



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA

CAMPUS D'ALCOI

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

Escuela Politécnica Superior de Alcoy

FABRICACIÓN Y CARACTERIZACIÓN DE MATERIALES  
COMPUESTOS TIPO SÁNDWICH PARA SECTOR  
NÁUTICO CON NÚCLEOS LIGEROS BASADOS EN NO  
TEJIDOS

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería, Procesado y Caracterización de  
Materiales

AUTOR/A: Ordovás Carreras, Antonio

Tutor/a: Fenollar Gimeno, Octavio Ángel

Cotutor/a: Ivorra Martínez, Juan

CURSO ACADÉMICO: 2022/2023

## RESUMEN

Este trabajo se van a estudiar las propiedades de materiales compuestos de tipo sándwich con núcleos ligeros no tejidos. Este trabajo recopila la información necesaria y relevante para llevar a cabo una investigación sobre el uso de materiales compuestos en el sector náutico. Este sector es uno de los principales en el uso de este tipo de materiales.

En este proyecto, se recoge información acerca del uso de núcleos en estructuras de materiales compuestos. Se determina porque los núcleos en los composites tipo sándwich provocan un aumento de las propiedades mecánicas.

Se han fabricado muestras con diferentes materiales, utilizando resina epoxi; y fibras de carbono, vidrio y polipropileno. Estas se han combinado con los núcleos ligeros no tejidos Soric XF y Sphere.core.

El método de fabricación de las muestras es mediante infusión de resina. En el presente trabajo se detalla el proceso, paso a paso, para obtener composites con la mayor calidad.

Se han utilizado las técnicas de caracterización mecánicas necesarias para conocer las propiedades de los materiales ensayados. De esta forma, se ha buscado conseguir arrojar nueva información relevante de estos novedosos materiales.

Palabras clave: Materiales compuestos, estructuras sandwich, núcleos no tejidos, laminados, caracterización, propiedades mecánicas, materiales náuticos.

## RESUM

Aquest treball consisteix en estudiar les propietats i caracteritzar materials compostos de tipus sandvitx amb nuclis lleugers no teixits. Aquest treball recopila la informació necessària i rellevant per dur a terme una investigació sobre l'ús de materials compostos en el sector nàutic. Aquest sector és un dels principals en l'ús d'aquest tipus de materials.

En aquest projecte, s'arreglega informació sobre l'ús de nuclis en estructures de materials compostos. Es determina perquè els nuclis en els composites tipus sandvitx provoquen un augment de les propietats mecàniques.

S'han fabricat mostres amb diferents materials, utilitzant resina epoxi; i fibres de carbono, vidre i polipropilè. Aquestes s'han combinat amb els nuclis lleugers no teixits Soric FX i Sphere.core.

El mètode de fabricació de les mostres és mitjançant infusió de resina. En el present treball es detalla el procés, pas a pas, per obtenir composites amb la major qualitat.

S'han utilitzat les tècniques de caracterització necessàries per conèixer les propietats dels materials assajats. D'aquesta manera, s'ha buscat aconseguir llançar nova informació rellevant d'aquests nous materials.

Paraules clau: Materials compostos, estructures sandvitx, nuclis no teixits, laminats, caracterització, propietats mecàniques, materials nàutics.

## ABSTRACT

This work consists of studying the properties and characterizing sandwich-type composite materials with light non-woven cores. This work compiles the necessary and relevant information to carry out an investigation on the use of composite materials in the nautical sector. This sector is one of the main ones in the use of this type of materials.

In this project, information about the use of core in composite material structures is collected. It is determined why the cores in sandwich composites cause an increase in mechanical properties.

Samples have been made with different materials, using epoxy resin; and carbon, glass and polypropylene fibers. These have been combined with Soric FX and Sphere.core lightweight nonwoven cores.

The manufacturing method of the samples is by Vacuum-assisted resin infusion. In this work the process is detailed, step by step, to obtain composites with the highest quality.

The necessary characterization techniques have been used to know the properties of the tested materials. In this way, it has been sought to know new relevant information on these new materials.

Keywords: Composite materials, sandwich structures, nonwoven cores, laminates, characterization, mechanical properties, nautical materials.

# INDICE

## Tabla de contenido

RESUMEN.....	1
RESUM.....	2
ABSTRACT.....	3
INDICE .....	4
<i>LISTADO DE ILUSTRACIONES</i> .....	7
<i>LISTADO DE TABLAS</i> .....	9
<i>LISTADO DE GRÁFICOS</i> .....	10
OBJETIVO DEL PROYECTO.....	11
GLOSARIO Y DEFICINIONES .....	12
ABREVIATURAS Y SIGLAS. ....	17
<b>I. Antecedentes.....</b>	<b>19</b>
1. Introducción a los materiales poliméricos.....	19
1.1. <i>Polímeros termoplásticos</i> .....	20
1.2. <i>Polímeros termoestables</i> . ....	21
1.3. <i>Polímeros elastómeros</i> . ....	21
2. Introducción a los materiales compuestos.....	22
2.1. <i>Refuerzos</i> .....	25
2.1.1. Tipos de fibras empleadas. ....	26
2.1.1.1. Fibra de vidrio .....	26
2.1.1.2. Fibra de carbono.....	28
<i>Poli acrílico nitrilo (pan)</i> .....	29
<i>Obtención fibra de carbono</i> .....	30
2.1.1.1. Fibra de polipropileno (Innegra). ....	31
2.1.2. Formato de los refuerzos .....	32
<i>Título</i> . ....	32

<i>Gramaje</i> .....	33
<i>Tejido</i> .....	33
<i>Unidireccional</i> .....	34
<i>Multiaxial</i> .....	34
<i>Mat</i> .....	36
2.2. <i>Matriz</i> .....	36
2.2.1. Resinas de epoxi.....	37
2.3. <i>propiedades mecánicas de los composites</i> .....	38
2.3.1. Isotropía y anisotropía de los composites.....	40
2.3.2. <i>la regla de las mezclas</i> .....	41
2.3.3. <i>Orientación de las fibras</i> .....	42
<i>Nomenclatura de los laminados</i> .....	43
2.4. <i>Núcleos</i> .....	44
2.4.1. <i>Propiedades mecánicas de los núcleos</i> .....	45
2.4.2. <i>Núcleos empleados en el proyecto</i> .....	47
2.4.2.1. Soric XF.....	47
2.4.2.2. Sphere.Core.....	50
2.5. <i>Métodos de fabricación</i> .....	51
<b>II. Objetivo</b> .....	<b>55</b>
1. Objetivo general.....	55
2. Objetivo estratégico.....	55
<b>III. Experimental</b> .....	<b>56</b>
1. Proceso de fabricación de los materiales.....	56
2.1. <i>corte y pesado de los materiales</i> .....	57
2.2. <i>construcción del laminado</i> .....	58
2.3. <i>Sellado de la bolsa</i> .....	60
2.4. <i>Preparación de la resina</i> .....	60
2.5. <i>Infusión y curado</i> .....	62
2.6. <i>Desmoldeado</i> .....	63
3. Corte de las probetas.....	64
<b>IV. Caracterización</b> .....	<b>67</b>
1. Diseño del experimento.....	67
1.2. <i>Normativa</i> .....	68
2. Definición de ensayos.....	68
2.1. <i>Técnicas de caracterización físicas y naturales del material</i> .....	68
2.2. <i>Técnicas de caracterización mecánica</i> .....	70
2.2.1. Ensayo de tracción.....	70

2.2.2.	Ensayo de flexión.....	71
2.2.3.	Ensayo de impacto charpy.....	72
<b>V.</b>	<b>Resultados y discusión.....</b>	<b>74</b>
1.	Resultados de propiedades físicas y naturales.....	<b>74</b>
1.1.	<i>Peso, densidad y porcentaje de fibra.</i> ....	74
1.2.	<i>Velocidad de impregnado de los núcleos.</i> .....	75
2.	Resultados de la caracterización mecánica. ....	<b>80</b>
2.1.	<i>Ensayo de tracción</i> .....	80
2.1.1.	Ensayo de tracción de los núcleos con resina.....	80
2.1.2.	Ensayo de tracción de los compuestos .....	81
2.1.3.	Discusión de los resultados del ensayo de tracción.....	82
2.1.3.1.	Discusión de los resultados del ensayo de tracción de los núcleos impregnados	82
2.1.3.2.	Discusión de resultados del ensayo de tracción de los composites .....	84
2.2.	<i>Ensayo de flexión</i> .....	87
2.2.1.	Ensayo de flexión de los núcleos con resina .....	87
2.2.2.	Ensayo de flexión de los compuestos.....	88
2.2.3.	Discusión de resultados del ensayo de flexión.....	89
2.3.	<i>Ensayo de impacto charpy.</i> .....	92
2.3.1.	Ensayo de resistencia al impacto de los núcleos con resina.....	92
2.3.2.	Ensayo de resistencia al impacto de los compuestos.....	93
2.3.3.	Discusión de los resultados del ensayo de impacto.....	95
<b>VI.</b>	<b>Conclusiones.</b> .....	<b>97</b>
<b>VII.</b>	<b>Referencias.</b> .....	<b>100</b>

## LISTADO DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Ejes locales y ejes globales .....	13
Ilustración 2. Imagen microscópica de las fibras .....	13
Ilustración 3. Diagrama ensimaje.....	13
Ilustración 4. Diagrama escalas.....	14
Ilustración 5: estructura de cadena polimérica .....	20
Ilustración 6: Estructura Polímero Termoplásticos .....	20
Ilustración 7: Comparación estructura polímero semicristalino y amorfo .....	20
Ilustración 8: Estructura Polímero Termoestables .....	21
Ilustración 9: Estructura Polímeros Elastómeros .....	21
Ilustración 10: Proceso Vulcanización Elastómeros .....	22
Ilustración 11: Diagrama Clasificación de los Composites.....	22
Ilustración 12: Ejemplo de Embarcaciones Tecnológicamente avanzadas - www.expansion.com/nauta360 .....	24
Ilustración 13: Ejemplo de Transbordador Espacial Fabricado con Composites - www.esa.int.	24
Ilustración 14: Esquema Disposición Fibras y Matriz .....	25
Ilustración 15: Proceso de Obtención de Fibras de Vidrio.....	27
Ilustración 16: Productos Fabricados con Fibra de Vidrio (A – Piscina - piscinasdefibra.com), (B - Casco de embarcación – topbarcos.com), (C - Carrocería de Autobús - unvi.es), (D - Depósito contenedor – poliesterdeposur.es).....	28
Ilustración 17: Estructura PAN .....	29
Ilustración 18: Bobina de PAN → Bobina de Fibra de Carbono .....	30
Ilustración 19: Proceso de Obtención de Fibra de Carbono .....	30
Ilustración 20: Productos Fabricados con Fibra de Carbono. (A - Satélite Espacial – esa.es), (B - Avión de pasajeros – airbus.com), (C – Bicicleta - hibridosyelectricos.com) D) (Pala de pádel – padellife.com).....	31
Ilustración 21. Comparación de pieza carbono - aramida (arriba) y carbono – Polipropileno (abajo) - www.interempresas.net/Aeronautica.....	32
Ilustración 22: Diagrama Tex y Gramaje.....	33
Ilustración 23: Bobina (Roving) de Fibra de Carbono .....	33
Ilustración 24: Tejido Unidireccional Fibra de Carbono.....	34
Ilustración 25: Esquema Combinación Tejidos Unidireccionales.....	34
Ilustración 26. Esquema disposición filamentos en los tejidos .....	35
Ilustración 27: Disposición y Estructura de los Filamentos .....	36
Ilustración 28: Izq. Aeronave fabricada con epoxi. Centro. Dos componentes del epoxi en forma de resina prepolímero. Der. Automóviles de competición fabricados con epoxi. ....	37
Ilustración 29: Ejes Locales Laminado .....	40
Ilustración 30: Ejes Locales: A) Material Anisotrópico B) Material Isotrópico .....	41
Ilustración 31: Propiedades en Función de la Orientación de las Fibras.....	41
Ilustración 32: Influencia de la orientación de las fibras en la resistencia a tracción.....	42
Ilustración 33: Diagrama de estratificado con diferentes ángulos.....	43
Ilustración 34: Comparación propiedades mecánicas con núcleo y sin núcleo.....	44
Ilustración 35: Ejemplos Núcleos .....	45
Ilustración 36: Diagrama Laminados con núcleo y sin Núcleo.....	45
Ilustración 37: Distribución de Tensiones en Laminado con Núcleo.....	46
Ilustración 38. Analogía entre un composite tipo sándwich y un perfil ipe de acero.....	46



Ilustración 39: Diagramas de Esfuerzos.....	47
Ilustración 40: Logo Lantor Composites.....	47
Ilustración 41: Diagrama de avance de resina por núcleo Soric FX .....	49
Ilustración 42: Diagrama de avance de resina por núcleo de Soric FX (2).....	49
Ilustración 43: Logo Compañía Sphere Tex .....	50
Ilustración 44: Diagrama de avance de la resina por el núcleo Sphere.core .....	50
Ilustración 45: Conformación de composites con molde abierto o cerrado .....	51
Ilustración 46: Esquema de fabricación de composites.....	51
Ilustración 47. Proyección simultánea.....	52
Ilustración 48. Contacto a mano.....	52
Ilustración 49. Empaquetado al vacío. ....	52
Ilustración 50. Filament winding .....	52
Ilustración 51. Pultrusión. ....	53
Ilustración 52. Braiding.....	53
Ilustración 53. Infusión de resina. ....	53
Ilustración 54. RTM.....	53
Ilustración 55: Esquema de fabricación de los materiales para las probetas.....	56
Ilustración 56: Corte de los núcleos .....	57
Ilustración 57: Láminas de fibra de carbono y núcleo Soric FX.....	57
Ilustración 58: Pesaje de Soric FX y fibra de vidrio .....	58
Ilustración 59: Tubos de canalización de resina.....	58
Ilustración 60: Colocación de la primera capa - plástico perforado.....	59
Ilustración 61: Colocación del laminado (Núcleo Soric FX) .....	59
Ilustración 62: Colocación del plástico superior, peel ply y tubos de distribución.....	59
Ilustración 63: Colocación de manta de absorción, cinta de sellado y bolsa de vacío. ....	59
Ilustración 64: Preparación del sistema de infusión completo y sellado.....	60
Ilustración 65: Resina Resoltech 1050 y Endurecedor Resoltech 1056s .....	61
Ilustración 66: Pesado de cada componente.....	61
Ilustración 67: Diagrama del proceso de infusión.....	62
Ilustración 68: Sistema de infusión compactado con vacío .....	62
Ilustración 69: Proceso de desmoldeado y retirada del peel ply .....	63
Ilustración 70: Pesaje del composite .....	63
Ilustración 71: Composites preparados para corte .....	64
Ilustración 72: Método de fijación del laminado con cinta de doble cara y tornillos.....	64
Ilustración 73: Izq. Sujeción del laminado con grapas. der. Corte de probetas.....	65
Ilustración 74: Orientación de las probetas respecto a la dirección de las fibras .....	65
Ilustración 75: Plano de corte de las probetas .....	66
Ilustración 76: Clasificación de probetas .....	66
Ilustración 77. Izq. MUE Ibertest ELIB-50W, Der. Diagrama ensayo de tracción.....	71
Ilustración 78. Diagrama ensayo de flexión.....	72
Ilustración 79. Izq. Máquina de ensayos de impacto. Centro, Péndulo. Der. Diagrama de ensayo de impacto.....	72
Ilustración 81. Medición de la velocidad de impregnado del núcleo SORIC FX. ....	76
Ilustración 82. Medición de la velocidad de impregnado del núcleo de SPHERE. ....	77
Ilustración 83. Rotura de probeta en ensayo de tracción del composite de polipropileno. ....	86

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Ventajas y Desventajas de los composites [9] .....	23
Tabla 2. Principales refuerzos y matrices.....	25
Tabla 3. Propiedades de las fibras en comparación con otros materiales. ....	26
Tabla 4. Tipos de fibra de vidrio.....	26
Tabla 5. Diferencias entre la fibra de carbono de tipo I y II. ....	28
Tabla 6. Diferencia de propiedades en función de la materia prima.....	29
Tabla 7. Módulos elásticos de fibras, resinas y metales empleados en la industria .....	38
Tabla 8. Propiedades dimensionales del Soric XF 3 .....	48
Tabla 9. Propiedades mecánicas del soric XF 3 .....	48
Tabla 10. Propiedades dimensionales del sphere.core .....	50
Tabla 11. Bloques y ensayos a realizar. ....	67
Tabla 12. Significado siglas normativa .....	68
Tabla 13. Resultados - peso de los núcleos.....	74
Tabla 14. Resultados - Peso de los laminados.....	74
Tabla 15. Medición tiempos de impregnado. ....	78
Tabla 16. Resultados de velocidad de impregnado y propiedades físicas.....	79
Tabla 17. Resultados del ensayo de tracción del Núcleo de Soric FX impregnado.....	80
Tabla 18. Resultados del ensayo de tracción del núcleo de SPHERE impregnado.....	80
Tabla 19. Resultados del ensayo de tracción del CF + Soric FX .....	81
Tabla 20. Resultados del ensayo de tracción del del GF + Soric FX.....	81
Tabla 21. Resultados del ensayo de tracción del del PPF + Soric FX.....	81
Tabla 22. Resultados del ensayo de tracción del del CF + SPHERE.CORE. ....	81
Tabla 23. Resultados del ensayo de tracción del del GF + SPHERE.CORE.....	82
Tabla 24. Resultados del ensayo de tracción del del PPF + SPHERE.CORE.....	82
Tabla 25. Resultados del ensayo de flexión del Núcleo de Soric FX impregnado. ....	87
Tabla 26. Resultados del ensayo de flexión del Núcleo de SHERE impregnado. ....	88
Tabla 27. Resultados del ensayo de flexión del del CF + Soric FX.....	88
Tabla 28. Resultados del ensayo de flexión del del CF + Soric FX.....	88
Tabla 29. Resultados del ensayo de tracción del del PPF + Soric FX.....	88
Tabla 30. Resultados del ensayo de tracción del del PPF + Soric FX.....	89
Tabla 31. Resultados del ensayo de tracción del del PPF + Soric FX.....	89
Tabla 32. Resultados del ensayo de tracción del del PPF + Soric FX.....	89
Tabla 33. Resultados del ensayo a flexión de los Composites.....	91
Tabla 34. Resultado del ensayo de resistencia al impacto del Soric FX impregnado.....	92
Tabla 35. Resultado del ensayo de resistencia al impacto del SPHERE impregnado.....	92
Tabla 36. Resultado del ensayo de resistencia al impacto del Soric FX + CF.....	93
Tabla 37. Resultado del ensayo de resistencia al impacto del SPHERE.CORE + CF.....	93
Tabla 38. Resultado del ensayo de resistencia al impacto del Soric FX + GF.....	93
Tabla 39. Resultado del ensayo de resistencia al impacto del SPHERE.CORE + GF.....	94
Tabla 40. Resultado del ensayo de resistencia al impacto del SPHERE + PPF.....	94
Tabla 41. Resultado del ensayo de resistencia al impacto del Soric FX + PPF .....	94

## LISTADO DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Comparación Módulos Diferentes Materiales .....	38
Gráfico 2: Tensión-Deformación Fibra, Resina y Composite.....	39
Gráfico 3: Tensión-Deformación Fibra, Resina y composite de Alto Módulo .....	39
Gráfico 4. Velocidad de impregnado de los núcleos. ....	78
Gráfico 5. Resultados de las propiedades mecánicas de los núcleos impregnados....	84
Gráfico 6. Módulo elástico de los materiales compuestos ensayados.....	84
Gráfico 7. Deformación de los materiales compuestos ensayados. ....	85
Gráfico 8. Resistencia a tracción de los materiales compuestos ensayados.....	85
Gráfico 9. comparación de los resultados del ensayo de tracción en los compuestos.	86
Gráfico 10. Resistencia de los compuestos a flexión. ....	90
Gráfico 11. Módulo elástico de los compuestos a flexión. ....	90
Gráfico 12. Resultados al ensayo de flexión de los núcleos impregnados. ....	91
Gráfico 13. Resultado de los núcleos impregnados a flexión. ....	95
Gráfico 14. Absorción de energía en el impacto de los laminados. ....	95
Gráfico 15. Resiliencia al impacto de los laminados.....	96

## OBJETIVO DEL PROYECTO

El objetivo del presente trabajo es profundizar en el campo de investigación de los materiales compuestos y en las técnicas de caracterización de materiales. En concreto, se busca caracterizar materiales compuestos con núcleos no tejidos.

El proyecto se divide en tres etapas:

La primera parte incluye todo el proceso de **búsqueda de información**, bibliografía, estado del arte y antecedentes. Esta parte es fundamental para conocer la naturaleza de los materiales compuestos y sus variantes. También se pretende conocer las ventajas de añadir núcleos a los laminados en los materiales compuestos.

La segunda etapa consiste en la **fabricación** de los materiales y extracción de las probetas. En esta fase se estudia e investiga sobre el proceso de infusión de resina, se aprende la técnica y los usos en la industria. Una vez se obtienen los materiales, se fabrican probetas según la normativa, para proceder con la tercera fase. Se van a fabricar 6 tipos de materiales compuestos, combinando los dos materiales de núcleo novedosos, con tres tipos de tejido (fibra de vidrio, fibra de carbono y fibra de polipropileno).

La tercera fase es la de **caracterización**, en esta se ensayan las probetas, con el objetivo de conocer las técnicas de caracterización actuales, y poder obtener información nueva y concluyente sobre los materiales ensayados. En esta fase se realizan ensayos mecánicos, ópticos, térmicos y otros ensayos relativos a los materiales compuestos.

Con todo esto, se pretende llevar a cabo un proyecto de principio a fin, con un procedimiento y un objetivo de investigación, sin dejar de lado el objetivo académico.

## GLOSARIO Y DEFINICIONES

### **ACELERADOR**

Un acelerador es un componente que se añade a una reacción química para aumentar la velocidad de reacción.

En el caso de los polímeros termoestables usados en los materiales compuestos, el acelerador se utiliza para que el polímero cure más rápido.

### **AUTOCLAVE**

Un autoclave es un equipo utilizado en la fabricación de materiales compuestos. Es un recipiente metálico que permite elevar la temperatura y la presión en el interior.

Una autoclave es fundamental en algunos procesos en los que es necesario curar las piezas de composites utilizando presión y temperatura.

Las líneas modernas de investigación y las normativas de algunos países empiezan a limitar el uso de autoclaves, debido a que pueden ser peligrosos, ya que son grandes recipientes a alta presión, y, además, suponen un gran gasto energético.

### **CARBONIZACIÓN Y GRAFITIZACIÓN**

La carbonización y la grafitización son fases en el proceso de fabricación de las fibras de carbono.

La carbonización consiste en someter a las fibras a temperaturas muy elevadas (2500-3000°C), en ausencia de oxígeno. Esto hace que las fibras comiencen a perder los átomos que no son de carbono. Esto hace que los átomos de carbono que restan se empaqueten en cristales fuertemente unidos.

El proceso de grafitización es un proceso parecido, pero a temperaturas por encima de 3000 grados, con lo que se consigue una fibra de alto módulo.

### **CATALIZADOR**

El catalizador es un elemento que forma parte de la reacción de entrecruzado de las resinas termoestables. Este elemento es el que inicia la reacción de entrecruzamiento. Generalmente en la industria es un peróxido orgánico.

### **COMPOSITE**

Un composite o material compuesto es un material formado por dos o más materiales diferentes, que en su conjunto tienen mejores propiedades que por separado.

### **DELAMINACIÓN**

La delaminación es uno de los problemas más frecuentes y temidos en el sector de los composites. Este consiste en la separación entre láminas de un laminado, o entre las láminas y el núcleo. Supone uno de los grandes retos de calidad en el sector.

Esto crea puntos débiles en el interior del material, así como espacios de aire, que evitan una correcta transmisión de tensiones y suponen concentradores de tensiones.

### **EJES LOCALES Y EJES GLOBALES.**

En un laminado con varias capas de fibra, es habitual diferenciar entre los ejes locales y los globales. Los ejes globales (verde) son los ejes principales de la pieza, del laminado completo. Y como es habitual, se denominan con 'x' e 'y'. Y como es habitual, se denominan con 'x' e 'y'.

Los ejes locales (rojo), son los ejes de cada una de las láminas, y están en la dirección de la orientación de la fibra. De esta forma, el eje local 1 está en la dirección de la fibra, y el eje 2 es ortogonal al 1.

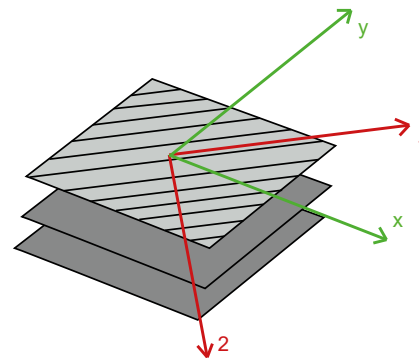


ILUSTRACIÓN 1. EJES LOCALES Y EJES GLOBALES

### **EMBARCACIÓN DE RECREO**

Las embarcaciones de recreo son barcos de hasta 25 metros cuyo uso es recreativo o de ocio. Estos barcos son principalmente fabricados con composites. En la actualidad el uso de núcleos tipo sandwich en la construcción de estos barcos está muy extendido.

### **ENSIMAJE (SIZING)**

Uno de los puntos más importante en los materiales compuestos es la interfase entre la matriz y el refuerzo. Para mejorar la unión entre la fibra y la resina, se aplica a la fibra un tratamiento conocido como sizing. Este proceso mejora la consistencia de los filamentos de la fibra y mejora sus capacidades de adherencia de la fibra.

Para este proceso, generalmente se utilizan silanos, especialmente para fibras de vidrio y basalto. Los silanos actúan como puentes o uniones entre fibra y resina.

Estos forman uniones moleculares entre dos componentes y están ampliamente industrializados en el sector de los materiales compuestos.

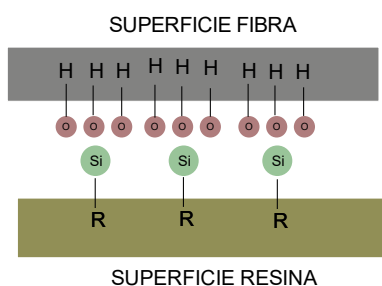


ILUSTRACIÓN 3. DIAGRAMA ENSIMAJE

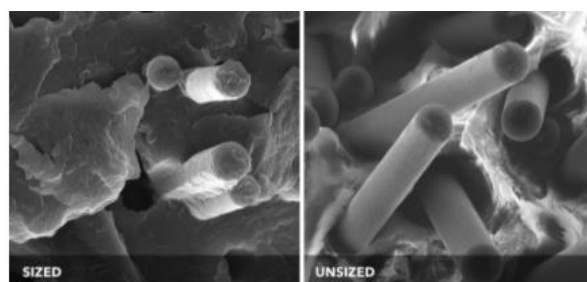


ILUSTRACIÓN 2. IMAGEN MICROSCÓPICA DE LAS FIBRAS

### **ESCALA MACRO/MICRO/NANO**

Las escalas métricas diferencian las dimensiones y los entornos de observar un objeto o cosa. De esta forma, se destacan tres escalas en la ciencia de materiales. Estas son la escala macro, o normal, ya que es la escala donde están las cosas que se ven con el ojo humano.

Un si se reducen las dimensiones se alcanza la escala micrométrica, en la cual se debe utilizar microscopia óptica para conseguir ver las cosas. Se encuyen en esta escala, las células y las bacterias por ejemplo.

En tercer lugar, se encuentra la escala nanométrica, en la cual se debe utilizar microscopia electrónica para conocer la morfología de las cosas. En esta escala se encuentran los virus, los nanomateriales y las nanofibras entre otros.

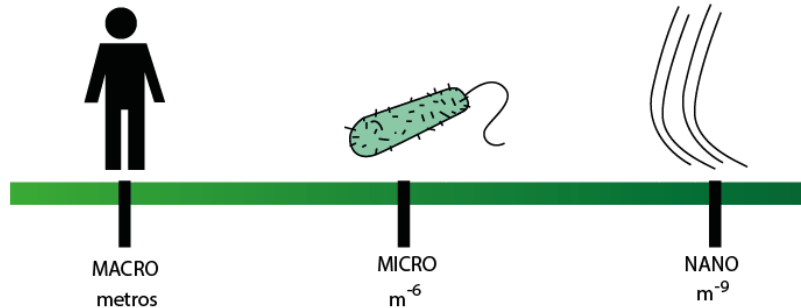


ILUSTRACIÓN 4. DIAGRAMA ESCALAS

#### ***FILM PERFORADO O DESAIREADOR.***

Es un material empleado en procesos de fabricación de materiales compuestos. El film desaireador, o plástico perforado, es una lámina de plástico con agujeros que permite distribuir la fuerza del vacío por la superficie del laminado.

#### ***FLUJO.***

El flujo es un término relativo a la viscosidad de la resina. El flujo es la velocidad o facilidad con la que la resina avanza por los poros de los materiales del composite para impregnarlo.

#### ***GELCOAT.***

El gelcoat es un elemento ampliamente utilizado en el sector de los composites, en particular en el sector naval. Este elemento se utiliza como capa protectora de los composites frente al ambiente exterior. Es una resina que se aplica en el exterior de las piezas.

#### ***INHIBIDOR.***

El inhibidor es una sustancia que se aplica en los procesos de entrecruzado de la resina para ralentizar la reacción. Es el elemento opuesto al acelerador.

#### ***ISOTROPÍA, ORTOTROPÍA, ANISOTROPÍA.***

Un material isótropo es un material que tiene las mismas propiedades mecánicas en cualquier dirección.

Un material ortótropo es un material que tiene dos ejes ortogonales y simétricos, en los cuales sus propiedades son diferentes en ambas direcciones. Es habitual encontrar este tipo de materiales en los composites, pues muchos laminados tienen las fibras orientadas en ejes ortogonales. Este tipo de materiales también se conocen como materiales transversalmente isotrópicos.

Por último, un material anisótropo es un material en el que sus propiedades mecánicas, elásticas, térmicas, etc., varían en función de la dirección. Esta también es una cualidad de los composites, pues existen laminados totalmente anisótropos. Es por esto que es fundamental una etapa de diseño del composite antes de su fabricación.

### ***KEVLAR***

El kevlar es el nombre común para referirse a la fibra de aramida. Esto es debido a que es la fibra de aramida distribuida por la empresa Dupont, la cual promocionó y dio a conocer esta fibra. Pero a pesar de ello, también hay otras compañías que producen fibras de aramida.

### ***MANTA DE SANGRADO***

La manta de sangrado es un material tejido que se utiliza en procesos de infusión de resina, en la fabricación de composites. Es el último de los componentes que se coloca antes de la bolsa de vacío. Esta ayuda a distribuir el vacío y evita que pase la resina por la bomba de vacío.

### ***MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS***

La máquina universal de ensayos es el equipo más utilizado en las técnicas de caracterización mecánica. Se trata de un equipo que desplaza un cabezal que deforma el material y mide la tensión ofrecida por este.

Con esta máquina se pueden realizar ensayos de tracción, compresión y flexión, entre muchos otros.

### ***MISCIBILIDAD***

La miscibilidad es la propiedad de algunos polímeros para mezclarse. Un blend de dos polímeros miscibles entre si será más homogéneo y así se verá en sus propiedades.

### ***MÓDULO DE ELASTICIDAD.***

El módulo de elasticidad (E) es el parámetro propio de cada material que define su comportamiento elástico. El módulo de elasticidad es la pendiente de la gráfica tensión deformación de un material, en su región elástica.

Cuando se trata de un esfuerzo a tracción, el módulo elástico es el módulo de Young.

### ***PEEL PLY***

El peel ply es un tejido de Dacron (poliéster) que es ampliamente utilizado en la industria de los materiales compuestos.

Se trata de un tejido que se pone sobre la fibra cuando esta se moldea y se va a curar, para conseguir un acabado superficial rugoso de forma que pueda adherirse mejor en un ensamblado o con un adhesivo. También es muy útil para permitir el flujo de vacío y resina, y para ayudar a retirar todo el material fungible que está encima de la fibra y facilitar el desmoldeado.

### ***POLÍMEROS TERMOPLÁSTICOS TERMOESTABLES Y ELASTÓMEROS***

Los polímeros están divididos en tres grandes familias. Por un lado, están los termoplásticos, que son polímeros formados por largas cadenas poliméricas. Estos tienen la capacidad de fundirse si se calientan.



En segundo lugar, están los termoestables. Estos polímeros son los más extendidos en combinación con refuerzos para crear composites. Estos polímeros tienen una estructura molecular reticular, formando mallas en 3D. Estos polímeros no se pueden fundir, sino que, al aumentar la temperatura, se degradan.

Por último, están los polímeros elastómeros. Estos son polímeros formados por largas cadenas, pero están unidas entre sí. Generalmente las uniones suelen ser por puentes de azufre. Esto se consigue tras un proceso de vulcanización del polímero. Estos polímeros presentan propiedades elásticas y de deformación superiores.

#### **POT LIFE**

El término inglés “*pot life*” hace referencia al tiempo de manipulación de una resina antes de que esta cure y endurezca.

#### **REFUERZO, CARGA Y ADITIVO.**

Los tres términos suelen confundirse. Un refuerzo es un material que se embebe en otro con la finalidad de mejorar sus propiedades mecánicas, como, por ejemplo, las fibras de vidrio o carbono.

Por otra parte, las cargas se añaden con la finalidad de reducir los costes del material. Esto no quita que una carga pueda mejorar alguna otra propiedad del material. La carga más utilizada es el  $\text{CaCO}_3$ .

Por último, un aditivo se añade a un polímero para modificar alguna propiedad de este. Así como la carga y el refuerzo pueden añadirse en un porcentaje muy alto, de hasta el 70%, los aditivos se aplican en porcentajes menores, de menos de 3%. Un ejemplo de aditivo puede ser  $\text{TiO}_2$  o DOP.

#### **RESISTENCIA A LA TRACCIÓN.**

La resistencia a la tracción es la propiedad de un material que hace referencia a la rotura o deformación de este bajo un esfuerzo axial.

#### **RESISTENCIA AL IMPACTO**

La resistencia al impacto de un material es una propiedad que hace referencia a su tenacidad. Es la resistencia de un material a romperse bajo el golpe o choque de una fuerza repentina exterior.

#### **RIGIDEZ**

Resistencia de un material a deformarse por acción de fuerzas exteriores.

#### **RIGIDEZ Y MÓDULO ESPECÍFICOS.**

Cuando se habla de una propiedad específica, como en el caso de la rigidez específica o la resistencia a tracción específica, se trata de esta magnitud dividido por la densidad o el peso. Esto es muy relevante en los composites, pues sus características mecánicas son aún más destacables en si se tiene en cuenta su peso.

#### **TEJIDO NO-TEJIDO**

Esta expresión proviene del inglés, “no-woven fabric” y hace referencia a las telas, paños o elementos en 2D, que no están formados por el enlazado de otras fibras más pequeñas, y por lo tanto presentan isotropía.

## ABREVIATURAS Y SIGLAS.

$\sigma$	Tensión.
$\rho$	densidad.
$\varepsilon$	Elongación.
$\nu$	Coefficiente de poisson.
<b>ASTM</b>	American society for testing and materials.
<b>CaCO<sub>3</sub></b>	Carbonato de calcio, aditivo.
<b>CAD</b>	Computer aided design.
<b>CAE</b>	Computer aided engineering.
<b>CAM</b>	Computer aided manufacturing.
<b>CF</b>	carbon fiber.
<b>CNC</b>	Control numérico por computadora.
<b>DOP</b>	Di-n-octilftalato, aditivo plastificante.
<b>E</b>	Módulo de elasticidad.
<b>GF</b>	Glass fiber.
<b>GPa</b>	Gigapascal, unidad de presión.
<b>IUPAC</b>	International Union of Pure and Applied Chemistry.
<b>J</b>	Julio, unidad de energía.
<b>MEKP</b>	Peróxido de metil-etil-cetona. Catalizador habitual.
<b>MPa</b>	Megapascal, unidad de presión.
<b>MUE</b>	Maquina universal de ensayos.
<b>N</b>	Newtons, unidad de fuerza.
<b>P3</b>	Marca comercial de plástico perforado para infusión.
<b>PP</b>	Polipropileno.
<b>PRFV</b>	Plástico reforzado con fibra de vidrio.
<b>RTM</b>	Resin transfer molding.
<b>SEM</b>	Scanning electron microscope.
<b>TiO<sub>2</sub></b>	Dióxido de titanio, aditivo.

<b><i>UTS</i></b>	Ultimate tensile strength, tipo de ensayo.
<b><i>VARI</i></b>	Vacuum aided resin infusion.
<b><i>IUPAC</i></b>	International Union of Pure and Applied Chemistry.

## I. ANTECEDENTES

### 1. Introducción a los materiales poliméricos

Los polímeros son una macro familia de materiales, que, junto a los metales y los materiales cerámicos, componen los tres grandes grupos de materiales en la ciencia y en la industria [1].

Según la IUPAC, un polímero es “una sustancia compuesta por macromoléculas, caracterizada por la repetición múltiple de una o más especies o grupos de átomos (unidades constitucionales) unidos a cada uno de los otros en cantidad suficiente para proporcionar una serie de propiedades que no varían marcadamente con la adición o sustracción de una o pocas unidades constitucionales” [2].

Por lo tanto, se entiende como polímero como un material cuya estructura representa una repetición de moléculas. Estas moléculas se denominan monómeros.

En muchas ocasiones, se utiliza el término “plásticos” para denominar los polímeros. Pero esta afirmación no es del todo acertada. Mientras que un polímero hace referencia a la sustancia a nivel químico y molecular, un plástico es un polímero industrial al que se le han añadido aditivos para conformar o variar sus propiedades.

**Plástico = polímero + aditivos.**

Estas moléculas que forman las estructuras poliméricas se unen entre sí por diferentes tipos de enlaces.

Enlaces intramoleculares: enlaces entre átomos de tipo covalente, que confieren una gran estabilidad a la molécula. Se consideran enlaces fuertes.

Enlaces intermoleculares: enlaces producidos por fuerzas electroestáticas como pueden ser fuerzas de van der Waals o puentes de hidrogeno. Estos suelen unir grandes cadenas moleculares. Se consideran enlaces débiles.

La estructura molecular de los polímeros varía en función de la subfamilia a la que pertenezcan.

Existen tres subfamilias de polímeros: Termoplásticos, termoestables y elastómeros.

## 1.1. Polímeros termoplásticos.

Son los polímeros más conocidos, con los que se fabrican la gran mayoría de productos de plástico en la industria. Estos polímeros se reblandecen y funden cuando se aumenta la temperatura, y cuando se enfría vuelven a su estado sólido. Es por esto por lo que estos polímeros pueden ser conformados varias veces, cambiando su geometría y adquiriendo nuevas formas. Además, el hecho de poderse fundir y conformar, permite que estos polímeros se puedan reciclar. Esto no ocurre con los termoestables y los elastómeros [3].

La estructura típica de un polímero termoplástico está formada por largas cadenas moleculares, en las que se repite un mismo patrón, el monómero.

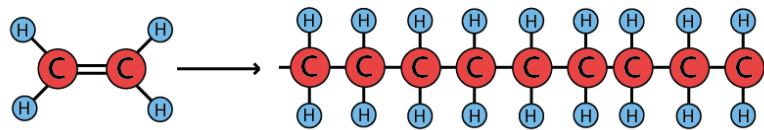


ILUSTRACIÓN 5: ESTRUCTURA DE CADENA POLIMÉRICA

Dentro de esta familia se encuentran polímeros ampliamente conocidos y utilizados, como son el Polietileno, el polipropileno, el PVC, el PET, el ABS o el policarbonato entre muchos otros.

En algunos termoplásticos, estas cadenas están desordenadas, y en otros, se ordenan. El grado de ordenamiento de las cadenas de un termoplástico se denomina grado de cristalinidad. De esta forma, se pueden observar dos tipos de estructura en función de su grado de cristalinidad.

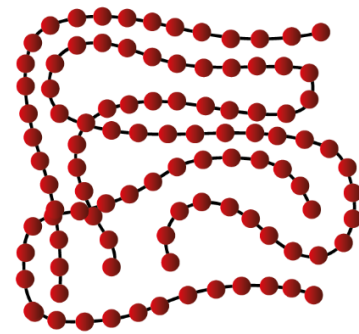


ILUSTRACIÓN 6: ESTRUCTURA POLÍMERO TERMOPLÁSTICOS

**Termoplásticos amorfos:** Aquellos cuyas cadenas están totalmente desordenadas.

**Termoplásticos semicristalinos:** Aquellos cuyas cadenas tienden a ordenarse. Generalmente, las cadenas tienden a ordenarse por fuerzas de van der Waals o por puentes de hidrógeno.

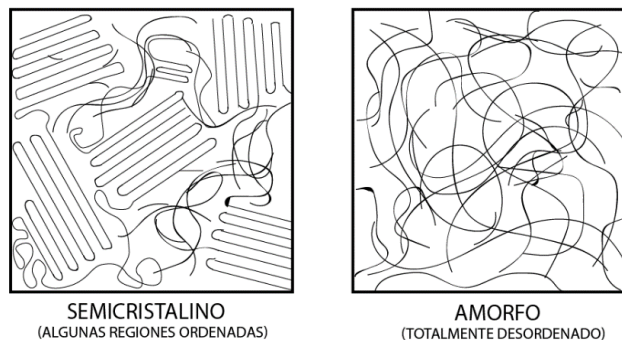


ILUSTRACIÓN 7: COMPARACIÓN ESTRUCTURA POLÍMERO SEMICRISTALINO Y AMORFO

## 1.2. Polímeros termoestables.

Los polímeros termoestables tienen estructuras de tipo reticular. Es decir, que su estructura se repite formando redes tridimensionales, fuertemente unidas por enlaces covalentes [4].

La principal característica de estos polímeros, en comparación con los termoplásticos, es que estos no se funden ni se disuelven. Si se aumenta la temperatura, llega un punto en que sus enlaces comienzan a romperse y el material se degrada [5].

Por otra parte, tienen muy buenas propiedades mecánicas y resistencia térmica.

Los polímeros termoestables son los principales materiales que funcionan como matriz en el campo de los materiales compuestos. Entre ellos se encuentran las resinas de poliéster o de epoxi.

Generalmente en la industria, los materiales termoestables se suministran en un estado de pre-polímero, dividido en dos componentes líquidos. Uno contiene los agentes de curado, endurecedores y plastificantes, y otro tiene materiales de relleno y reforzantes [6].

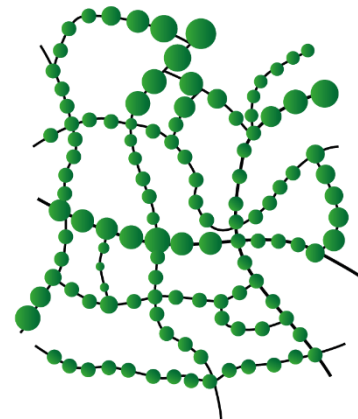


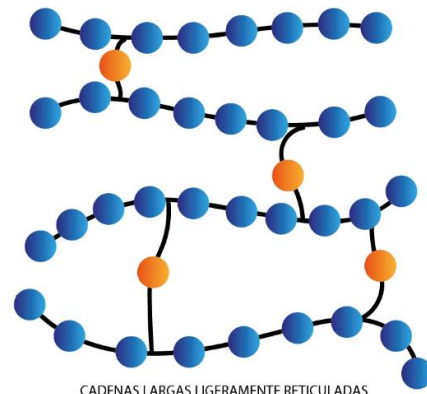
ILUSTRACIÓN 8: ESTRUCTURA POLÍMERO TERMOESTABLES

## 1.3. Polímeros elastómeros.

Los elastómeros son la tercera gran familia de los polímeros. La principal característica de estos materiales es su flexibilidad, es decir, su elevada deformabilidad reversible, así como su gran tenacidad [7].

Si los termoplásticos estaban compuestos por cadenas lineales, y los termoestables por cadenas entrecruzadas, los elastómeros están formados por cadenas lineales ligeramente entrecruzadas entre ellas. Este entrecruzamiento puede ser permanente (enlaces químicos), o reversible (enlaces físicos).

Este entrecruzamiento generalmente se lleva a cabo mediante un proceso de vulcanización. Este proceso, descubierto mediante una serendipia, consiste en la transformación de un material relativamente elástico-plástico en un material altamente elástico, mediante calor y agentes vulcanizantes. Los agentes vulcanizantes pueden ser varios, siendo el azufre el más utilizado.



CADENAS LARGAS LIGERAMENTE RETICULADAS

ILUSTRACIÓN 9: ESTRUCTURA POLÍMEROS ELASTÓMEROS

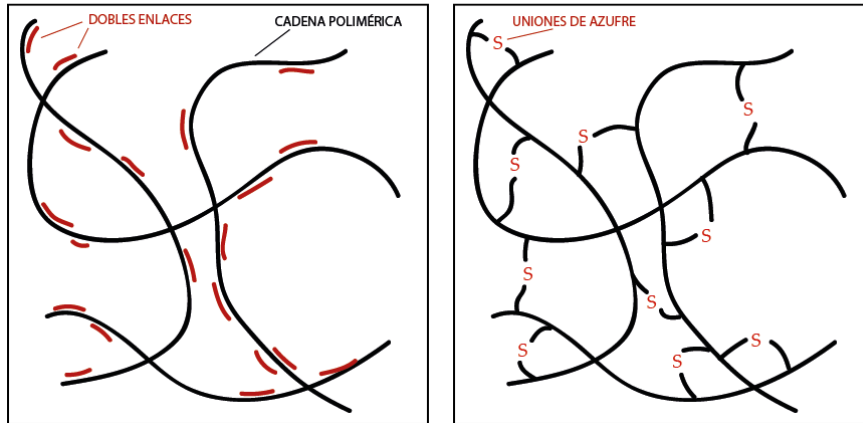


ILUSTRACIÓN 10: PROCESO VULCANIZACIÓN ELASTÓMEROS

## 2. Introducción a los materiales compuestos

Se conoce como materiales compuestos a los materiales conformados por dos o más materiales diferentes, buscando conseguir que las propiedades del compuesto sean mejores que las de los componentes por separado [8].

El desarrollo y el estudio de los materiales compuestos (también nombrados composites, del inglés), surge de la búsqueda de materiales con mejores características, principalmente físico-mecánicas, como la rigidez o la resistencia. Todo esto disminuyendo considerablemente el peso, y con ello el coste [9].

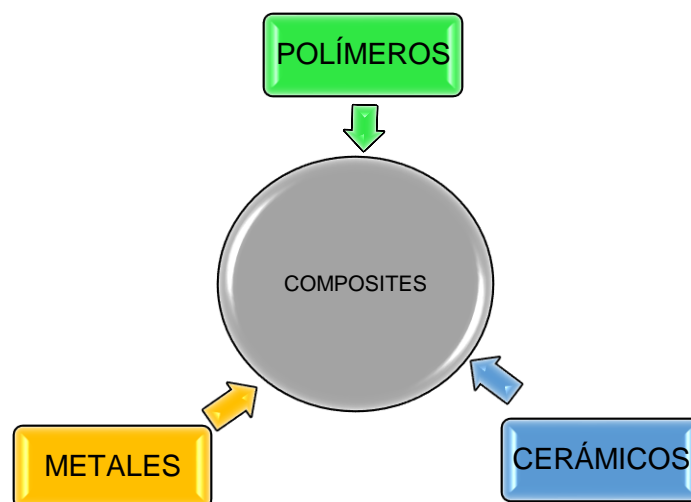


ILUSTRACIÓN 11: DIAGRAMA CLASIFICACIÓN DE LOS COMPOSITES

Esta combinación puede ser a escala macro, micro e incluso nano.

Los materiales que componen un material compuesto pueden ser de cualquier forma y naturaleza química, pero no pueden ser solubles ni miscibles entre sí. En la siguiente tabla (tabla 1) se exponen las ventajas e inconvenientes que presentan los materiales compuestos [9].

TABLA 1. VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LOS COMPOSITES [9]

<b>PRINCIPALES VENTAJAS DE LOS MATERIALES COMPUESTOS</b>	<b>PRINCIPALES INCONVENIENTES DE LOS MATERIALES COMPUESTOS</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• Resistencia y rigidez elevadas.</li><li>• Bajo peso.</li><li>• Resistencia a la corrosión.</li><li>• Resistencia a la degradación.</li><li>• Flexibilidad de diseño.</li><li>• Durabilidad.</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Alto coste de producción.</li><li>• Ensayos no destructivos difíciles.</li><li>• Necesidad operarios cualificados.</li><li>• Baja resistencia a la temperatura.</li><li>• Reciclabilidad baja.</li></ul>

Aunque cualquier combinación de materiales es considerada material compuesto, en la industria, generalmente, son los compuestos de una matriz polimérica y un refuerzo.

La matriz polimérica es, o bien termoplástica, o termoestable. La más empleada, que ocupa aproximadamente un 85% de la producción en la industria, es la matriz termoestable, frente a un 15% de uso de la matriz termoplástica.

Como refuerzo existen multitud de componentes, que pueden tener diferentes morfologías. Los refuerzos más utilizados en la industria son en forma de fibras. Las fibras más utilizadas son la fibra de vidrio, la fibra de carbono y la fibra de aramida, las cuales se detallan en el punto siguiente.





ILUSTRACIÓN 12: EJEMPLO DE EMBARCACIONES TECNOLÓGICAMENTE AVANZADAS -  
WWW.EXPANSION.COM/NAUTA360

Hoy en día los composites de matriz termoestable reforzados con fibras se encuentran en muchos sectores de la industria, especialmente aquellas que requieren sus excelentes propiedades:

- Industria aeroespacial.
- Industria del automóvil.
- Industria naval.
- Industria del deporte.
- Construcción.

Especial hincapié se puede hacer en la industria aeronáutica y aeroespacial, donde los composites se han introducido en la producción, y es muy difícil sustituirlos.

También en la industria naval, que es el campo de estudio del presente trabajo, los composites están muy extendidos. Prácticamente el 100% de las embarcaciones de recreo se fabrican hoy en día con materiales compuestos de resina termoestable reforzado con fibra de vidrio [11].

También en el sector de los deportes, donde cada vez se requieren las mejores propiedades y el menor peso posible.

Dentro de los composites de matriz termoestable y refuerzo de fibra se pueden encontrar varios tipos, en función de la combinación de materiales y la morfología de las fibras.

En la tabla 2, se observa las resinas y fibras más utilizadas:



ILUSTRACIÓN 13: EJEMPLO DE TRANSBORDADOR ESPACIAL  
FABRICADO CON COMPOSITES -  
WWW.ESA.INT

TABLA 2. PRINCIPALES REFUERZOS Y MATRICES.

REFUERZOS	MATRICES
Fibra de vidrio	Resinas fenólicas
fibra de carbono	Resinas poliéster
fibra de aramida	Resinas viniléster
Fibra de boro	Resinas epoxi
Fibras naturales	Resinas Poliuretano
Fibras metálicas	
Fibras cerámicas	

## 2.1. Refuerzos.

La fibra es el refuerzo dentro de una estructura de composite. Cuando se combina con una resina, se combinan las propiedades y se forma un material compuesto.

Existen varios tipos de fibra, como se ha detallado con anterioridad. En la industria las más utilizadas son la fibra de vidrio, la fibra de carbono y la fibra de aramida. Cada vez más se empiezan a utilizar las fibras de origen vegetal.

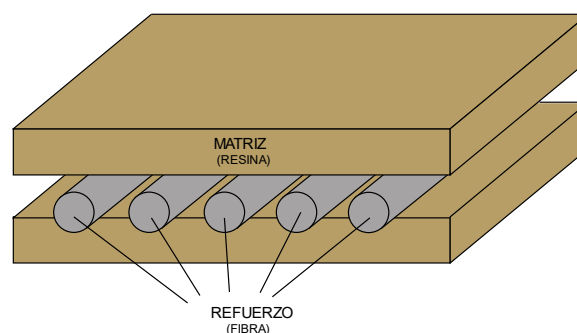


ILUSTRACIÓN 14: ESQUEMA DISPOSICIÓN FIBRAS Y MATRIZ

En la tabla 3 se pueden observar algunas propiedades de los tipos de fibras más utilizados en la industria, así como algunos metales para poder compararlos. Si comparamos la rigidez de los materiales, existen materiales con un módulo elástico más elevado que los metales, como lo son la fibra de carbono, la fibra de aramida o la fibra de boro.

Las excelentes propiedades de los composites son mucho más relevantes si se comparan junto a su densidad o peso específico. De esta forma, se observa que si se divide el módulo de elasticidad por su peso específico (o densidad), es más alto en los composites. Esta magnitud se conoce como rigidez específica o módulo específico, y en los materiales compuestos por fibra y matriz termoestable es muy elevado [12].

TABLA 3. PROPIEDADES DE LAS FIBRAS EN COMPARACIÓN CON OTROS MATERIALES.

PROPIEDADES DE LAS FIBRAS A 20°C			
MATERIAL	PESO ESPECÍFICO (kN/m <sup>3</sup> )	MÓDULO DE ELASTICIDAD (Tracción) (Gpa)	$\frac{E}{Y}$ (Mm)
Aluminio	26,3	73	2,8
Acero	76,6	210	2,7
Fibra de vidrio-E	25	72	2,9
Fibra de vidrio-S	24,4	86	3,5
Carbono I	19,1	390	20
Carbono II	17,2	250	15
Kevlar 29	14,2	83	5,8
Kevlar 49	14,2	125	8,8
Boro	25,2	400	16

## 2.1.1. Tipos de fibras empleadas.

### 2.1.1.1. Fibra de vidrio

Las fibras de vidrio están compuestas principalmente de Sílice SiO<sub>2</sub> con algunas adiciones como el óxido de calcio, boro, sodio, hierro o aluminio [13]. Existen varios tipos de fibra de vidrio. En función de sus propiedades se pueden clasificar en varios grupos. Los más utilizados se muestran en la tabla 4:

TABLA 4. TIPOS DE FIBRA DE VIDRIO.

<b>Fibra de vidrio E</b>	Electric	Buenas propiedades eléctricas. También buenas propiedades de resistencia, rigidez y desgaste.
<b>Fibra de vidrio C</b>	Chemical	Buenas propiedades de resistencia a la corrosión. Coste más elevado y peores propiedades resistentes.
<b>Fibra de vidrio S</b>	Stiffness and Strength	Buenas propiedades de rigidez y resistencia.

El proceso de obtención de la fibra de vidrio se fundamenta en fundir el material, generalmente en forma de arena o granulado, para hacerlo pasar por unos orificios del diámetro requerido, mediante gravedad [14].

De esta forma, para obtener el diámetro de fibra requerido, los agujeros deberán estar acorde. Esto suele ser entre 8 y 15  $\mu\text{m}$ . Posteriormente, se enfrían y obtienen las dimensiones finales. A continuación, se les aplica un proceso de ensimaje (*sizing*), para favorecer la unión con la matriz. Por último, se enrollan en una bobina para su almacenaje y distribución. A continuación, en la imagen 15 se puede observar el esquema del proceso de fabricación de las fibras de vidrio:

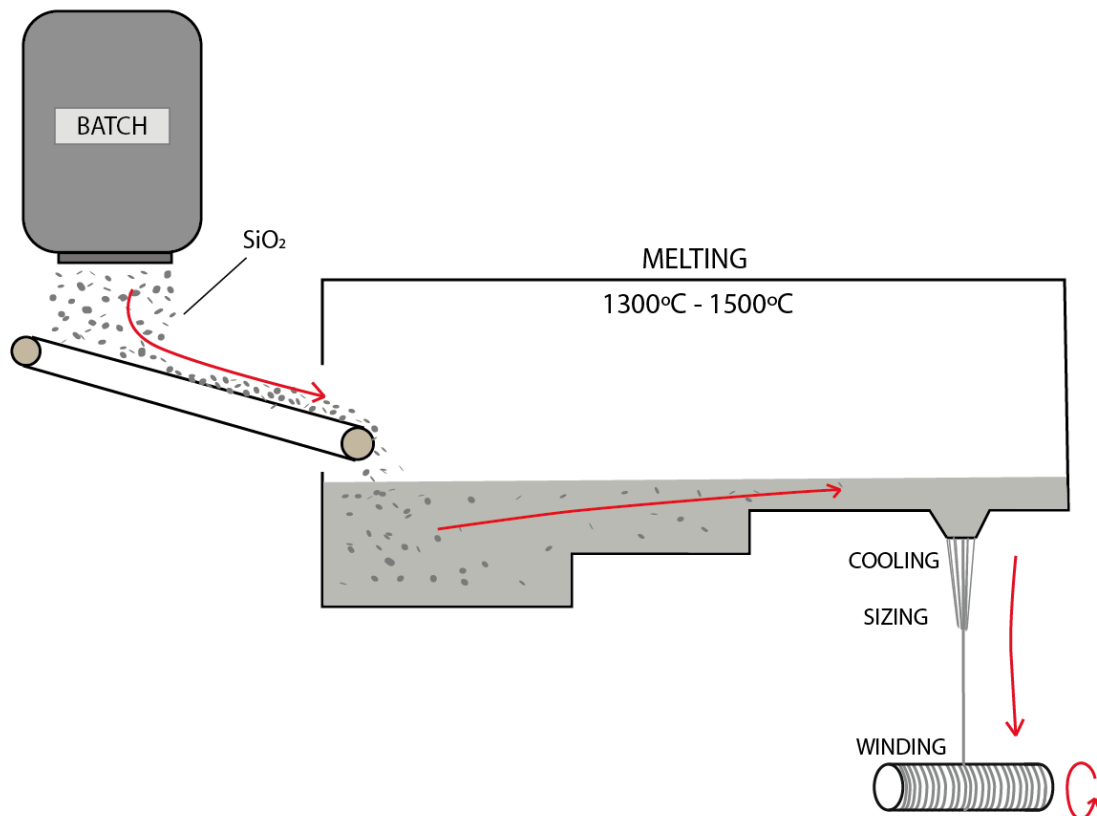


ILUSTRACIÓN 15: PROCESO DE OBTENCIÓN DE FIBRAS DE VIDRIO

La fibra de vidrio es el refuerzo más utilizado en la industria de los materiales compuestos, debido a su precio y a su capacidad y versatilidad en el diseño. Existen multitud de procesos industriales para fabricar con fibra de vidrio, en función de los requerimientos del producto. Generalmente, la resina más utilizada junto a la fibra de vidrio es la resina de poliéster, seguida de la resina vinililéster

El composite con refuerzo de fibra de vidrio es ampliamente utilizado en varios sectores, como en la fabricación de embarcaciones, depósitos, piscinas, material deportivo, automoción, y un largo etcétera. A continuación, se muestran algunos ejemplos de aplicaciones de la fibra de vidrio en la industria [15].







ILUSTRACIÓN 16: PRODUCTOS FABRICADOS CON FIBRA DE VIDRIO (A – PISCINA - PISCINASDEFIBRA.COM), (B - CASCO DE EMBARCACIÓN – TOPBARCOS.COM), (C - CARROCERÍA DE AUTOBÚS - UNVI.ES), (D - DEPÓSITO CONTENEDOR – POLIESTERDEPOSUR.ES)

### 2.1.1.2. Fibra de carbono

La fibra de carbono es una fibra con excelentes propiedades mecánicas que procede de la carbonización del polímero Poliacrilo nitrilo (PAN). Su microestructura está formada por una red cristalina de átomos de carbono. Los filamentos suelen tener un diámetro de unos 7 u 8  $\mu\text{m}$ . Su uso en la industria de los composites representa un 6% de la producción total [16]. Existen dos tipos básicos de fibra de carbono utilizado en la industria, los cuales se muestran en la tabla 5:

TABLA 5. DIFERENCIAS ENTRE LA FIBRA DE CARBONO DE TIPO I Y II.

<b>Fibra de carbono Tipo I</b>	Rigidez 	Resistencia 
<b>Fibra de carbono Tipo II</b>	Rigidez 	Resistencia 

Por sus excelentes propiedades mecánicas, el composite con refuerzo de fibra de carbono está sustituyendo cada vez más a los metales en la industria. Comparado con el acero, presenta una mayor rigidez, más aún si se tiene en cuenta su bajo peso [17]. Generalmente, la fibra de carbono se combina con las resinas epóxicas, debido a su compatibilidad y características mecánicas.

También se pueden obtener fibras de carbono del crudo de petróleo, siendo sus propiedades de resistencia inferiores que las procedentes de PAN.

TABLA 6. DIFERENCIA DE PROPIEDADES EN FUNCIÓN DE LA MATERIA PRIMA.

ORIGEN FIBRA DE CARBONO		
<b>PETRÓLEO</b>	Coste ↓	Resistencia ↓
<b>PAN</b>	Coste ↑	Resistencia ↑

### *Poli acrílo nitrilo (pan)*

El poliacrilonitrilo es un polímero que por sí solo no presenta muchas aplicaciones. No obstante, es el precursor de algunos polímeros importantes. Este se produce a partir del propileno junto al amoníaco [18].

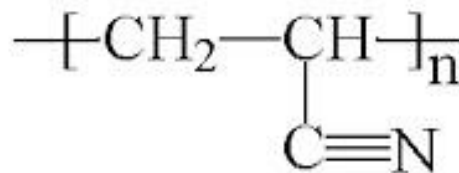


ILUSTRACIÓN 17: ESTRUCTURA PAN

Uno de los usos más utilizados, es cuando se combina con el estireno, dando lugar a poliestireno-acrilonitrilo (SAN), o más todavía, cuando este se combina con el butadieno, formando el famoso Poliacrilonitrilo-estireno-butadieno (ABS), el cual está considerado un polímero técnico debido a sus altas prestaciones.

En lo que incumbe a el presente trabajo, el PAN es el antecedente químico de las fibras de carbono de alta calidad.

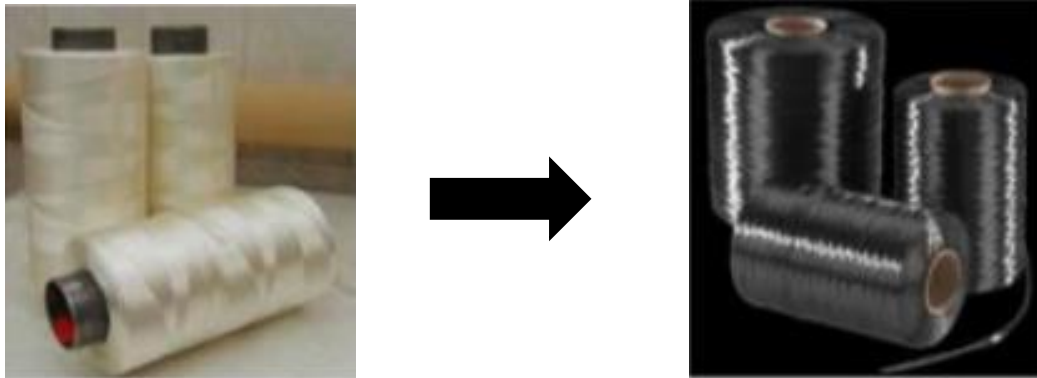


ILUSTRACIÓN 18: BOBINA DE PAN → BOBINA DE FIBRA DE CARBONO

### Obtención fibra de carbono

Para obtener las fibras de carbono, como se ha comentado con anterioridad, se carbonizan las fibras de PAN o de PITCH de petróleo.

En primer lugar, se parte de una bobina de fibras de PAN o de la fundición del crudo de petróleo, y se someten a un proceso de oxidación a unos 200-300°. Posteriormente se someten a un proceso de carbonización, donde se eleva la temperatura a 1500-2000 °C en ausencia de oxígeno. Las fibras cuyo proceso llega hasta aquí son fibras de resistencia media. Para conseguir fibras con una resistencia alta, es necesario someterla a uno o dos procesos de carbonización adicionales. Por último, si se quiere obtener fibras de alto módulo, se somete a un último proceso de grafitización, en el cual se eleva la temperatura a 2500-3000°C.

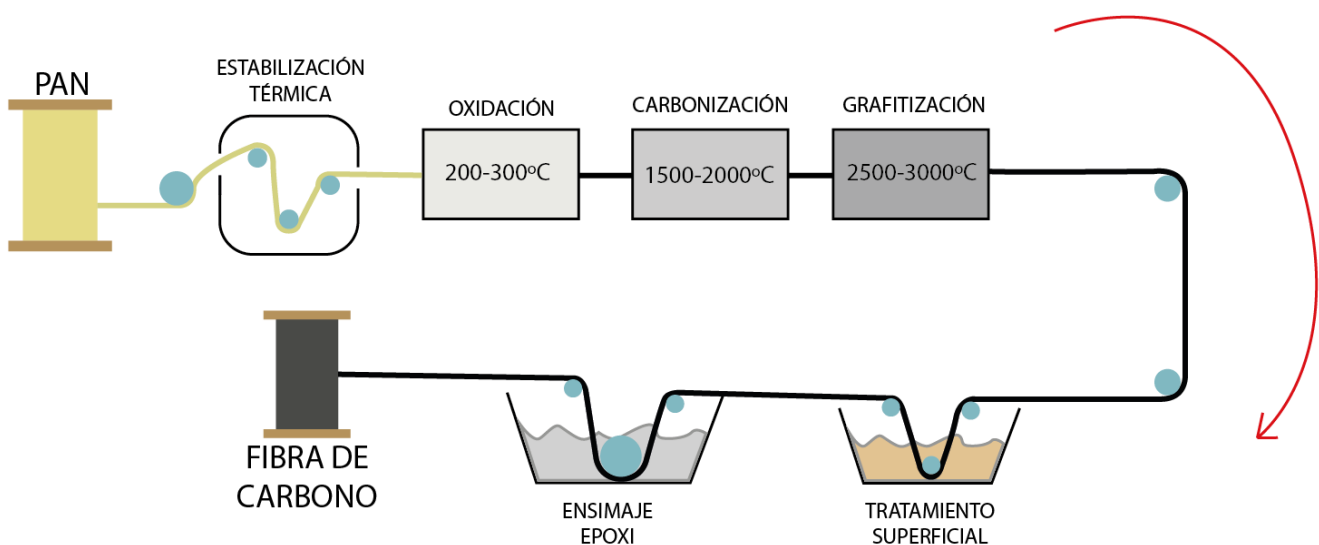


ILUSTRACIÓN 19: PROCESO DE OBTENCIÓN DE FIBRA DE CARBONO

Por sus características, la fibra de carbono se expande cada vez más por todos los sectores de la industria. Especialmente, se apuesta por este material en aplicaciones muy técnicas, que requieren unas propiedades mecánicas excelentes.

Entre las aplicaciones donde se utiliza, destacan la industria aeronáutica y aeroespacial por encima de todas. También se utiliza en material deportivo de alto nivel, barcos de regatas, depósitos a presión, industria de la energía, industria de la automoción de alta calidad y construcción [19].



ILUSTRACIÓN 20: PRODUCTOS FABRICADOS CON FIBRA DE CARBONO. (A - SATÉLITE ESPACIAL – ESA.ES), (B - AVIÓN DE PASAJEROS – AIRBUS.COM), (C – BICICLETA - HIBRIDOSYELECTRICOS.COM) D) (PALA DE PÁDEL – PADELLIFE.COM)

#### 2.1.1.1. Fibra de polipropileno (Innegra).

Las fibras de polipropileno (PP) son candidatas atractivas como componentes de refuerzo para materiales compuestos de bajo costo debido a su bajo costo, resistencia de fibra relativamente alta y baja densidad. En concreto, estas fibras se fabrican con filamentos extruidos de polipropileno de alto peso molecular (HMPP). [20]

Esta fibra se ideó como refuerzo para composites en 2004, y fue comercializada en 2011 bajo el nombre comercial “Innegra Technologies”. En la industria se encuentra también extendido el nombre Innegra para nombrar al refuerzo de polipropileno en general, como también ocurre con la fibra de aramida y el famoso Kevlar de Dupont.



La fibra Innegra o de polipropileno de alto peso molecular es una fibra de altas prestaciones empleada en aplicaciones textiles y de composites que puede ser convertida en muchos tipos de refuerzos distintos [21].

Sus principales características son su baja densidad, resistencia al envejecimiento, baja probabilidad de roturas catastróficas, ductilidad, resistencia a impacto, reducción de vibraciones, aislamiento eléctrico, baja elongación, alta cristalinidad, hidrofobia y es reciclable. Este último punto es de gran importancia, sobre todo si se compara con las fibras de refuerzo que más se emplean en la industria.

Sus propiedades de resistencia mecánica no pueden competir con las fibras industriales de carbono o vidrio, pero al tener una mayor ductilidad, su resistencia al impacto es mayor.

Por último, otro de los factores, sino el más importante, que juega un papel fundamental en el diseño y fabricación de materiales compuestos, es el precio. El precio de las fibras de polipropileno es muy inferior a las fibras competidoras [22]



ILUSTRACIÓN 21. COMPARACIÓN DE PIEZA CARBONO - ARAMIDA (ARRIBA) Y CARBONO - POLIPROPILENO (ABAJO) - [WWW.INTEREMPRESAS.NET/AERONAUTICA](http://WWW.INTEREMPRESAS.NET/AERONAUTICA).

### 2.1.2. Formato de los refuerzos

En la industria podemos encontrar la materia prima del refuerzo de formas muy distintas. En función de las necesidades y del diseño, el fabricante de composites escogerá trabajar con un tipo u otro.

#### *Título.*

El título es una magnitud que hace referencia a la densidad lineal de un hilo. Este término es ampliamente utilizado en la industria para conocer la densidad en bobinas y fibras dispuestas en un único filamento. Es una relación entre el peso y la longitud. Generalmente se mide en tex.

$$1 \text{ tex} = 1 \text{ g/km}$$

### Gramaje.

El gramaje es la densidad superficial y se mide en gramos por metro cuadrado. Esta magnitud es ampliamente utilizada para conocer las propiedades de densidad de un tejido o mat.

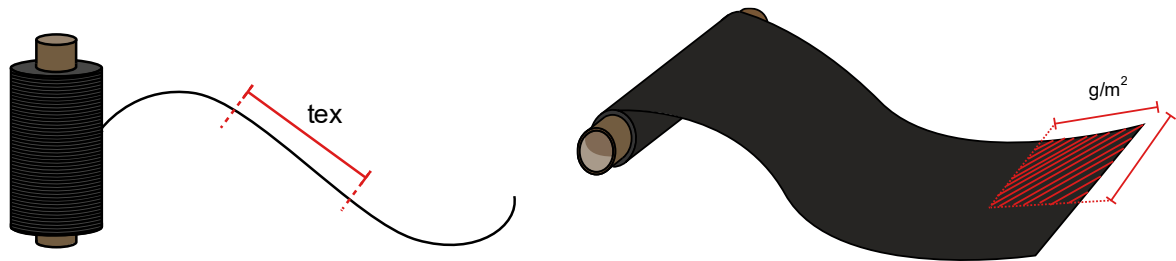


ILUSTRACIÓN 22: DIAGRAMA TEX Y GRAMAJE

A continuación, se van a detallar las formas más corrientes en las que podemos encontrar los refuerzos en la industria.

### Roving

El roving, o monofilamento, es un único conjunto de fibras de larga longitud que viene enrollado en bobinas.

Este modelo de fibra es muy útil para algunos métodos de fabricación como el filament winding, braiding o pultrusión.

Hay bobinas de todo tipo de fibras, de varias densidades y con diferentes ensimajes.

Las densidades en este tipo de fibra suelen estar entre 600 y 4800 tex.



ILUSTRACIÓN 23: BOBINA (ROVING) DE FIBRA DE CARBONO

### Tejido

El tejido es la disposición de la fibra con mejores características mecánicas y para realizar piezas con mejores propiedades físicas y con mayor calidad. En los tejidos existen los conceptos de la industria textil de trama y urdimbre. Esto hace referencia a que generalmente, los tejidos tienen las fibras orientadas en una o dos direcciones. Esto hace a los tejidos altamente anisótropos, es decir que sus propiedades varían en función de su orientación. En concreto son materiales ortótropos, es decir que tienen dos direcciones principales.

### *Unidireccional*

En el tejido unidireccional, las fibras están dispuestas únicamente en una dirección, paralelas entre ellas. Para no descomponerse, suelen estar unidas con algún ligante químico o con alguna unión mecánica, como un hilo que las sujeta en su sitio.

El tejido unidireccional tiene propiedades excepcionales, prácticamente al 100% de las propiedades de la fibra teórica, pero únicamente en la dirección longitudinal de la fibra, llamada dirección 1, pues en la dirección perpendicular a la fibra (dirección 2), prácticamente las propiedades mecánicas son las de la resina, que es muy inferior a la de la fibra.

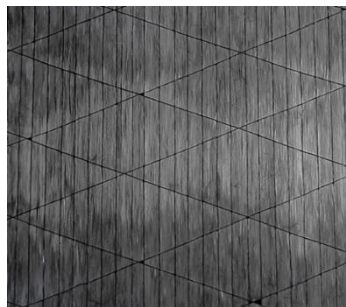


ILUSTRACIÓN 24: TEJIDO UNIDIRECCIONAL  
FIBRA DE CARBONO

Muchas veces se utiliza el tejido unidireccional, combinándolo mediante varias láminas, y orientando cada una en una dirección, con tal de reforzar el laminado en otras direcciones.

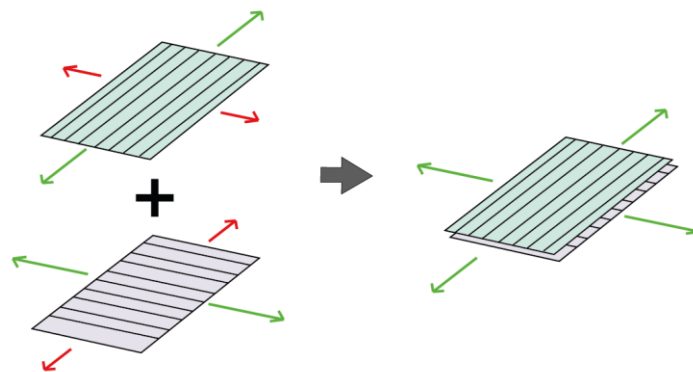


ILUSTRACIÓN 25: ESQUEMA COMBINACIÓN TEJIDOS UNIDIRECCIONALES

### *Multiaxial*

El tejido multiaxial, como su nombre indica, consta de un tejido con la fibra dispuesta en varios ejes.

Lo más habitual es encontrar tejidos con dos direcciones, perpendiculares entre ellas. Aunque también se pueden encontrar tejidos en direcciones diferentes.

Existen dos tipos fundamentales de tejidos multiaxiales, los que están tejidos entrelazando sus filamentos entre ellos mediante algún método de calada, o los que tienen las fibras unas sobre otras sin entrecruzarse.

### TEJIDOS MULTIAXIALES

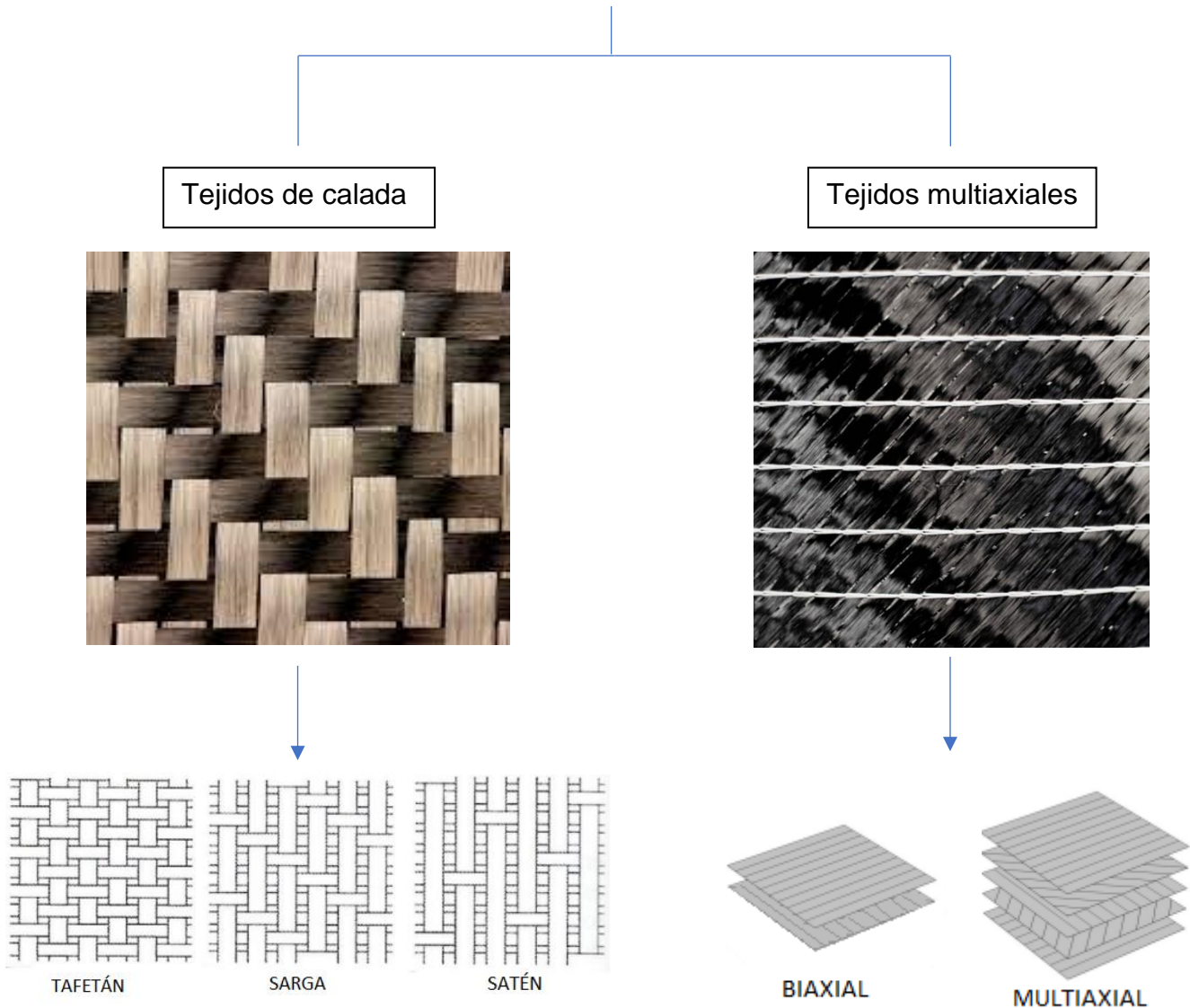


ILUSTRACIÓN 26. ESQUEMA DISPOSICIÓN FILAMENTOS EN LOS TEJIDOS

En términos de propiedades mecánicas, el tejido de calada tiene menor rigidez que el multiaxial, debido a que los filamentos no están totalmente rectos y paralelos entre ellos, sino que van ondeando para entrelazarse. Esto hace que, frente a un esfuerzo axial, el tejido de calada se deforme, y estire sus filamentos.

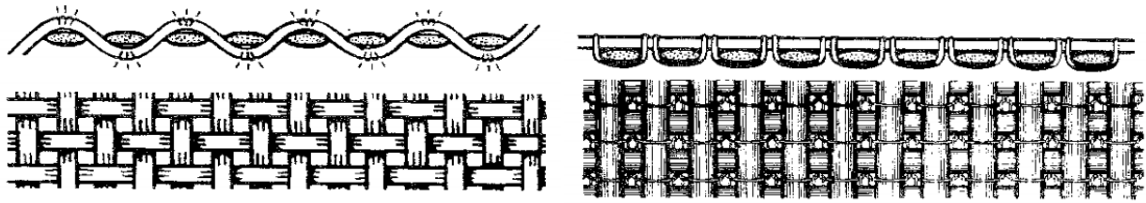


ILUSTRACIÓN 27: DISPOSICIÓN Y ESTRUCTURA DE LOS FILAMENTOS

### **Mat**

El mat es una lámina en forma de felpudo o filamentos dispuestos al azar que crean una superficie homogénea y cuyo comportamiento se puede considerar isotrópico en el plano de la lámina. Existen varios tipos de mat en función de su gramaje y longitud de las fibras. Generalmente, el mat más encontrado en la industria está formado con fibras de vidrio, aunque sí que existe mat de fibra de carbono u otras fibras.

## 2.2. Matriz.

La matriz es el segundo componente, que, junto al refuerzo, compone un material compuesto. La matriz es el material que rodea el refuerzo, embebiéndolo y creando una geometría. Generalmente en la industria de los polímeros reforzados, las matrices pueden ser de polímero termoplástico o termoestable. Siendo las matrices de polímero termoestable las más utilizadas, por sus mejores propiedades resistentes y térmicas.

Como cualquier polímero termoestable, las resinas de este tipo poseen fuerzas de unión entre las macromoléculas muy intensas. Las moléculas crean una estructura tridimensional reticulada. Esto hace que el polímero tenga mejores propiedades térmicas y mecánicas, pero por el contrario partida, las moléculas se romperán antes de fundirse si se eleva la temperatura. Esto quiere decir que un polímero termoestable no se funde, sino que se degrada al calentarse.

Este fenómeno complica mucho el reciclaje del composite con termoestable, y es por esto por lo que cada vez más surge la necesidad de crear materiales compuestos competentes con matriz termoplástica. Algunas de las resinas termoplásticas que se utilizan en la industria son a base de polipropileno, poliamida, policarbonato o polímeros acrílicos entre otros.

En el presente proyecto, se dejarán de lado las resinas termoplásticas para centrarse en las resinas termoestables. Estas últimas son las que más se utilizan en el sector industrial. Estas pueden ser resinas fenólicas, resinas de poliéster, viniléster, resinas de uretano y resinas epoxi. A continuación, se expone las principales características y propiedades de las resinas de epoxi, las cuales se emplean en el presente proyecto.

### 2.2.1. Resinas de epoxi

El epoxi es el material de matriz que tiene mejores propiedades mecánicas. Es por esto por lo que se utilizan en piezas de altas prestaciones en ingeniería junto a la fibra de carbono o aramida. [24]

Además de sus propiedades mecánicas, las resinas epoxi tienen una buena capacidad de adhesión, lo que permite producir composites con un alto contenido en fibra, lo cual produce materiales con mejores propiedades. Suele fabricarse a partir de dos componentes liquido-viscosos, nombrados A y B. Uniendo estos dos componentes comienza la reacción de curado.

El componente A se nombra comúnmente como Resina, se considera prepolímero, y se encuentra en un estado líquido, más o menos viscoso. Es un componente reactivo que contiene dos o más grupos oxidanos. El principal proceso para su obtención es la reacción entre un compuesto que tiene un hidrógeno activo y la epiclorhidrina, seguida de una deshidrohalogenación, y también se pueden preparar mediante la reacción de olefinas con peroxiácidos orgánicos. [25].

Por otra parte el componente B contienen las sustancias que reaccionan con las bases epoxi. Unos reaccionan con sus grupos epoxi, otros con los grupos hidroxilo presentes en las bases y finalmente se encuentran los iniciadores catiónicos y amónicos (endurecedores catalíticos) que actúan como iniciadores de la homopolimerización de las bases epoxi.

El proceso de curado comienza al mezclar ambos componentes en la medida correcta indicada por el fabricante. La reacción de entrecruzado es exotérmica, y algunos parámetros como la presión o la temperatura influyen directamente sobre la reacción.

El resultado final tras el proceso de entrecruzamiento es un material frágil y altamente resistente. Tiene también buenas propiedades eléctricas, químicas y térmicas, y muestran una baja contracción durante el curado. Esto hace que la geometría sea muy ajustada. Por sus características y su combinación con el carbono, la resina epoxi es ampliamente utilizada en el sector aeronáutico y aeroespacial, deportivo, náutico y automoción.



**ILUSTRACIÓN 28: IZQ. AERONAVE FABRICADA CON EPOXI. CENTRO. DOS COMPONENTES DEL EPOXI EN FORMA DE RESINA PREPOLÍMERO. DER. AUTOMÓVILES DE COMPETICIÓN FABRICADOS CON EPOXI.**

### 2.3. propiedades mecánicas de los composites

Para entender las propiedades, naturaleza y funcionamiento de los composites, es fundamental conocer las propiedades de sus componentes por separado, y, sobre todo, como se combinan entre sí. Para eso, se deben comparar ambos componentes, para conocer cuál es la función de cada uno dentro de un material compuesto.

En la gráfica 1 se puede observar la comparación entre la tensión y la deformación, y el módulo elástico de la fibra de vidrio y carbono, resina de poliéster y epoxi, comparado con los metales más utilizados en la industria y también el polipropileno [23].

TABLA 7. MÓDULOS ELÁSTICOS DE FIBRAS, RESINAS Y METALES EMPLEADOS EN LA INDUSTRIA

	E (Gpa)	UTS (Mpa)
Fibra carbono	390	4100
Fibra vidrio	86	3400
Acero	210	4000
Aluminio	73	620
Resina poliéster	3	55
Resina epoxi	5	70
Polipropileno	1,5	50

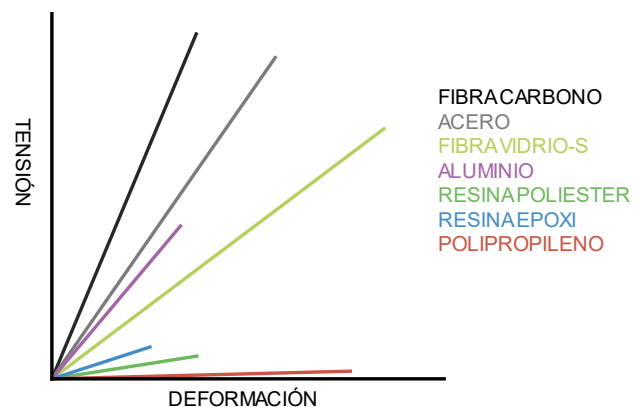


GRÁFICO 1: COMPARACIÓN MÓDULOS DIFERENTES MATERIALES

Como se puede observar a simple vista, la fibra de carbono y la fibra de vidrio resisten altas tensiones, su máxima tensión de rotura es pareja a la del acero, y está muy por encima del aluminio. En la gráfica se puede apreciar que solo se tiene en cuenta la parte de la deformación elástica. Esto es porque las fibras prácticamente no tienen deformación plástica.

Por otra parte, las resinas de epoxi y poliéster sí que tienen deformación elástica por sí solas, pero en un material compuesto, el material que gobierna es la fibra. Por lo tanto, si se alcanza el límite elástico de la fibra, rompe el material, y aun no se ha llegado al límite elástico de la resina.

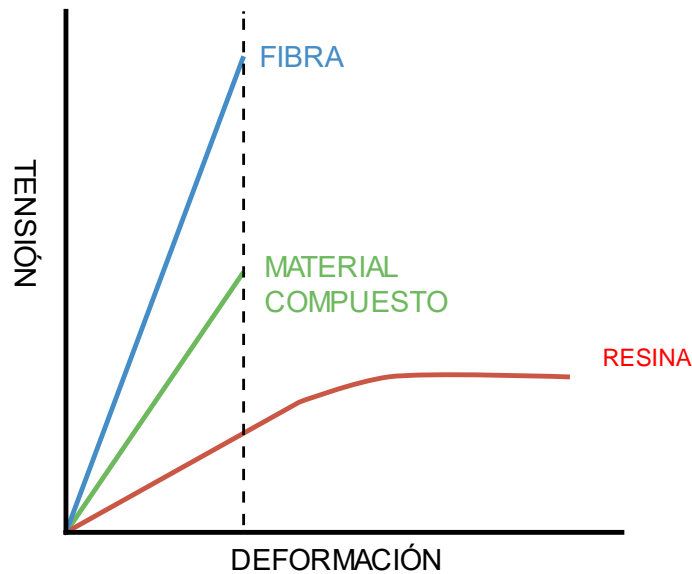


GRÁFICO 2: TENSIÓN-DEFORMACIÓN FIBRA, RESINA Y COMPOSITE

En el gráfico anterior se puede observar como el límite elástico del composite viene marcado por la fibra. Por otro lado, la resina entra en una fase de deformación plástica.

En función de la calidad del composite, del porcentaje de resina y de la orientación de las fibras, se puede conseguir que el módulo y la resistencia mecánica se parezcan más a las de las fibras que a las de la resina.

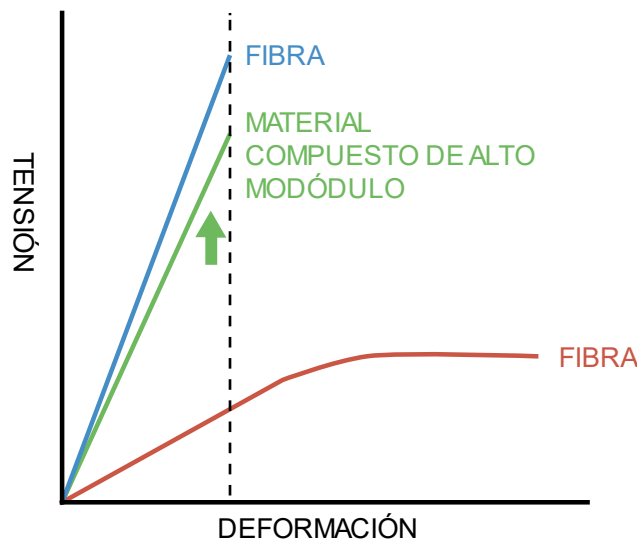


GRÁFICO 3: TENSIÓN-DEFORMACIÓN FIBRA, RESINA Y COMPOSITE DE ALTO MÓDULO



### 2.3.1. Isotropía y anisotropía de los composites.

Una de las propiedades más relevantes de los materiales compuestos es la orientación de los refuerzos que los componen. Las propiedades mecánicas van a depender esta orientación. Para realizar este análisis en los composites, ya que son principalmente laminados donde el espesor es despreciable frente al resto de dimensiones, el eje ortogonal a la superficie del laminado no se tiene en cuenta en los cálculos [26].

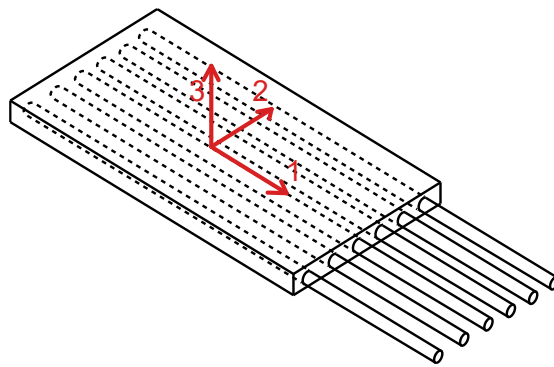


ILUSTRACIÓN 29: EJES LOCALES LAMINADO

En un **material isótropo**, las propiedades mecánicas son iguales en todas las direcciones del plano del laminado. Esto puede darse cuando las fibras son muy cortas, o directamente, el refuerzo lo componen partículas. También ocurre con los mat, en los cuales, la posición de la fibra es aleatoria [27].

Por otro lado, en un **material anisótropo**, las propiedades estructurales no son iguales en cualquier dirección. Esto suele pasar siempre que se tiene un laminado con tejidos, donde la fibra está orientada.

Generalmente, en un material con fibras unidireccionales, se establecen dos ejes locales en el material laminado, en función de la orientación de las fibras. De esta forma, se determina que el eje 1 es el paralelo a la orientación de las fibras, y el eje 2 el perpendicular al 1.

En los dos casos de abajo, podemos observar como en el caso B, no importa la dirección del material, porque se considera isótropo. Por otro lado, se puede ver que en el caso A sí que influye en gran medida la dirección.

En el caso A, la fibra trabaja de manera unidireccional en la dirección 1, mientras que en la dirección 2 solo trabaja la matriz.

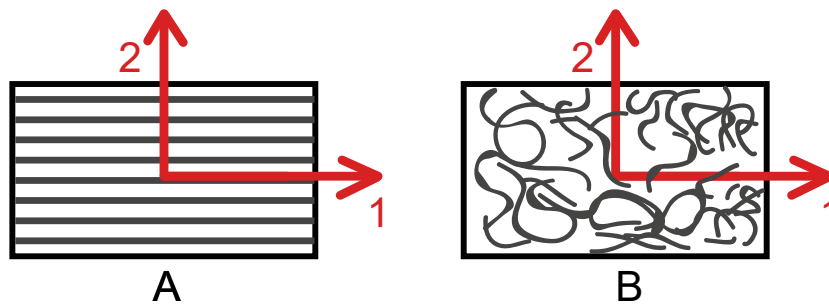


ILUSTRACIÓN 30: EJES LOCALES: A) MATERIAL ANISOTRÓPICO B) MATERIAL ISOTRÓPICO

En el caso A, el material va a tener mejores propiedades mecánicas en la dirección 1, donde el módulo de elasticidad y la resistencia máxima van a ser prácticamente las de la fibra. Mientras que en la dirección 2, el módulo será el de la resina, que es muy inferior.

### 2.3.2. la regla de las mezclas

La regla de las mezclas sirve para realizar un cálculo rápido y aproximado de las propiedades de un composite, sabiendo de antemano las propiedades de la matriz y el refuerzo. De esta forma, para conocer las propiedades tensionales y elásticas, se pueden idealizar dos casos. Cuando las tensiones actúan en la dirección de la fibra, y cuando actúan en perpendicular a la dirección de las fibras.

ESFUERZOS Y TENSIONES  
EN LA DIRECCIÓN DE LA FIBRA

$$\epsilon_{\text{compuesto}} = \epsilon_{\text{fibra}} = \epsilon_{\text{matriz}}$$

$$\sigma_c = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m$$

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m$$

ESFUERZOS Y TENSIONES  
EN LA DIRECCIÓN  
OPUESTA A LA FIBRA

$$\sigma_{\text{compuesto}} = \sigma_{\text{fibra}} = \sigma_{\text{matriz}}$$

$$\epsilon_c = \epsilon_f V_f + \epsilon_m V_m$$

$$E_c = \frac{E_f E_m}{E_f V_m + E_m V_f}$$

ILUSTRACIÓN 31: PROPIEDADES EN FUNCIÓN DE LA ORIENTACIÓN DE LAS FIBRAS

La regla de las mezclas relaciona una propiedad de los materiales que combinan el composite, con la cantidad en peso o volumen de este material en el composite. De esta forma, además del módulo elástico, pueden medirse otras propiedades como la densidad o la resistividad eléctrica entre muchas otras

### 2.3.3. Orientación de las fibras.

La orientación de las fibras también es fundamental en el estudio de las propiedades mecánicas de un compuesto. Tal y como ya se ha mencionado, cuanto más se acerque el eje de orientación de las fibras, al eje de la tensión, mejor será las propiedades mecánicas.

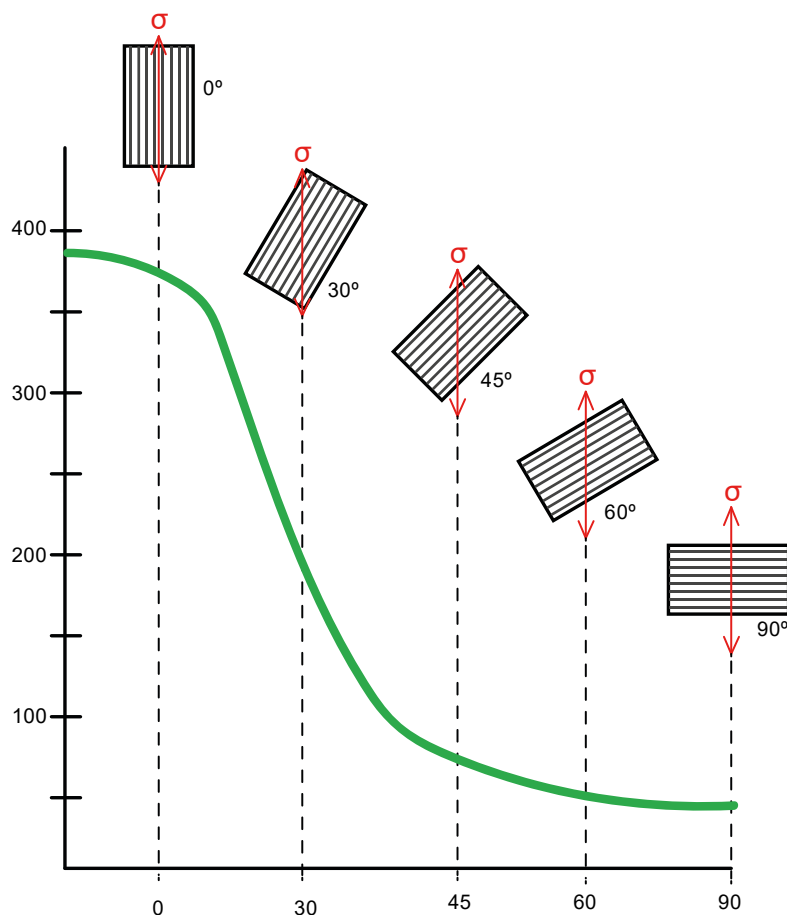


ILUSTRACIÓN 32: INFLUENCIA DE LA ORIENTACIÓN DE LAS FIBRAS EN LA RESISTENCIA A TRACCIÓN

Esto es fundamental a la hora de diseñar piezas con materiales compuestos. Existen algunas piezas que por sus requisitos y comportamiento en servicio pueden estar compuestas por fibras en una única dirección. Por ejemplo, cables o perfiles de pultrusión. Esto es porque generalmente trabajan a tracción. Pero en la mayoría de las piezas, es necesario disponer fibras en muchas direcciones, para que las cargas estén distribuidas y las propiedades mecánicas sean las adecuadas no solo en una dirección. Para esto se colocan láminas de fibras en distintas orientaciones, como se puede observar en el esquema de abajo[28].

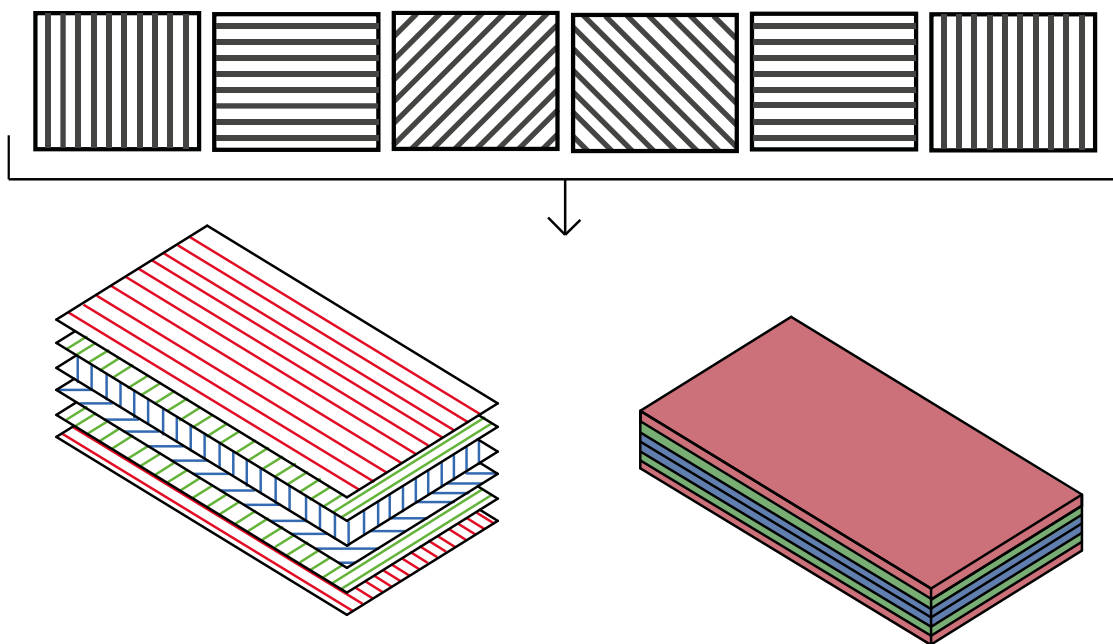


ILUSTRACIÓN 33: DIAGRAMA DE ESTRATIFICADO CON DIFERENTES ÁNGULOS

### *Nomenclatura de los laminados*

Para realizar estos laminados por capas, es necesario tener claro el orden. Para esto se ha creado una nomenclatura en las diferentes bibliografías, para conocer las diferentes orientaciones en las láminas de un laminado.

Consiste en poner entre corchetes los grados angulares de las diferentes láminas, de manera sucesiva. Una “S” después del corchete significa que se repite lo que se indica, de manera simétrica. Por ejemplo, en el laminado de arriba, se tienen fibras a 0 a los extremos, las segundas son a 90, y las centrales son a 45:

[0, 90, 45]s

Para laminados muy grandes, se puede también indicar al final del corchete, las veces que este se repite.

## 2.4. Núcleos

Los núcleos son elementos materiales que se combinan con los composites para mejorar sus propiedades estructurales [29].

Los materiales compuestos tienen unas propiedades mecánicas excelentes en comparación con su densidad, pero generalmente, suelen tener muy poco espesor. Esto es debido a que es más fácil diseñar y fabricar laminas finas. Esto hace que se necesite más espesor para conseguir algunas propiedades, pero encarece el proceso y sobredimensiona el producto.

Es por eso por lo que se añaden los núcleos y refuerzos internos. Estos núcleos tienen propiedades mecánicas inferiores al composite que los rodea, pero hace crecer la sección, y con ello algunas propiedades mecánicas y el momento de inercia.

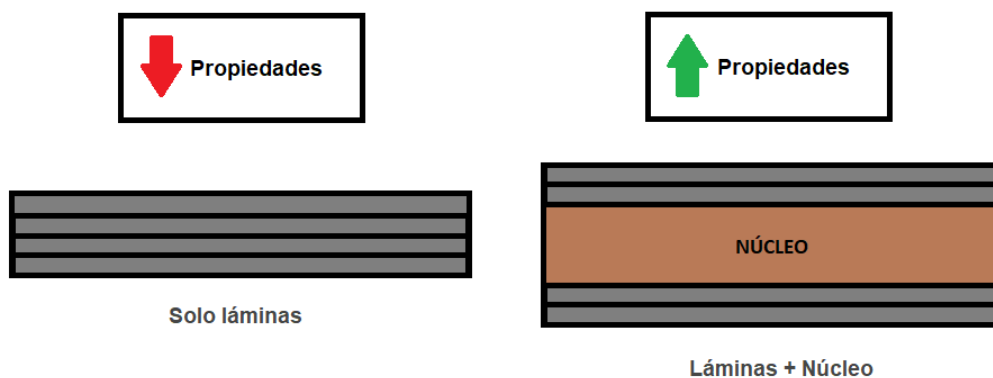


ILUSTRACIÓN 34: COMPARACIÓN PROPIEDADES MECÁNICAS CON NÚCLEO Y SIN NÚCLEO

Existen varios materiales usados como núcleo en la industria. Generalmente interesa obtener materiales con muy poca densidad, con la finalidad de reducir al máximo el peso del composite. Por otra parte, un material menos denso será más fácil de mecanizar, para adquirir la forma deseada. Por todas estas cosas, los materiales poliméricos más utilizados para núcleos son las espumas. Por ejemplo, espuma de PVC, espuma de PET, espuma de poliuretano o espuma de polifenilsulfona.

A estos materiales espumados, le les suma algunos más tradicionales, como el corcho o la madera de balsa. Un grupo cada vez más utilizados son las estructuras de nido de abeja y los no tejidos. Estos suponen el objeto de análisis del presente proyecto.

Existen diversos tipos de núcleos sintéticos, diseñados específicamente para procesos industriales de fabricación de composites. Estos materiales presentan bajas densidades, y un diseño que distribuye el material de manera intermitente para favorecer la impregnación de resina. En el presente proyecto se van a estudiar y caracterizar los núcleos no tejidos Soric FX y Sphere.core.



ILUSTRACIÓN 35: EJEMPLOS NÚCLEOS

### 2.4.1. Propiedades mecánicas de los núcleos

Los núcleos confieren espesor y un aumento de la sección de la pieza de composite. Tienen propiedades mecánicas inferiores y menos densidad que los materiales laminados en la superficie. La rigidez a la flexión de un laminado sólido es directamente proporcional al cubo de su espesor, mientras que, para laminados tipo sándwich, con núcleo incluido es directamente proporcional al cuadrado de su espesor. Es por eso por lo que el principal motivo del uso de núcleos de baja densidad es aumentar el espesor de un laminado. Esto aumenta considerablemente la rigidez a flexión, sin aumentar el peso [30].

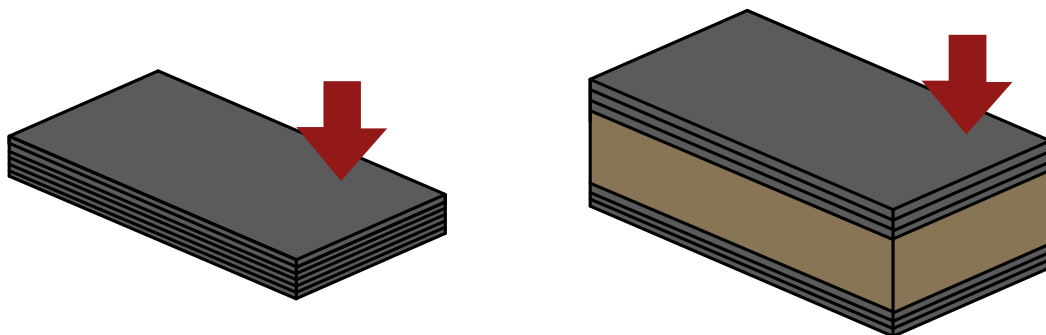


ILUSTRACIÓN 36: DIAGRAMA LAMINADOS CON NÚCLEO Y SIN NÚCLEO

Un material laminado de tipo sándwich con núcleo está formado por dos caras a ambos lados y un núcleo central.

Las caras son los elementos más resistentes, que soportan las tensiones de tracción y compresión en la estructura. Es aquí donde son ampliamente utilizados los polímeros reforzados. Por otro lado, en el centro de la estructura se encuentra el núcleo, cuya función es evitar que las caras exteriores se deformen y mantenerlas en una posición relativa entre sí, a una distancia determinada.

Para esto, el núcleo debe ser suficientemente rígido para que no se deforme, así como tener una cierta resistencia a esfuerzos cortantes para conseguir que las caras exteriores trabajen de forma sinérgica entre sí.

Las funciones que debe cumplir un material de núcleo pueden ser:

- Cierta resistencia a la deformación y los esfuerzos cortantes.
- Resistencia al pandeo
- Aislamiento térmico, eléctrico o térmico.
- Absorción de humedad.
- Porosidad.
- Resistencia al desgaste y envejecimiento.

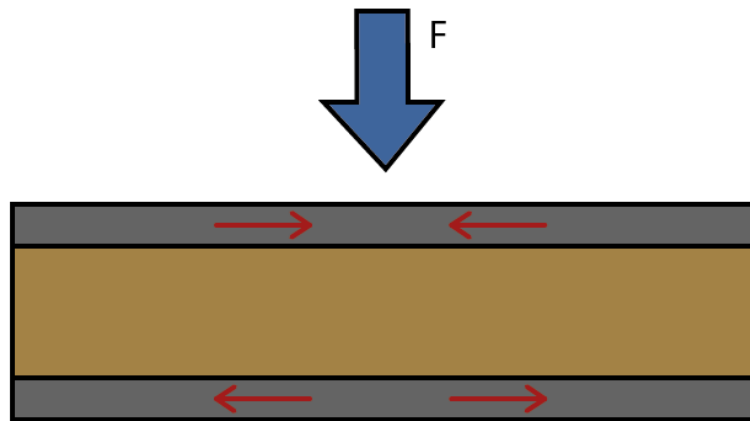


ILUSTRACIÓN 37: DISTRIBUCIÓN DE TENSIONES EN LAMINADO CON NÚCLEO

Se puede homologar los laminados con núcleo tipo sándwich con la barra de acero en forma de I o modelo IPE, ampliamente utilizado como elemento estructural. Esta barra está formada por un núcleo vertical y unas alas perpendiculares en los extremos. Estas alas soportan esfuerzos de tracción y compresión en el plano, al igual que lo hacen las caras de refuerzo exteriores de la construcción sándwich. Cuando las alas o refuerzos están más separadas la estructura gana una rigidez más proporcional [31].

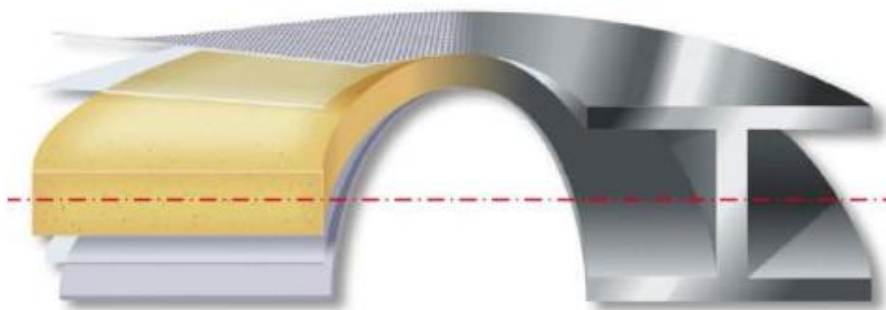


ILUSTRACIÓN 38. ANALOGÍA ENTRE UN COMPOSITE TIPO SÁNDWICH Y UN PERFIL IPE DE ACERO.

La diferencia entre ambos materiales nombrados anteriormente es que, frente a los mismos criterios de resistencia de flexión, el ahorro de peso del composite es de hasta un 90%. Además de ser un material que flota, es aislante térmico, eléctrico y acústico y no es corrosivo.

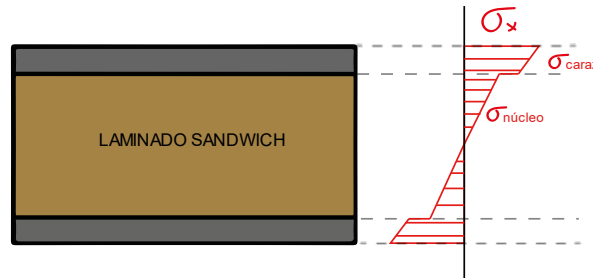


ILUSTRACIÓN 39: DIAGRAMAS DE ESFUERZOS

En la mayoría de los materiales estructurales, como vigas, columnas o paneles estructurales, el espesor es fundamental, y está directamente relacionado con la rigidez y resistencia a la hora de dimensionar las piezas.

Una de las grandes virtudes de los laminados con núcleo, es que se puede aumentar el espesor para ganar propiedades, pero esto no supone un aumento grande del peso total.

## 2.4.2. Núcleos empleados en el proyecto

### 2.4.2.1. Soric XF

Uno de los objetos de estudio del presente trabajo es el núcleo SORIC XF 3. Consiste en un núcleo no-tejido en forma hexagonal o de panal de abeja. Este es un material comercial para núcleos de composites de la compañía Lantor [32].

Lantor es una empresa holandesa que fabrica materiales de núcleos, rellenos y revestimientos. En concreto, su grupo dedicado a los composites es especialista en la fabricación de núcleos no-tejidos y espumas.

ILUSTRACIÓN 40: LOGO LANTOR COMPOSITES

Este material es perfecto para procesos de molde cerrado, como los procesos de infusión. Se trata de un poliéster no-tejido y estable a la presión, compatible con las resinas más habituales, como la resina de poliéster, viniléster, fenólicas y poliéster.

Es perfecto para diversos sectores:

- Sector marino: Cascos, cubiertas y estructuras.
- Sector automóvil: Partes de automóviles, remolques y camiones.
- Sector ferrocarril: Interior y exterior de trenes y autobuses.
- Sector acuático: Kayaks, piscinas y bañeras.



- Industrial: Paneles de revestimiento, ventiladores y tanques.
- Sector energético: Piezas de generadores eólicos.

A continuación, se describen las propiedades del Soric XF3, directamente extraída de los datos ofrecidos por el fabricante.

TABLA 8. PROPIEDADES DIMENSIONALES DEL SORIC XF 3

PROPIEDADES DIMENSIONALES SORIC FX 3				
Espesor	Temperatura máxima de procesamiento	Resina absorbida	densidad impregnado	Peso en seco
mm	°C	kg/m <sup>2</sup>	kg/m <sup>3</sup>	g/m <sup>2</sup>
3	170	1,4	600	180

Como se puede observar en la tabla 8, el material tiene un peso muy bajo, pero una capacidad de absorción de resina muy altas. Por otra parte, la temperatura máxima de trabajo está muy por encima de las temperaturas de curado de las resinas habituales.

TABLA 9. PROPIEDADES MECÁNICAS DEL SORIC XF 3

PROPIEDADES MECÁNICAS SORIC FX 3					
Resistencia a flexión	Módulo de flexión	Resistencia a tracción a través de las laminas	Resistencia a compresión	Resistencia a cizalla	Módulo a Cizalla
MPa	MPa	MPa	MPa	MPa	MPa
8	800	4	8	3,5	35

Su estructura en forma de hexágonos, o panal de abeja facilita el flujo de la resina por las zonas con menos espesor, permitiendo que todo el núcleo se impregne. Esta forma esta optimizada para mejorar la velocidad de avance del núcleo, y lo hace perfecto para procesos de transferencia de resina, como es el proceso de infusión [33].

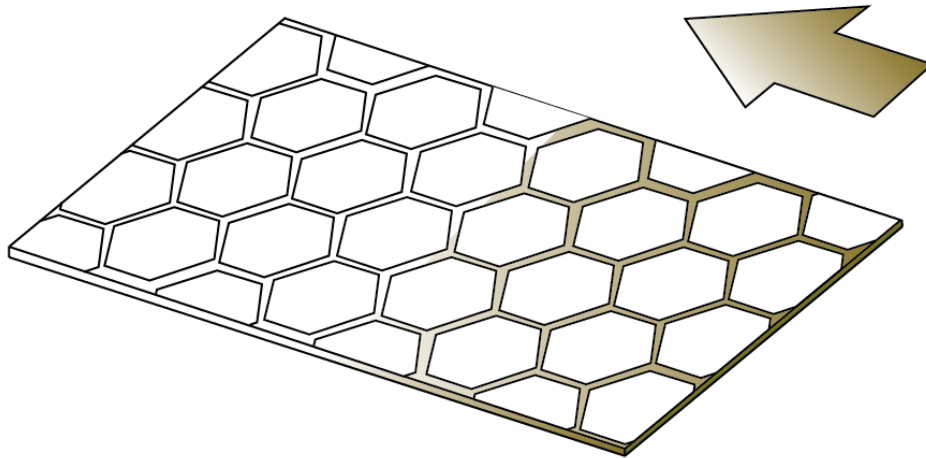


ILUSTRACIÓN 41: DIAGRAMA DE AVANCE DE RESINA POR NÚCLEO SORIC FX

Además, las zonas con menor espesor facilitan la transferencia de resina de manera transversal al avance del flujo, permitiendo que todo el estratificado a ambos lados quede totalmente impregnado.

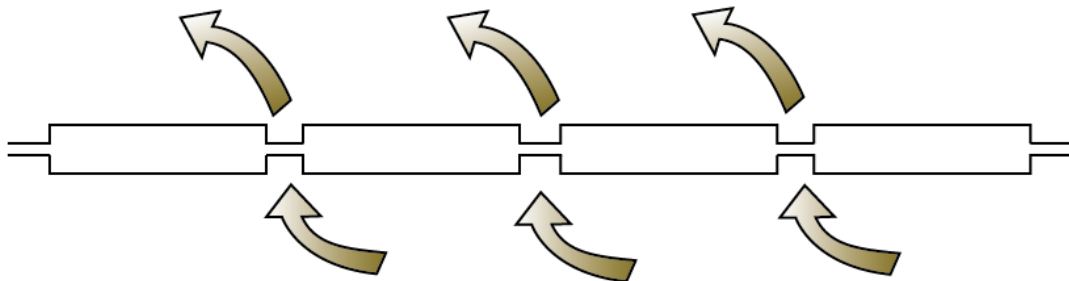


ILUSTRACIÓN 42: DIAGRAMA DE AVANCE DE RESINA POR NÚCLEO DE SORIC FX (2)

En definitiva, el material para núcleos no-tejidos SORIC XF es perfectamente adecuado para los procesos de infusión, RTM y laminado mediante pre-impregnados, puesto que garantiza unas propiedades mecánicas relativamente buenas en función de su peso, y sobre todo, favorece un avance e impregnado de la resina excelentes.

#### 2.4.2.2. Sphere.Core

El segundo material para núcleo que se va a investigar en el presente trabajo es el Sphere.core PSI de 3mm. Este material lo fabrica la compañía alemana Spheretex.

Sphere.core PSI es un material básico para procesos cerrados. Se suele utilizar en los procesos de RTM, RTL light e infusión. Las dos capas exteriores están formadas en fibra de vidrio despeluchada, entre las que se integra un medio fluido [34].

Se caracteriza por una capacidad de drapado muy buena, su alta resistencia a la compresión y su bajo consumo de resina. Sphere.core PSI es adecuado para espesores de componentes de 3 a 5 milímetros.



ILUSTRACIÓN 43: LOGO COMPAÑÍA SPHERE TEX

TABLA 10. PROPIEDADES DIMENSIONALES DEL SPHERE.CORE

PROPIEDADES DIMENSIONALES Sphere.core PSI 3mm		
Espesor	Resina absorbida	Peso en seco
mm	kg/m <sup>2</sup>	g/m <sup>2</sup>
3	1,5	360

Este material de núcleo se caracteriza por estar compuesto por dos capas de fibra de vidrio despeluchada que crea una cavidad interior entre ambas. De esta forma facilita el flujo de resina por el interior, aumentando la velocidad de avance.

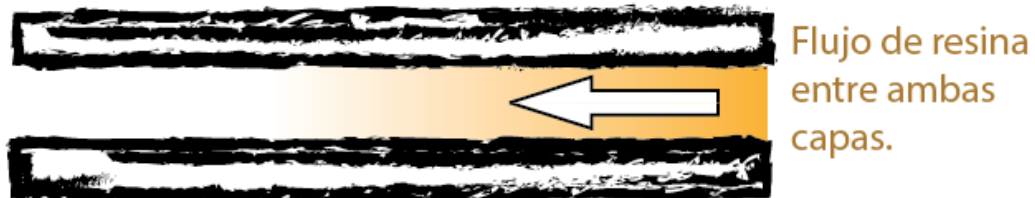


ILUSTRACIÓN 44: DIAGRAMA DE AVANCE DE LA RESINA POR EL NÚCLEO SPHERE.CORE

## 2.5. Métodos de fabricación.

Una de las principales ventajas de los materiales compuestos es su versatilidad en el diseño y la producción. Existen numerosas formas de fabricación en los materiales compuestos [35].

La elección del proceso industrial depende en gran medida del tipo de materia prima y del diseño y requerimientos finales. Una forma de clasificar los procesos de fabricación de composites es en función de si es con molde abierto o con molde cerrado.

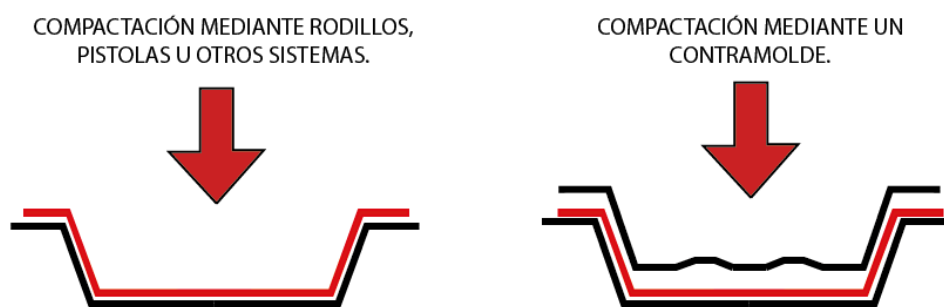


ILUSTRACIÓN 45: CONFORMACIÓN DE COMPOSITES CON MOLDE ABIERTO O CERRADO

Todos los procesos de fabricación tienen en común una serie de factores. Generalmente se disponen la fibra y la resina sobre un molde, se cura y se desmoldea [36]. La forma en que se coloca la fibra sobre el molde puede ser de vital importancia, si la fibra no es isótropa, pues dependerá de la orientación de la fibra. En el curado es cuando se produce la reacción en la resina, un término más adecuado puede ser entrecruzamiento o reticulación de la resina. Para esto generalmente hay que iniciar la reacción, o bien mediante agentes químicos iniciadores, o bien mediante calor.

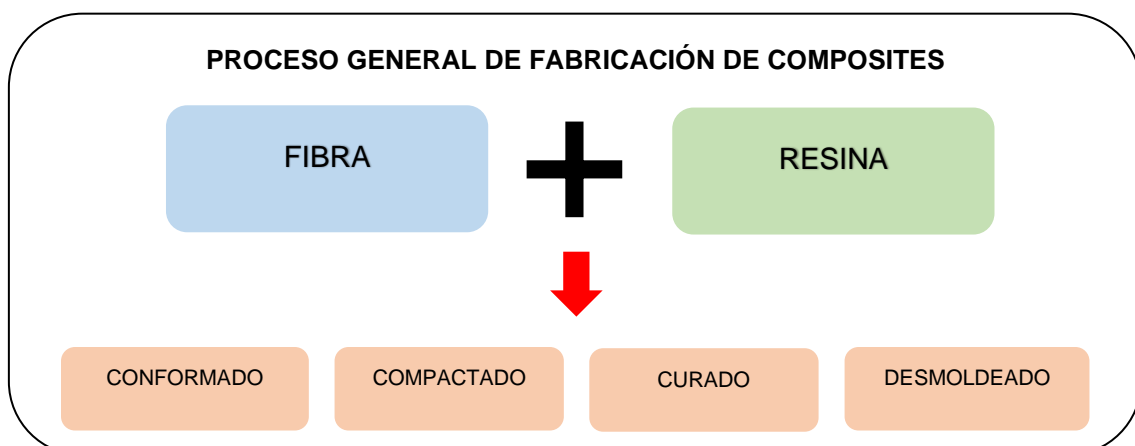


ILUSTRACIÓN 46: ESQUEMA DE FABRICACIÓN DE COMPOSITES

### PROYECCIÓN SIMULTÁNEA

La fibra se corta en trozos muy pequeños y se proyecta junto a la resina mediante una pistola de mano. Es un método muy económico, pero la pieza tiene una gran cantidad de.

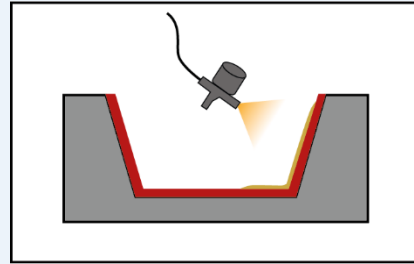


ILUSTRACIÓN 47. PROYECCIÓN SIMULTÁNEA

### CONTACTO A MANO

Se dispone la fibra en el molde y se aplica la resina a mano con ayuda de un rodillo. Resulta también un método económico, pero requiere habilidad por parte del operario.

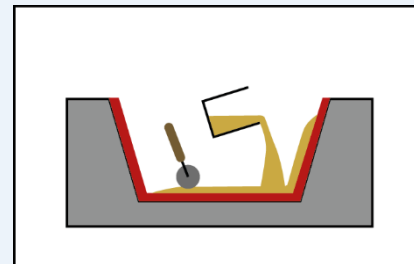


ILUSTRACIÓN 48. CONTACTO A MANO.

### EMPAQUETAMIENTO A VACIO

Se utilizan preimpregnados. Estos se disponen sobre el molde y se compactan mediante vacío. Para mejorar la compactación se puede utilizar un autoclave. Se consiguen piezas de alta calidad.

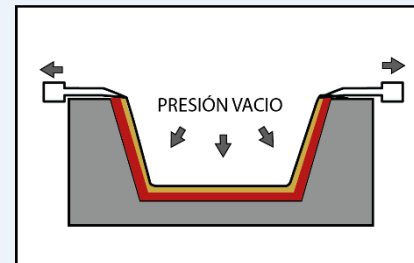


ILUSTRACIÓN 49. EMPAQUETADO AL VACÍO.

### FILAMENT WINDING

La fibra en forma de un único filamento se bobina sobre un mandril interior que va girando. Este filamento puede ser pre-impregnado o estar seco y pasar por una bañera de resina. Este proceso es ideal para fabricar tubos.

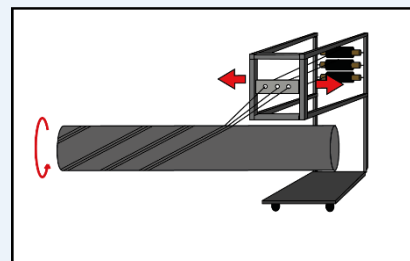


ILUSTRACIÓN 50. FILAMENT WINDING

## PULTRUSIÓN

Las fibras de un único filamento son dispuestas de manera longitudinal y son estiradas a través de un baño de resina, para después pasar por un molde que le da forma. Este proceso es ideal para perfiles estructurales.

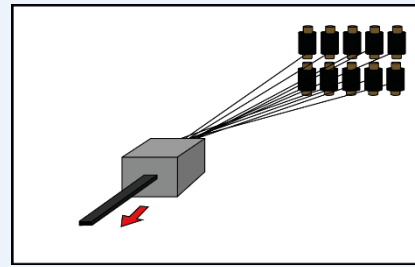


ILUSTRACIÓN 51. PULTRUSIÓN.

## BRAIDING

En el braiding las fibras se trenzan alrededor de un husillo o molde. Este proceso es similar al de filament winding pero las fibras se trenzan antes de entrar en contacto con el mandril.

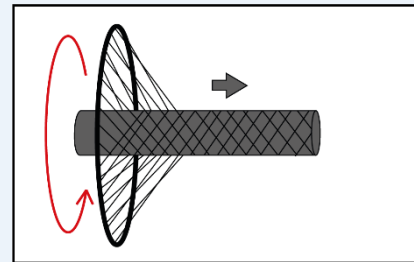


ILUSTRACIÓN 52. BRAIDING.

## INFUSIÓN DE RESINA

Primero se disponen las fibras sobre un molde abierto, luego se hace vacío para compactar y finalmente se infunde resina que avanza por la fibra impregnandola. Este es el método utilizado en el presente proyecto, y posteriormente se explicará con más detalle.

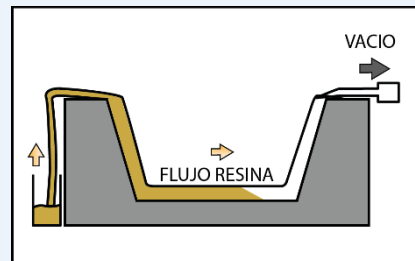


ILUSTRACIÓN 53. INFUSIÓN DE RESINA.

## MOLDEO POR TRANSFERENCIA DE RESINA (RTM)

En este proceso se disponen las fibras en el interior de un molde de dos caras, luego el molde se cierra y la fibra queda presionada. Por último se inyecta la resina a presión. Este método tiene un coste elevado pero un acabado de pieza excelente 18.9

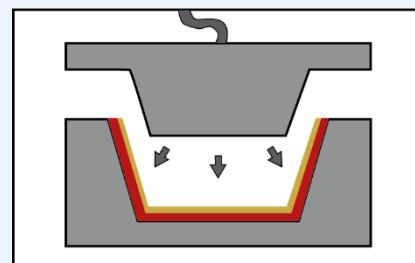


ILUSTRACIÓN 54. RTM

De entre los procesos detallados, para el presente proyecto se va a utilizar el **proceso de infusión**. Este proceso va a permitir conocer mejor la naturaleza de los composites y su fabricación a un nivel práctico.

El proceso de infusión, como se ha comentado, consiste en succionar la resina mediante vacío, para que impregne el tejido y elimine el aire. Este proceso permite crear piezas de mucha calidad, gracias a la eliminación del aire y compactación producida por el vacío. Así se consiguen ratios de fibra y resina muy elevado [37].

Debido a su naturaleza, este proceso es perfecto para series de producción muy bajas o producciones únicas. Esto significa que este proceso es adecuado para realizar piezas grandes, como cascos de barco.

En el apartado experimental se define paso a paso la fabricación de materiales compuestos mediante infusión de resina.

## II. OBJETIVO

### 1. Objetivo general.

El presente proyecto, tal y como se ha explicado al inicio, es un proyecto de investigación de materiales. En concreto se van a investigar las propiedades de materiales laminados con núcleos no tejidos novedosos en el mercado.

Para esto se llevará a cabo una caracterización de los materiales a investigar, a nivel de laboratorio, para obtener la información necesaria sobre las propiedades más relevantes.

Con los resultados obtenidos se pretende esclarecer una conclusión determinante sobre las propiedades de estos laminados, y conocer en concreto las propiedades de los núcleos, así como su eficiencia y comportamiento para su aplicación en el sector náutico.

### 2. Objetivo estratégico.

Para llevar a cabo el proyecto y cumplir con el objetivo principal, se van a definir una serie de objetivos específicos técnicos, que se habrán de ir cumpliendo a modo de hitos, para garantizar el éxito del proyecto.

En primer lugar, y como se ha podido observar en el apartado anterior, se ha realizado un completo **estado del arte**, donde se ha investigado sobre materiales poliméricos y composites, su naturaleza, sus propiedades y su aplicación en el sector náutico. También se ha investigado la naturaleza de los núcleos dentro de composites laminados, sus propiedades estructurales y su funcionamiento. Dentro del estado del arte se ha investigado sobre los procesos de fabricación con composites, en concreto el proceso de infusión de resina, que será el empleado en este proyecto. También se ha estudiado el posible efecto de los núcleos cuando se fabrican materiales compuestos mediante este proceso.

Tras conocer los antecedentes y establecer un punto de partida, se va a generar **las probetas para ensayo**. Esta parte es importante, pues las propiedades de los materiales compuestos dependen en gran medida de su fabricación. Para la fabricación de probetas se va a utilizar el método de infusión de resina mediante vacío, que ya se ha comentado. Para esto se van a preparar varios sistemas para optimizar la fabricación y poder infusionar varios tejidos a la vez. Se busca generar probetas de SORIC FX y de SPHERE.CORE combinadas con fibras de carbono, fibras de vidrio y fibras de polipropileno, todas ellas combinadas a su vez con resina epoxi.

Una vez generadas y organizadas las probetas, se comenzará con la **fase de caracterización**. En esta se pretende conocer las propiedades más relevantes de estos laminados y núcleos. Para esto, se van a realizar ensayos de tracción, flexión, impacto, microscopía electrónica. Además, se caracterizarán las propiedades físicas de los compuestos, como la densidad, el espesor, el porcentaje de absorción de resina y la velocidad de impregnado.



### III. EXPERIMENTAL

#### 1. Proceso de fabricación de los materiales.

El proceso de infusión es considerado un proceso de molde cerrado. Esto es debido a que por una de las caras se tiene un molde con un acabado determinado, y por la otra se tiene una bolsa de plástico, que, por acción del vacío, hace de contra molde, y compacta las fibras [37].

Una vez se han diseñado los materiales, se procede a fabricarlos para poder extraer las probetas. Para esto, se divide la fabricación en dos bloques. En primer lugar, se van a realizar el impregnado de los núcleos en solitario, y posteriormente se procede a realizar la infusión también de los laminados.

Los laminados con los dos materiales de núcleo se van a realizar con tres tipos de fibras. Fibra de polipropileno, fibra de carbono y fibra de vidrio. En total, hay dos núcleos y tres fibras, saldrán 6 laminados.

Fabricación de los núcleos en solitario:



Fabricación de los laminados:

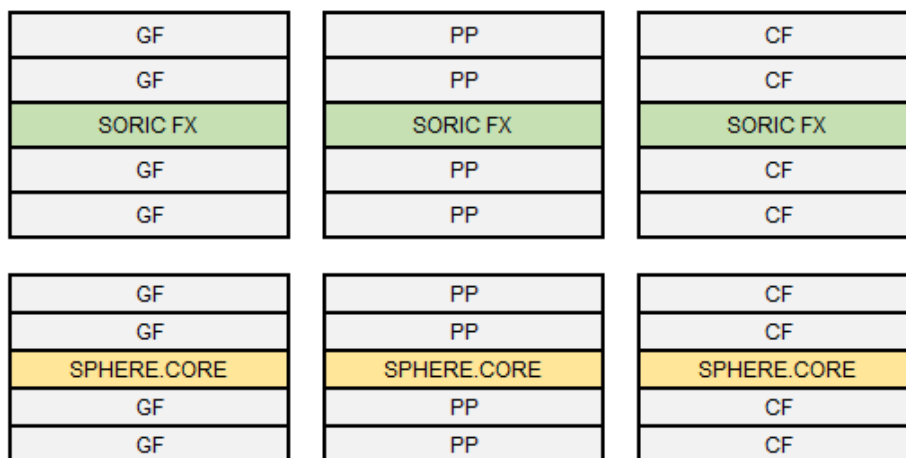


ILUSTRACIÓN 55: ESQUEMA DE FABRICACIÓN DE LOS MATERIALES PARA LAS PROBETAS

## 2.1. corte y pesado de los materiales

Por lo tanto, para fabricar los materiales, se comienza cortando los dos núcleos. Se aprovecha y se cortan también los núcleos que se van a utilizar en los laminados, en total 3 de cada material.

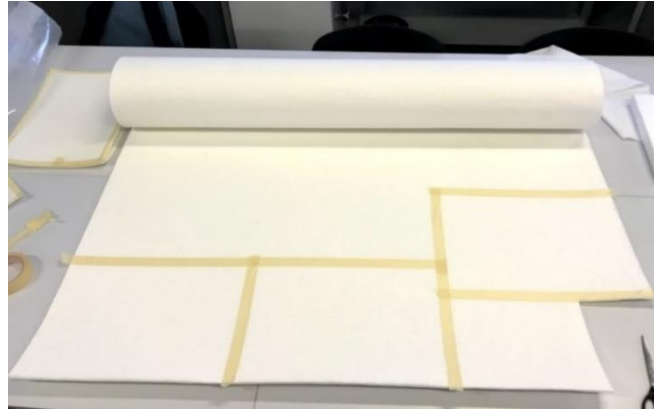


ILUSTRACIÓN 56: CORTE DE LOS NÚCLEOS

Una vez cortados los dos núcleos, se cortan las telas para realizar los laminados. Esto es, la fibra de carbono, la fibra de vidrio y la fibra de polipropileno. De esta forma, ya se tienen los materiales para construir los laminados.

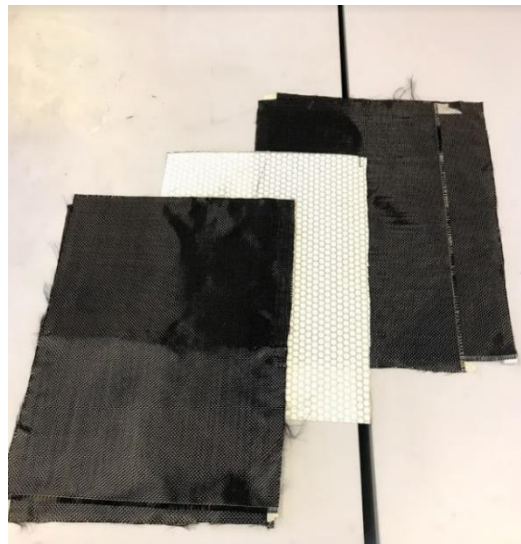


ILUSTRACIÓN 57: LÁMINAS DE FIBRA DE CARBONO Y NÚCLEO SORIC FX

A continuación, se van a cortar y preparar los materiales fungibles que ayudan a la infusión.

Estos son el peel-ply, el plástico perforado y la manta de absorción. Por último, en el estratificado, se colocan los tubos de entrada y salida de vacío y la bolsa de vacío. Al

colocar la bolsa de vacío sobre todas las capas, hay que dejar un poco de holgura, para facilitar la creación de pliegues, que permitan adaptarse al interior.

Antes de empezar con el proceso de preforma del laminado, es fundamental pesar todas las láminas, telas y núcleos. Esto se hace para conocer el porcentaje de matriz-refuerzo, una vez fabricado el composite. Si se conoce el peso del refuerzo, y se conoce el peso final del composite, se puede conocer el peso de la resina absorbida.

Esto es de gran utilidad, pues como se describe en apartados anteriores, el porcentaje de refuerzo y matriz influye en gran medida en las propiedades finales del composite, y en la industria es fundamental para realizar un correcto control de calidad en los productos.



ILUSTRACIÓN 58: PESAJE DE SORIC FX Y FIBRA DE VIDRIO

## 2.2. construcción del laminado.

Generalmente en la industria, antes de colocar los materiales del laminado, es fundamental aplicar algún agente de desmoldeo. Esto se realiza para facilitar el desmoldeo posterior.

En este caso, sobre el tablero de madera se va a colocar una fina capa de plástico perforado, que hará de desmoldeante.

Para introducir la resina y realizar el vacío, se utilizan unos tubos fungibles, que se adaptan fácilmente. Y con ellos, para controlar la resina y el vacío, se aplican unas válvulas de paso.



ILUSTRACIÓN 59: TUBOS DE CANALIZACIÓN DE RESINA



ILUSTRACIÓN 60: COLOCACIÓN DE LA PRIMERA CAPA - PLÁSTICO PERFORADO

ILUSTRACIÓN 61: COLOCACIÓN DEL LAMINADO (NÚCLEO SORIC FX)

ILUSTRACIÓN 62: COLOCACIÓN DEL PLÁSTICO SUPERIOR, PEEL PLY Y TUBOS DE DISTRIBUCIÓN

ILUSTRACIÓN 63: COLOCACIÓN DE MANTA DE ABSORCIÓN, CINTA DE SELLADO Y BOLSA DE VACÍO.

### 2.3. Sellado de la bolsa.

Cuando todo está colocado en su sitio, se procede a sellar la bolsa. Este paso es crítico, pues se debe conseguir un vacío total. Es habitual que este vacío no se consiga a la primera. Requiere de cierta habilidad para averiguar si tiene alguna fuga y localizarla.

Generalmente, si existe alguna fuga de vacío, suele estar en las esquinas o lugares por donde se introducen los conductos.

Por la forma de los materiales contenidos, es necesario realizar algunos pliegues en la bolsa de vacío, para que al compactar se adapte, tal y como se muestra en la imagen de abajo.

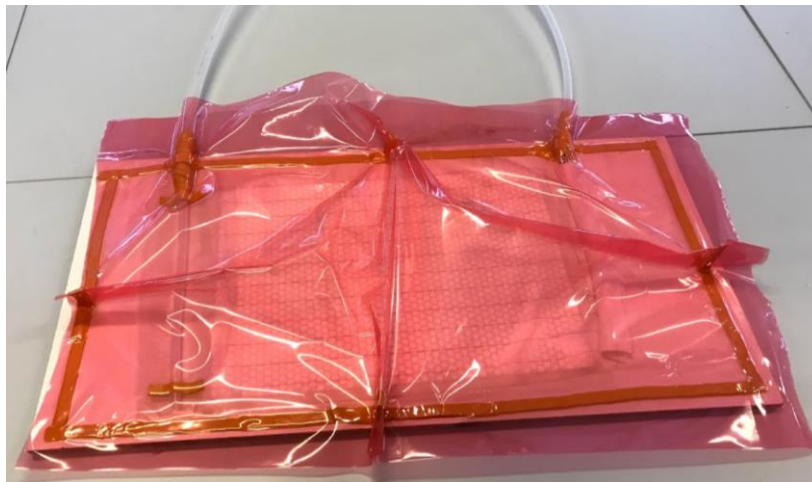


ILUSTRACIÓN 64: PREPARACIÓN DEL SISTEMA DE INFUSIÓN COMPLETO Y SELLADO

### 2.4. Preparación de la resina.

Una vez se realiza vacío, se procede a inyectar la resina, que previamente se había mezclado en un recipiente.

Hay que tener en cuenta que cuando cura la resina, endurece y afecta a todos los materiales con los que está en contacto. Es por eso por lo que es fundamental cierta higiene y cuidado en la manipulación y mezclado de la resina. Además, todos los conductos, mangueras y recipientes que entren en contacto con la resina, se desecharán cuando esta cure.

En la industria, es habitual utilizar recipientes o herramientas metálicas, y para retirar manchas o suciedad de resina se utiliza algún disolvente como la acetona.

Comercialmente, la mayoría de resinas epóxicas se proporcionan en un sistema bicomponente. Estos son ser el componente A y el componente B. También se denominan Resina y Endurecedor. El fabricante informa sobre el porcentaje que se ha de añadir de cada elemento.

Se va a utilizar la resina epoxi Resoltech 1050 y el endurecedor correspondiente según el fabricante, que es el endurecedor Resoltech 1056S, que suministra la empresa Castro Composites [38].

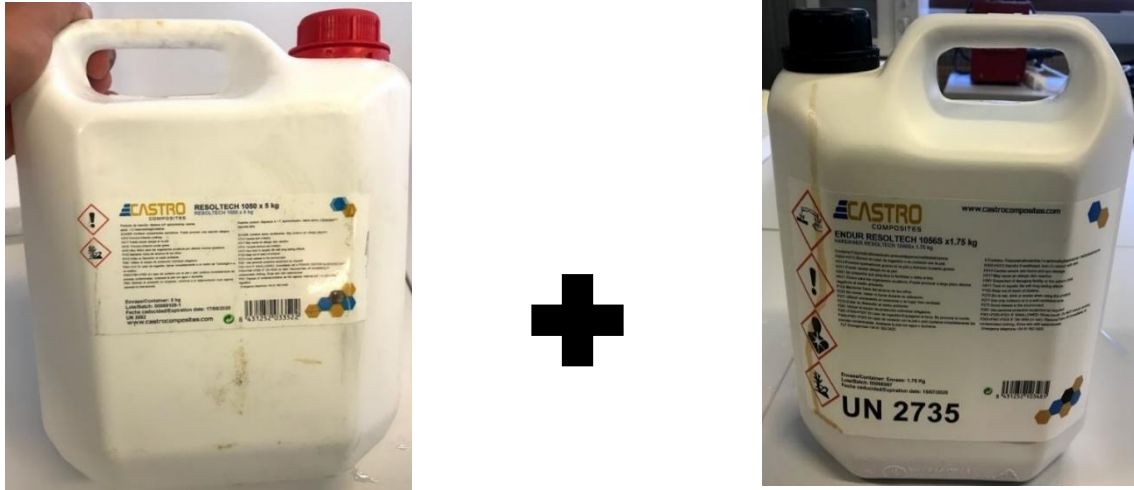


ILUSTRACIÓN 65: RESINA RESOLTECH 1050 Y ENDURECEDOR RESOLTECH 1056S

La ratio de mezcla de esta resina es 100/35, lo cual es habitual en este tipo de resinas. Esta mezcla suele tener un margen de error, pero lo adecuado es ajustar la mezcla lo máximo posible para optimizar el material conseguido.

En este caso, se procede a mezclar 1 kg de resina para cada laminado, teniendo en cuenta que lo más probable es que sobre resina, pero sin correr el riesgo de quedarse corto. Ya que todo el refuerzo debe quedar perfectamente impregnado.

Una vez mezclada la resina, y controlando el tiempo en todo momento se procede a realizar la infusión.

Controlar el tiempo es fundamental, pues se dispone un tiempo de manipulación de la resina antes de que esta endurezca. Este tiempo se denomina pot life. El fabricante proporciona una serie de endurecedores con diferentes tiempos de gelificación, los cuales se pueden mezclar entre ellos para conseguir el pot life necesario.

En este caso, según las especificaciones del fabricante, el tiempo de gel aproximado es de 1 hora.



ILUSTRACIÓN 66: PESADO DE CADA COMPONENTE

## 2.5. Infusión y curado.

Una vez se tiene la resina preparada y el vacío bien realizado en el proceso, se procede a infundir la resina. La manguera se introduce en el recipiente de la resina mezclada y la llave que cierra el vacío se abre dejando pasar la resina. El propio vacío es el que aspira la resina, que va impregnando el refuerzo.

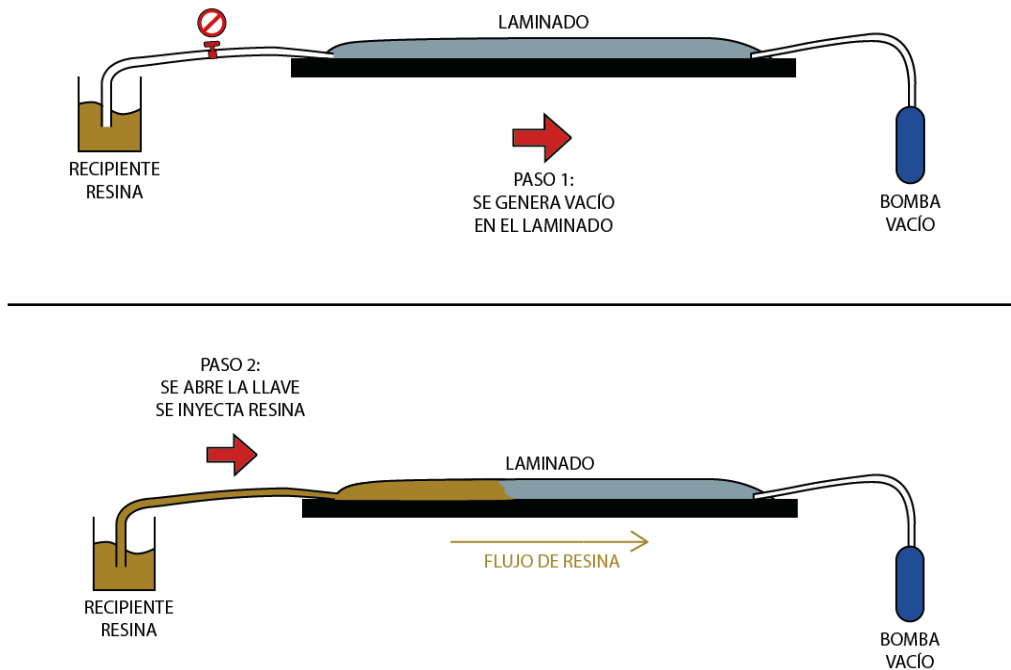


ILUSTRACIÓN 67: DIAGRAMA DEL PROCESO DE INFUSIÓN

El vacío debe estar compactando hasta que la resina este totalmente curada. Esta resina cura entorno a tres horas a temperatura ambiente, por lo que se dispone una pistola de calor, apuntando hacia el laminado para reducir el tiempo de curado.

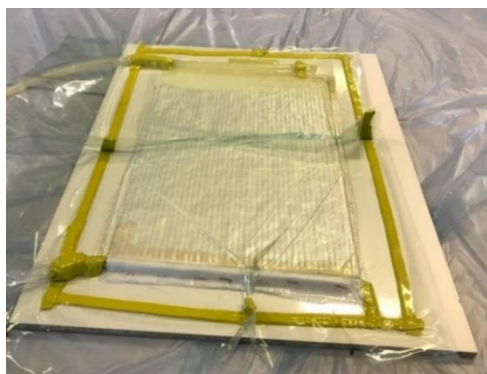


ILUSTRACIÓN 68: SISTEMA DE INFUSIÓN COMPACTADO CON VACÍO

## 2.6. Desmoldeado.

Cuando se está seguro de que el material está totalmente curado y la resina ha endurecido, se pueden retirar los materiales fungibles.

Hay que asegurarse de que este bien curado, de lo contrario, al abrir el plástico y retirar el vacío, entraría aire en el interior del laminado, facilitando la creación de burbujas y produciendo un detrimento en las propiedades mecánicas.

El proceso de desmoldeo puede llegar a complicarse mucho si no se ha aplicado correctamente un agente desmoldeante. El peel-ply también es de gran ayuda para retirar todos los materiales fungibles.

Una vez retirados los materiales fungibles, se procede a desmoldear el laminado.

Como se ha comentado con anterioridad, es fundamental pesar los materiales una vez curados para conocer el porcentaje de resina que tienen.



ILUSTRACIÓN 69: PROCESO DE DESMOLDEADO Y RETIRADA DEL PEEL PLY



ILUSTRACIÓN 70: PESAJE DEL COMPOSITE



### 3. Corte de las probetas.

Una vez se tienen todas las láminas tanto de núcleos impregnados como de material compuesto, se procede a extraer de ahí las probetas que se van a ensayar. En las imágenes de abajo se puede observar el procedimiento experimental de la fabricación de las probetas. A continuación se muestra como quedan las láminas de composites fabricadas. Arriba pueden verse las conformadas con fibra de carbono, que ya han sido mecanizadas.



ILUSTRACIÓN 71: COMPOSITES PREPARADOS PARA CORTE

Para mecanizar las probetas, se colocan las láminas en la fresadora-cortadora por control numérico. Este es un equipo de dimensiones reducidas, perfecto para el corte de probetas de laboratorio. Para asegurar la integridad de la fresadora se dispone una plantilla de madera debajo de la pieza a mecanizar.

A continuación, se coloca cinta de doble cara para tratar de asegurar e inmovilizar la lámina, y que esta no se separe de la plantilla. En seguimiento, se atornilla la lámina en las esquinas para afianzarla a la madera.



ILUSTRACIÓN 72: MÉTODO DE FIJACIÓN DEL LAMINADO CON CINTA DE DOBLE CARA Y TORNILLOS

Por último, se introduce dentro del área de trabajo de la fresadora, y se asegura a la máquina mediante las grapas que tiene el equipo. Es conveniente ir aspirando la viruta y el serrín que va desprendiendo el mecanizado.

Poco a poco se van recortando todas las probetas necesarias para llevar a cabo los ensayos programados. En las imágenes de abajo se puede observar el procedimiento de corte de las láminas



ILUSTRACIÓN 73: IZQ. SUJECCIÓN DEL LAMINADO CON GRAPAS. DER. CORTE DE PROBETAS

Como se puede observar en la imagen anterior, de una misma lámina se pueden extraer numerosas probetas de diferentes tipos. De esta forma, se extraerán todas las probetas, necesarias para los diferentes ensayos. Para el corte de las probetas, se va a seguir la normativa referente a los ensayos que se van a realizar.

A la hora de cortar las probetas, es fundamental tener en cuenta la dirección del laminado. Pues, como se ha visto antes, las propiedades de este tipo de composites varían en función de las propiedades. Por esto, se debe apuntar y asegurar la dirección de la probeta en función de los ejes del laminado.

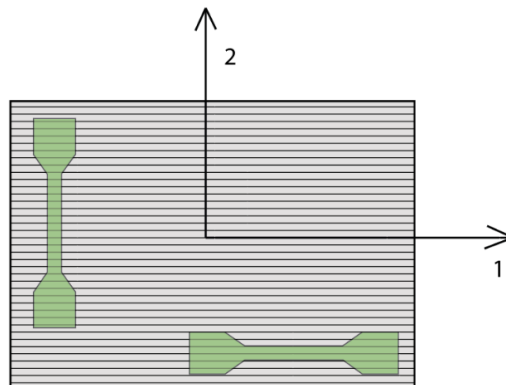


ILUSTRACIÓN 74: ORIENTACIÓN DE LAS PROBETAS RESPECTO A LA DIRECCIÓN DE LAS FIBRAS

De esta forma, según la norma, se van a cortar probetas de forma que la fibra quede a 0° y 90°. Esto supone que las fibras que se encuentren a 0° funcionarán de una manera excepcional frente a esfuerzos de tracción y flexión.

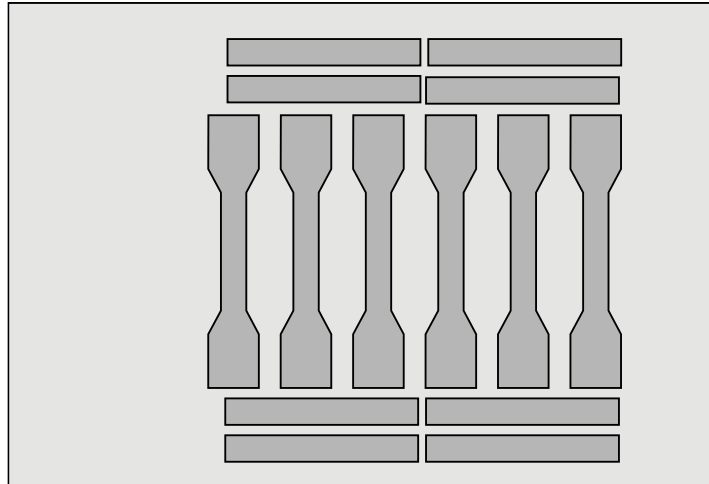


ILUSTRACIÓN 75: PLANO DE CORTE DE LAS PROBETAS

Como se puede observar en el patrón de la figura 75, se van a extraer 6 probetas con forma de halterios, como especifica la normativa de los ensayos de tracción, y 10 probetas rectangulares para ensayos de impacto y flexión. Una vez concluido el proceso de corte, es fundamental, como en todos los ensayos de laboratorio de materiales, numerar y almacenar correctamente las probetas. En la imagen de abajo, se pueden observar todas las probetas preparadas para comenzar los ensayos.



ILUSTRACIÓN 76: CLASIFICACIÓN DE PROBETAS

## IV. CARACTERIZACIÓN

### 1. Diseño del experimento.

En el tercer bloque del presente trabajo, se van a aplicar técnicas de caracterización de materiales para conocer las propiedades de cada material. De todos los materiales obtenidos en el bloque anterior se han extraído probetas. De esta forma se realizarán todos los ensayos para todos los materiales diferentes, para, no solo conocer sus propiedades, sino también para poder comparar los materiales entre ellos.

Se va a dividir el experimento en 3 bloques, en función de la naturaleza de los ensayos, y las propiedades que se averiguan en cada uno:

CARACTERIZACIÓN	
BLOQUE	ENSAYO
FÍSICAS Y NATURALES	Espesor
	Densidad
	Porcentaje de resina
	Absorción de resina
	Velocidad de impregnado
MECÁNICAS	Tracción
	Flexión
	impacto Charpy

TABLA 11. BLOQUES Y ENSAYOS A REALIZAR.

## 1.2. Normativa.

Para realizar los diferentes ensayos, se van a seguir una serie de normas que estandarizan cada proceso. Principalmente se van a seguir normas ISO y normas ASTM.

<b>ISO</b>	International Organization for Standardization
<b>ASTM</b>	American Society for Testing and Materials

TABLA 12. SIGNIFICADO SIGLAS NORMATIVA.

Estas normas arrojan información detallada sobre el proceso del ensayo y la morfología de las probetas. De esta forma, se van a utilizar las siguientes normas para los diferentes ensayos:

- UNE-EN ISO 527:2020: Plásticos. Determinación de las propiedades en tracción.
- UNE-EN ISO 178:2020: Plásticos. Determinación de las propiedades de flexión.
- UNE-EN ISO 179:2011: Plásticos. Determinación de las propiedades al impacto Charpy.

## 2. Definición de ensayos.

### 2.1. Técnicas de caracterización físicas y naturales del material.

En este bloque se va a hacer un recopilatorio de las propiedades naturales de los materiales, como su densidad o algunas características en relación con su morfología y comportamiento en el proceso de infusión.

Los materiales compuestos son más complejos que los materiales convencionales isotrópicos, como pueden ser los polímeros, metales o cerámicos. Estos últimos tienen una materia homogénea, con lo cual, al transformarlos y crear piezas y componentes con estos, se pueden conocer las propiedades teóricas con bastante precisión.

Por otro lado, los materiales compuestos basados en estructuras laminadas presentan una naturaleza anisotrópica, como ya se ha comentado con anterioridad. Es por esto que requieren una caracterización más exhaustiva, que a menudo comienza desde su producción.

A continuación, se van a llevar a cabo una serie de análisis y ensayos para conocer la naturaleza y estructura que presentan nuestras probetas. En estas propiedades no solo influyen los materiales, sino la también el método de fabricación y las condiciones.

### **Peso, densidad y porcentaje de fibra.**

Una de las propiedades más obvias de un material es la densidad, pero en los composites, al estar compuestos por diferentes materiales, se debe tener en cuenta la densidad de los materiales por separado.

En primer lugar, se procede a calcular el peso del composite. Para esto, es fundamental antes de procesar y conformar un material compuesto, conocer su peso por adelantado.

Como no se conoce la cantidad de resina exacta que va a tener el composite, se pesa el refuerzo, para después sacar el peso de la resina restando la fibra al total del composite.

De esta forma se conoce el peso de fibra, de resina, y del total del composite. Así se obtiene el porcentaje de fibra que tiene el composite.

Muchas veces este porcentaje es un dato que se analiza en la industria para comprobar los estándares de calidad de los laminados, pues un menor porcentaje de resina tendrá beneficios para la pieza a nivel estructural y de peso.

Para calcular la densidad del compuesto, se puede medir el volumen y masa del compuesto. Esta propiedad es importante, y variará en función del porcentaje de resina absorbido.

### **Velocidad de impregnado de los núcleos.**

Otro de los conceptos importantes de la fabricación de composites mediante el proceso de infusión, así como en todos los procesos que conlleven un flujo de resina, es conocer la velocidad de impregnado.

Para esto es fundamental tener en cuenta las condiciones de humedad y, sobre todo, temperatura. Hay que tener en cuenta que cuanto mayor sea la temperatura del ambiente, menor viscosidad tendrá la resina, será más líquida, y avanzará más rápido. Pero, por otra parte, su reacción de entrecruzamiento será también más rápida.

En el proceso de infusión, la velocidad de impregnado es muy importante en la industria, puesto que en cualquier línea de producción el tiempo es clave.

- Una impregnación demasiado rápida puede hacer que la pieza tenga defectos de aire, que la resina alcance la salida de aire demasiado pronto y obture la salida.

- Por otra parte, un impregnado demasiado lento conlleva costes de producción, pero fundamentalmente puede suceder que la resina se cure antes de impregnar toda la pieza.

Para medir la velocidad de impregnación de los núcleos se dispone una cámara con cronómetro apuntando hacia el sistema de infusión, como se muestra en el siguiente apartado.

## 2.2. Técnicas de caracterización mecánica.

Los ensayos mecánicos consisten en realizar un estudio de sobre el comportamiento de los materiales cuando son sometidos a distintos esfuerzos mecánicos. La finalidad, es poder realizar una comparativa entre los diferentes materiales según su resistencia máxima a rotura y su elongación, su resistencia a flexión, su resistencia al impacto y su dureza.

Para todo esto, se utilizarán distintos tipos de ensayos entre los cuales variará la velocidad de aplicación de las cargas y el direccionamiento y concentración de tensiones.

El ensayo por antonomasia en la caracterización mecánica es el ensayo de tracción. Este, al igual que otros, se realiza en la maquina universal de ensayos, coloquialmente denominada MUE.

### 2.2.1. Ensayo de tracción.

Para el ensayo de tracción se ha utilizado la máquina de ensayos universal disponible en el laboratorio de ensayos mecánicos. Esta es una Ibertest ELIB- 50-W. La máquina universal de ensayos recorre una longitud (deformación) y registra una tensión.

Este ensayo se basa en someter la probeta a un esfuerzo axial, a velocidad constante, hasta llegar a la rotura [39]. Así, registrando la fuerza que ha sido necesaria para mantener la velocidad constante se pueden obtener datos como, módulo de elasticidad, límite elástico, alargamiento a la rotura, resistencia a la tracción, etc. Se ha utilizado una célula de carga de 5 KN en todos los ensayos.

Para que todos estos resultados, obtenidos para un material, sean comparables con el resto composites, se han realizado los ensayos siguiendo la norma UNE-EN ISO 527-1. En esta se recopila desde la forma de las probetas hasta las velocidades de desplazamiento de las mordazas.

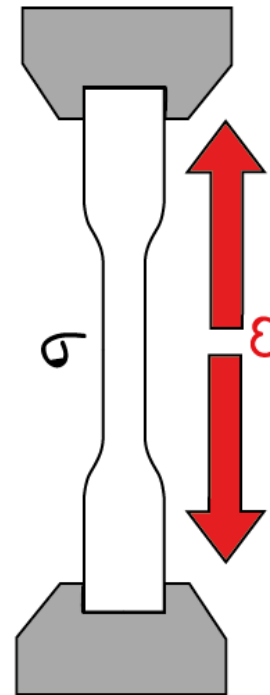


ILUSTRACIÓN 77. IZQ. MUE IBERTEST ELIB-50W, DER. DIAGRAMA ENSAYO DE TRACCIÓN.

### 2.2.2. Ensayo de flexión.

Para el ensayo de flexión se ha utilizado la máquina de ensayos universal disponible en el laboratorio de ensayos mecánicos. Se trata del equipo Ibertest ELIB- 50-W utilizado anteriormente en el ensayo de tracción [40].

Este ensayo se basa en medir la resistencia a esfuerzos de flexión de los materiales aplicando una carga en un punto de la parte central de la probeta mientras esta está apoyada en dos puntos en los extremos. De esta forma se consigue medir la deformación, o flecha de la probeta. También existe un ensayo muy común en el que la carga se aplica en dos puntos también en el centro.

Para realizar este ensayo, se conoce la separación entre los puntos de apoyo, el espesor de la probeta y el desplazamiento al que se mueve el punto de carga.

Como se ha visto anteriormente, estos ensayos están normalizados acorde a las normas:



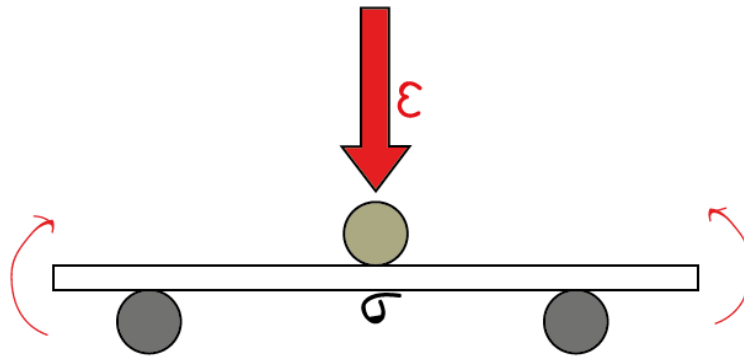


ILUSTRACIÓN 78. DIAGRAMA ENSAYO DE FLEXIÓN.

### 2.2.3. Ensayo de impacto charpy.

Para el ensayo de impacto se ha utilizado un péndulo Charpy. Concretamente es un péndulo para plásticos de la casa Metrotec. Este dispone de 2 péndulos de distintos tamaños, los cuales, según su masa, aplican al material 1 y 6 julios de energía. Se utiliza uno u otro según las características mecánicas del material ensayado, y siempre siguiendo la norma UNE-EN ISO 179- 1.

La base dinámica del ensayo es, someter a una probeta normalizada a un impacto en dirección transversal. Se sabe la energía que almacena cada péndulo, y se desprecian las pérdidas ínfimas mecánicas. Para saber la resistencia al impacto del material ensayado, basta con analizar el recorrido que realiza el péndulo tras romper la probeta [41].

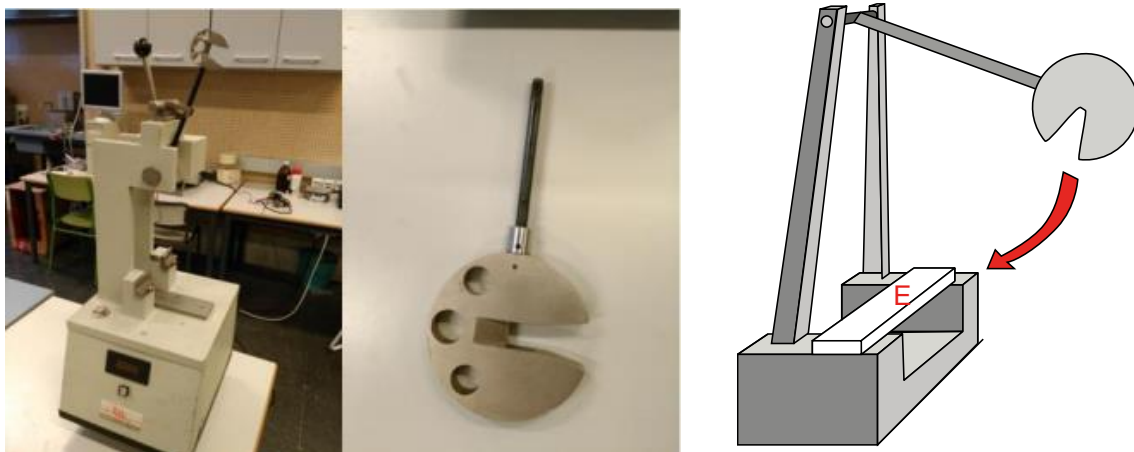


ILUSTRACIÓN 79. IZQ. MÁQUINA DE ENSAYOS DE IMPACTO. CENTRO, PÉNDULO. DER. DIAGRAMA DE ENSAYO DE IMPACTO.

En el caso de los materiales del experimento, para poder realizar una comparación se han realizado todos los ensayos con las mismas condiciones.

A las probetas también se le hará una entalla. Las entallas se utilizan cuando ambos péndulos no son capaces de romper las probetas solamente con el peso de cada uno. Se realiza una reducción de la sección de la probeta obteniendo así un concentrador de tensiones.

Una vez se tienen los valores de las dimensiones de las probetas, y el resultado del ensayo que devuelve la máquina, se puede obtener la resistencia al impacto en  $kJ \cdot m^2$ .

$$a_{cU} = \frac{E_c}{h \cdot b_N} \cdot 10^3$$

## V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este bloque se van a presentar los resultados de los ensayos y se van a discutir las conclusiones de los resultados obtenidos. Para cada ensayo de caracterización se van a exponer los resultados para cada uno de los materiales del proyecto, y se van a comparar entre ellos, principalmente los núcleos, objeto del presente proyecto.

### 1. Resultados de propiedades físicas y naturales.

#### 1.1. Peso, densidad y porcentaje de fibra.

PESO DE LOS NÚCLEOS				
Núcleos	Peso núcleo	peso composite (g)	peso Resina (g)	Refuerzo (%)
Soric FX	24,8	203,6	178,8	12,2
Sphere	42,2	281,6	239,4	15,0

TABLA 13. RESULTADOS - PESO DE LOS NÚCLEOS.

PESO DE LOS LAMINADOS					
Composite	Material	Peso refuerzo (g)	peso composite (g)	peso Resina (g)	Refuerzo (%)
GF + Soric	GF	95	356,6	236,2	33,8
	Soric FX	25,4			
GF + Sphere	GF	101,4	501,8	360,2	28,2
	Sphere	40,2			
PP + Soric	PP	97	458,2	336,6	26,5
	Soric FX	24,6			
PP + Sphere	PP	97,8	452,6	313,2	30,8
	Sphere	41,6			
CF + Soric	CF	107,8	428,3	295,9	30,9
	Soric FX	24,6			
CF + Sphere	CF	112,4	436,9	281,1	35,7
	Sphere	43,4			

TABLA 14. RESULTADOS - PESO DE LOS LAMINADOS.

## 1.2. Velocidad de impregnado de los núcleos.

Otro de los conceptos importantes de la fabricación de composites mediante el proceso de infusión, así como en todos los procesos que conlleven un flujo de resina, es conocer la velocidad de impregnado [43].

Para esto es fundamental tener en cuenta las condiciones de humedad y, sobre todo, temperatura. Hay que tener en cuenta que cuanto mayor sea la temperatura del ambiente, menor viscosidad tendrá la resina, será más líquida, y avanzará más rápido. Pero, por otra parte, su reacción de entrecruzamiento será también más rápida.

En el proceso de infusión, la velocidad de impregnado es muy importante en la industria, puesto que en cualquier línea de producción el tiempo es clave.

- Una impregnación demasiado rápida puede hacer que la pieza tenga defectos de aire, que la resina alcance la salida de aire demasiado pronto y obture la salida.
- Por otra parte, un impregnado demasiado lento conlleva costes de producción, pero fundamentalmente puede suceder que la resina se cure antes de impregnar toda la pieza.

Para medir la velocidad de impregnación de los núcleos se dispone una cámara con cronómetro apuntando hacia el sistema de infusión, como se muestra abajo.

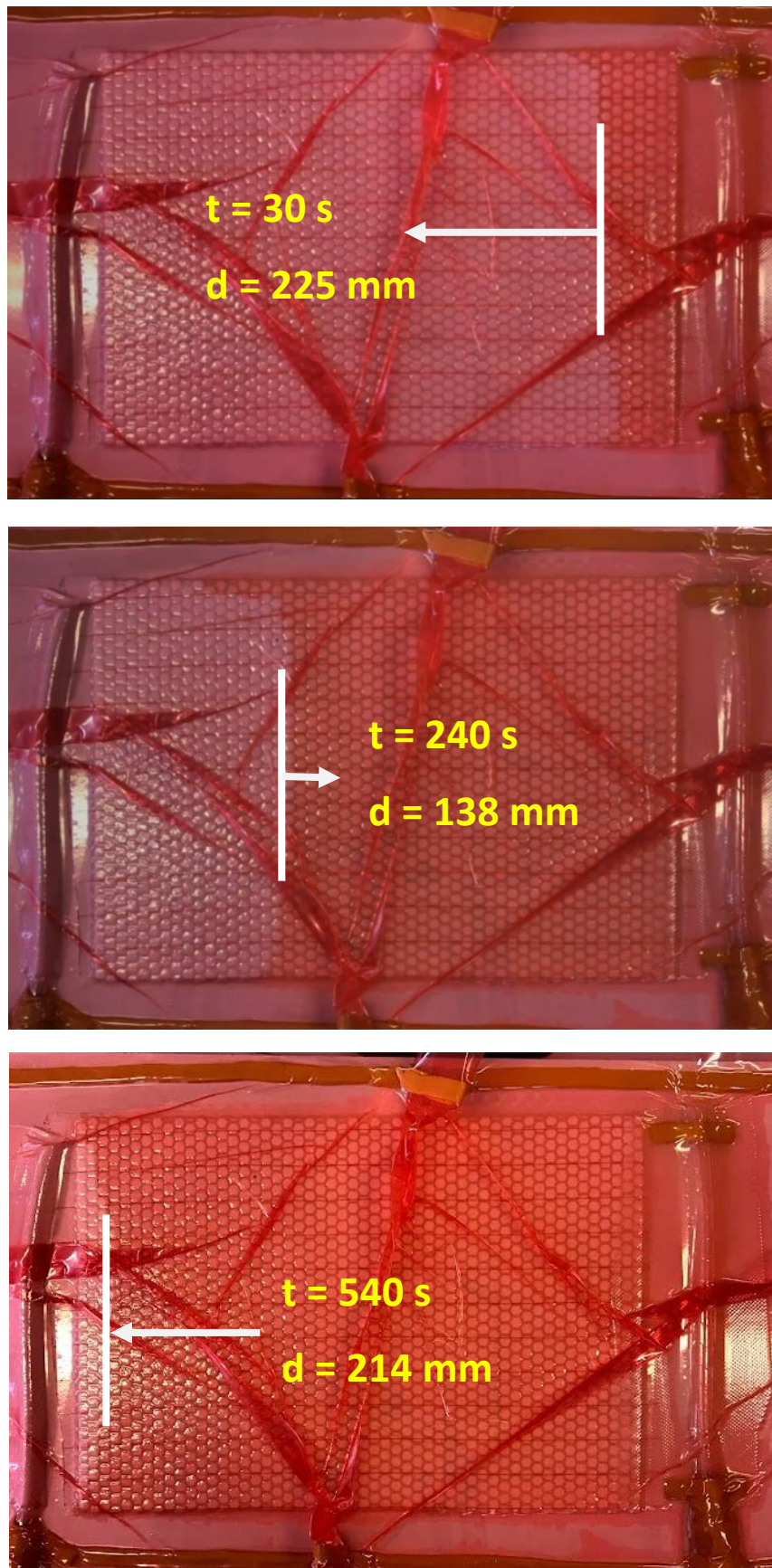


ILUSTRACIÓN 80. MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DE IMPREGNADO DEL NÚCLEO SORIC FX.

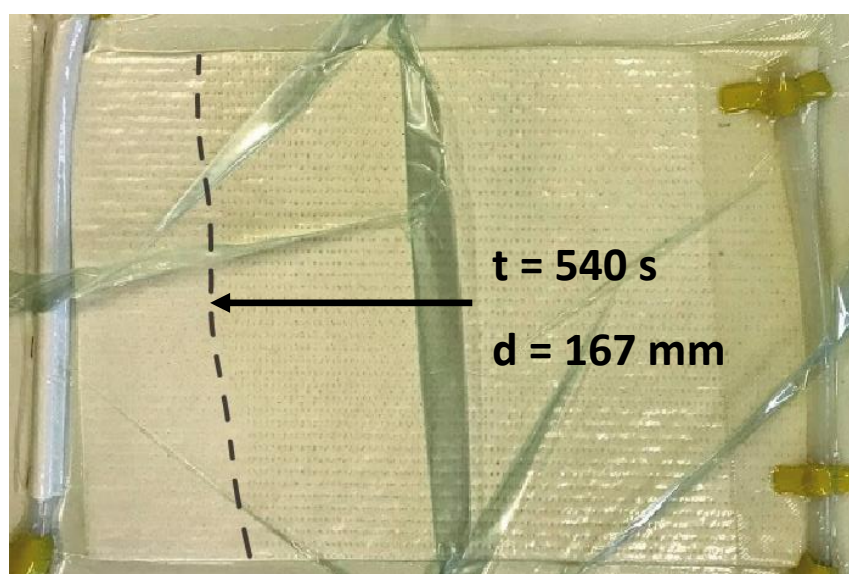
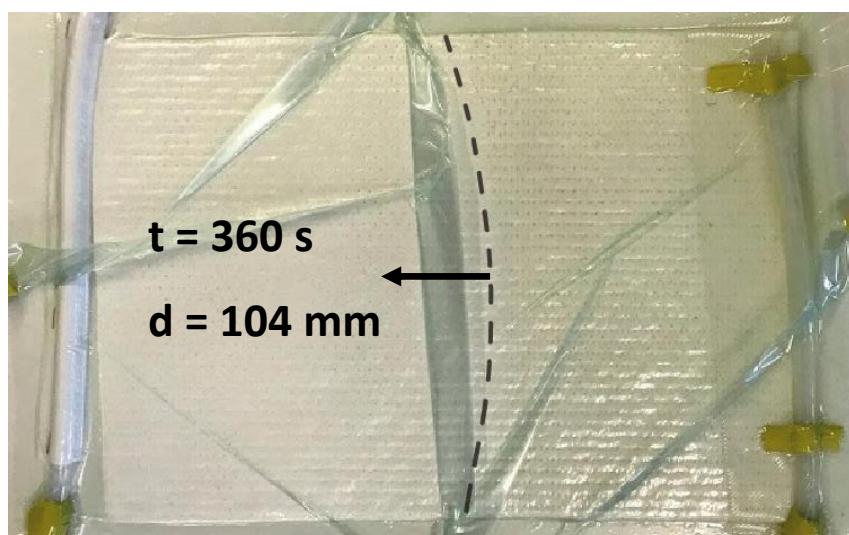
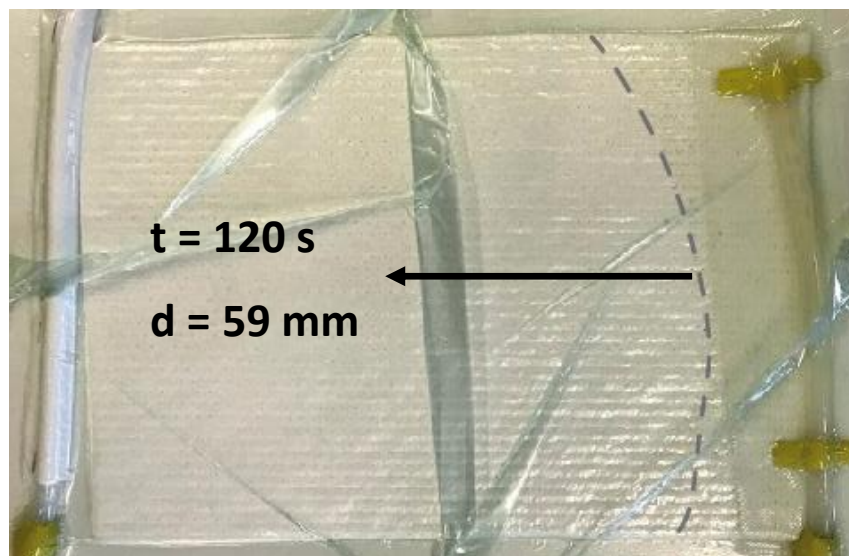


ILUSTRACIÓN 81. MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DE IMPREGNADO DEL NÚCLEO DE SPHERE.

En las páginas anteriores se muestran imágenes de la grabación del proceso de infusión, mediante la cual, teniendo en cuenta las dimensiones y el espesor del núcleo, se puede saber la velocidad de impregnado de los núcleos.

Se observa que la velocidad no es constante, y el avance tiene una aceleración negativa y cada vez va más despacio.

Los resultados del tiempo de impregnado son:

TABLA 15. MEDICIÓN TIEMPOS DE IMPREGNADO.

MEDICIÓN DE LA VELOCIDAD DE IMPREGNADO																	
TIEMPO		0	60	120	180	240	300	360	420	480	540	600	660	720	780	840	900
DISTANCIA (mm)	SORIC.FX	0	75	97	119	138	149	169	189	203	214	220					
	SPHERE.CORE	0	4	59	79	97	104	118	132	148	167	182	193	202	211	215	220

Teniendo dos láminas de 220 mm, se dividen en segmentos de 10 mm y se van tomando los tiempos en los que la resina avanza. De esta forma, se obtienen los valores de distancia y tiempo con los que se podrá medir la velocidad de impregnado.

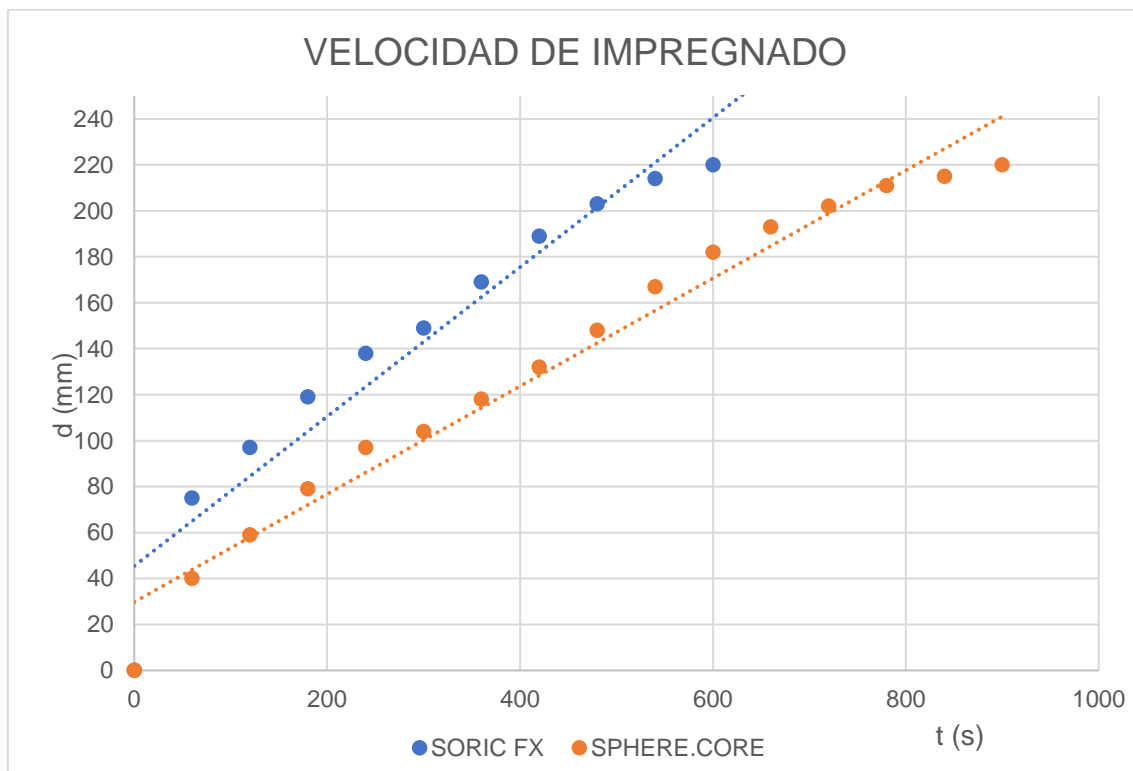


GRÁFICO 4. VELOCIDAD DE IMPREGNADO DE LOS NÚCLEOS.

En estos resultados se muestran las velocidades de impregnado de cada núcleo, con la misma resina y mismas propiedades ambientales. En este caso, se puede ver que el SORIC FX se impregna más rápido que el SPHERE.CORE. No obstante, resulta también interesante comparar la velocidad de impregnado de ambos núcleos con sus propiedades físicas, extraídas de las tablas anteriores.

TABLA 16. RESULTADOS DE VELOCIDAD DE IMPREGNADO Y PROPIEDADES FÍSICAS.

	SORIC FX	SPHERE.CORE
Espesor	3 mm	3 mm
Peso en seco	180 g/m <sup>2</sup>	360 g/m <sup>2</sup>
Resina absorbida	1.4 kg/m <sup>2</sup>	1.5 kg/m <sup>2</sup>
Velocidad de impregnado	0,366 mm/s	0,244 mm/s

Se puede observar que los dos núcleos tienen un mismo espesor, y absorben prácticamente la misma cantidad de resina, sin embargo, hay una gran diferencia en el peso de los núcleos, lo cual, teniendo el mismo espesor, afecta directamente a la densidad. Por lo tanto, siendo el material SORIC FX más ligero y menos denso, es natural aceptar los resultados de velocidad de impregnado.

Aunque el núcleo SORIC FX es del mismo espesor, debido a su configuración en forma de panal de abeja, tiene zonas en las que reduce el espesor, formando los hexágonos. Esto, además de reducir la densidad, favorece el fluido de la resina, en su avance durante la impregnación.

A priori, esta propiedad hace al SORIC FX más valioso a nivel industrial, puesto que pesa menos y tiene una velocidad de impregnado mayor. En los ensayos mecánicos que se expondrán a continuación, se podrá observar si las propiedades mecánicas de los núcleos acompañan a las propiedades de peso y velocidad de impregnado.



## 2. Resultados de la caracterización mecánica.

Los ensayos mecánicos consisten en realizar un estudio de sobre el comportamiento de los materiales cuando son sometidos a distintos esfuerzos mecánicos. La finalidad, es poder realizar una comparativa entre los diferentes materiales según su resistencia máxima a rotura y su elongación, su resistencia a flexión, su resistencia al impacto y su dureza.

Para todo esto, se utilizarán distintos tipos de ensayos entre los cuales variará la velocidad de aplicación de las cargas y el direccionamiento y concentración de tensiones.

El ensayo por antonomasia en la caracterización mecánica es el ensayo de tracción. Este, al igual que otros, se realiza en la maquina universal de ensayos, coloquialmente denominada MUE.

### 2.1. Ensayo de tracción

#### 2.1.1. Ensayo de tracción de los núcleos con resina

A continuación se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de tracción de los núcleos impregnados:

TABLA 17. RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN DEL NÚCLEO DE SORIC FX IMPREGNADO.

SORIC FX						
Probeta	ancho	espesor	dist. Garras	modulo (MPa)	Alargamiento (%)	resistencia a traccion (Mpa)
1	9,46	3,15	85	272,3	3,76	2,5
2	9,31	3,15	90	524	1,88	5,6
3	9,5	3,18	90	379,1	2,07	5,3
4	9,45	3,15	89	348,2	2,1	4,8
MEDIA	9,43	3,1575	88,5	380,9	2,4525	4,55

TABLA 18. RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN DEL NÚCLEO DE SPHERE IMPREGNADO.

SPHERE.CORE						
Probeta	ancho	espesor	dist. Garras	modulo (MPa)	Alargamiento (%)	resistencia a traccion (Mpa)
1	9,4	5,05	88	305,8	4,78	9,8
2	9,3	5	87	361	4,13	9
4	9,45	5,2	84	195	5,02	8,7
5	9,25	4,89	83	340	2,65	8,9
MEDIA	7,48	4,028	68,4	240,36	3,316	7,28

## 2.1.2. Ensayo de tracción de los compuestos

A continuación se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de tracción de los compuestos:

TABLA 19. RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN DEL CF + SORIC FX .

CF + Soric FX						
Probeta	ancho (mm)	espesor (mm)	dist. Garras (mm)	modulo (MPa)	Alargamiento (%)	resistencia a traccion (Mpa)
1	10,23	4,4	90	1454,07	no rompe	112,97
2	10,1	4,4	84	1730,3	7,31	114,6
3	10,1	4,3	83	1407	8,25	117
4	10,11	4,38	84	1208,2	7,63	89
5	10,1	4,3	83	1464,6	7,57	116,2
6	10,09	4,32	83	1537,8	7,37	102
MEDIA	12,146	5,22	101,4	1760,394	7,626	130,354

TABLA 20. RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN DEL DEL GF + SORIC FX.

GF + SORIC FX						
Probeta	ancho (mm)	espesor (mm)	dist. Garras (mm)	modulo (MPa)	Alargamiento (%)	resistencia a traccion (Mpa)
1	9,2	3,6	81	954,4	5,5	59,2
2	9,3	3,7	81	966	4,87	58
3	9,3	3,6	80,5	942,7	4,47	55,7
4	9,27	3,62	81	997	5	63,8
5	9,28	3,7	81	907,1	5,44	63,8
MEDIA	9,27	3,644	80,9	953,44	5,056	60,1

TABLA 21. RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN DEL DEL PPF + SORIC FX.

PPF + SORIC FX						
Probeta	ancho (mm)	espesor (mm)	dist. Garras (mm)	modulo (MPa)	Alargamiento (%)	resistencia a traccion (Mpa)
1	10,02	5,12	88	699,98	16,13	49,23
2	10,13	4,85	88	707,7	16,02	50,3
3	10,1	5	88	719,66	15,79	49,84
4	10	5,2	87	6,54	17,47	50,35
5	10,12	4,87	87	679,3	16,2	50,6
MEDIA	10,074	5,008	87,6	562,636	16,322	50,064

TABLA 22. RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN DEL DEL CF + SPHERE.CORE.

CF + sphere						
Probeta	ancho (mm)	espesor (mm)	dist. Garras (mm)	modulo (MPa)	Alargamiento (%)	resistencia a traccion (Mpa)
1	10,05	6,35	83	673,39	8,87	71,17
2	10,1	6,33	81,5	718,89	10,11	72,53
3	10,1	6,05	81	756,38	10,83	94,35
4	10,15	6,1	80,5	701,1	9,49	82,42
MEDIA	8,08	6,2075	81,5	712,44	9,825	80,1175

TABLA 23. RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN DEL DEL GF + SPHERE.CORE.

GF + SPHERE						
Probeta	ancho (mm)	espesor (mm)	dist. Garras (mm)	modulo (MPa)	Alargamiento (%)	resistencia a traccion (Mpa)
1	9,3	6	80,5	513,01	5,86	38,47
2	9,22	5,8	81	509,1	5,54	39,61
3	9,25	6,1	80,5	321,61	5,83	32,62
4	9,2	5,7	81	618,02	5,38	42,62
5	9,25	6,07	81	676,97	5,46	40,14
MEDIA	9,244	5,934	80,8	527,742	5,614	38,692

TABLA 24. RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN DEL DEL PPF + SPHERE.CORE.

PPF + SPHERE						
Probeta	ancho (mm)	espesor (mm)	dist. Garras (mm)	modulo (MPa)	Alargamiento (%)	resistencia a traccion (Mpa)
1	10,25	7,1	87	306,18	24,48	35,56
2	10	7,2	87	283,91	24,82	36,57
3	10,01	7,5	86	241,27	25,11	34,46
4	10,1	7,15	86	280,47	25,58	36,92
5	10,1	7,18	86	272,41	24,41	34,51
MEDIA	10,092	7,226	86,4	276,848	24,88	35,604

### 2.1.3. Discusión de los resultados del ensayo de tracción

A continuación, se va a llevar a cabo un análisis y discusión de los resultados obtenidos en el ensayo de tracción.

Como se ha comentado anteriormente, el ensayo de tracción supone uno de los ensayos más importantes dentro de la caracterización mecánica, y, por ende, dentro de la caracterización de materiales.

Si en algo destacan los materiales compuestos, es en sus propiedades mecánicas, principalmente si se comparan con su peso.

#### 2.1.3.1. Discusión de los resultados del ensayo de tracción de los núcleos impregnados

En primer lugar, se van a comparar y analizar los resultados de los núcleos por separado, impregnados con resina.

Hay que entender que esto es un ensayo con fines puramente de investigación y académicos, puesto que, en la industria, no tiene sentido impregnar un núcleo con resina para que trabaje solo. El núcleo siempre es una parte de un composite.

Aun así, es interesante conocer el funcionamiento de estos materiales, teniendo en cuenta también, que uno de los objetivos del presente proyecto es el de servir de formación y práctica para el autor.

Los resultados de los núcleos en el ensayo de tracción demuestran que los dos materiales tienen una varianza bastante alta en sus resultados. Esto es debido a que los núcleos impregnados con resina resultaron ser materiales muy frágiles, y debido a su morfología, presentaban concentradores de tensiones.

Aun así, se puede comprobar que el núcleo de Soric FX tiene un módulo elástico más alto que el Sphere.core, y una deformación ligeramente menor.

Esto es porque el Soric XF es un material más rígido. Esta propiedad lo hace combinar algo mejor con los materiales compuestos con fibras, ya que generalmente, cuando un núcleo y fibras trabajan de manera conjunta, la deformación la determina la fibra. Más adelante se mostrará que sucede cuando las fibras tienen un porcentaje de deformación superior a al núcleo.

Por otra parte, se observa que el material Sphere.core tiene una resistencia a la tracción superior a la del Soric XF.

Esto es debido a que son probetas más anchas, dada la tipología del núcleo. Además de esto, cabe recordar que el núcleo está trabajando en combinación con epoxi, esto es un termoestable, y una de sus principales características es que son polímeros rígidos y poco flexibles. Se puede comparar los resultados del ensayo de tracción con el porcentaje de resina que los núcleos han absorbido.

PESO DE LOS NÚCLEOS				
Núcleos	Peso núcleo	peso composite (g)	peso Resina (g)	Refuerzo (%)
Soric FX	24,8	203,6	178,8	12,2
Sphere	42,2	281,6	239,4	15,0

Se pueden observar diferencias entre los núcleos, que se ven reflejadas en los ensayos de tracción. En primer lugar, y como es lógico, en la resistencia a la tracción influye directamente la sección del material.

Se observa claramente que la sección de la probeta de Sphere.core es mayor que la de Soric FX, y además su masa es mayor. El núcleo Sphere.core también ha absorbido un porcentaje de resina algo superior.

Esto puede elevar un poco las propiedades del Sphere.core cuando se compara con el Soric FX.

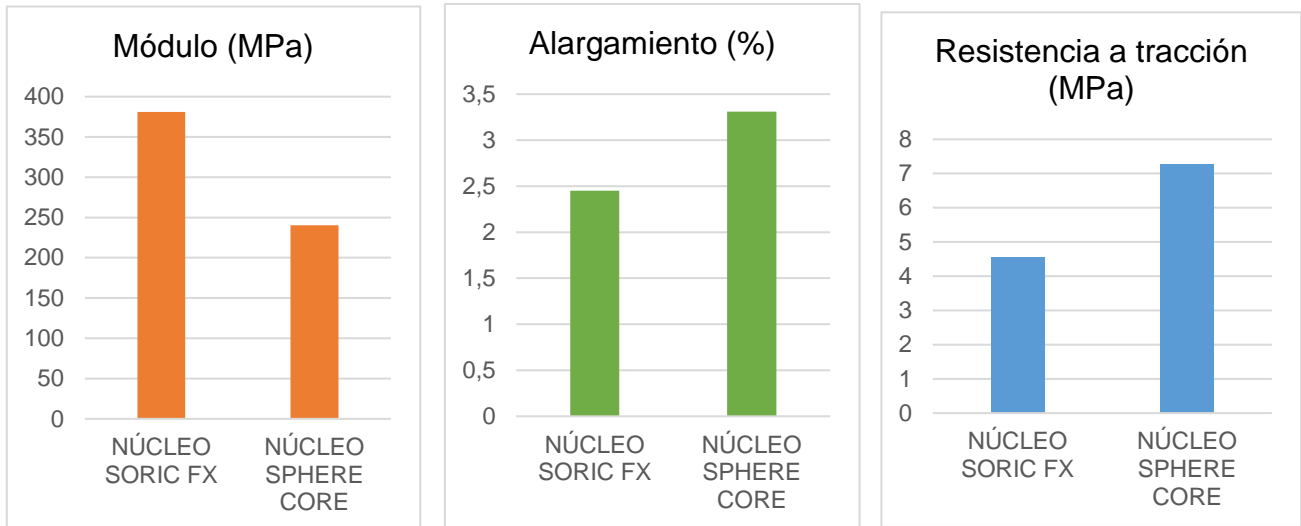


GRÁFICO 5. RESULTADOS DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS NÚCLEOS IMPREGNADOS.

### 2.1.3.2. Discusión de resultados del ensayo de tracción de los composites

A continuación, se procede a discutir los resultados obtenidos tras el ensayo de tracción. Desde un primer momento se tiene constancia de las diferencias entre las propiedades mecánicas de las fibras ensayadas, pero es interesante realizar algunas comparaciones y entender el porqué de los resultados.

A continuación, se van a representar los datos obtenidos:

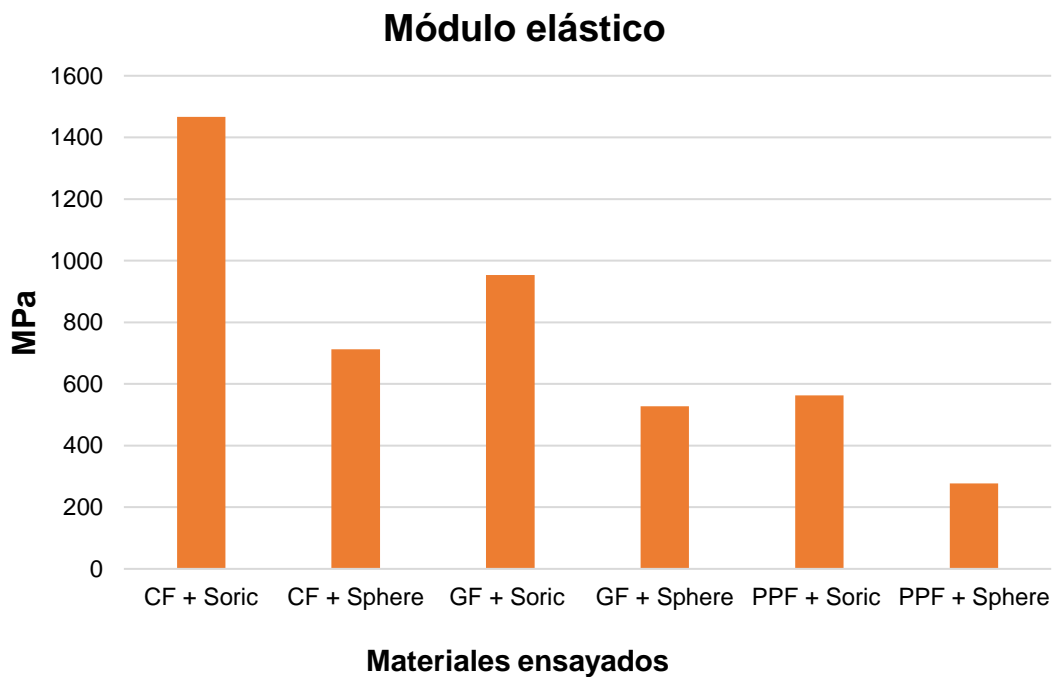


GRÁFICO 6. MÓDULO ELÁSTICO DE LOS MATERIALES COMPUESTOS ENSAYADOS.

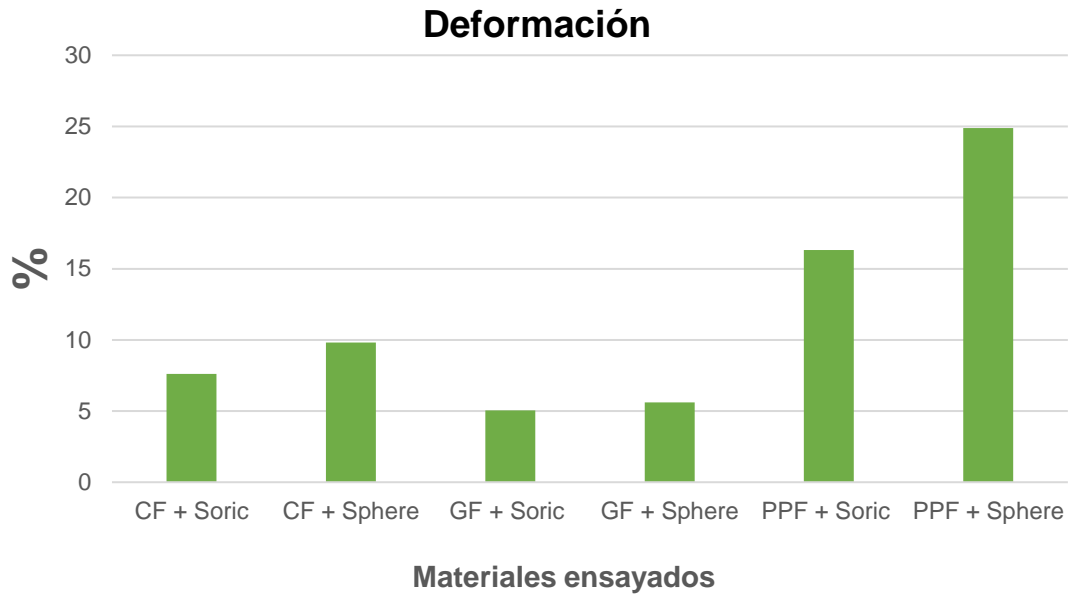


GRÁFICO 7. DEFORMACIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS ENSAYADOS.

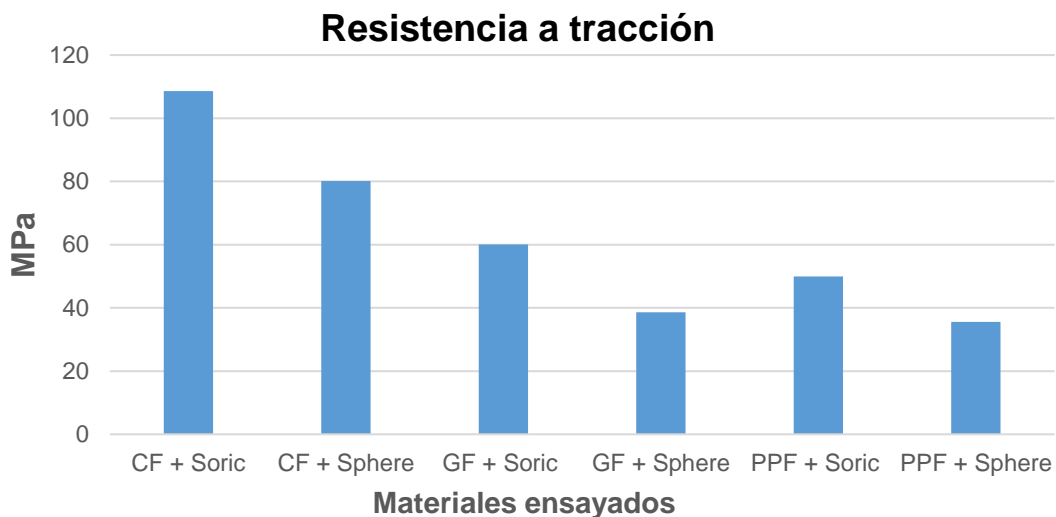


GRÁFICO 8. RESISTENCIA A TRACCIÓN DE LOS MATERIALES COMPUESTOS ENSAYADOS.

Si se observan las gráficas del resultado del ensayo a tracción, fácilmente se pueden ver las diferencias entre los materiales ensayados. Las diferencias entre los núcleos, así como la diferencia entre las fibras resulta evidente. Bien es cierto que los resultados han salido como se esperaban, conociendo previamente las propiedades a nivel teórico de los materiales, pero aun así, el resultado arroja más información.

Se puede analizar también el tipo de rotura. Tal y como se ha comentado en el apartado de introducción, el comportamiento a tracción de los núcleos no es muy bueno, pues la principal función de estos es aumentar el espesor de la pieza. De esta forma, mientras que las roturas de los compuestos de vidrio y carbono han sido totalmente frágiles, (llegando al fallo de la fibra y arrastrando de la misma forma el fallo del núcleo), en el caso de la

fibra de polipropileno la rotura es más dúctil, y el núcleo falla mucho antes de que lo haga la fibra, cuya deformación es mucho mayor.

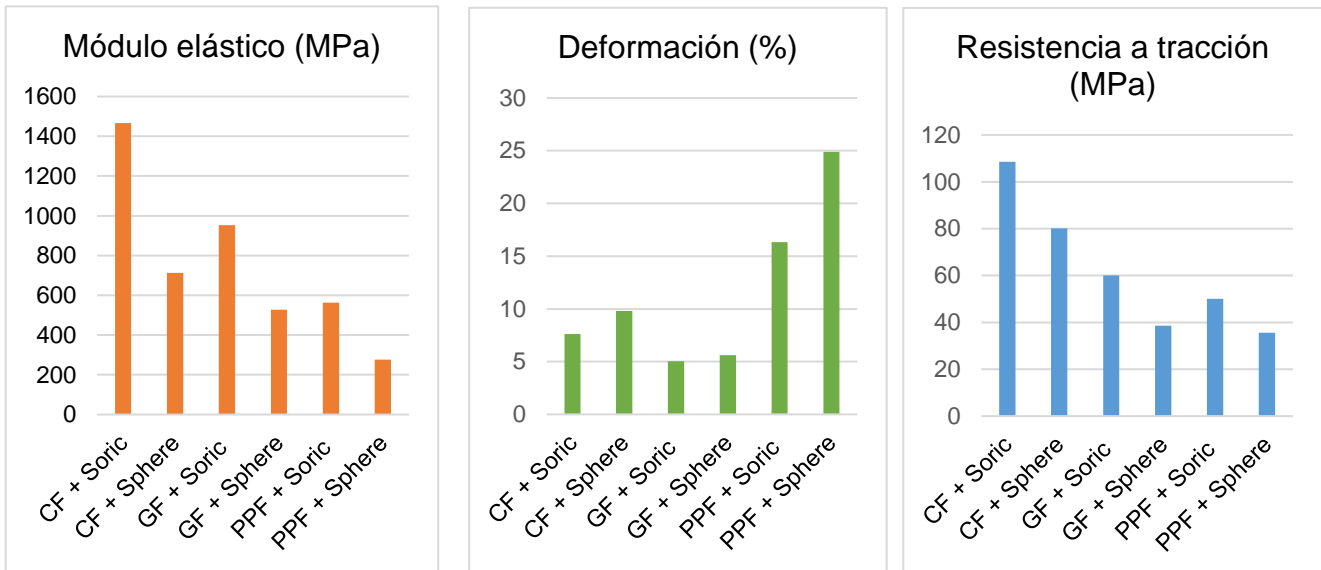


GRÁFICO 9. COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN EN LOS COMPUESTOS.

Tal y como se observa claramente, el compuesto de carbono es el que tiene mayor módulo y resistencia a tracción, seguido por el compuesto con fibra de vidrio y, por último, el compuesto de fibras de polipropileno. Pero si se observan los datos de deformación, se observa que el de PPF es bastante superior, llegando a alcanzar prácticamente un 25% de deformación total. Esto es debido a que es un material mucho más elástico. Esto encaja totalmente con la naturaleza de las fibras de polipropileno.



ILUSTRACIÓN 82. ROTURA DE PROBETA EN ENSAYO DE TRACCIÓN DEL COMPOSITE DE POLIPROPILENO.

Si se observan las imágenes de las probetas durante el ensayo, se observa una fluencia muy superior a los compuestos de carbono y vidrio, que son mucho más rígidos. En el caso del polipropileno, en el detalle de la imagen se puede observar como la fibra es mucho más flexible que el núcleo, y este se rompe antes. Esto no es un comportamiento habitual en los composites con fibras de vidrio y carbono, ya que estas fibras presentan una rigidez muy alta. En este caso, ya que se trata de una fibra termoplástica, se comporta como este material, y se deforma considerablemente antes de romper. Además, en la imagen de la izquierda se observa como al aplicar tensión la fibra se separa totalmente del núcleo, y ya no actúan como un único material. Esto supone uno de los principales fallos a evitar en la industria, y se debe a una mala interfase entre ambos componentes.

Viendo la pareja de Soric FX y Sphere.core combinados con carbono, se observa claramente que los resultados del núcleo Soric FX son muy superiores a los de Sphere.core. Esto también se había demostrado con el ensayo de los núcleos en solitario, pero esta vez la resistencia a la tracción del Soric FX también es superior a la del Sphere.core. Esto demuestra que la sinergia que tienen el composite de carbono + epoxi con el núcleo Soric FX es muy superior a la que tiene con el núcleo de Sphere.core.

De la misma forma ocurre si se comparan los resultados entre Soric FX y Sphere.core en los materiales de fibra de vidrio y fibra de polipropileno, se confirma que los compuestos con el núcleo de Soric FX tienen una resistencia a tracción y módulo elástico superiores, y además, son más rígidos, puesto que el Sphere.core se deforma bastante más.

## 2.2. Ensayo de flexión

### 2.2.1. Ensayo de flexión de los núcleos con resina

A continuación se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de flexión de los núcleos impregnados:

TABLA 25. RESULTADOS DEL ENSAYO DE FLEXIÓN DEL NÚCLEO DE SORIC FX IMPREGNADO.

SORIC FX				
Probeta	Ancho	Espesor	Resistencia (MPa)	Módulo de flexión (MPa)
1	9,2	3,1	9,7	805,83
2	9,3	3,2	8,82	637,21
3	9,2	3,1	8,9	634,58
Media	9,23	3,13	9,14	692,54



TABLA 26. RESULTADOS DEL ENSAYO DE FLEXIÓN DEL NÚCLEO DE SHERE IMPREGNADO.

SPHERE.CORE				
Probeta	Ancho	Espesor	Resistencia (MPa)	Módulo de flexión (MPa)
1	9,4	5,1	7,1	392,75
2	9,1	4,7	9,37	554,92
3	9,4	4,9	7,2	459,03
Media	9,3	4,9	7,89	468,9

### 2.2.2. Ensayo de flexión de los compuestos.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de flexión de los composites.

TABLA 27. RESULTADOS DEL ENSAYO DE FLEXIÓN DEL DEL CF + SORIC FX.

CF + SPHERE				
Probeta	Ancho	Espesor	Resistencia (MPa)	Módulo de flexión (MPa)
1	10,55	6,3	55,33	3222,80
2	10,3	6,8	20,63	2014,60
3	10,4	6,5	47,37	2622,00
Media	10,42	6,53	41,11	2619,8

TABLA 28. RESULTADOS DEL ENSAYO DE FLEXIÓN DEL DEL CF + SORIC FX.

CF + SORIC FX				
Probeta	Ancho	Espesor	Resistencia (MPa)	Módulo de flexión (MPa)
1	10,3	4,5	46,8	4950,3
2	10,25	4,4	61,3	6810,10
3	10,4	4,6	55,9	4485,10
Media	10,32	4,50	54,67	5415,17

TABLA 29. RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN DEL DEL PPF + SORIC FX.

GF + SORIC FX				
Probeta	Ancho	Espesor	Resistencia (MPa)	Módulo de flexión (MPa)
1	9,4	3,9	82,3	5917,10
2	9,4	4	47,2	5011,20
3	9,4	4,1	62,1	5392,90
Media	9,40	4,00	63,87	5440,40

TABLA 30. RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN DEL DEL PPF + SORIC FX.

GF + SPHERE				
Probeta	Ancho	Espesor	Resistencia (MPa)	Módulo de flexión (MPa)
1	9,2	6,3	45,08	3098,90
2	9,3	6	30,45	2168,80
3	9,4	6,3	37,46	2615,30
Media	9,3	6,2	37,66	2627,67

TABLA 31. RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN DEL DEL PPF + SORIC FX.

PPF + SORIC FX				
Probeta	Ancho	Espesor	Resistencia (MPa)	Módulo de flexión (MPa)
1	10,4	5,1	33,4	1653,30
2	10,2	5,15	35,8	1647,00
3	10,4	5,2	25,8	1882,30
Media	10,33	5,15	31,67	1727,53

TABLA 32. RESULTADOS DEL ENSAYO DE TRACCIÓN DEL DEL PPF + SORIC FX.

PPF + SPHERE				
Probeta	Ancho	Espesor	Resistencia (MPa)	Módulo de flexión (MPa)
1	10,1	7,1	12,22	943,27
2	10,2	7,1	14,17	989,98
3	10,25	7,3	12,8	695,81
Media	10,18	7,17	13,06	876,35

### 2.2.3. Discusión de resultados del ensayo de flexión

Como se ha comentado con anterioridad, el ensayo de flexión resulta de vital importancia en el análisis de los materiales compuestos con núcleos ligeros. Es de esperar, teniendo en cuenta los ensayos anteriores, que los compuestos con carbono tengan una resistencia mayor a la flexión que los compuestos con vidrio, y estos a su vez, mayor resistencia que los compuestos con fibra de polipropileno.

A continuación, se representan gráficamente los resultados de resistencia a flexión y de módulo de flexión de los ensayos realizados.

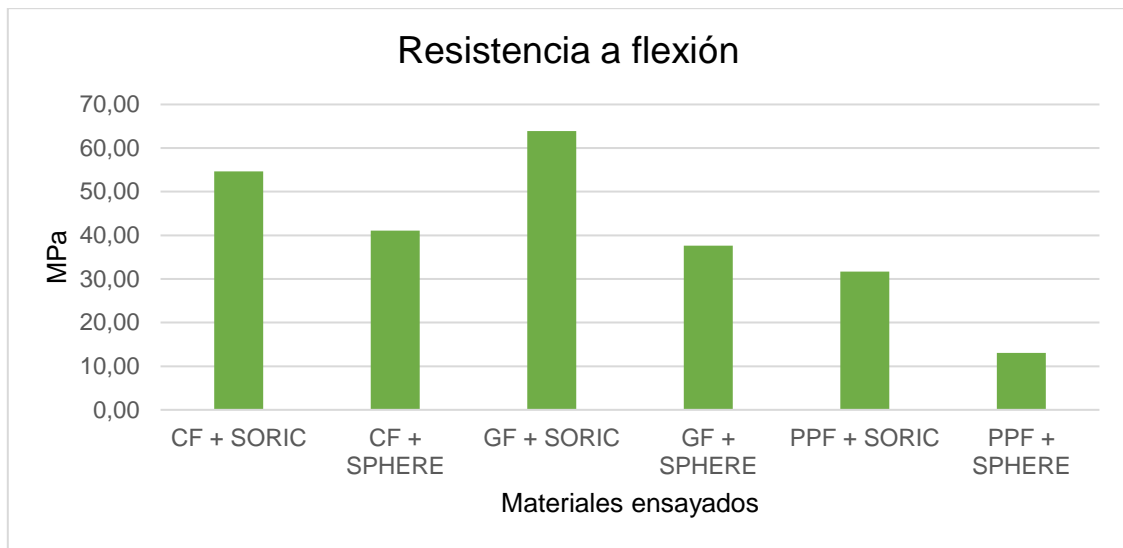


GRÁFICO 10. RESISTENCIA DE LOS COMPUESTOS A FLEXIÓN.

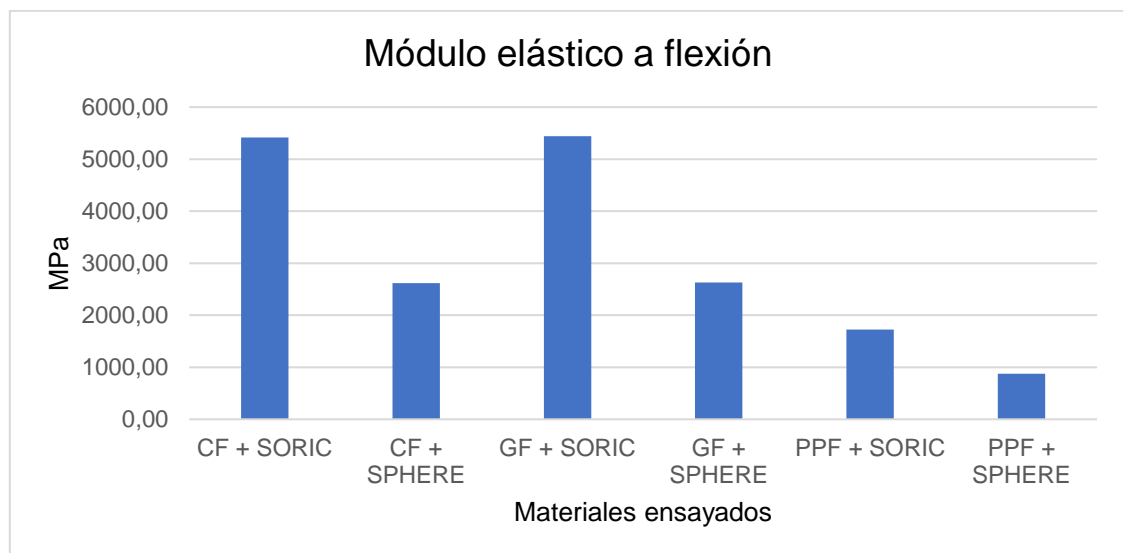


GRÁFICO 11. MÓDULO ELÁSTICO DE LOS COMPUESTOS A FLEXIÓN.

Como se puede comprobar, al contrario que en los ensayos de tracción, los compuestos de carbono no son los que tienen mayor resistencia, pues el mayor resultado medio lo obtuvo el compuesto de fibra de vidrio con núcleo de Soric FX, con 63,87 MPa. Por otra parte, el material con peores características mecánicas a flexión es el compuesto de polipropileno con núcleo de Sphere.core con apenas 13,66 MPa. En cuanto al módulo de flexión, la escala se repite, siendo el compuesto de fibra de vidrio con núcleo de Soric FX el que mayor módulo tiene, con hasta 5440,4 MPa, y el compuesto de polipropileno con núcleo de Sphere.core el que menos, con 876,35 MPa. En cuanto a los núcleos, se obtiene en todos los resultados la certeza de que el núcleo de Soric XF tiene una resistencia mayor, y una menor deformación.

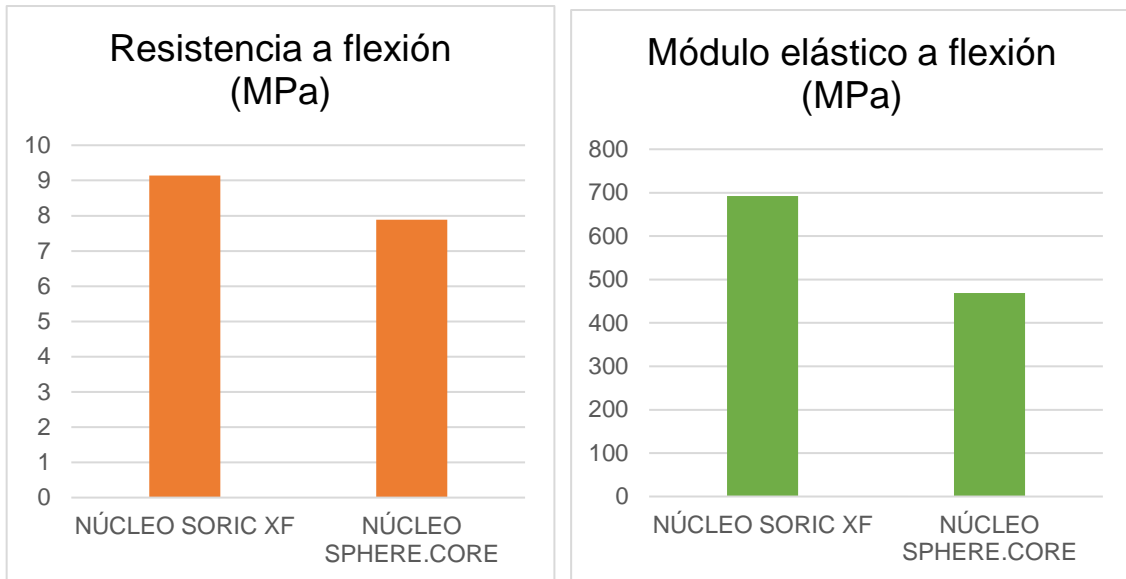


GRÁFICO 12. RESULTADOS AL ENSAYO DE FLEXIÓN DE LOS NÚCLEOS IMPREGNADOS.

Los núcleos de Soric XF han obtenido unos resultados de módulo de flexión claramente superiores, en concreto un 49,135% mayores que los compuestos con núcleo de Sphere.Core.

En algunas ocasiones, el tener una mayor flexibilidad puede contribuir a que el material, pese a tener un módulo inferior, tenga una resistencia superior, debido a la fluencia y a la reorientación de sus cadenas poliméricas. En este caso, aun así, la máxima resistencia a flexión la tiene el material con mayor módulo y menor deformación.

En cuanto a términos de diseño, resulta evidente que, si se busca resistencia en alguna pieza o componente, la elección de los compuestos con núcleo de Soric FX es la más acertada. En cuanto a deformación, en ocasiones se busca que la pieza tenga cierta flexibilidad, con lo cual habría que valorar la capacidad de flexión de ambos componentes. En la industria, generalmente la estabilidad dimensional es un factor importante a la hora de diseñar piezas, sobre todo si son estructurales. Con lo cual la elección más eficaz, sería escoger el compuesto de Soric FX con fibra de vidrio, o con fibra de carbono.

TABLA 33. RESULTADOS DEL ENSAYO A FLEXIÓN DE LOS COMPOSITES.

	Módulo de flexión (MPa)	Resistencia flexión (MPa)
CF + Soric FX	5415,17	54,7
GF + Sphere.core	2619,8	41,1
CF + Soric FX	5440,4	63,9
GF + Sphere.core	2627,67	37,7
PPF + Soric FX	1727,67	31,7
PPF + Sphere.core	876,35	13,1

## 2.3. Ensayo de impacto charpy.

### 2.3.1. Ensayo de resistencia al impacto de los núcleos con resina.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de impacto charpy de los núcleos compuestos:

TABLA 34. RESULTADO DEL ENSAYO DE RESISTENCIA AL IMPACTO DEL SORIC FX IMPREGNADO.

SORIC FX				
PÉNDULO 1 J				
Probeta	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Energía (J)	Resiliencia (J/m <sup>2</sup> )
1	9,30	3,20	0,08	2,69
2	9,20	3,20	0,07	2,38
3	9,10	3,10	0,08	2,84
Media	9,20	3,17	0,08	2,63

TABLA 35. RESULTADO DEL ENSAYO DE RESISTENCIA AL IMPACTO DEL SPHERE IMPREGNADO.

SPHERE.CORE				
PÉNDULO 1 J				
Probeta	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Energía (J)	Resiliencia (J/m <sup>2</sup> )
1	9,30	5,00	0,19	4,09
2	9,30	4,80	0,17	3,81
3	9,40	4,90	0,19	4,13
Media	9,33	4,90	0,18	4,01

### 2.3.2. Ensayo de resistencia al impacto de los compuestos.

A continuación se muestran los resultados obtenidos en los ensayos de impacto charpy de los composites:

TABLA 36. RESULTADO DEL ENSAYO DE RESISTENCIA AL IMPACTO DEL SORIC FX + CF.

<b>SORIC XF + CF</b>				
<b>PÉNDULO 1 J</b>				
<b>Probeta</b>	<b>Espesor (mm)</b>	<b>Ancho (mm)</b>	<b>Energía (J)</b>	<b>Resiliencia (J/m2)</b>
<b>1</b>	10,3	4,40	0,71	15,67
<b>2</b>	10,3	4,40	0,76	16,77
<b>3</b>	10,3	4,30	0,89	20,09
<b>Media</b>	<b>10,30</b>	<b>4,37</b>	<b>0,79</b>	<b>17,51</b>

TABLA 37. RESULTADO DEL ENSAYO DE RESISTENCIA AL IMPACTO DEL SPHERE.CORE + CF.

<b>SPHERE + CF</b>				
<b>PÉNDULO 6 J</b>				
<b>Probeta</b>	<b>Espesor (mm)</b>	<b>Ancho (mm)</b>	<b>Energía (J)</b>	<b>Resiliencia (J/m2)</b>
<b>1</b>	10,6	6,30	1,90	28,45
<b>2</b>	10,5	6,20	1,22	18,74
<b>3</b>	10,6	6,60	1,06	15,15
<b>Media</b>	<b>10,57</b>	<b>6,37</b>	<b>1,39</b>	<b>20,78</b>

TABLA 38. RESULTADO DEL ENSAYO DE RESISTENCIA AL IMPACTO DEL SORIC FX + GF.

<b>SORIC XF + GF</b>				
<b>PÉNDULO 6 J</b>				
<b>Probeta</b>	<b>Espesor (mm)</b>	<b>Ancho (mm)</b>	<b>Energía (J)</b>	<b>Resiliencia (J/m2)</b>
<b>1</b>	9,4	4,10	0,78	20,24
<b>2</b>	9,3	4,10	0,70	18,36
<b>3</b>	9,3	3,80	0,85	24,05
<b>Media</b>	<b>9,33</b>	<b>4,00</b>	<b>0,78</b>	<b>20,88</b>

TABLA 39. RESULTADO DEL ENSAYO DE RESISTENCIA AL IMPACTO DEL SPHERE.CORE + GF.

<b>SPHERE + GF</b>				
PÉNDULO 6 J				
Probeta	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Energía (J)	Resiliencia (J/m <sup>2</sup> )
1	9,3	5,90	1,06	19,32
2	9,3	6,20	1,14	19,77
3	9,3	5,90	1,14	20,78
<b>Media</b>	<b>9,30</b>	<b>6,00</b>	<b>1,11</b>	<b>19,96</b>

TABLA 40. RESULTADO DEL ENSAYO DE RESISTENCIA AL IMPACTO DEL SPHERE + PPF.

<b>SORIC XF + PPF</b>				
PÉNDULO 6 J				
Probeta	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Energía (J)	Resiliencia (J/m <sup>2</sup> )
1	10,4	5,2	1,16	21,45
2	10,3	5,1	1,14	21,70
3	10,3	5,2	1,19	22,22
<b>Media</b>	<b>10,33</b>	<b>5,17</b>	<b>1,16</b>	<b>21,79</b>

TABLA 41. RESULTADO DEL ENSAYO DE RESISTENCIA AL IMPACTO DEL SORIC FX + PPF

<b>SPHERE + PPF</b>				
PÉNDULO 6 J				
Probeta	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Energía (J)	Resiliencia (J/m <sup>2</sup> )
1	10,3	7,00	1,65	22,88
2	10,2	7,20	1,84	25,05
3	10,2	7,10	1,71	23,61
<b>Media</b>	<b>10,23</b>	<b>7,10</b>	<b>1,73</b>	<b>23,85</b>

### 2.3.3. Discusión de los resultados del ensayo de impacto

Analizando los resultados obtenidos podemos corroborar que el núcleo de Sphere.Core tiene una resistencia a impacto mayor que el Soric XF. En el caso estudiado, aunque haya aumentado la tenacidad y la resistencia al impacto, esta mejora es insignificante al lado de la mengua hecha de cara a las propiedades elásticas y de deformación en los anteriores ensayos.

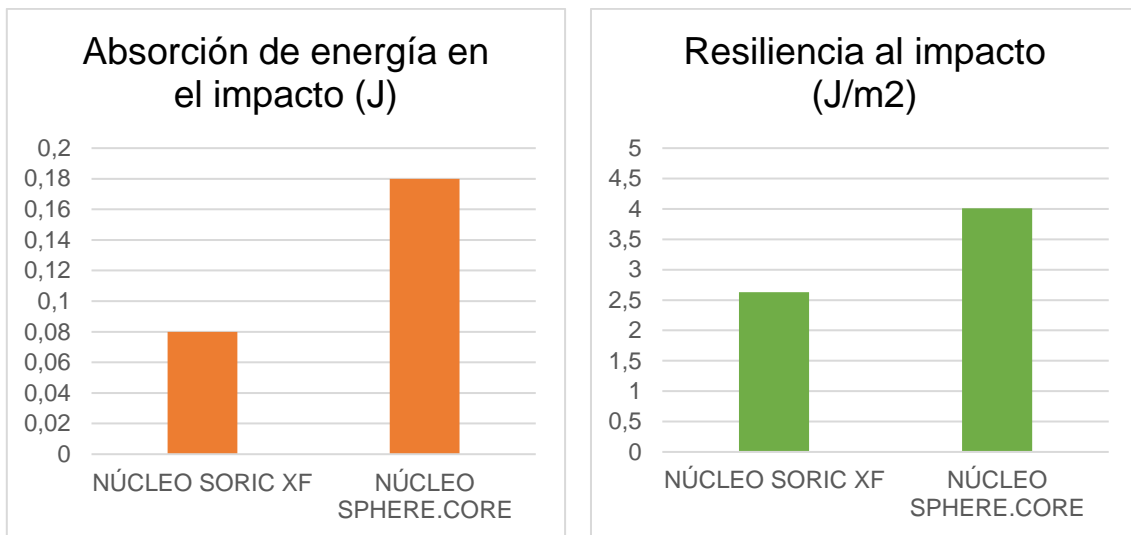


GRÁFICO 13. RESULTADO DE LOS NÚCLEOS IMPREGNADOS A FLEXIÓN.

Como era de esperar, teniendo en cuenta los resultados de los ensayos anteriores, el compuesto de fibra de polipropileno con núcleo de Sphere.Core es el que más resistencia al impacto tiene de los 6, con una media de 23,85 kJ·m<sup>2</sup>. Por otro lado, los datos obtenidos a partir de los materiales con fibra de vidrio y fibra de carbono han sido muy similares entre ellos, y por debajo del PP. Así, al sacar el promedio de los valores de los materiales con núcleo Soric FX, se observa que tiene peores propiedades de resistencia al impacto debido a una mayor rigidez y una absorción de energía más baja.

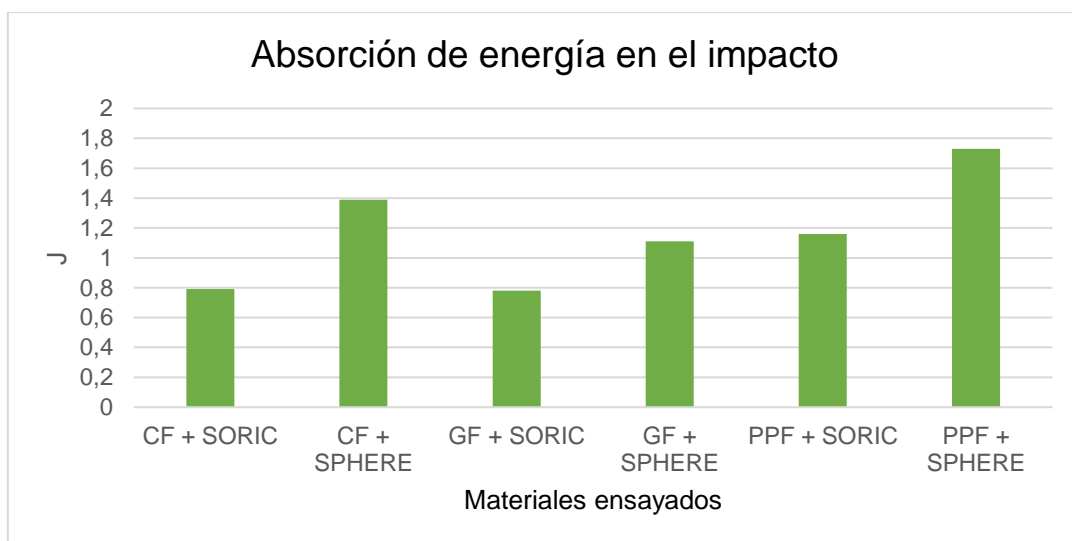


GRÁFICO 14. ABSORCIÓN DE ENERGÍA EN EL IMPACTO DE LOS LAMINADOS.



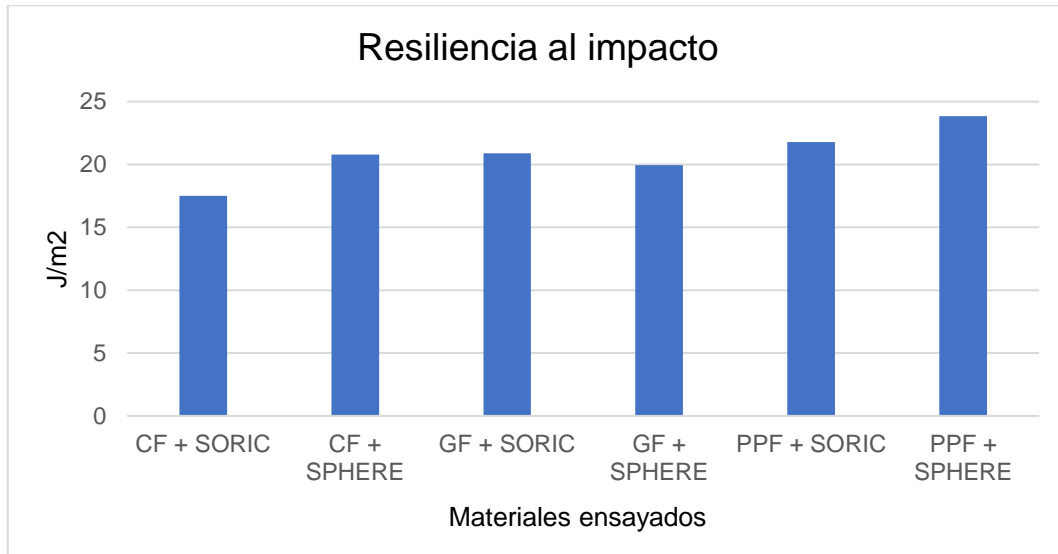


GRÁFICO 15. RESILIENCIA AL IMPACTO DE LOS LAMINADOS.

En el ensayo de impacto, la principal propiedad es cómo se comporta la energía en el momento en el que el péndulo choca contra la probeta. El equipo mide la energía que pierde el péndulo, y esta energía es la que ha absorbido la probeta.

Un material con menor resistencia al impacto, no le “quitará” mucha energía al péndulo. Por otra parte, un material que tenga una gran resistencia al impacto absorbe una energía mayor.

Es por esto por lo que un material más rígido distribuye menos la energía, mientras que un material más flexible, se deforma, y reparte la energía por el material, obteniendo una resistencia al impacto mayor. Por esto, los compuestos de fibra de polipropileno, y los núcleos de Sphere.core son los que mejor distribuyen la energía, y por lo tanto los que han obtenido mejores resultados en el ensayo de resistencia al impacto.

## VI. CONCLUSIONES.

En el presente trabajo se ha llevado a cabo una investigación en el campo de los materiales compuestos para el sector náutico, con productos altamente tecnológicos y muy avanzados, basados en compuestos con núcleos no-tejidos. Estos son materiales con un nivel de diseño elevado y que requieren grandes conocimientos de tecnología de materiales compuestos, una gran habilidad de fabricación y conocimientos de caracterización y ensayos de laboratorio.

Durante el periodo que duró la investigación se ha conseguido avanzar en la tecnología que envuelve los materiales compuestos empleados en el sector náutico, aportando un granito de arena al avance de la ciencia de materiales.

En primer lugar se ha llevado a cabo un análisis exhaustivo del estado del arte de los materiales poliméricos y compuestos, haciendo hincapié en la mecánica de los compuestos con núcleo en formato sandwich, y en concreto con los núcleos empleados, Soric XF y Sphere.core.

Todo esto se ha llevado a cabo con la intención de caracterizar ambos materiales con diferentes combinaciones y así consolidar algunas líneas de conocimiento que todavía no se habían establecido.

### Procedimiento de infusión.

Para avanzar en la investigación se han fabricado diferentes láminas de materiales compuestos mediante el proceso de infusión de resina. En el caso de los materiales compuestos, la caracterización ha de hacerse conociendo a fondo como se ha fabricado la probeta. Esto se debe a que cada compuesto es altamente anisotrópico, y con unas propiedades que varían en gran medida en función de los diferentes parámetros de fabricación.

Durante el proceso de infusión, se advirtieron que los dos núcleos facilitan de gran manera la infusión de resina, favoreciendo el flujo de esta. En concreto, el núcleo de Soric XF es el que más facilitó el avance de la resina, aunque por otra parte, el Sphere.core resulta ser más flexible, y esto favoreció el que no haya roturas o grietas en la manipulación.

La resina empleada Resina Resoltech 1050 y Endurecedor Resoltech 1056s resultaron ser muy adecuados para los procesos de infusión de piezas pequeñas, puesto que el pot life es amplio y permitió trabajar cómodamente, y con una fuente de calor adicional, el curado fue relativamente rápido.

### Caracterización de los materiales compuestos.

EL apartado más importante y que contribuye al cumplimiento de los objetivos fue la caracterización de los materiales obtenidos. Los diferentes ensayos de caracterización permiten asociar unas propiedades a los diferentes compuestos.

El objetivo del bloque de caracterización es conocer a fondo los nuevos materiales, pero en concreto obtener las propiedades de los materiales de núcleo para el sector náutico, y sus propiedades cuando se combinan con los refuerzos y matrices tradicionales. En este sentido, durante la investigación se ha podido comparar las propiedades físicas y mecánicas de tres tipos de refuerzos, a saber, fibra de carbono, fibra de vidrio y fibra Innegra o fibra de polipropileno. Pero lo más interesante fue obtener las propiedades de los dos materiales de núcleo no-tejidos para compuestos tipo sándwich. De esta forma, el núcleo Soric XF y el Sphere.Core, han sido probados bajo diferentes cargas, arrojando información clara de su comportamiento mecánico.

En primer lugar, se planteó una serie de ensayos y pruebas para conocer el comportamiento físico y natural de los núcleos y compuestos. Se llevó a cabo el pesaje de los componentes, antes del proceso de infusión, para obtener, mediante la regla de las mezclas, la cantidad de resina absorbida y la densidad del compuesto. De esta forma se pudo comprobar que el Soric XF es un núcleo con menor espesor, y más ligero, y esto lleva a que absorbe menos resina. El porcentaje de resina absorbida por el Sphere.Core es 3.29% mayor que el del Soric XF.

Otro ensayo muy interesante, principalmente para conocer y controlar el proceso de fabricación con estos materiales, es el estudio de la velocidad de impregnado. Se hizo el ensayo de velocidad de impregnado, midiendo el tiempo que tardaba en avanzar la resina y cubrir el núcleo. El material Sphere.Core tardó alrededor de 15 minutos en cubrir toda la lámina, mientras que el Soric solo 10 minutos. Esto demuestra que la velocidad de impregnado del Soric XF es hasta un 50% mayor que la del Sphere.Core, y la calidad del material final es idéntica. Esto convierte al Soric XF en mejor material para núcleo a nivel de producción, puesto que los tiempos de infusión y curado se intentan reducir al máximo.

Tras estos ensayos, se comenzó con el bloque de propiedades mecánicas, donde se midieron las propiedades de resistencia a tracción, resistencia al impacto y resistencia a flexión de los núcleos por separado y junto a otros refuerzos. Este bloque de ensayos es el más importante, puesto que el objetivo principal de los núcleos es la mejora de las propiedades mecánicas sin un aumento considerable del peso.

En primer lugar se realizó el ensayo de tracción, donde claramente, los compuestos de fibra de carbono tuvieron un módulo elástico muy superior a los de vidrio y polipropileno. La fibra de carbono otorga a los compuestos una rigidez excelente, y en los ensayos realizados, los módulos elásticos de los compuestos con carbono han sido un 67% superior a los de fibra de vidrio, y un 194% a los de fibra de polipropileno. Esto confirma que la estabilidad dimensional bajo tensión de los compuestos con fibra de carbono es muy elevada. En cuanto a la resistencia máxima a tracción los compuestos de carbono son un 113% y un 145% más resistentes que los compuestos de vidrio y polipropileno

respectivamente. Además, el ensayo de tracción demuestra que los compuestos de fibra Innegra o polipropileno tienen un alargamiento mucho mayor que los otros dos, de hasta un 286% superior. Este dato confirma que estos compuestos tienen menor estabilidad dimensional que los compuestos de vidrio y carbono.

Tras este análisis, se procede a comparar los materiales de los núcleos. Tras el ensayo se puede afirmar que el Soric XF es un material mucho más rígido que el Sphere.Core, pues su módulo elástico es un 58,47% superior. Por otro lado, y debido a la fluencia y a la deformación del Sphere.core, este termina teniendo una resistencia a la tracción un 60% superior al del Soric XF.

Otro de los ensayos que se han llevado a cabo es el de resistencia al impacto. Los resultados de este ensayo han encajado perfectamente con los resultados de los ensayos anteriores. Los compuestos de fibra de polipropileno son los más elásticos y absorben hasta un 53,08% más de energía que los compuestos de fibra de vidrio. Este resultado valida el mensaje del fabricante Innegra, que afirma que la fibra de polipropileno de alto peso molecular tienen unas propiedades frente al impacto excelentes.

En cuanto a los dos materiales de núcleo, se repite el mismo patrón, y el material con mayor deformación es capaz de absorber más energía, con lo cual tiene mejores propiedades de resistencia al impacto. En el ensayo se pudo comprobar que el Sphere.Core absorbe un 139,13% más de energía que el Soric XF.

El último ensayo del bloque fue el ensayo de resistencia a flexión, el cual es el más importante para comprobar el comportamiento bajo tensión de los núcleos, tal y como se ha expuesto en los apartados anteriores.

El refuerzo que ha obtenido mejores resultados de resistencia a la flexión es el de fibra de vidrio, aunque muy emparejado con el de fibra de carbono. Mientras que el compuesto de fibra de vidrio y Soric XF es un 16,38% mayor que el compuesto de fibra de carbono y Soric XF, el compuesto de fibra de carbono y Sphere.core es un 9,16% que el compuesto de fibra de vidrio y Sphere.core. Por lo tanto, se puede aceptar que los resultados de los materiales de fibra de carbono y de fibra de vidrio son muy similares. Los laminados de fibra de polipropileno tuvieron los peores resultados. En cuanto a los resultados del ensayo de flexión de los materiales para núcleos, se pudo observar que el Soric XF tiene una resistencia a la flexión muy superior que el Sphere.core, de hasta un 16,58% mayor. El módulo elástico a flexión también es mayor, un 47,69%.

Con los ensayos mecánicos se tiene una idea clara y concisa de las propiedades mecánicas de los diferentes materiales ensayados. En cuanto a los refuerzos, el carbono es el que presenta mayor estabilidad dimensional, y unas propiedades resistentes muy elevadas, seguido muy de cerca por la fibra de vidrio. El refuerzo de fibra de polipropileno presenta unas propiedades resistentes muy inferiores, pero una gran resistencia al impacto.

En cuanto a los núcleos, sin duda el que presenta mejores propiedades para su empleo en el sector náutico es el Soric XF, puesto que es más ligero, tiene un espesor menor, una velocidad de impregnado mayor y también vence al Sphere.core en resistencia mecánica. Esto permite a este material obtener ventajas competitivas en diseño y fabricación.

## VII. REFERENCIAS.

- [1] Billmeyer, Jr.; Fred, W et al. (1975). Ciencia de los polímeros. Editorial Reverté
- [2] IUPAC. (1997). Compendium of Chemical Terminology
- [3] López Romero, Juan Manuel. (2013). Transformación de materiales.
- [4] Goodman, Sídney . (1998). Handbook of Thermoset Plastics.
- [5] Universidad de Burgos. (2019). Polímeros para el siglo XXI.
- [6] Cai, Ming; Martín, Olga . (2011). Efecto interfases en material compuesto CNT-EPOXY: propiedades mecánicas.
- [7] Akiba, M.; Hashim, A. S. (1997). Vulcanization and crosslinking in elastomers, Progress in Polymer Science.
- [8] Miravete, Antonio; Larrodé, E. . (2012). Materiales compuestos. Tomo 1. .
- [9] Hull , Derek; Areal Guerra, R. . (2003). Materiales compuestos.
- [10] Bilurbina Alter, Luis; Liesa, Francisco . (1990). Materiales no metálicos resistentes a la corrosión.
- [11] Besednjak Dietrich, Alejandro . (2005). Materiales compuestos : procesos de fabricación de embarcaciones.
- [12] García de la Figal, Javier El cálculo de los materiales compuestos por elementos finitos.
- [13] Kolesov, Y.I.; Kudryavtsev, M.Y. et al. (2001). Types and Compositions of Glass for Production of Continuous Glass Fiber.
- [14] Loewenstein, K.L. (1973). The Manufacturing Technology of Continuous Glass Fibers.
- [15] Busto Rodríguez, Manuel Ramón, . (2015). Diseño del proceso de fabricación de un catamarán de fibra de vidrio en astillero.
- [16] Faheem Hassan, Muhammad; Ashraf Sabri, Muhammad et al. (2020). Recent trends in activated carbon fibers production from various precursors and applications— A comparative review.
- [17] Ellringmann, T.; Wilms, C. et al. (2016). Carbon fiber production costing: a modular approach.
- [18] Ortiz Fernandez, Alejandro . (2006). Obtención y estudio de fibras de carbón de módulo medio a partir de fibras de p9oliacrilonitrilo (PAN).

- [19] Hijano Martel, Antonio Jesus. (2011). Aplicación de Nuevos Materiales en Productos Náuticos de Recreo.
- [20] C., Rita; L., Dutra et al. (1998). Composite Materials Constituted by a Modified Polypropylene Fiber and Epoxy Resin.
- [21] Kavya, H.M.; Yogesha, B. et al. (2021). Effect of coir fiber and inorganic filler hybridization on Innegra fiber-reinforced epoxy polymer composites: physical and mechanical properties.
- [22] Sigmatex Innegra Datasheet.
- [23] Ruland, Wilhelm. (1990). Carbon fiber review.
- [24] Morancho Llena, Jose Maria . (1996). Estudio del curado de materiales compuestos por un sistema epoxi y partículas elastoméricas.
- [25] Ellis, Bryan. (1993). Chemistry and Technology of Epoxy Resins.
- [26] Golfman, Yosif. (2011). Hybrid Anisotropic Materials for Structural Aviation Parts.
- [27] Ghugal, Y.M.; Shimpi, R.P. (2002). A Review of Refined Shear Deformation Theories of Isotropic and Anisotropic Laminated Plate.
- [28] Katrin Kugler, Susanne. (2020). Fiber Orientation Predictions—A Review of Existing Models.
- [29] Palomba, Giulia; Epasto, Gabriella et al. (2021). Lightweight sandwich structures for marine applications: a review, Mechanics of Advanced Materials and Structures.
- [30] ReinforcedPlastics. (2011). Sandwich composites excel at cost-effective, lightweight structures.
- [31] Diab Group. (2012). Diab guide to core and sandwich.
- [32] Hyun Eum, Soo; Hae Kim, Yum et al. (2005). A Study on the Mechanical Properties of The Honeycomb Sandwich Composites made by VARTM. "
- [33] Hurtado, Francisco; Kaiser, Antonio et al. (2015). Numerical analysis of the vacuum infusion process for sandwich composites with perforated core and different fiber orientations.
- [34] SphreTex Group Sphere datasheet.
- [35] Campbell, F. C.; Flake, C. (2004). Manufacturing Processes for Advanced Composites.
- [36] Miravete de Marco, Antonio . (2021). Procesos de materiales compuestos. .
- [37] Summerscale, J.; Searle, T. J. (2005). Low-pressure (vacuum infusion) techniques for moulding large composite structures.
- [38] Resoltech Industries. Resoltech Datasheet.

- [39] Horta Muñoz, Sergio. (2021). Complexity of the structural response of fiber reinforced polymer matrix composites.
- [40] Mujika Garitano, Faustino . (2003). Análisis del comportamiento en flexión e influencia de la temperatura en composites unidireccionales carbono/epoxi .
- [41] Hufenbach, W.; Marques Ibrahim, F. (2008). Charpy impact tests on composite structures – An experimental and numerical investigation.
- [42] Clavijo , Josué . (2013). Caracterización de materiales a través de medidas de microscopía electrónica de barrido (SEM).
- [43] Almazán, J.A.; López, E. et al. (2022). Optimización de propiedades mecánicas mediante el control de la velocidad de impregnado en procesos de infusión.