes estructuras de materiales compuestos.

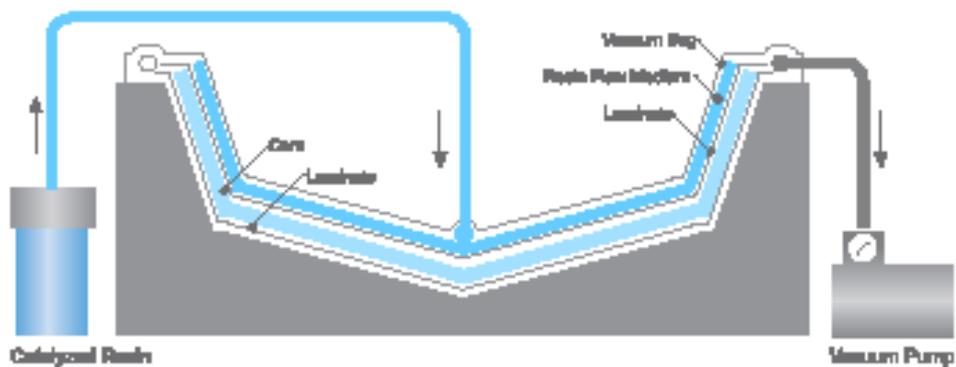


Figura 15: Esquema proceso SCRIMP

1.2 Objetivos de la tesina

La tesina se ha enfocado como un estudio de investigación y aplicación de nuevos materiales y tecnologías de fabricación aplicadas a la creación de productos que utilizan los materiales compuestos, para obtener productos de alta calidad y buenas características técnicas, además de un peso reducido.

Los objetivos principales de la tesina son:

El acercamiento a la situación actual del estado del arte de los materiales que se aplican para la creación de materiales compuestos diferenciando entre materiales usados como fibras de refuerzo, como matrices o los usados como núcleos. Definiendo las características técnicas para poder seleccionar los materiales adecuados para una aplicación concreta.

Abordar las técnicas y procesos de fabricación de componentes producidos con materiales compuestos, para poder evaluar y seleccionar la solución más adecuada en los proyectos de diseño y desarrollo de productos que se fabrican con materiales compuestos, por las necesidades o requerimientos del diseño.

Explicar la teoría del método de elementos finitos, es decir, definir como trabaja de forma matemática y analítica para poder entender el mecanismo de cálculo y las necesidades para poder plantear un problema real de forma que se pueda introducir en un software de simulación para estudiar y analizar el comportamiento que tendría el caso práctico.

La aplicación práctica de un problema de cálculo de resistencia de materiales compuestos, para resolver y optimizar la configuración, composición de las capas y orientaciones de las fibras de refuerzo mediante el método de elementos finitos con el software de diseño paramétrico Unigraphics NX-7.

La aplicación práctica de la simulación de infusión de resina por el proceso de VARI, para poder establecer los parámetros del proceso, como puntos de infusión, venteo, tiempos de infusión, evolución del flujo de resina y así poder analizar y establecer la estrategia del proceso de fabricación, con el objetivo de optimizar el proceso productivo del componente con el software de simulación de infusión de resina PAM-RTM.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1 Las teorías del refuerzo

Las ventajas de los compuestos incluyen mejorar la rigidez y la resistencia del material compuesto en comparación con la del material usado de matriz o de refuerzo. En materiales compuestos, se puede lograr una mayor resistencia mediante el aumento de la energía necesaria para iniciar y propagar una grieta a través de la matriz frágil. El aumento de la energía de fractura se obtiene en los materiales compuestos a través de pérdida de adherencia entre la interfase matriz-fibra, la interacción de fricción entre la fibra y la matriz. En el caso de materiales compuestos con matriz frágil, se necesitan pequeñas cantidades de material de refuerzo para alcanzar el rendimiento deseado. La Fracción volumétrica de fibra es un valor cuantitativo que mide el grado de refuerzo de la matriz en un material compuesto reforzado con fibra. Si el volumen de un material compuesto es V y el volumen de las fibras es V_f y la de la matriz es V_m , entonces:

$$V = V_f + V_m$$

Del mismo modo para los pesos W , W_f y W_m :

$$W = W_f + W_m$$

La densidad del material compuesto está relacionada con la densidad de la fibra y de la matriz por la regla de las mezclas:

$$\rho = v_f \cdot \rho_f + v_m \cdot \rho_m$$

Donde:

$$v_f = \frac{V_f}{V}$$

$$v_m = \frac{V_m}{V}$$

v_f y v_m son las fracciones volumétricas de la fibra y la matriz, respectivamente. Por lo tanto, para las fibras de carbono con una densidad de 1.8 g/cm^3 en una resina epoxi con una densidad de 1.2 g/cm^3 , la densidad del material compuesto en función de la fracción volumétrica de fibra se da en la Figura 16. La rigidez E_1 de una lámina unidireccional en la dirección de la fibra también es dada aproximadamente por la regla de las mezclas:

$$E_1 = v_f \cdot E_f + v_m \cdot E_m$$

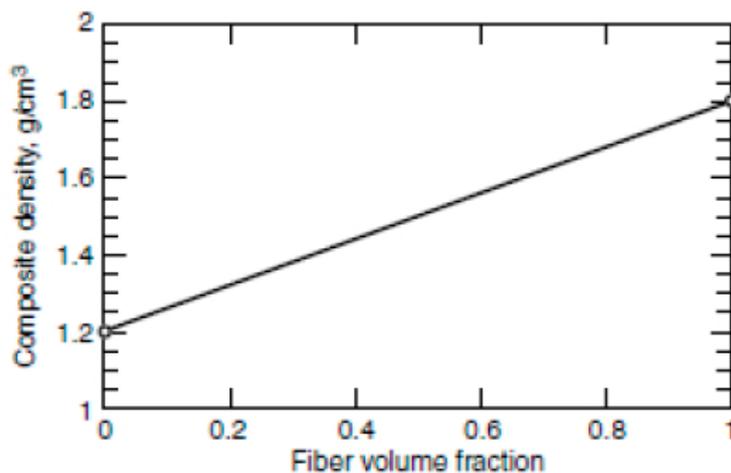


Figura 16: Variación de la densidad de la resina epoxi reforzada con fibra de carbono con respecto a la fracción volumétrica de fibra, sobre la base de la regla de las mezclas.

Para el caso de las fibras de alto módulo, tales como fibras de carbono con $E_f = 240$ GPa, en una matriz polimérica, como la resina epoxi con $E_m = 3,0$ GPa, el módulo es aproximadamente proporcional a la fracción volumétrica de fibra y el módulo de las fibras:

$$E_1 \approx v_f \cdot E_f$$

La adición de las fibras de carbono tiene un efecto muy grande en la rigidez de la matriz de epoxi. Para una fracción volumétrica de fibra de una lámina unidireccional de 0,6 de carbono-epoxi tiene una rigidez $E_1 = 145$ GPa. La relación entre la fibra, los módulos de la matriz y la fracción volumétrica de fibra de una lámina unidireccional cargada en la dirección transversal a las fibras no es simple. El límite inferior viene dado por la expresión del modelo de la serie primavera,

$$\frac{1}{E_2} = \frac{v_f}{E_f} + \frac{v_m}{E_m}$$

Y se proporciona un límite superior por la regla de las mezclas, o el modelo primavera en paralelo. En general, las fibras pueden ser anisotrópicas, de manera que sólo se utiliza el módulo de la fibra transversal. Dado que esta propiedad es difícil de medir, y se suelen emplear las propiedades de la fibra axial y asumir el comportamiento isotrópico de los componentes de los modelos de micromecánica. Se ha desarrollado un modelo simple para el módulo extensional de los materiales compuestos fibrosos y partículas usando una combinación en serie y en paralelo de los modelos primavera:

$$\frac{E_2}{E_m} = \frac{X}{1 - X \left(1 - \frac{E_m}{E_1}\right)} + (1 - X)$$

Donde X depende del refuerzo y la geometría.

Una estimación del módulo de corte G_{12} también se da por una expresión basada en el modelo de serie primavera.

$$\frac{1}{G_{12}} = \frac{v_f}{G_f} + \frac{v_m}{G_m}$$

La variación del módulo de corte en el plano normalizado con respecto al módulo de la matriz, se muestra en la Figura 17 como una función de la fracción volumétrica de fibra. Como se señaló anteriormente, en general es difícil medir el módulo de corte de las fibras, que puede ser anisotrópico. La ecuación debe utilizarse con precaución. El ratio de Poisson, ν_{12} , es el negativo de la relación entre la deformación transversal a la dirección de la fibra, ϵ_2 , y la tensión en la dirección de la fibra, ϵ_1 , cuando la lámina está cargada en la dirección de las fibras y también se puede expresar en términos de las propiedades de los componentes a través de la regla de las mezclas.

$$\nu_{12} = \nu_f \cdot \nu_f + \nu_m \cdot \nu_m$$

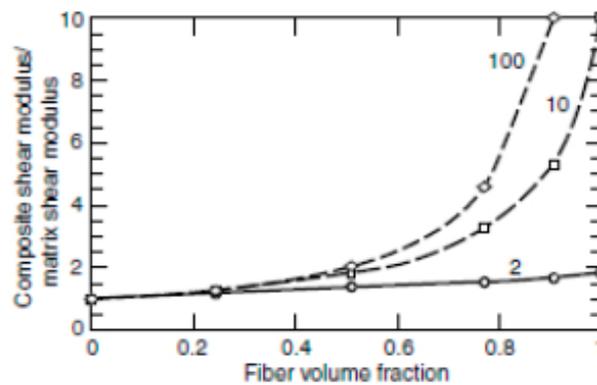


Figura 17: Variación del módulo de corte G_{12} de la resina epoxi reforzada con fibra de carbono en función de la fracción volumétrica de fibra, para varios valores de la relación entre el módulo de corte de la fibra y la matriz ($\frac{G_f}{G_m}$). Se observan las proporciones en las curvas.

Las diferencias entre los límites definidos por los modelos simples pueden ser grandes, por lo que se necesitan teorías más avanzadas para predecir el módulo transversal de los materiales compuestos unidireccionales, las propiedades constitutivas y las fracciones volumétricas de fibra. Las ecuaciones de Halpin-Tsai proporcionan un ejemplo de estas teorías avanzadas en las que el estado de las expresiones de mezclas para el módulo extensional y la relación de Poisson se complementan con la ecuación.

$$\frac{M}{M_m} = \frac{1 + \xi \cdot \eta \cdot \nu_f}{1 - \eta \cdot \nu_f}$$

Donde:

$$\eta = \frac{\frac{M_f}{M_m} - 1}{\frac{M_f}{M_m} + \xi}$$

M es la propiedad del compuesto (E_1, G_{12}, ν_{23}), y M_f y M_m son las propiedades de la fibra y la correspondiente a la matriz. El principal problema en la aplicación de las ecuaciones de Halpin-Tsai se encuentra en determinar el valor de ξ , que depende de la fibra, la geometría y las condiciones de carga. Las predicciones de la resistencia de los materiales compuestos son en general bastante complejas y un tanto limitadas. Esto es particularmente cierto en la resistencia a la compresión y el cortante, que se necesitan, junto con la resistencia a la tracción. La resistencia a la tracción de una lámina unidireccional cargada en la dirección de la fibra se puede estimar a partir de las propiedades de la fibra y la matriz. Si todas las fibras tienen la misma resistencia a la tracción ρ_m y el compuesto es elástico lineal hasta la rotura de las fibras, la fuerza del compuesto está dada por:

$$\rho_c = \rho_f \cdot v_f + \epsilon_{mf} \cdot E_m \cdot v_m$$

Donde ϵ_{mf} es la deformación en la matriz, cuando las fibras fallan. La resistencia a la tracción del material compuesto de fibras de carbono en resina epoxi se prevé que sea aproximadamente proporcional a la fracción volumétrica de fibra. Asumir el fracaso de una tensión constante de las fibras no es realista. Esta predicción de fuerza se refiere a un modelo de fibra dominado. Sin embargo, en valores bajos de la fracción volumétrica de fibra el modelo de fibra dominado no es válido. Esto se ve claramente en el caso límite de la fracción volumétrica de fibra igual a cero, cuando se observa la fuerza de la matriz ρ_m . Para valores muy bajos de la fracción volumétrica de fibra, la resistencia a la tracción del compuesto viene dada aproximadamente por el modelo de matriz dominada por:

$$\rho_c = \rho_m(1 - v_f)$$

Ambas ecuaciones de resistencia a la tracción se ilustran en la Figura 4, utilizando los datos típicos de fibras de grafito en resina epoxi. Las cuatro cantidades E_1 , E_2 , G_{12} y ν_{12} son suficientes para definir la ley tensión-deformación para una fibra tejida unidireccionalmente cargada de material en las direcciones principales.

$$\begin{Bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \tau \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{E_1}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} & \frac{\nu_{21} \cdot E_2}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} & 0 \\ \frac{\nu_{21} \cdot E_2}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} & \frac{E_2}{1 - \nu_{12} \cdot \nu_{21}} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix}$$

Donde:

$$\frac{\nu_{21}}{E_1} = \frac{\nu_{12} \cdot E_2}{E_1}$$

Esta relación tensión deformación muchas veces se escribe como:

$$\begin{Bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \tau \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & G_{12} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix}$$

O:

$$(\rho) = [Q] \cdot (\epsilon)$$

Donde [Q] es la matriz de rigidez reducida.

La relación tensión-deformación se utiliza en conjunto con las reglas para determinar el estrés, la tensión de algunos componentes y el ángulo con respecto a la dirección de las fibras, para obtener la relación de tensión-deformación de una lámina cargada

bajo condiciones de deformación plana, donde las fibras están con un ángulo con respecto al eje de carga. Cuando los ejes del material y de la carga no son coincidentes, entonces el acoplamiento entre corte y la extensión se produce:

$$\begin{Bmatrix} \rho_x \\ \rho_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix}$$

O:

$$(\rho) = [\bar{Q}] \cdot (\epsilon)$$

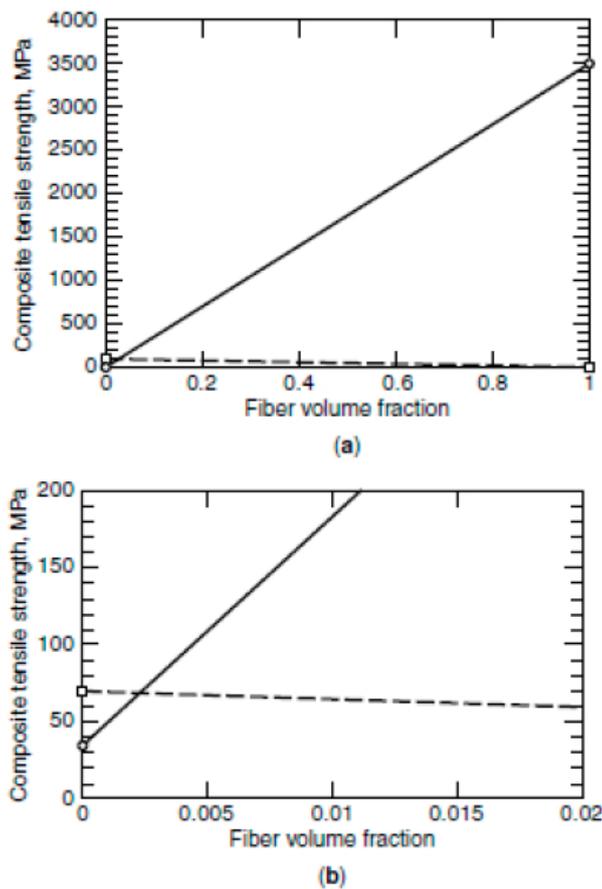


Figura 18: (a) Variación de la resistencia a la tracción de fibras unidireccionales de fibra de carbono reforzada con resina epoxi en función de la fracción volumétrica de fibra. (b) Variación de la resistencia a la tracción unidireccional de fibra de carbono reforzada con resina epoxi en función de la fracción en volumen de fibra para una fracción volumétrica baja.

2.2 El flujo en un medio poroso

En los procesos de LCM, la resina fluye a través de un refuerzo de fibra, que puede ser considerado como un medio poroso. En este caso, el flujo de la resina se rige por la ley de Darcy, que establece que el flujo de la resina por unidad de área es proporcional a la presión del gradiente e inversamente proporcional a la viscosidad de la resina. La constante de proporcionalidad se denomina como la permeabilidad del medio poroso. Es independiente del líquido, pero depende de la dirección de las fibras que forman el refuerzo (si el medio poroso no es isótropo). El refuerzo debe estar inicialmente seco y la resina debe llenar la cavidad. La capilaridad que actúa en el frente del flujo depende de la tensión superficial de la resina y de su capacidad para adherirse a la superficie de las fibras.

2.2.1 Ley de Darcy

La velocidad del fluido es proporcional al gradiente de presión:

$$\vec{v} = -\frac{k}{\mu} \vec{\nabla} P$$

Donde:

- K: permeabilidad
- μ : viscosidad de la resina
- v : velocidad de Darcy
- P: presión

Con el fin de preservar el equilibrio de la masa de la resina, la velocidad debe cumplir la condición de divergencia:

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0$$

Combinando estas dos ecuaciones obtenemos:

$$\nabla \cdot \left(\frac{k}{\mu} \cdot \nabla \cdot P \right) = 0$$

Las condiciones de contorno necesarias para resolver el problema pueden ser de dos tipos:

- Condición de Dirichlet, o la presión impuesta:

$$P = f(x, y, z)$$

- Condiciones de Neumann, o el caudal impuesto en los puntos de entrada:

$$\vec{V} \cdot \vec{n} = Q$$

Otra alternativa al RTM es el VARI (Vacuum Assisted Resin Infusion), que utiliza moldes flexibles. El proceso de VARI hereda los principios básicos del RTM. El vacío se destina principalmente para reducir la formación de huecos y facilitar la transferencia de la resina, que se inyecta a presión atmosférica. Sin embargo, en el caso de los medios deformables, se tienen que derivar las ecuaciones a partir del balance de masa de resina con el fin de asegurar la conservación. La ecuación de continuidad, teniendo en cuenta la resina y las fibras como material incompresible, se expresa como:

$$\text{div}(\phi \cdot \vec{V}_r) = -\text{div}(\vec{V}_s)$$

Donde:

- ϕ : porosidad
- V_r : velocidad de la resina
- V_s : velocidad del sólido

En conclusión, la ley de Darcy se puede expresar:

$$\text{div} \left(\frac{[k]}{\mu} \langle \nabla P \rangle \right) = \text{div}(\vec{V}_s) = \frac{d\varepsilon}{dt}$$

Donde ε representa una deformación infinitesimal de la fibra.

Esta ecuación es la forma general de conservación de la masa y a menudo se llama la ecuación de Darcy unificada. Se introduce una ecuación adicional para seguir la deformación de la cubierta. Se supone que es un estado cuasiestacionario que prevalece en cualquier punto de la superficie cubierta. La suma de la presión de compactación (P_c) y la presión de la resina (P_r) tiene que equilibrar la presión externa (P_{ext}) que actúa sobre la superficie de la cubierta. Esto se puede formular como:

$$P_c + P_r = P_{ext}$$

El conocimiento de la presión de la resina y la presión externa permite obtener en cada instante de tiempo, el espesor de la cavidad según la ley de compactación. Por lo tanto, la curva de compactación juega un papel importante.

El flujo se resuelve utilizando una aproximación no conforme de elementos finitos. La presión es discontinua a lo largo de las fronteras entre elementos, excepto en los nodos centrales, como se muestra a continuación para un elemento triangular. Al contrario que en la conformidad de los elementos finitos, el calcula las tasas del flujo de Darcy que permanecen constantes a través del límite de los elementos.

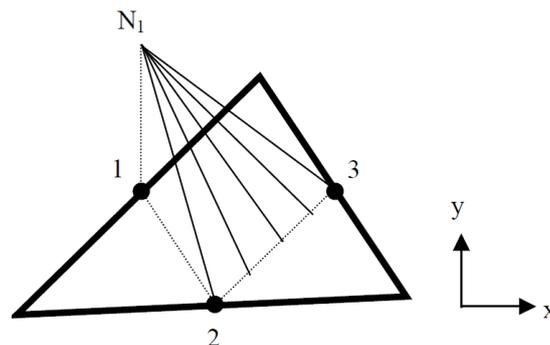


Figura 19: fronteras entre elementos

La presión se interpola con funciones lineales de la forma:

$$p(x, y) = a + b \cdot x + c \cdot y = \sum P_i \cdot N_i(x, y)$$

$$0, \quad \text{si } i \neq j$$

$$N_i(x_j^*, y_j^*) = \delta_{ij} = \{$$

$$1, \quad \text{si } i = j$$

Donde (x_j^*, y_j^*) son los nodos intermedios en los límites del elemento.

2.3 La permeabilidad del refuerzo

Caracteriza la relativa facilidad de un líquido viscoso para penetrar en un medio poroso. Esta propiedad física del medio poroso (tela, manta de fibra, etc.) depende de la fracción volumétrica de fibras (grado de compactación). La permeabilidad es generalmente denotada por K y su unidad es m^2 . La permeabilidad de los refuerzos en sus direcciones principales se determina experimentalmente.

2.4 Los fenómenos térmicos

Ocurren en la cavidad del molde. Primero se llena el molde y luego se polimeriza. Los fenómenos de transferencia de calor tienen una fuerte influencia en el llenado del molde y el curado de la resina. De hecho, la temperatura de la resina gobierna la reactividad de la reacción de polimerización. La temperatura también influye en el llenado del molde, ya que la viscosidad de la resina depende de la temperatura. Las simulaciones térmicas, por lo tanto son delicadas para llevar a cabo. En primer lugar, el calor es transferido entre las fibras y la resina. En segundo lugar la transmisión de calor se produce durante el llenado de la cavidad con la resina. Finalmente, el calor se produce por la reacción química exotérmica de la polimerización de la resina. También se crea un poco de calor por la disipación viscosa en el flujo de la resina, pero en menor medida que el calor procedente de la reacción química.

El campo de temperatura se rige por la ecuación general:

$$\rho \cdot C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_r \cdot c_{pr} \cdot \vec{V} \cdot \nabla T = \vec{\nabla} \cdot \{k \cdot \nabla T\} - \rho_r \cdot \Delta h \frac{D_\alpha}{D_t}$$

Donde T representa la temperatura, t denota el tiempo, ρ es la densidad, C_p es el calor específico, k es el coeficiente de conducción térmica, el subíndice r designa la resina, Δh es la entalpía total de la polimerización de la resina, α es el curado de la resina.

Hay tres tipos de condiciones de contorno de temperatura:

- Condición de contorno de temperatura: $T = T_0$
- Condición de contorno del flujo de calor: $\frac{\partial T}{\partial n} = q$
- Condición de contorno por convección de calor: $\frac{\partial T}{\partial n} = h(T_\infty - T)$

Donde h es el coeficiente de convección de calor, T_∞ es la temperatura del medio ambiente.

Esta ecuación general permite tratar las etapas de pre-calentamiento, llenado y curado.

Durante la etapa de llenado, se utilizan con eficacia sus propiedades:

- Para las fibras no impregnadas:

$$\rho \cdot C_p = \phi \cdot \rho_a \cdot C_{pa} + (1 - \phi) \cdot \rho_f \cdot C_{pf}$$

$$k = \phi \cdot k_a + (1 - \phi) \cdot k_f$$

- Para las fibras impregnadas:

$$\rho \cdot C_p = \phi \cdot \rho_r \cdot C_{pr} + (1 - \phi) \cdot \rho_f \cdot C_{pf}$$

$$k = k_e + k_D$$

Donde el subíndice r es de la resina, f de las fibras y a para el aire. En general, las propiedades térmicas del aire se desprecian. La conductividad efectiva k_e del compuesto es un promedio de cada dirección. Al igual que el tensor de permeabilidad K, el coeficiente de conducción de calor k se reduce a un escalar de la preforma de fibra isotrópica. El coeficiente de k_D representa el tensor de dispersión térmica derivado de la hidrodinámica de dispersión. Puede ser evaluada en función del número de Peclet, pero su influencia es pequeña siempre y cuando la velocidad del fluido sea baja. Sin embargo a partir de PAM-RTM™ 2008, es posible tener en cuenta la dispersión térmica.

Los resultados experimentales mostraron que la dispersión depende del número de Prandtl y Reynolds y que número de Peclet se puede aproximar a la hidrodinámica y a los fenómenos de transferencia de calor a nivel de los poros. La base de Delaunay, además extendió este enfoque y demostró experimentalmente que las dispersiones transversal y axial se pueden modelar empíricamente utilizando un enfoque de longitud de mezcla, mediante la corrección de los componentes de la conductividad térmica con una expresión que depende del número de Peclet de la siguiente manera:

$$\lambda_{trans} = \lambda_{stat}(1 + 0.1 \cdot P_e)$$

$$\lambda_{axial} = \lambda_{stat}(1 + 0.8 \cdot P_e)$$

El número de Peclet se define:

$$P_e = \frac{v_f \cdot l}{a}$$

Donde: v_f velocidad observada del frente del flujo en (m / s), relacionado con la velocidad de Darcy

$$v_f = \frac{v}{\phi}$$

- ϕ la porosidad del refuerzo de fibra
- l longitud característica (m)
- a difusión térmica (m² / s)

La longitud característica se conoce como la escala característica de la forma elíptica de una fibra comprimida,

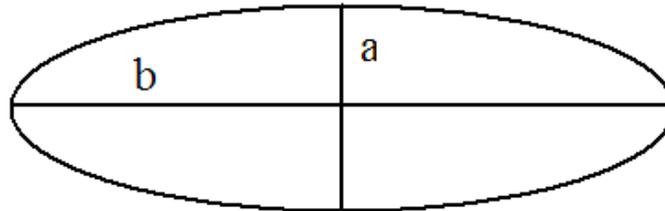


Figura 20: escala característica de la forma elíptica de una fibra comprimida,

En cuyo caso está dada por:

$$l = \sqrt{a \cdot b}$$

A continuación se describe la resistencia térmica de contacto. En general, cuando dos sólidos (partes de un molde, el refuerzo) están en contacto, debido a su rugosidad y la falta de planitud de las superficies, el contacto no se lleva a cabo en toda la superficie

aparente. Entre las zonas de contacto sigue habiendo un espacio intersticial, que es una zona con baja conductividad. El campo de temperatura esta considerablemente alterado. La introducción de una R_{th} resistencia térmica de contacto permite despreciar el espesor de la zona de contacto y reemplazar la variación brusca de la temperatura por una discontinuidad verdadera.

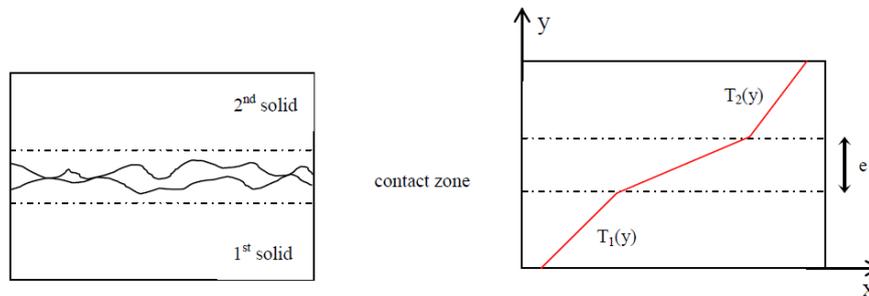


Figura 21: resistencia térmica de contacto

La resistencia térmica de contacto R_{th} se define:

$$\varphi = \frac{T_1 - T_2}{R_{th}}$$

Donde T_1 y T_2 son las temperaturas de contacto y φ la transferencia de calor. Su valor en la superficie está determinado por la siguiente relación:

$$R_{th} = \frac{e}{k} (m^2 \cdot W^{-1} \cdot k)$$

Donde e es el espesor de la zona perturbada y k es la conductividad térmica del aire. Por lo tanto, podemos considerar las brechas en el molde o las costillas en el refuerzo, al afectar a nivel local el valor de resistencia térmica.

El término en el lado derecho de la ecuación general de los fenómenos térmicos representa el calor interno generado por la reacción química exotérmica en sistemas

de resinas termoestables. Este término por lo general se supone que es proporcional a la velocidad de reacción.

$$\frac{D_a}{D_t}$$

2.5 Viscosidad de la resina

La viscosidad de la resina depende de la temperatura y del grado de reticulación. La dependencia del grado de reticulación es muy fuerte, ya que se suele suponer que la viscosidad alcanza el infinito cuando la resina está en estado de gelificación. La dependencia de la viscosidad, de la temperatura y el grado de reticulación se modela por una ley constitutiva.

- Viscosidad constante
- Viscosidad en función de la temperatura de un modelo predefinido

$$\mu(T) = A \cdot \exp(B \cdot T)$$

Donde A y B son dos constantes especificadas por el usuario.

- Viscosidad en función de la temperatura y del tipo de resina de un modelo de conversión de un valor predefinido, donde A, B, y κ son constantes características de la resina:

$$\mu(T, a) = B \cdot \exp\left(\frac{B}{T} + \kappa \cdot a\right)$$

La viscosidad $\mu = f(T, \alpha)$ en función de la temperatura y del tipo de resina, como en el siguiente modelo:

$$\mu(T, a) = B \cdot \exp\left(\frac{T_B}{T}\right) \cdot \left(\frac{\alpha_{gel}}{\alpha_{gel} - \alpha}\right)^{C_1 + C_2 \cdot \alpha}$$

Donde B, T_b , α_{gel} , C1 y C2 son constantes características de la resina

Cinética de la polimerización de la resina

El software permite definir una cinética de la polimerización de la resina del modelo de Kamal-Sourour. La forma general de la ecuación de Kamal-Sourour de una resina con n componentes es la siguiente:

$$\alpha = \sum_{i=1}^n C_i \cdot \alpha_i$$

$$\frac{d\alpha_i}{dt} = k_i(T) \cdot (1 - \alpha)^{p_i}$$

Donde $\frac{d\alpha}{dt}$ es la velocidad de reacción para el componente de orden n en s^{-1} , los valores de K_i se definen por la ley de Arrhenius: $K_i = A_i \cdot \exp(-E_i/RT)$

- A_i número de choques de utilidad para las reacciones
- E_i energías de activación de la reacción química
- m_i y p_i son exponentes que caracterizan la sensibilidad de cada reacción auto catalítica
- C_i pesos de cada reacción.

Capítulo 3

Método de Elementos Finitos

El método de los elementos finitos (MEF en castellano o FEM en inglés) es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy utilizado en diversos problemas de ingeniería.

El MEF está pensado para ser usado en computadoras y permite resolver ecuaciones diferenciales asociadas a un problema físico sobre geometrías complicadas. El MEF se usa en el diseño, mejora de productos y aplicaciones industriales, así como en la simulación de sistemas físicos complejos. La variedad de problemas a los que puede aplicarse ha crecido enormemente, siendo el requisito básico que las ecuaciones constitutivas y ecuaciones de evolución temporal del problema a considerar sean conocidas de antemano.

3.1 Introducción

El MEF permite obtener una solución numérica aproximada sobre un objeto, estructura o dominio (medio continuo), sobre el que están definidas ciertas ecuaciones diferenciales en forma débil o integral que caracterizan el comportamiento físico del problema, dividiéndolo en un número elevado de subdominios no-intersectantes entre sí denominados «elementos finitos». El conjunto de elementos finitos forma una partición del dominio también denominada discretización. Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados «nodos». Dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito; además, un nodo sobre la frontera de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos. El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se llama «malla».

Los cálculos se realizan sobre una malla de puntos (llamados nodos), que sirven a su vez de base para la discretización del dominio en elementos finitos. La generación de la malla se realiza usualmente con programas especiales llamados generadores de mallas, en una etapa previa a los cálculos que se denomina pre-proceso. De acuerdo con estas relaciones de adyacencia o conectividad se relaciona el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo y denominadas grados de libertad. El conjunto de relaciones entre el valor de una determinada variable entre los nodos se puede escribir en forma de sistema de ecuaciones lineales (o linealizadas). La matriz de dicho sistema de ecuaciones se llama matriz de rigidez del sistema. El número de ecuaciones de dicho sistema es proporcional al número de nodos.

Típicamente el método de los elementos finitos se programa computacionalmente para calcular el campo de desplazamientos y, posteriormente, a través de relaciones cinemáticas y constitutivas, las deformaciones y tensiones respectivamente, cuando se trata de un problema de mecánica de sólidos deformables o más generalmente un problema de mecánica de medios continuos. El método de los elementos finitos es muy usado debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos (en dos o tres dimensiones). Además el método es fácilmente adaptable a problemas de transmisión de calor, de mecánica de fluidos para calcular campos de velocidades y presiones (mecánica de fluidos computacional, CFD) o de campo electromagnético. Dada la imposibilidad práctica de encontrar la solución analítica de estos problemas, con frecuencia en la práctica ingenieril los métodos numéricos y, en particular, los elementos finitos, se convierten en la única alternativa práctica de cálculo.

Una importante propiedad del método es la convergencia; si se consideran particiones de elementos finitos sucesivamente más finas, la solución numérica calculada converge hacia una solución más exacta del sistema de ecuaciones.

3.2 Descripción matemática del método

El desarrollo de un algoritmo de elementos finitos para resolver un problema definido mediante ecuaciones diferenciales y condiciones de contorno requiere en general cuatro etapas:

- El problema debe reformularse en forma variacional.

- El dominio de variables independientes (usualmente un dominio espacial para problemas dependientes del tiempo) debe dividirse mediante una partición en subdominios, llamados elementos finitos. Asociada a la partición anterior se construye un espacio vectorial de dimensión finita, llamado espacio de elementos finitos. Siendo la solución numérica obtenida por elementos finitos una combinación lineal en dicho espacio vectorial.
- Se obtiene la proyección del problema variacional original sobre el espacio de elementos finitos obtenido de la partición. Esto da lugar a un sistema con un número de ecuaciones finito, aunque en general con un número elevado de ecuaciones incógnitas. El número de incógnitas será igual a la dimensión del espacio vectorial de elementos finitos obtenido y, en general, cuanto mayor sea dicha dimensión mejor será la aproximación numérica obtenida.
- El último paso es el cálculo numérico de la solución del sistema de ecuaciones.

Los pasos anteriores permiten transformar un problema de cálculo diferencial en un problema de álgebra lineal. Dicho problema en general se plantea sobre un espacio vectorial de dimensión no-finita, pero que puede resolverse aproximadamente encontrando una proyección sobre un subespacio de dimensión finita, y por tanto con un número finito de ecuaciones (aunque en general el número de ecuaciones será elevado típicamente de miles o incluso centenares de miles). La discretización en elementos finitos ayuda a construir un algoritmo de proyección sencillo, logrando además que la solución por el método de elementos finitos sea generalmente exacta en un conjunto finito de puntos. Estos puntos coinciden usualmente con los vértices de los elementos finitos o puntos destacados de los mismos. Para la resolución concreta del enorme sistema de ecuaciones algebraicas en general pueden usarse los métodos convencionales del álgebra lineal en espacios de dimensión finita.

En lo que sigue d es la dimensión del dominio, n el número de elementos finitos y N el número de nodos total.

3.3 Método MEF en la práctica

El MEF es un método numérico de resolución de ecuaciones diferenciales. La solución obtenida por MEF es sólo aproximada, coincidiendo con la solución exacta sólo en un número finito de puntos llamados nodos. En el resto de puntos que no son nodos, la solución aproximada se obtiene interpolando a partir de los resultados obtenidos para los nodos, lo cual hace que la solución sea sólo aproximada debido a ese último paso.

El MEF convierte un problema definido en términos de ecuaciones diferenciales en un problema matricial que proporciona el resultado correcto para un número finito de puntos e interpola posteriormente la solución al resto del dominio, resultando finalmente sólo una solución aproximada. El conjunto de puntos donde la solución es exacta se denomina conjunto de nodos. Dicho conjunto de nodos forma una red, denominada malla formada por retículos. Cada uno de los retículos contenidos en dicha malla es un "elemento finito". El conjunto de nodos se obtiene dividiendo o discretizando la estructura en elementos de forma variada (pueden ser superficies, volúmenes y barras).

Desde el punto de vista de la programación algorítmica modular, las tareas necesarias para llevar a cabo un cálculo mediante un programa MEF se dividen en:

- **Pre-procesado**, que consiste en la definición de geometría, generación de la malla, las condiciones de contorno y asignación de propiedades a los materiales y otras propiedades. En ocasiones existen operaciones cosméticas de regularización de la malla y pre-condicionamiento para garantizar una mejor aproximación o una mejor convergencia del cálculo.
- **Cálculo**, el resultado del pre-proceso, es un problema simple no-dependiente del tiempo, permite generar un conjunto de N ecuaciones y N incógnitas, que pueden ser resueltas con cualquier algoritmo de resolución de sistemas de ecuaciones lineales. Cuando el problema a tratar es un problema no-lineal o un problema dependiente del tiempo a veces el cálculo consiste en una sucesión finita de sistemas de N ecuaciones y N incógnitas que deben resolverse uno a continuación de otro, y cuya entrada depende del resultado del paso anterior.

- **Post-procesado**, el cálculo proporciona valores de las funciones en los nodos de la malla que define la discretización, en el post-procesado se calculan magnitudes derivadas de los valores obtenidos para los nodos, y en ocasiones se aplican operaciones de suavizado, interpolación e incluso determinación de errores de aproximación.

3.4 Pre-procesado y generación de la malla

La malla se genera y ésta en general consta de miles (e incluso centenares de miles) de puntos. La información sobre las propiedades del material y otras características del problema se almacena junto con la información que describe la malla. Por otro lado las fuerzas, los flujos térmicos o las temperaturas se reasignan a los puntos de la malla. A los nodos de la malla se les asigna una densidad por todo el material dependiendo del nivel de la tensión mecánica u otra propiedad. Las regiones que recibirán gran cantidad de tensión tienen normalmente una mayor densidad de nodos (densidad de malla) que aquellos que experimentan poco o ninguno. Los puntos de interés consisten en: puntos de fractura previamente probados del material, esquinas, detalles complejos, y áreas de elevada tensión. La malla actúa como la red de una araña en la que desde cada nodo se extiende un elemento de malla a cada nodo adyacente. Este tipo de red vectorial es la que lleva las propiedades del material al objeto, creando varios elementos.

Las tareas asignadas al pre-proceso son:

- El continuo se divide, mediante líneas o superficies imaginarias en un número de elementos finitos. Esta parte del proceso se desarrolla habitualmente mediante algoritmos incorporados a programas informáticos de mallado durante la etapa de pre-procesado.
- Se supone que los elementos están conectados entre sí mediante un número discreto de puntos o “nodos”, situados en sus contornos. Los desplazamientos de estos nodos serán las incógnitas fundamentales del problema, tal y como ocurre en el análisis simple de estructuras por el método matricial.

- Se toma un conjunto de funciones que definan de manera única el campo de desplazamientos dentro de cada “elemento finito” en función de los desplazamientos nodales de dicho elemento. Por ejemplo el campo de desplazamientos dentro de un elemento lineal de dos nodos podría venir definido por: $u = N1 u1 + N2 u2$, siendo $N1$ y $N2$ las funciones comentadas (funciones de forma) y $u1$ y $u2$ los desplazamientos en el nodo 1 y en el nodo 2.
- Estas funciones de desplazamientos definirán entonces de manera única el estado de deformación del elemento en función de los desplazamientos nodales. Estas deformaciones, junto con las propiedades constitutivas del material, definirán a su vez el estado de tensiones en todo el elemento, y por consiguiente en sus contornos.

Se determina un sistema de fuerzas concentradas en los nodos, tal que equilibre las tensiones en el contorno y la cargas distribuidas, resultando así una relación entre fuerzas y desplazamientos de la forma $F = k \cdot u$, que como vemos es similar a la del cálculo matricial.

3.5 Cálculo y resolución de sistemas de ecuaciones

En un problema mecánico lineal no-dependiente del tiempo, como en un problema de análisis estructural estático o en un problema elástico, el cálculo generalmente se reduce a obtener los desplazamientos en los nodos y con ellos definir de manera aproximada el campo de desplazamientos de los elementos finitos.

Cuando el problema es no-lineal en general la aplicación de las fuerzas requiere la aplicación incremental de las fuerzas y considerar incrementos numéricos, y calcular en cada incremento algunas magnitudes referidas a los nodos. Algo similar sucede con los problemas dependientes del tiempo, para los que se considera una sucesión de instantes, en general bastante cercanos en el tiempo, y se considera el equilibrio en cada instante. En general estos dos últimos tipos de problemas requieren un tiempo de cálculo sustancialmente más elevado que en un problema estático y lineal.

3.6 Post-procesado

Actualmente, el MEF es usado para calcular problemas tan complejos, que los ficheros que se generan como resultado del MEF tienen tal cantidad de datos que resulta conveniente procesarlos de alguna manera adicional para hacerlos más comprensible e ilustrar diferentes aspectos del problema. En la etapa de post-procesado los resultados obtenidos de la resolución del sistema son tratados, para obtener representaciones gráficas y obtener magnitudes derivadas, que permitan extraer conclusiones del problema.

El post-procesado del MEF generalmente requiere un software adicional para organizar los datos de salida, de tal manera que sea más fácilmente comprensible el resultado y permita decidir si ciertas consecuencias del problema son o no aceptables. En el cálculo de estructuras por ejemplo, el post-proceso puede incluir comprobaciones adicionales de si una estructura cumple los requisitos de las normas pertinentes, calculando si se sobrepasan tensiones admisibles, o existe la posibilidad de pandeo en la estructura.

3.7 Resultados del MEF

La solución del MEF nos aporta datos para predecir los fallos debidos a tensiones desconocidas, mostrando la distribución de tensiones en el material y permitiendo a los diseñadores ver todas las tensiones involucradas. Este método de diseño y prueba del producto es mejor que el ensayo y error en donde hay costos de manufactura asociados a la construcción de cada ejemplar para las pruebas.

Las grandes ventajas del cálculo por ordenador se pueden resumir en que:

- Hace posible el cálculo de estructuras que, bien por el gran número de operaciones que presenta su resolución o por lo tedioso de las mismas son inabordables en la práctica mediante el cálculo manual.
- En la mayoría de los casos reduce a límites despreciables el riesgo de errores operativos.

3.8 Limitaciones

En general el MEF tal como se usa actualmente tiene algunas limitaciones:

- El MEF calcula soluciones numéricas concretas y adaptadas a unos datos particulares de entrada, no puede hacerse un análisis de sensibilidad sencillo que permita conocer como variará la solución si alguno de los parámetros se altera ligeramente. Es decir, proporciona sólo respuestas numéricas cuantitativas concretas no relaciones cualitativas generales.
- El MEF proporciona una solución aproximada cuyo margen de error en general es desconocido. Si bien algunos tipos de problemas permiten acotar el error de la solución, debido a los diversos tipos de aproximaciones que usa el método, los problemas no-lineales o dependientes del tiempo en general no permiten conocer el error.
- En el MEF la mayoría de aplicaciones prácticas requieren mucho tiempo para ajustar detalles de la geometría, existiendo frecuentemente problemas de mal condicionamiento de las mallas, desigual grado de convergencia de la solución aproximada hacia la solución exacta en diferentes puntos, etc. En general una simulación requiere el uso de numerosas pruebas y ensayos con geometrías simplificadas o casos menos generales que el que finalmente pretende simularse, antes de empezar a lograr resultados satisfactorios.

Capítulo 4

Aplicación al caso de estudio

En este apartado se pretenden aplicar todos los conceptos y teorías descritas en los apartados anteriores para la realización de simulaciones por el método de elementos finitos, de resistencia con el software Unigraphics NX-7, para poder determinar la composición y disposición de las diferentes capas de fibra de basalto y así poder simular el proceso de infusión de resina en el refuerzo con el software PAM-RTM en tablas de kitesurf, con el objetivo de analizar y optimizar el proceso de fabricación del caso en estudio.

4.1 Análisis de resistencia de materiales compuestos

El método de elementos finitos es una herramienta poderosa para los ingenieros de hoy, que le dan la posibilidad de diseñar, modelar y analizar los componentes realizados con materiales compuestos. La capacidad de estas técnicas para predecir con precisión la distribución de las cargas en la pieza y determinar el efecto de las concentraciones de tensión permite al diseñador incorporar un refuerzo extra en estas regiones. El uso sistemático de esta técnica puede resultar en el diseño de productos altamente optimizados, que cumplen con todos los requisitos del cliente, y no se le incrementa ni peso ni coste al producto.

4.1.1 Pre-procesado

Para comenzar el análisis por el método de elementos finitos, lo primero es obtener la geometría del producto diseñado en un programa de modelado 3D. En esta tesina se

ha utilizado Unigraphics NX-7, en el cual se ha modelado la geometría simplificada para así disminuir la complejidad del problema, permitiendo obtener un resultado más preciso. Este programa tiene un modulo de simulación avanzada que nos permite realizar el mallado de la pieza. La cual se muestra a continuación el la figura 22:

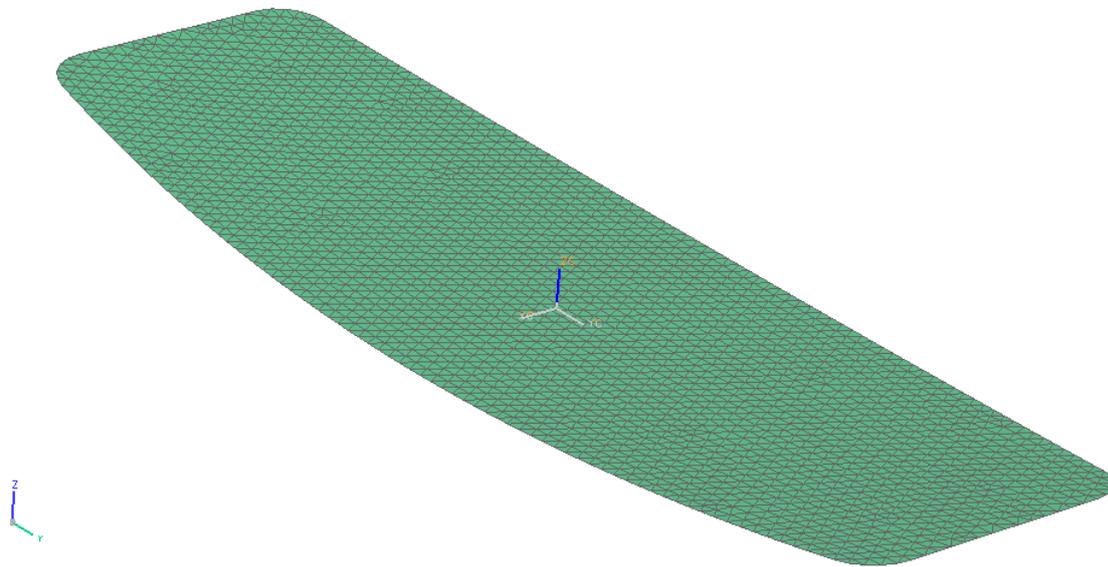


Figura 22: Malla tabla kitesurf 2D

Se puede apreciar que se ha generado una malla 2D, porque vamos a generar un laminado tipo sándwich, en el cual se describen las diferentes capas de material de refuerzo, con su orientación y espesor, además de definir el espesor del núcleo y las propiedades del material. La composición del laminado se muestra en la Figura 23.

THICKNESS	ANGLE	PLY	MATERIAL
0.250	0.0	5	FIBRA DE BASALTO
0.250	45.0	4	FIBRA DE BASALTO
5.000	0.0	3	PVC ESPUMADO
0.250	45.0	2	FIBRA DE BASALTO
0.250	0.0	1	FIBRA DE BASALTO

Número de pliegues

Espesor

Figura 23: Composición laminado tipo sándwich

Una vez concluida la etapa de definición de la composición del laminado, hay que definir las restricciones o condiciones de contorno que simulan las condiciones de un caso de carga real. Se ha decidido optar por el ensayo de resistencia a flexión para poder estudiar tanto la resistencia de las capas del laminado inferior que trabajarán a tracción como el laminado superior que trabaja a compresión e incluso se podrían observar los esfuerzos cortantes. Pudiendo así comparar de una forma rápida la diferencia de comportamiento del laminado ante un caso de carga que simula la energía transmitida desde el kitesurfista a la tabla en la recepción de un salto, que es el caso más desfavorable.

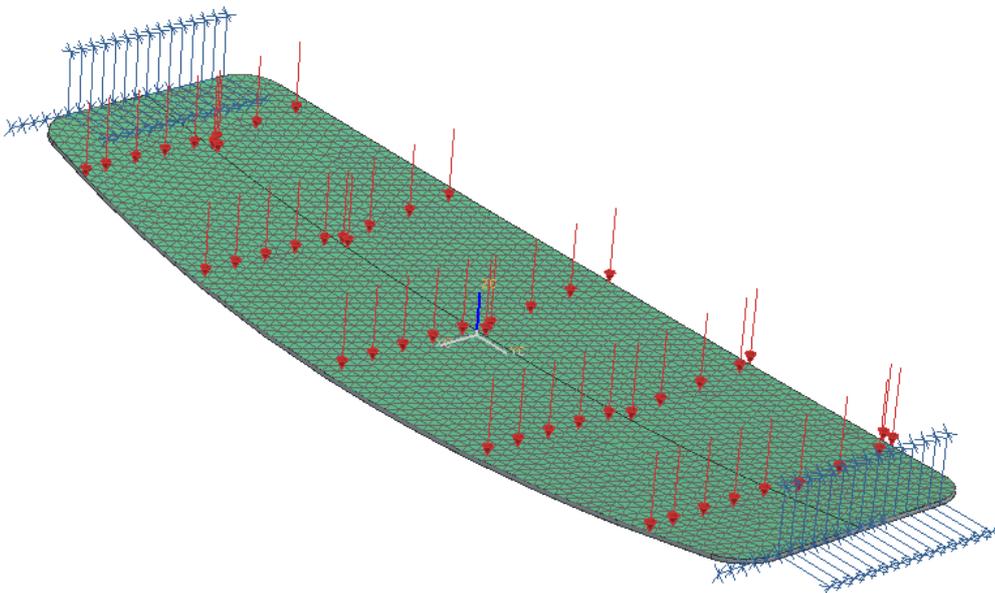


Figura 24: Condiciones de contorno

La fuerza producida por el kitesurfista se ha transformado en una carga distribuida puesto que se transmitiría a través de los footstraps, y para simplificar el modelo no se han modelado.

4.1.2 Cálculo

Como motor de cálculo se ha utilizado el solver MSC Nastran, que es un paquete informático asociado al programa de diseño paramétrico Unigraphics NX-7, el cual es

capaz de obtener los datos necesarios del modelo tridimensional, para realizar el cálculo.

Cuando se trata de resolver el comportamiento de la tensión / deformación, la respuesta dinámica, las vibraciones y los gradientes térmicos en sistemas del mundo real, MSC Nastran es reconocido como el solucionador multidisciplinar de mayor confianza en el mundo. MSC Nastran se basa en el trabajo realizado por científicos de la NASA e investigadores, y es muy adecuado para el diseño de sistemas complejos. Casi todas las naves, aeronaves y vehículos diseñados en los últimos 40 años han sido analizados con MSC Nastran. En los últimos años, varias actualizaciones del software lo han convertido en un solucionador multidisciplinario y único. En el que los usuarios pueden simular todo, desde un solo componente, a conjuntos complejos en diversas condiciones.

4.1.3 Resultados

En este apartado se muestran los resultados obtenidos con el modulo de simulación avanzada del software de diseño parametrico Unigraphics NX-7, en el cual se pueden apreciar de una forma sencilla e intuitiva los resultados obtenidos, para poder evaluar el comportamiento de las distribución de tensiones y las deformaciones del objeto de estudio. Con la finalidad de establecer la configuración necesaria para la construcción del laminado tipo sandwich.

Lo primero que hay que valorar es si la simulación por medio de elementos finitos nos da resultados logicos, puesto que el ensayo de flexión es un caso de cargas muy utilizado y a priori se conoce el comportamiento del ensayo. Ademas se ha decidido realizar este ensayo puesto que seria el caso más desfavorable, porque la energia del impacto depende del angulo de incidencia de la tabla con el agua, ademas de ser un medio deformable y no seria lo mismo un impacto en aguas tranquilas que en aguas agitadas, puesto que el agua tendria menor tensión superficial y absorberia menos energia.

En esta secuencia de imágenes se muestran las tensiones en las diferentes capas que componen el laminado tipo sandwich, para evaluar los valores de maxima tensión y asi poder validar el modelo diseñado.

Analisis de tensiones

En la figura 25 se muestra la distribución de tensiones en la capa superior del laminado superior de la tabla de kitesurf, formada por un paño de fibra de basalto biaxial con una orientación de $0^{\circ}/90^{\circ}$ y como matriz resina epoxi hexcel.

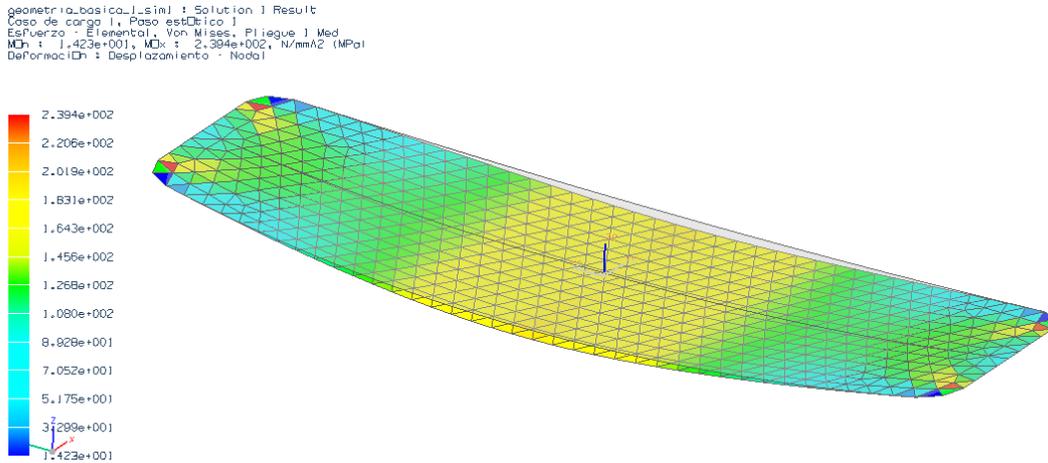


Figura 25: Análisis de tensiones de la capa 1

En la figura 26 se muestra la distribución de tensiones en la capa inferior del laminado superior de la tabla de kitesurf, formada por un paño de fibra de basalto biaxial con una orientación de $45^{\circ}/-45^{\circ}$ y como matriz resina epoxi hexcel.

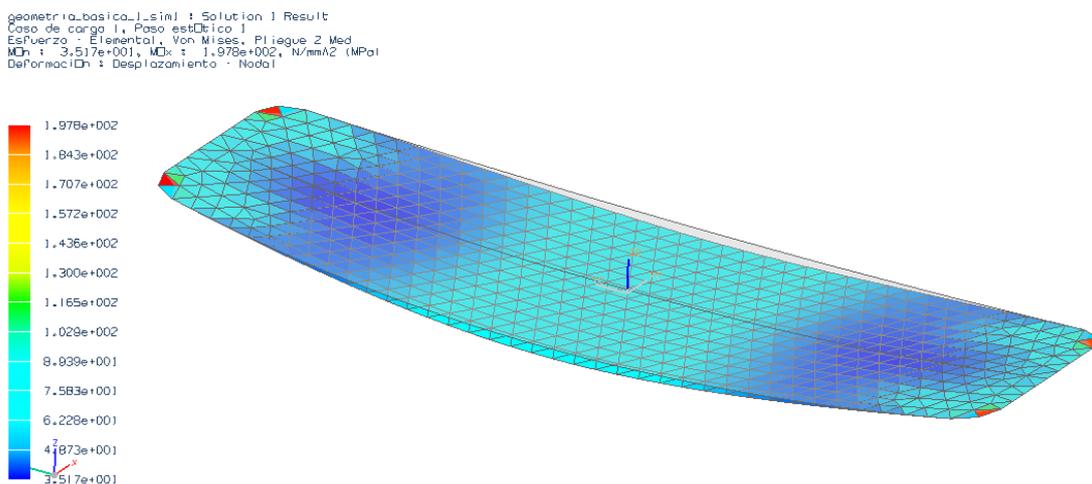


Figura 26: Análisis de tensiones de la capa 2

En la figura 27 se muestra la distribución de tensiones en núcleo de la tabla de kitesurf, que se ha usado un foam de PVC espumado. Cuya función es mantener la separación entre las capas y para que transmita las tensiones por toda la tabla.

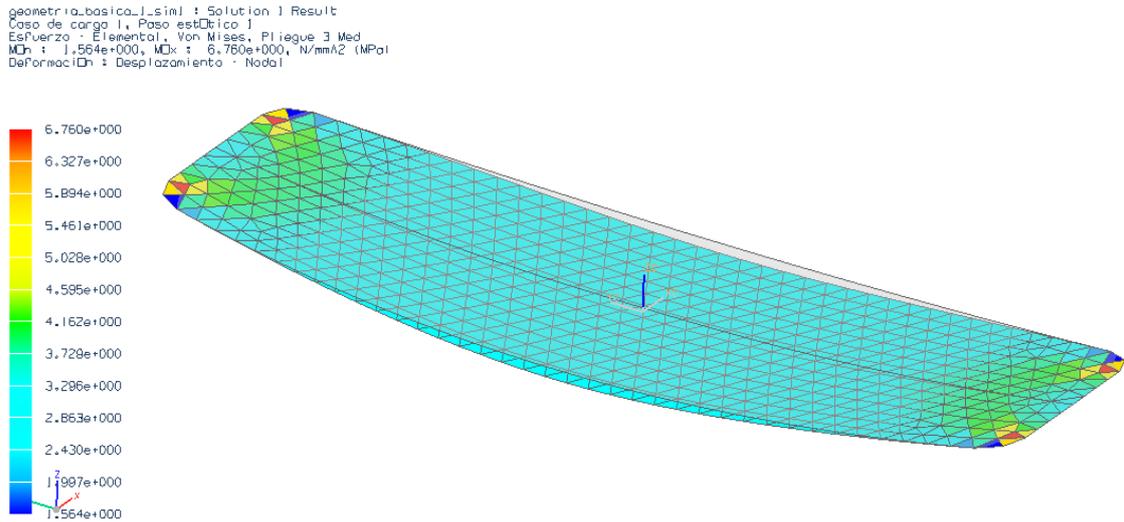


Figura 27: Análisis de tensiones de la capa 3

En la figura 28 se muestra la distribución de tensiones en la capa inferior del laminado inferior de la tabla de kitesurf, formada por un paño de fibra de basalto biaxial con una orientación de 45°/-45° y como matriz resina epoxi hexcel.

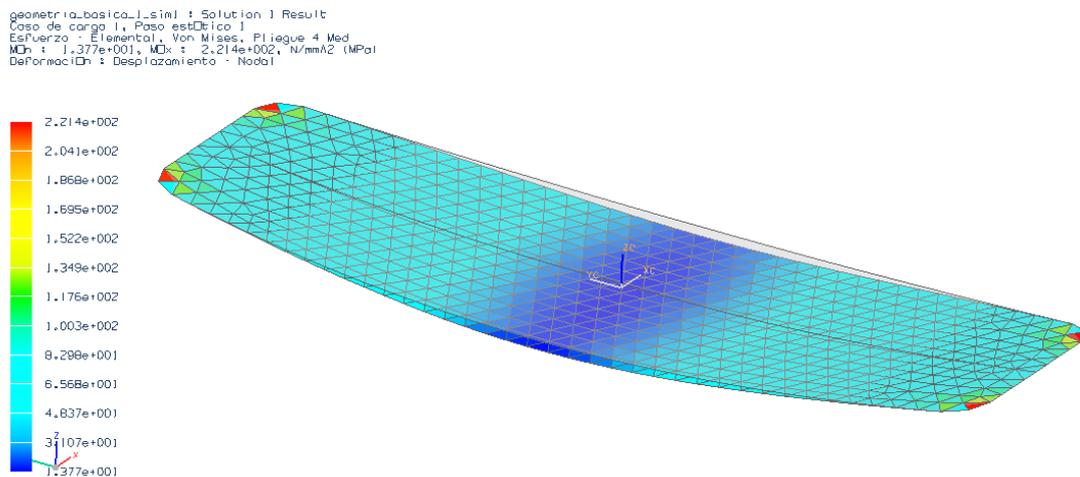


Figura 28: Análisis de tensiones de la capa 4

En la figura 29 se muestra la distribución de tensiones en la capa superior del laminado inferior de la tabla de kitesurf, formada por un paño de fibra de basalto biaxial con una orientación de $0^{\circ}/90^{\circ}$ y como matriz resina epoxi hexcel.

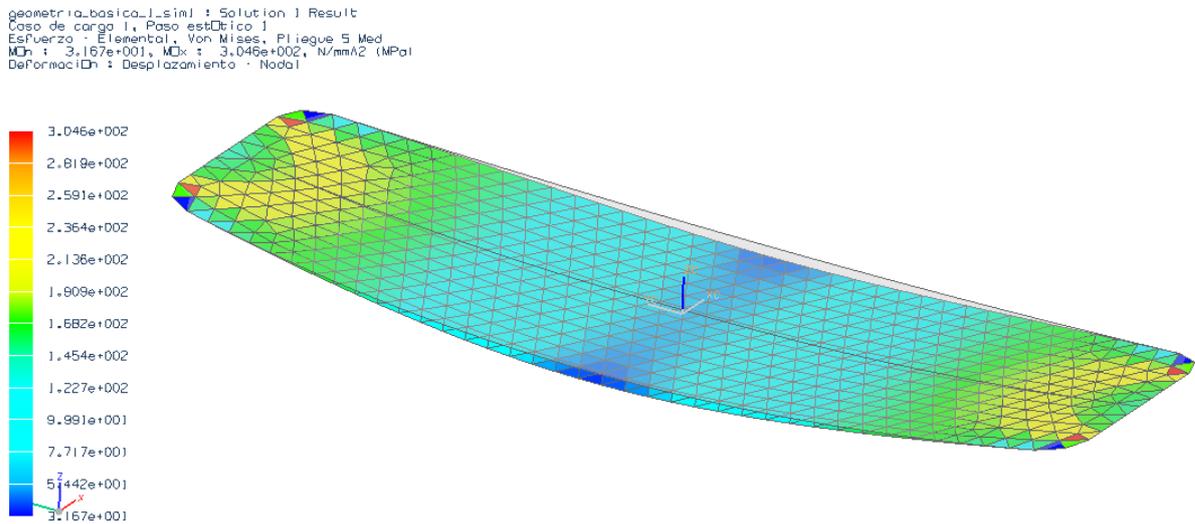


Figura 29: Análisis de tensiones de la capa 5

Una vez analizados todos los valores de tensiones distribuidas por las diferentes capas del laminado tipo sándwich, se puede afirmar que el estudio nos muestra unos resultados lógicos, puesto que las tensiones disminuyen en las capas interiores llegando a valores muy bajos en el núcleo, lo cual nos sirve para interpretar que la distribución de cargas es correcta puesto que en un elemento sometido a flexión las cargas varían de tensiones máximas de tracción a las tensiones máximas de compresión, mostrando datos casi nulos en la línea neutra.

También hay que mencionar que ninguna capa supera los valores de tensión máxima admisible de los materiales usados en la fabricación del laminado tipo sándwich, con lo cual se puede decir que los resultados obtenidos por el software de cálculo son inferiores a los valores críticos de los materiales utilizados en la fabricación del producto.

Análisis de desplazamientos

En la figura 30 se muestran las deformaciones provocadas por las cargas en la tabla de kitesurf, en esta imagen se puede apreciar la deformación del modelo cargado con respecto al modelo sin deformar, pudiendo observar que presenta una deformación lógica, puesto que presenta el comportamiento normal del ensayo. El desplazamiento máximo es de 40 mm siendo un valor admisible, puesto que las tablas de kitesurf necesitan un flex para la absorción de los impactos y para aprovechar la energía que devuelve al recuperar la deformación para realizar algunos trucos. Con esto podemos concluir diciendo que tanto el planteamiento de la simulación como los valores obtenidos son admisibles y se puede validar esta composición del laminado para la fabricación de tablas de kitesurf.

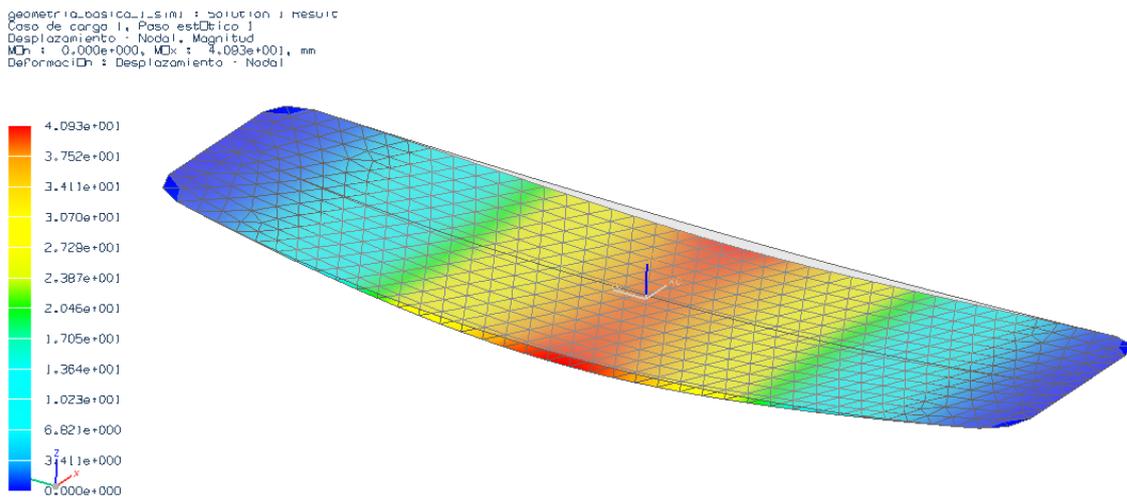


Figura 30: Análisis de deformaciones tabla de kitesurf

4.2 Análisis de infusión de resina

Por el incremento de uso de materiales compuestos en la industria, se ha creado la necesidad de potenciar las herramientas de simulación para aumentar la creatividad y la productividad de los ingenieros. El moldeo compuesto líquido (LCM) es un proceso de infusión de resina a través de refuerzos fibrosos. Ampliamente utilizado en la industria de los materiales compuestos, especialmente para las piezas de matriz

termoestable, los procesos LCM ofrecen un gran potencial para la creación de componentes estructurales con alta relación calidad / precio. A través de su tecnología punta, el software de simulación PAM-RTM permite a los diseñadores e ingenieros de proceso reducir drásticamente el desarrollo, así como el tiempo de producción y costo.

4.2.1 Pre-procesado

Este apartado se centra en la definición de los parámetros de la simulación de infusión de resina, para la cual se necesita obtener la malla. La cual define la distribución de elementos finitos, que nos proporcionan los datos obtenidos de la evolución temporal. En este caso la malla se ha obtenido en el programa de modelado Unigraphics NX-7, puesto que el software PAM-RTM no posee un paquete informático de creación de malla.

El objetivo de esta simulación es realizar una extrusión de la malla 2D con capas de diferentes espesores y materiales. En esta imagen se muestra las direcciones de la fibra, definidas para que simule el comportamiento del flujo de la resina a través de las fibras, ya que en el laminado se han definido las diferentes capas con sus permeabilidades, porosidades y orientaciones de las fibras.



Figura 31: Orientación de las fibras

El objetivo es generar una malla sólida compuesta por 5 capas: 0, 45, 45, 0, y un núcleo en la parte interior. El primer paso es crear los materiales de refuerzo de fibra y el núcleo. El material de refuerzo usado es igual para las 4 capas. Cambiando las orientaciones de las fibras.

Como se puede apreciar en las imágenes, se ha creado un tipo de fibra biaxial con unas permeabilidades de $k_1 = k_2 = 1.8 \cdot 10^{-11}$ y $k_3 = 1.1 \cdot 10^{-12}$ y un cuerpo sólido denominado núcleo que no permite la penetración de la resina, ya que tiene una porosidad muy baja. También se han definido las capas que constituyen el laminado tipo sandwich con los grosores y orientaciones de fibra.

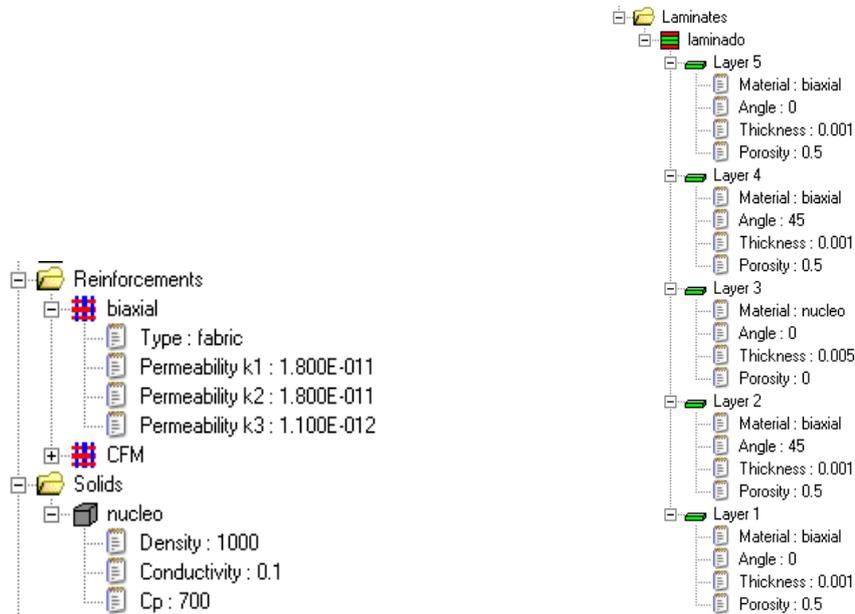


Figura 32: Datos de materiales PAM-RTM

Antes de realizar la extrusión, es importante verificar que los vectores normales apuntan en la dirección correcta.

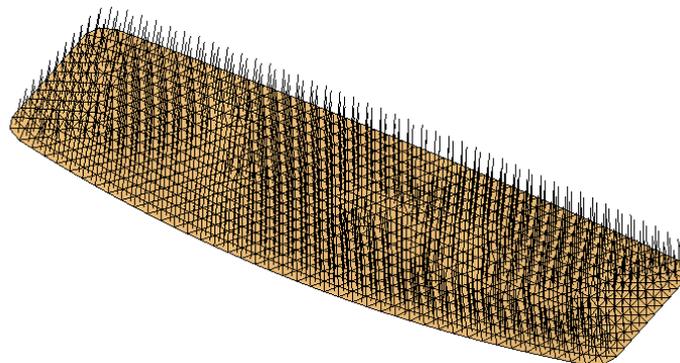


Figura 33: Vectores normales a la malla

Una vez definidos los materiales que vamos a usar, las fibras de refuerzo, el núcleo y las direcciones de la fibra de las diferentes capas. Podemos proceder a la extrusión de la malla, para poder simular la infusión de resina en una pieza 3D. En la siguiente imagen se pueden observar las zonas que hemos creado, ahora hay que comprobar que las zonas tienen asignados el grosor, la porosidad y el material que le corresponde.

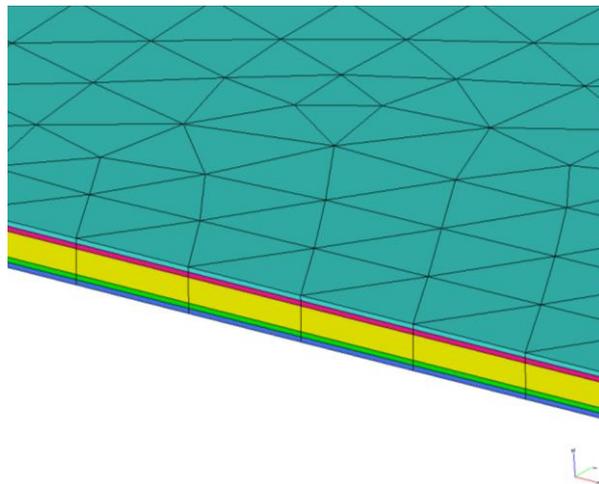


Figura 34: zonas creadas en PAM-RTM

En esta imagen se pueden ver las diferentes zonas creadas, a partir de los datos introducidos como el número de capas, con un material y grosor asignados al laminado y las fibras que hemos creado.

4.2.2 Cálculo

En el proceso se coloca un distribuidor de resina en la preforma seca para reducir el tiempo de llenado por lo que el flujo de resina en el interior del sistema está dado por tres contribuciones (se muestra en la figura 2):

- un flujo longitudinal en el distribuidor;
- un flujo longitudinal en el refuerzo;
- un flujo transversal en el refuerzo (debido a la diferencia de velocidad de la resina en el distribuidor y en el refuerzo).

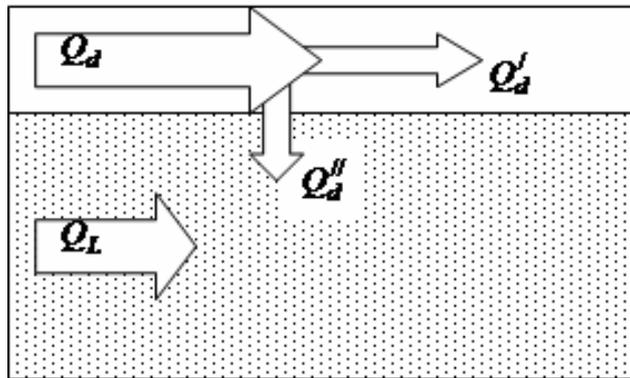


Figura 35: Esquema de flujos de resina

Ahora es necesario decir que si Q_d es el caudal volumétrico en el distribuidor, sólo $Q_d/2$ va a impregnar una parte del refuerzo, mientras que la otra mitad del flujo volumétrico avanza por el distribuidor. Esta hipótesis se basa en algunas observaciones sobre la Ley de Darcy. Si Q_d es el flujo volumétrico total en el distribuidor y siendo Q'_d y Q''_d los flujos volumétricos de impregnación, respectivamente, del refuerzo y el distribuidor, es posible escribir

$$Q_d = Q'_d + Q''_d$$

En la ley de Darcy el flujo volumétrico es directamente proporcional a la sección del flujo de cruces. Por lo que el flujo Q'_d es proporcional al área A_T generada a partir de la diferencia del frente del flujo entre la malla de distribución y el refuerzo. Si Q''_d es mayor que Q'_d , la distancia entre los dos frentes del flujo longitudinal aumenta, con el consiguiente aumento de la superficie transversal y Q'_d . Asimismo, si Q'_d es mayor que Q''_d la superficie de paso disminuye de modo que Q'_d también disminuye. Por lo tanto, es imposible que uno sea mayor que el otro. Esto, obviamente, es cierto sólo en condición de equilibrio, después de un tiempo transitorio inicial que en nuestra hipótesis es despreciable. Basándonos en esta demostración es posible adoptar el esquema de dos flujos paralelos de impregnación del refuerzo: el primero generado por el flujo en el refuerzo longitudinal, el segundo por la red de distribución e igual a $Q_d/2$ (figura 36).

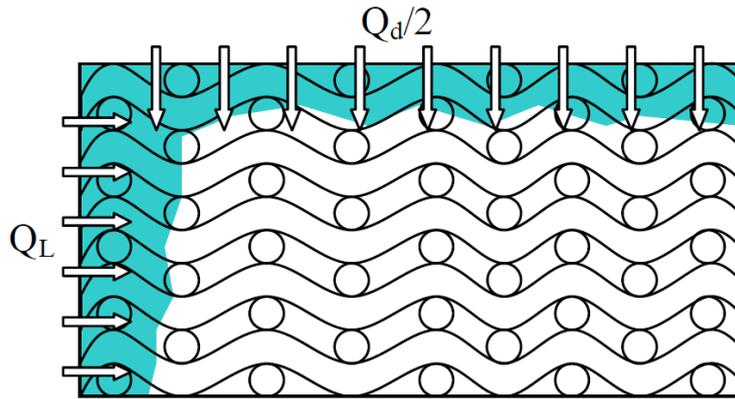


Figura 36: Esquema de impregnación del refuerzo

4.2.3 Resultados

En la siguiente imagen se ha realizado un corte, para observar el comportamiento del flujo de resina en el interior del molde, para poder ver si la resina impregna el núcleo o fluye como queremos que se realice la simulación.

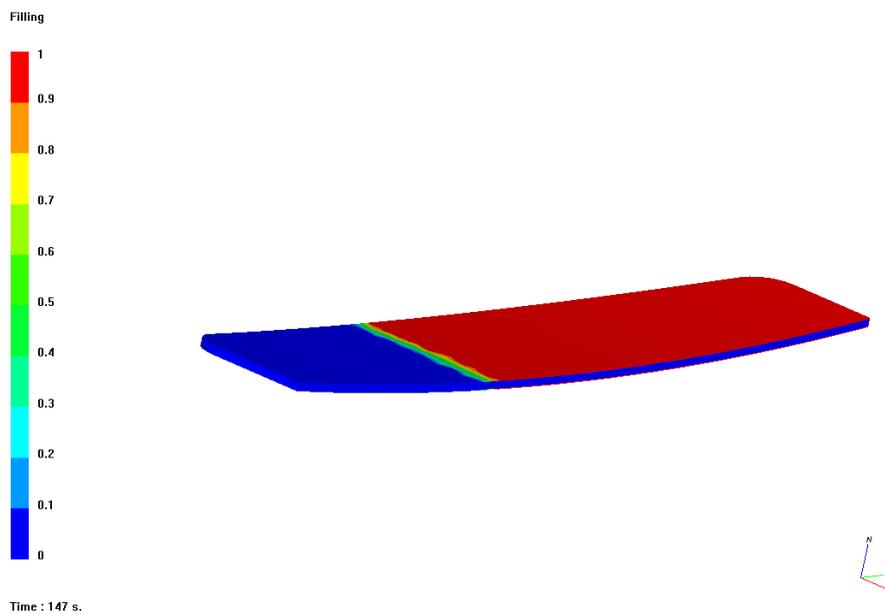


Figura 37: Sección del modelo de infusión de resina con PAM-RTM

En esta imagen de detalle se puede ver el flujo presenta una evolución variable en cada capa, ya que presenta comportamientos diferentes según la orientación de las fibras.

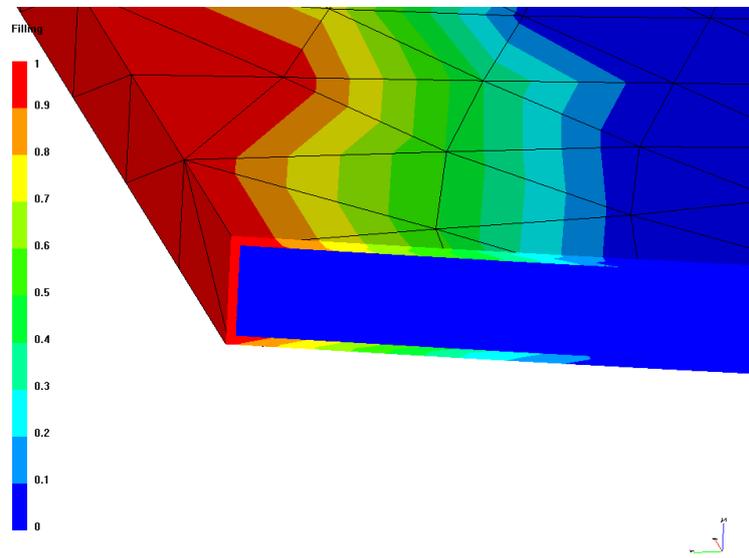


Figura 38: detalle del modelo de infusión de resina con PAM-RTM

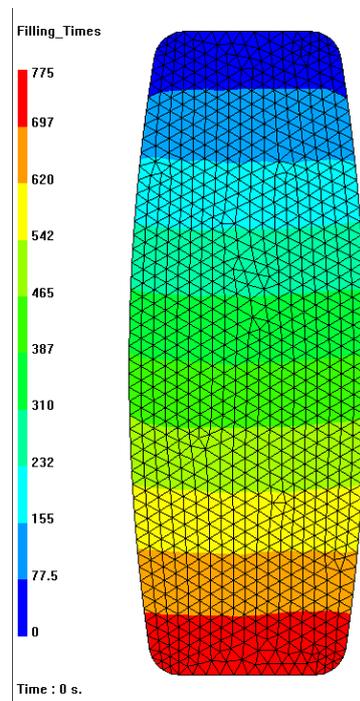


Figura 39: Flujo longitudinal de resina con PAM-RTM

En esta imagen se puede ver la evolución de la flujo de resina a través de la pieza, ya que la inyección que se ha establecido es de llenado lineal a lo largo de la pieza, provocando una evolución del flujo lineal.

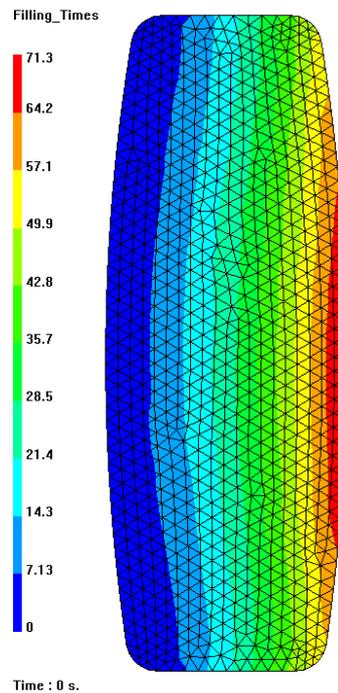


Figura 40: Flujo transversal de resina con PAM-RTM

En esta simulación se ha usado un lateral de la tabla como línea de inyección y el otro como venteo para favorecer el flujo de la resina transversalmente. Como se puede observar, el tiempo de llenado es menor que con la otra configuración. Con lo cual se puede decir que es más adecuado utilizar esta configuración para el proceso de infusión de esta pieza.

Para la configuración del proceso definitivo se ha elegido la infusión lateral por ser la que menor tiempo necesita para el llenado y por ser la mejor manera, porque no nos dejaría la marca sobre las caras de la pieza que deben tener un buen acabado. Y se quedaría la marca de la inyección en los cantos que hay que eliminar, por ser el lugar donde se realiza el solape de las fibras superiores e inferiores.

Capítulo 5

Conclusiones y Trabajos Futuros

Una vez realizada esta tesina se puede afirmar que la utilización de la fibra de basalto como material de refuerzo de materiales compuestos, es muy adecuada para la fabricación de tablas de kitesurf, puesto que presenta unas características mecánicas que superan a la fibra de vidrio y aunque posee un límite de rotura inferior a la fibra de carbono, presenta una mayor tenacidad siendo capaz de absorber mejor las tensiones generadas en un impacto, haciéndolo muy adecuado para la aplicación en tablas de kitesurf.

También hay que mencionar que las herramientas informáticas de cálculo, por el método de los elementos finitos, son herramientas muy poderosas que nos ayudan a hacer una mejor comprensión de cómo se comportan tanto las distribuciones de tensiones en los materiales, como el comportamiento del flujo de resina en los procesos de infusión de resina. Haciéndolas muy adecuadas para la obtención de resultados lógicos en la resolución de problemas complejos que serían muy tediosos por los métodos tradicionales.

Trabajos futuros relacionados con el campo de aplicación de esta tesina:

Realizar un análisis hidrodinámico por el método de elementos finitos para optimizar la geometría, es decir estudiar las variaciones de comportamiento asociadas a los cambios de forma o geometría de la tabla, pudiendo hacer modelos más específicos y adecuados a la modalidad de kitesurf para la que se diseña la tabla.

Realizar un estudio comparativo de los datos obtenidos por medio de la simulación de infusión de resina con el software PAM-RTM y el proceso de infusión real, con la finalidad de optimizar los datos que introducimos en el software de simulación para una mejor convergencia de resultados y así obtener datos teóricos más cercanos a los reales.

Bibliografía

- [1] Matthews, F.L., Rawlings, R.D., *Composite Materials: Engineering and Science*. 1994
- [2] *Composite Materials design and applications*: Daniel Gay, Suong V. Hoa, Stephen W. Tsai 2003
- [3] Militky, J.K., Vladimir, *Ultimate Mechanical Properties of Basalt Filaments*. *Textile Research Journal*, 1996. 66(4): p. 225-229.
- [4] Cater, S., *Editorial*. *International Composites News*, March 2002. 40.
- [5] Subramanian, R.V., Tang, T. J. Y. and Austin, H. F., *Reinforcement of Polymers by Basalt Fibers*. *SAMPE Quarterly*, 1977: p. 1-10.
- [6] Artemenko, S.E., *Polymer Composite Materials Made From Carbon, Basalt, And Glass Fibers. Structure and Properties*. *Fiber Chemistry*, 2003. 35(3): p. 226-229.
- [7] Sim, J., Park, Cheolwoo & Moon, Do Young, *Characteristics of basalt fiber as a strengthening material for concrete structures*. *Composites, Part B*, 2005. 36(6- 7): p. 504-512.
- [8] Van de Velde K., K.P., Van Langenhove L., '*Basalt Fibers As Reinforcement For Composites*', <http://www.basaltex.com/logos/basalt%20fibres.pdf>.
- [9] Chantladze, T., '*Industrial assimilation of the effective type of fiber with multicomponent charge*', <http://www.tctv.ne.jp>.
- [10] '*Basaltex, The thread of stone*', <http://www.basaltex.com>.
- [11] Militky, J.K., Vladimir, *Ultimate Mechanical Properties of Basalt Filaments*. *Textile Research Journal*, 1996. 66(4): p. 270-278.
- [12] Sergeev, e.a., *Basalt Fibers - A Reinforcing Filler for Composites*. *Power Metallurgy and Metal Ceramics*, 1994. 33(9-10): p. 555-557.
- [13] Medvedyev, O.O.T., Y. L., *The Outlook for the use of basalt continuous fibers for composite reinforcement*. *International SAMPE Symposium and Exhibition*, 2004. 49: p. 2299-2303.
- [14] <http://www.compositesworld.com/articles/basalt-fibers-alternative-to-glass>