



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior (Jaén)

Trabajo Fin de Máster

ANÁLISIS MECÁNICO DE MATERIALES COMPUESTOS Y LA MEJORA PRODUCIDA POR LA INTRODUCCIÓN DE DIVERSOS FACTORES EN SU PROCESO DE FABRICACIÓN

Alumno/a: López Martín, Miguel Antonio

Tutor/a: Prof. D. Elías López Alba
Dpto.: Ingeniería Mecánica y Minera

Septiembre, 2018



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera

Don ELÍAS LÓPEZ ALBA , tutor del Proyecto Fin de Carrera titulado: ANÁLISIS MECÁNICO DE MATERIALES COMPUESTOS Y LA MEJORA PRODUCIDA POR LA INTRODUCCIÓN DE DIVERSOS FACTORES EN SU PROCESO DE FABRICACIÓN, que presenta MIGUEL ANTONIO LÓPEZ MARTÍN, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, SEPTIEMBRE de 2018

El alumno:

Los tutores:

Miguel Antonio López Martín

Elías López Alba

A mis padres, mi hermano y mi sobrino

Resumen

El objeto de este trabajo es comprobar la influencia de la inclusión de nuevos factores en la fabricación de materiales compuestos en sus propiedades elásticas, Los factores incluidos están relacionados con la técnica de refuerzo 3D basada en el cosido (stitching).

Siguiendo la tendencia de trabajos previos a este, el estudio se ha realizado a laminados de fibra unidireccional afectados del factor stitching en forma de variación de la densidad de puntada (puntadas por unidad de longitud) teniendo cosido en hilo de nylon.

En primer lugar, se realizará una introducción teórica a los fundamentos de los materiales compuestos y de los refuerzos 3D de fibras (tejido, trenzado, tejido en punto y cosido). Tras conocer el fondo teórico, se ahondará en el conocimiento del comportamiento de estos materiales y de la influencia del stitching en el módulo de Young mediante dos modelos: el anunciado por Mouritz & Cox y el modelo basado en la regla de las mezclas. Estos modelos permitirán calcular el módulo de Young teórico en base a parámetros particulares del cosido (diámetros de puntada, distancia entre puntada, distancia entre líneas de cosido...).

Seguidamente, en base a la influencia de los distintos factores de stitching en el módulo de Young se definirá un plan de ensayos, en base a la norma ASTM D3039, constituido de seis casuísticas: laminados unidireccionales de 0° y 90° con tres densidades de puntada cada uno. Para llevar a cabo los ensayos, se fabricarán estos laminados por el método de infusión de resina.

Los resultados obtenidos de los ensayos se compararán, en primer lugar, con el módulo de Young calculado por los dos métodos mencionados (de Mouritz y Cox y la regla de las mezclas) razonando cuál se adecua más a la realidad. Tras esto, con los datos obtenidos en probetas similares sin el factor stitching y tomados de un trabajo anterior, se compararán el módulo de Young y resistencia a tracción obteniendo unos valores normalizados que indicarán, en base a 1, la mejoría o empeoramiento de estas propiedades.

Índice

1. Antecedentes y motivación	11
2. Consideraciones teóricas	12
2.1. Introducción	12
2.2. Materiales compuestos	12
2.2.1. Concepto.....	13
2.2.2. Fibras.....	14
2.2.3. Matrices	19
2.2.4. Unión fibra matriz	23
2.2.5. Fabricación	25
2.3. Sistemas de refuerzo 3D.....	27
2.3.1. Weaving.....	27
2.3.2. Braiding.....	32
2.3.3. Knitting.....	35
2.3.4. Stitching	38
2.4. Comportamiento mecánico de los materiales compuestos.....	42
2.4.1. Regla de las mezclas	42
2.4.2. Propiedades físicas.....	48
2.4.3. Propiedades elásticas	50
2.4.4. Comportamiento de un laminado y criterios de rotura	53
2.5. Modelos de estimación de propiedades elásticas en materiales cosidos.....	57
2.6. Conclusiones.....	64
3. Metodología y análisis experimental	65
3.1. Introducción	65
3.2. Definición de ensayos	65
3.2.1. Normativa.....	65
3.2.2. Metodología de ensayo	66
3.2.3. Probetas.....	66
3.2.4. Equipos de ensayo.....	68
3.2.5. Correlación Digital de Imágenes (DIC) [29]	72
3.2.6. Justificación de ensayos	72
3.2.7. Plan de ensayos.....	73
3.3. Fabricación de muestras	74
3.3.1. Materiales	74

3.3.2.	Equipos	76
3.3.3.	Seguridad en la fabricación	78
3.3.4.	Cosido de fibras	79
3.3.5.	Preparación y realización de la infusión	82
3.3.6.	Preparación y corte de probetas	88
4.	Resultados y discusión	93
4.1.	Estimación de valores teóricos.....	93
4.1.1.	Análisis microscópico	94
4.1.2.	Propiedades estimadas teóricamente	96
4.2.	Ensayos a tracción.....	97
4.2.1.	Fibras cosidas a 0°.....	101
4.2.2.	Fibras cosidas a 90°.....	103
4.2.3.	Resumen de resultados	105
4.3.	Comparativa y normalización de resultados	105
5.	Conclusiones.....	109
6.	Trabajos futuros	110
	Bibliografía	111

1. Antecedentes y motivación

Los materiales compuestos son relacionados en la actualidad a materiales novedosos y de alta tecnología debido a su gran uso en aeronáutica o industria automovilística. A lo largo de historia, diversos materiales, que podrían denominarse compuestos, han estado a la orden del día y en constante uso en la sociedad.

Este hecho es significativo en las construcciones antiguas donde unían sus elementos estructurales con mezclas de áridos con otros elementos produciendo así un material compuesto; un ejemplo más cotidiano puede ser el uso de hormigón armado en las construcciones que llenan las ciudades.

Otro tipo de materiales compuestos son los fibrados, objeto de este trabajo, que son una mezcla heterogénea entre una matriz (resina) encargada de la distribución de esfuerzos y un refuerzo (fibra) encargado de soportarlos. Las resinas más utilizadas son las basadas en poliéster y las resinas epoxi.

La experiencia previa de otros investigadores y trabajos propios del Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera de la Universidad de Jaén han demostrado que los materiales compuestos fibrados tienen un gran comportamiento en condiciones de tracción (esfuerzos sobre plano) pero no tan idóneos ante esfuerzos de flexión (esfuerzos fuera de plano). En este hecho radica el interés y motivación de este estudio: introducir el conocimiento a los refuerzos en los materiales en búsqueda de una mejora de las propiedades mecánicas de estos.

La idea del refuerzo 3D de los laminados es de un gran interés, pero antes debe comprobarse que la inclusión del nuevo material no afecta las condiciones elásticas empeorando las características que se conocen y que presentan los materiales. Por este motivo, este trabajo centra su interés en el estudio del efecto sobre las condiciones elásticas (módulo de Young, resistencia a tracción y deformación última) de la inclusión de un refuerzo 3D a láminas de fibra de vidrio unidireccional en matriz de resina de poliéster, sirviendo este trabajo de antecedente a trabajos futuros en los que se ahonde en el conocimiento experimental de materiales compuestos con fibra reforzada.

La tecnología de refuerzo 3D elegida para este estudio es el cosido de fibras (stitching) por lo que se afectará de este factor en forma de distintos cosidos con hilo de Nylon a laminados unidireccionales de 0° y 90° infusionados en resina de poliéster. De este estudio se tendrán resultados numéricos del módulo de Young y resistencia a tracción que serán comparados y discutidos con datos teóricos previamente calculados y con los datos resultantes de laminados similares sin estar afectados del factor stitching; de la comparativa se tendrán conclusiones que indicarán la capacidad de refuerzo obtenida.

2. Consideraciones teóricas

2.1. Introducción

En este apartado se tratarán los aspectos teóricos relacionados con los materiales compuestos y su composición (matriz y refuerzo), así como la fabricación de estos. Además, se realizará una introducción a los distintos métodos de refuerzo de fibras haciendo hincapié en el cosido de fibras (stitching), objeto principal de este trabajo.

Tras conocer conceptualmente los materiales compuestos y los distintos métodos de refuerzo 3D de fibras, se hará un estudio sobre las leyes de comportamiento de estos materiales y sus propiedades físicas y elásticas para terminar con la presentación de dos modelos para el cálculo del módulo de Young en materiales compuestos con fibras cosidas.

2.2. Materiales compuestos

En este apartado se presentarán los conceptos básicos para el conocimiento de los materiales compuestos como son la composición de estos, los tipos de matrices y refuerzos que se comercializan, los distintos tipos de uniones entre la fibra y la matriz y los distintos tipos de fabricación de materiales compuestos fibrados que se tiene en la industria.

2.2.1. Concepto

Como material compuesto se entiende cualquier material que, siendo sólido, está formado por la combinación de dos o más materiales en fases separadas a escala macroscópica, manteniendo los constituyentes sus propiedades químicas. [1]

La estructura de material compuesto objeto de este estudio está constituida de dos fases: matriz y refuerzo. La matriz constituye una fase continua cuya principal misión es la de distribuir los esfuerzos mecánicos a los que se solicite el material, la resistencia ambiental y térmica de compuesto y mantener unida a la fase discontinua, refuerzo, cuya principal misión es la de soportar los esfuerzos de sollicitación.

Esta combinación de acciones hace que se consigan propiedades mecánicas distintas que la de las partes por separado que no siempre se repiten ya que estas, además de depender de las propiedades de los componentes, depende de factores como la cantidad relativa de los diferentes materiales, la orientación y adherencia de estos y el tamaño, forma y distribución de la fase continúa.

Teniendo en cuenta todos estos factores, la combinación adecuada de las fases continua y discontinúa origina unos materiales con una mejora de propiedades (resistencia mecánica, peso, rigidez, comportamiento a fatiga o resistencia a la corrosión) a cambio de aumentar el coste y dificultad de fabricación de material o bajar la ductilidad de estos.

Es destacable que las fases de un material compuesto, al ser heterogéneas, no deben fusionarse o disolverse completamente entre ellos, pudiendo identificarse estos por medios físicos. Esta heterogeneidad hace que estos materiales se comporten de manera distinta en diferentes orientaciones de carga; las propiedades van a depender de la orientación del material de refuerzo tratándose así, de materiales anisotrópicos.

2.2.2. Fibras

El refuerzo en los materiales compuestos se pueden disponer de distintas maneras tal y como se esquematizan en la Figura 1 [2]. En esta figura se muestra ejemplos de refuerzos en forma de partículas, en forma de fibra larga orientada y en forma de fibra corta.

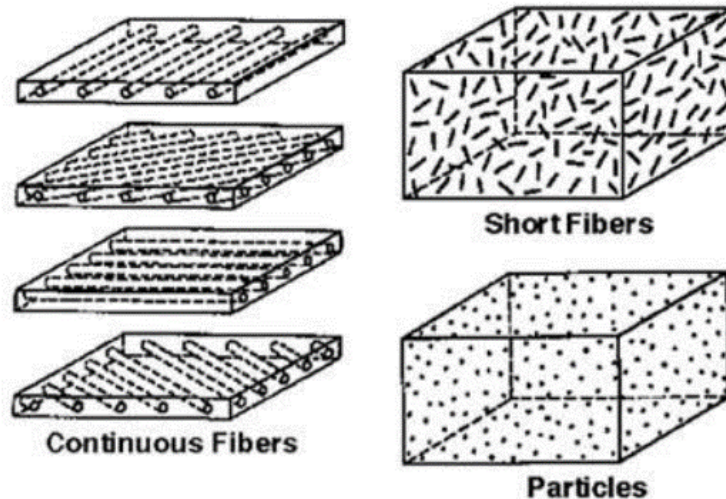


Figura 1. Tipos de refuerzo [2]

Este trabajo se va a centrar en el uso de fibras por lo que se obviarán las referencias a refuerzo con uso de partículas.

Los materiales reforzados con fibras son de gran utilidad en la industria y tienen un gran abanico de aplicaciones en función del tipo de fibra con el que estén reforzados. Como se puede observar en la Figura 2, en el origen de las fibras se tienen dos grandes bloques: de origen mineral y origen inorgánico. Dentro del primer bloque se tienen fibras metálicas, inorgánicas (de base fundamentalmente plástica) y cerámicas, englobándose dentro de estas las fibras de carbono y vidrio.

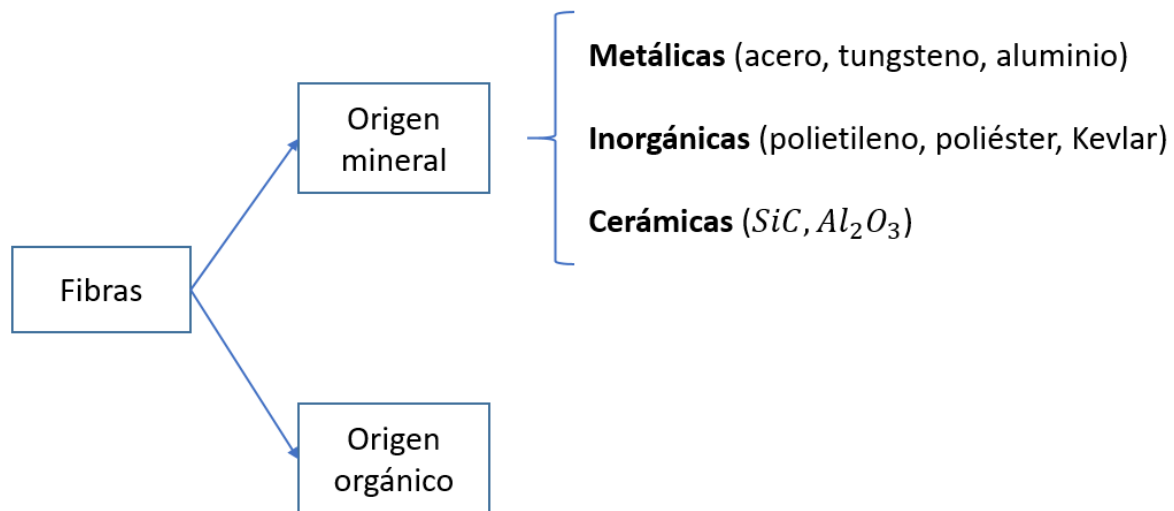


Figura 2. Clasificación de fibras según su origen.

Como se pudo ver en el apartado anterior, la principal misión de los refuerzos es la de soportar los esfuerzos de sollicitación; para ello, es de interés conocer las propiedades mecánicas de algunos tipos de fibras con objeto a la obtención de una orden de magnitud de la resistencia de estos. En busca de este objetivo se presentan en Figura 3 y en la Figura 4 unos gráficos en los que se observan las características específicas y diagramas tensión-deformación ($\sigma - \epsilon$) de algunas fibras respectivamente; además, en la Tabla 1 se muestra un resumen de las propiedades mecánicas de interés de algunas de las fibras más utilizadas.

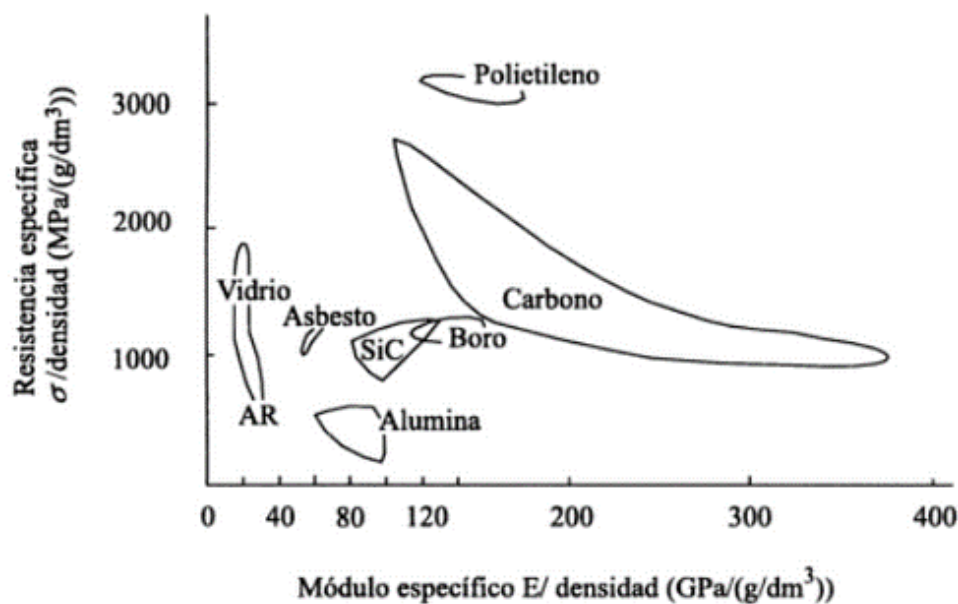


Figura 3. Características específicas en función del tipo de fibra [3].

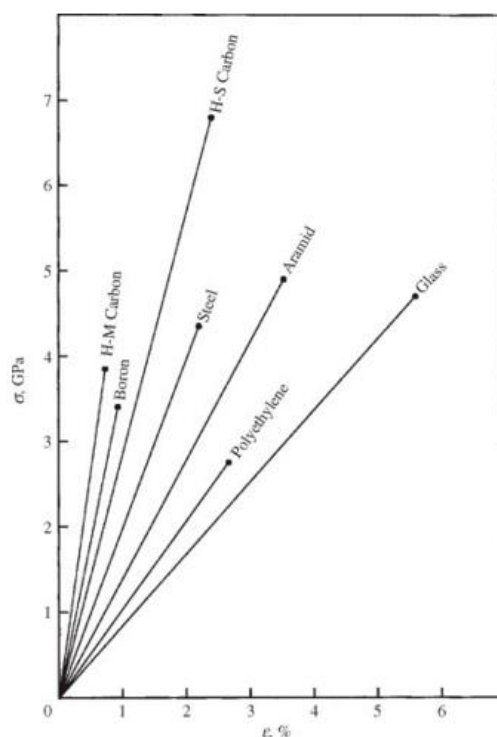


Figura 4. Diagrama $\sigma - \epsilon$ de varias fibras usadas en materiales compuestos [4].

Tabla 1. Resumen de propiedades de fibras de vidrio, carbono y Kevlar a 20°C [4].

PROPIEDADES	UNIDADES	CARBONO BASE PAN TIPO I	CARBONO BASE PAN TIPO II	VIDRIO E	KEVLAR 49 POLIAMIDA AROMÁTICAS
Diámetro	μm	7,0 – 9,7	7,6 – 8,6	8,14	11,9
Densidad	10^3 kgm^{-3}	1,95	1,75	2,56	1,45
Módulo de Young	GPa	390	250	76	125
Módulo (perpendicular al eje de la fibra)	GPa	12	20	76	
Resistencia a tracción	GPa	2,2	2,7	1,4 - 2,5 (típica) 3,5 (estirado recientemente)	2,8 – 3,6
Alargamiento en rotura	%	0,5	1,0	1,8 – 3,2	2,2 – 2,8

En este trabajo se va a utilizar, a nivel práctico, fibra de vidrio como refuerzo. Teniendo en cuenta su gran relación calidad-precio, este tipo de fibra es el más usado en la actualidad en la fabricación de materiales compuestos, en mayor medida, en aplicaciones industriales.

Entre las principales propiedades de la fibra de vidrio cabe destacar la alta adherencia fibra-matriz, su resistencia mecánica, su capacidad de aislamiento

térmico, la estabilidad dimensional frente a variaciones de temperatura y humedad, incombustibilidad, imputrescibilidad, bajo coste y baja conductividad térmica [3].

La fibra de vidrio puede encontrarse en distintas composiciones atendiendo a distinta nomenclatura:

- Vidrio S: vidrio de gran calidad utilizado principalmente en aeronáutica. Una resistencia mecánica y un módulo de Young superior a los demás tipos de vidrios hace que sea empleado en estructuras de elevadas características mecánicas.
- Vidrio C: es un vidrio de peores características mecánicas de resistencia, pero la mayor importancia en él se encuentra en su elevada resistencia a la corrosión química
- Vidrio E: a pesar de tener buena resistencia, rigidez y resistencia al desgaste, es el vidrio más utilizado debido a sus propiedades mecánicas.

Cuantitativamente se puede observar una comparativa entre las principales características mecánicas de las fibras en la Tabla 2, donde estas se muestran atendiendo a la siguiente nomenclatura:

- σ_f^* : tensión de rotura de la fibra
- E_f : módulo de Young de la fibra
- ε_f^* : deformación de rotura de la fibra
- ρ : densidad del material
- $\varnothing$: diámetro de la fibra

Tabla 2. Propiedades de los distintos tipos de fibra de vidrio [5].

Parámetro	Unidades	Vidrio-E	Vidrio-R/S	Vidrio-C
σ_f^*	GPa	3.45	4.50	3.10
E_f	GPa	72.50	86.50	71.00
ε_f^*	%	3.30-4.80	4.20-5.40	3.50
ρ	g/cm ³	2.60	2.50	2.45
σ_f^* / ρ	(GPa·cm ³)/g	1.30	1.75	1.30
E_f / ρ	(GPa·cm ³)/g	28.00	34.00	29.00
$\varnothing$	μm	3-25	3-25	3-25
Coef. dilat. tér. lin.	10 ⁻⁶ /K	5.00	4.00	7.20

Por último, para completar este apartado, se van a tratar las distintas maneras de presentación de la fibra de vidrio; esta puede encontrarse en las siguientes disposiciones [6]:

- MAT: formadas por fieltros de hilos de una longitud determinada y aglomerados entre sí mediante un agente químico. Se presenta en forma de superficie, hilos cortados o hilos continuos
- Roving: ensamblados sin torsión que se pueden presentar de dos maneras principalmente; en hilo de filamento, teniendo roving directo, o en hilo de vidrio, siendo este roving indirecto, utilizado para la fabricación de láminas traslúcidas.
- Tejido: se dispone en forma que en un sentido dispone de más hilos que en otro fortaleciendo así las propiedades mecánicas en uno de ellos. Su principal presentación es de manera equilibrada, orientada o unidireccional.
- Hilos cortados: dispuestos como fibra molida o complejos MAT-Tejido
- Varios: otras disposiciones

En este trabajo se utilizará fibra de vidrio en forma de MAT de hilos cortados (Figura 5) y en forma de tejido unidireccional (Figura 6).



Figura 5. Presentación tipo MAT de hilos cortados.



Figura 6. Presentación tipo tejido unidireccional.

2.2.3. Matrices

Junto con las fibras, la matriz es un elemento primordial en el material compuesto que permite la unión del refuerzo además de la distribución de la carga sobre este; existen matrices de distintos tipos: orgánicas e inorgánicas.

Por lo general, las matrices usadas para el concepto de material compuesto usado en este trabajo, son de tipo orgánico; estando basadas en compuestos orgánicos de elevado peso molecular, originados en reacciones de polimerización por adición o condensación. Las matrices orgánicas pueden ser termoestables o termoplásticas. Las matrices inorgánicas son aquellas de origen mineral como pueden ser las matrices metálicas o cerámicas cotidianamente visibles en trabajos de arquitectura o ingeniería.

Visualmente, se puede contemplar en la Figura 7 la clasificación comentada:

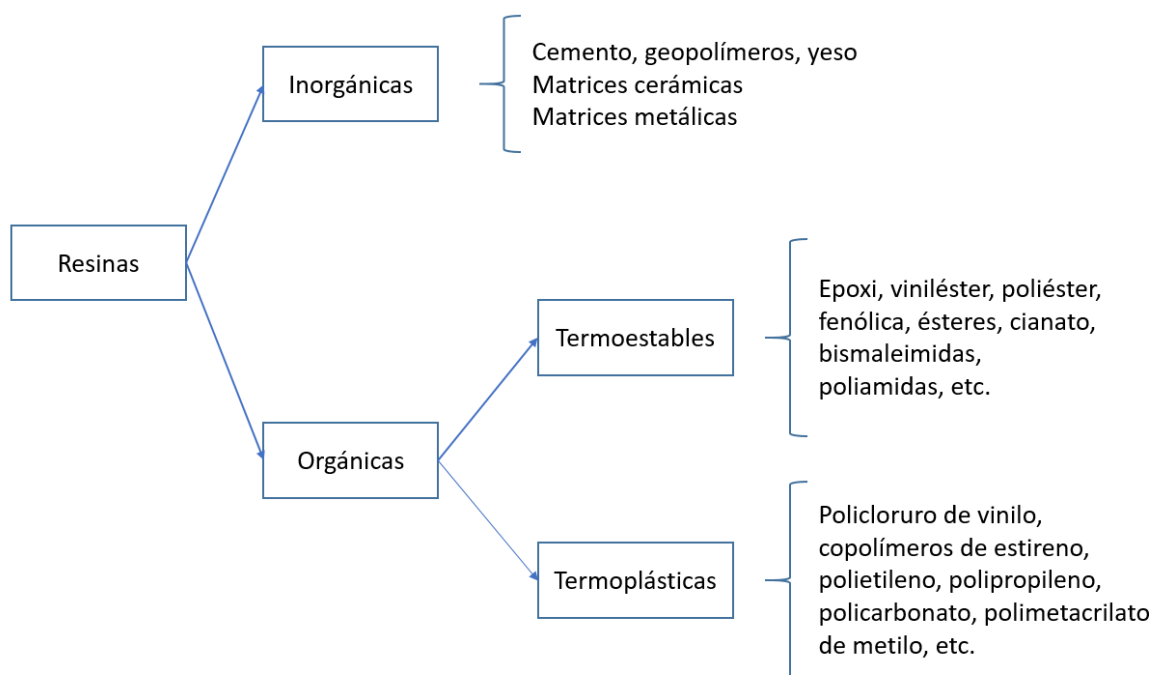


Figura 7. Clasificación de matrices para materiales compuestos.

Objeto de este trabajo va a ser una matriz termoestable caracterizada por una alta estabilidad térmica, alta rigidez, bajo peso y buena resistencia a la termofluencia y deformación a baja carga; esta matriz además es líquida a temperatura ambiente y necesitada de un proceso de curado para solidificar y conseguir propiedades

mecánicas adecuadas. El curado se fomenta con un catalizador y puede realizarse a temperatura ambiente o en un horno, incluso podría hacerse a distintas presiones, siempre usando la información facilitada por el fabricante.

Durante el proceso de curado, se produce una reacción exotérmica que podría provocar una pequeña pretensión en el laminado final ya que se experimentan cambios volumétricos en la masa de resina (matriz). Dependiendo de la velocidad de curado podría fomentarse el aumento de la porosidad del laminado final siendo este dañino para las propiedades mecánicas finales y cuya influencia no se tratará en este trabajo.

De entre las matrices termoestables destacan las resinas epoxi y poliéster cuyos diagramas tensión-deformación y principales propiedades se pueden contemplar en la Figura 8 y en la Tabla 3:

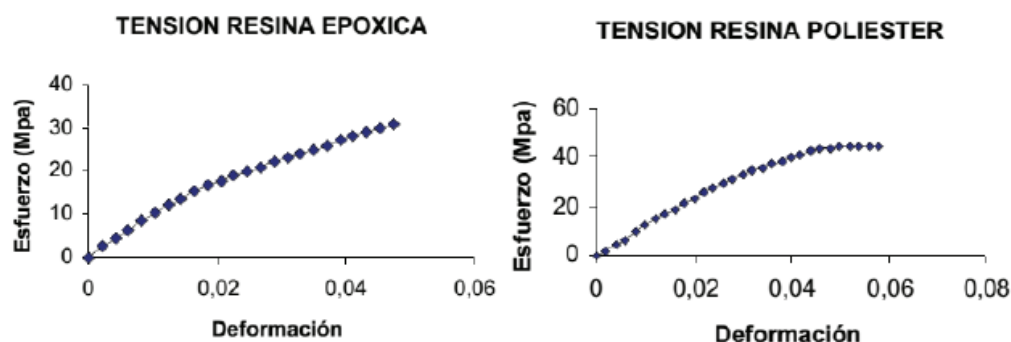
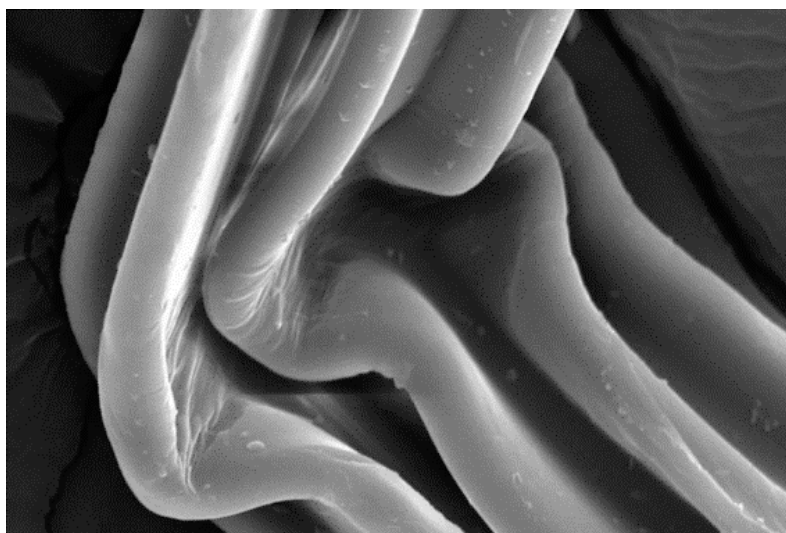


Figura 8. Diagramas $\sigma - \varepsilon$ de las resinas epoxi y poliéster [7].

Tabla 3. Propiedades típicas de las resinas epoxi y poliéster [8].

Propiedad	Unidades	Resinas epoxi	Resinas poliéster
Densidad	Mg m^{-3}	1,1-1,4	1,2-1,5
Módulo de Young	GN m^{-2}	3-6	2-4,5
Relación de Poisson		0,38-0,4	0,37-0,39
Resistencia a tracción	MN m^{-2}	35-100	40-90
Resistencia a compresión	MN m^{-2}	100-200	90-250
Alargamiento de rotura (tracción)	%	1-6	2
Conductibilidad térmica	$\text{W m}^{-1}\text{°C}^{-1}$	0,1	0,2
Coefficiente de dilatación térmica	10^{-6}°C^{-1}	60	100-200
Temperatura de distorsión por calor	°C	50-300	50-110
Contracción de curado	%	1-2	4-8
Absorción de agua (24 h. a 20 °C)	%	0,1-0,4	0,1-0,3

En este trabajo se utilizará resina de poliéster (Figura 9) en base a su relación entre el coste de la resina y las propiedades mecánicas que aporta además de la posibilidad de curar en un gran rango de temperaturas. Esta resina es muy usada en carenados automovilísticos y náuticos en los que la necesidad de mantener una relación coste-resistencia es muy importante para mantener la competitividad de las empresas.

**Figura 9. Vista microscópica de la resina de poliéster [9].**

Al tratarse la resina de poliéster de la resina objeto de este trabajo es importante conocer sus condicionantes de curado; según Antonio Miravete [3], para el curado de este tipo de resina no conviene superar los 35 °C -40 °C aunque, en el

caso de que se tenga un molde capaz de disipar el calor, el curado podría realizarse a 50°C o 60°C como máximo.

Una vez conocidas las temperaturas a la que es aconsejable curar la resina, es conveniente conocer las etapas del proceso de curado en las resinas. En la figura pueden observar el ciclo de curado [6] siendo similar pero más detallado al que se puede encontrar en [3], en este esquema se definen las siguientes temperaturas y tiempos:

- Tiempo de gelificación: tiempo transcurrido desde que se añaden los componentes de la mezcla (resina + catalizador) y el comienzo de la reacción de polimerización.
- Tiempo de gel: tiempo transcurrido entre el inicio de la reacción de polimerización y el punto de gel
- Tiempo de reactividad o endurecimiento: tiempo en el que se produce el endurecimiento del material conllevando un aumento de la temperatura.
- Tiempo de polimerización: tiempo completo del proceso considerado desde el inicio de la reacción hasta el fin del endurecimiento.
- Punto de gel: situación en la que el material deja de fluir y no puede ser procesado.
- Pico exotérmico: temperatura máxima alcanzada por la resina durante el endurecimiento; caracteriza el final del proceso de polimerización y, tras este, sólo queda el proceso de enfriamiento.

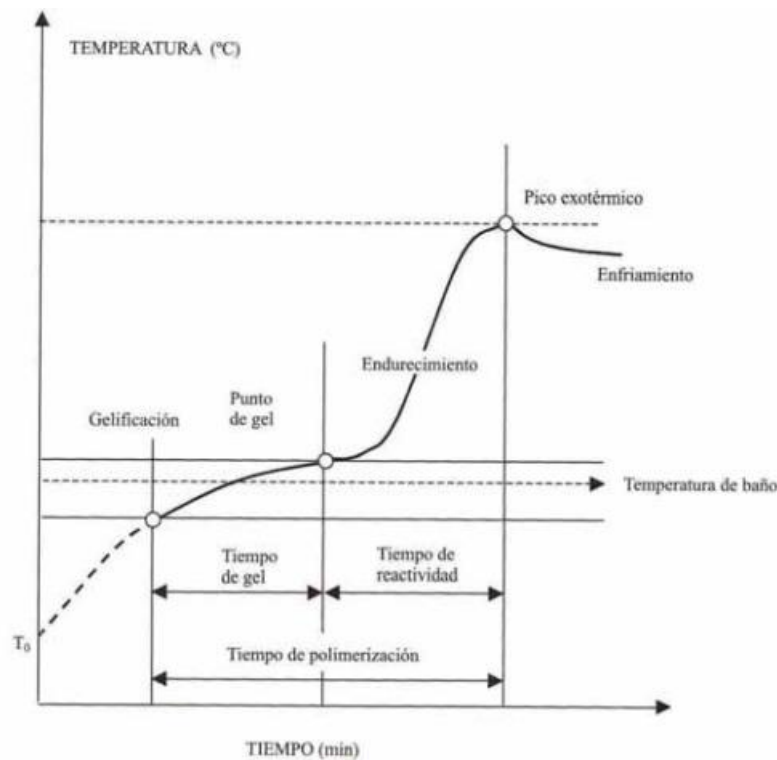


Figura 10. Proceso de curado de resina [6].

2.2.4. Unión fibra matriz

En apartados anteriores se ha comentado la importancia de la matriz y el refuerzo para la distribución y resistencia ante los esfuerzos; pero esta combinación de acciones sólo es posible encontrarla con una unión firme entre los distintos compuestos.

Entendiendo el mojado o impregnación como la capacidad de un líquido para extenderse por una superficie sólida, aplicando este concepto a los materiales compuestos, una buena impregnabilidad hace que la matriz fluirá adecuadamente por la superficie del refuerzo eliminando a su paso el rastro de aire disminuyendo la porosidad del laminado final. Cumpliéndose esto, se favorece que la fibra esté fuertemente unida a la resina cumpliéndose las condiciones de uso de ambos elementos (distribución y resistencia frente a esfuerzos).

Como mecanismos de adhesión entre fibra y matriz Wake, en 1978, enunciaba cinco de estos (Figura 11). Miravete, en 2007, tomo como más importantes cuatro de estos (Figura 11b-e):

- Adsorción y humectación (Figura 11a): fundamentada en la tensión superficial. Las pequeñas cavidades que hubiera entre las dos superficies se rellena de resina que origina una unión por efecto de la tensión superficial.
- Interdifusión (Figura 11b): fundamentada en el mecanismo de difusión entre redes poliméricas, es decir, las moléculas de una superficie polimérica pasan a la red de otra superficie polimérica. La resistencia de esta unión depende del número de entrelazamientos entre cadenas y aumenta con la adición de disolventes o plastificantes.
- Atracción electrostática (Figura 11c): producida ante la diferencia de polaridad entre dos superficies de manera que, una de ellas tuviera carga positiva y la otra, carga negativa.
- Enlace químico (Figura 11d): importante en compuestos fibrados como los de este trabajo; está fundamentado en la formación de un enlace químico entre la superficie de la fibra y el grupo químico de la resina. La calidad de unión depende del número y tipo de enlaces químicos.
- Adhesión mecánica (Figura 11e): fundamentada en la rugosidad entre superficies que es cubierta por la matriz. La efectividad de la unión es directamente proporcional a la rugosidad de la superficie.

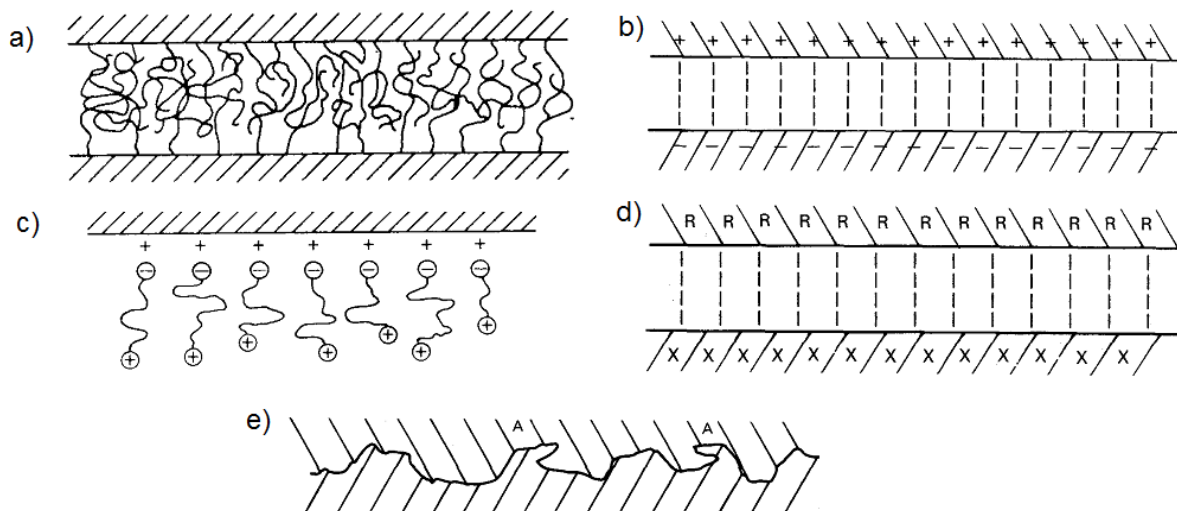


Figura 11. Creación de interfase fibra-matriz [10].

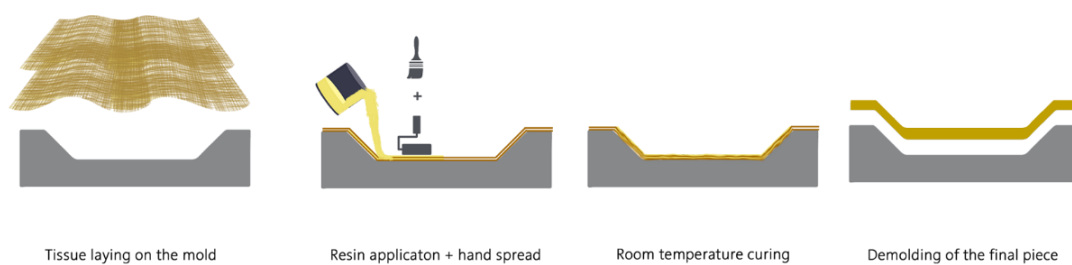
2.2.5. Fabricación

Industrialmente predominan tres tipos de fabricación de materiales compuestos: fabricación manual, fabricación por vacío y fabricación por infusión. A continuación, se va a introducir los conceptos básicos de cada tipo de fabricación, aunque en este trabajo se utilizará el último de ellos (fabricación por infusión).

La fabricación manual (Figura 12) es utilizada principalmente en piezas de grandes dimensiones como pueden ser embarcaciones o carrocerías. Esta es la tecnología más utilizada debido sobre todo a su bajo coste, este está fomentado principalmente a la posibilidad de poder hacer laminados a temperatura ambiente y sin ninguna sobrepresión.

La posibilidad de laminar a temperatura y presión ambiente hace que también se tengan desventajas al usar esta tecnología como puede ser el acabado irregular de la superficie laminada (lo que puede hacer que se tenga que procesar posteriormente) o el aumento de la porosidad.

Tanto en este proceso como en los demás es posible que se tenga una mala adherencia al molde que se solucionaría con la impregnación de este con un agente desmoldeante.

**Figura 12. Secuencia de fabricación manual en molde abierto [11].**

La fabricación por vacío (Figura 13) consiste en la impregnación del laminado y posterior aplicación de vacío. Esta técnica ofrece mejores resultados que la fabricación manual debido a que, al ejercer presión, se disminuye la resina sobrante

(mejorando así el acabado) y se disminuye la porosidad mejorando las características mecánicas del laminado resultante.

Para poder realizar correctamente el vacío, a diferencia que el método anterior, se requiere de elementos accesorios como bolsa de vacío o tejidos que favorecen el desmoldeo.

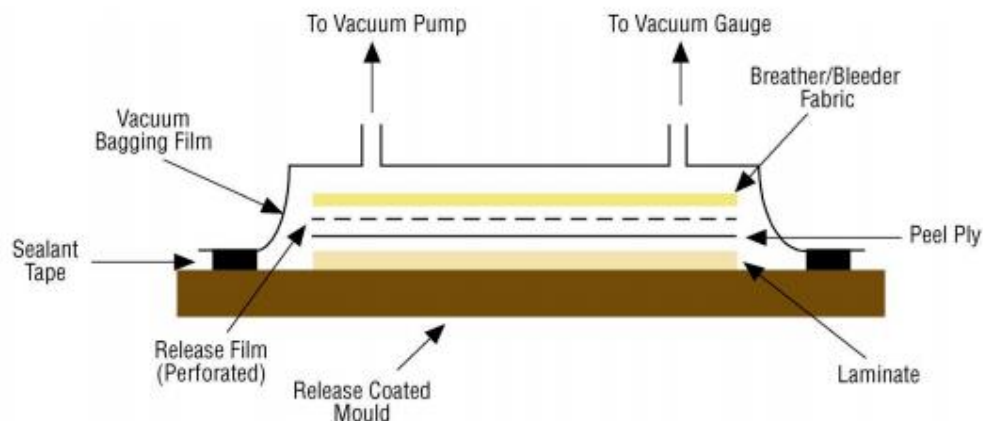


Figura 13. Fabricación por vacío [12].

La fabricación por infusión (Figura 14) es la que mejor acabado aporta a los laminados de las tecnologías que se tratan partiendo de un laminado seco, sobre el que se genera el vacío y se llena el laminado de resina.

Además del acabado superficial, otras de sus ventajas es la excelente relación entre la resina y fibra que disminuye la resina sobrante y mejora el acabado, la rapidez del proceso de laminación y la reducción de costes al reducir los residuos resultantes.

Para lograr una optimización del proceso es aconsejable el uso de una malla de distribución de resina que fomente el reparte equitativo de la matriz en el refuerzo.

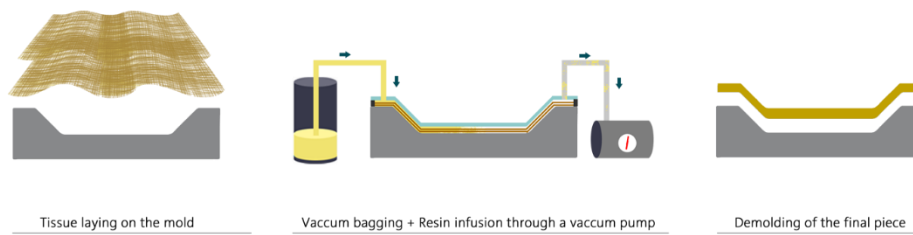


Figura 14. Fabricación por infusión [11].

2.3. Sistemas de refuerzo 3D

En este apartado se van a introducir distintas tecnologías de refuerzo 3D de fibras para materiales compuestos: weaving (tejido), braiding (trenzado), knitting (punteado) y stitching (cosido).

El fundamento del refuerzo 3D de fibras está en la necesidad de mejorar el comportamiento de material fibrado en otros planos que no sea el de carga con fibras unidireccionales sin recurrir a los laminados compuestos (en los que se apilan láminas de fibra de igual o distinta orientación como se puede ver esquematizado en la Figura 44) que dan peor adherencia entre las fibras y mayor grosor del laminado.

2.3.1. Weaving

El weaving o tejido es conocido debido a su uso en la industria textil, pero, al igual que se usa en esta industria, es ampliamente utilizada en la industria de los materiales compuestos.

Para llevarlo a cabo se necesita un equipo de tejido comúnmente conocido como telar que permite obtener la mayoría de las láminas en una sola capa realizando un tejido 2D, aunque el mismo equipo se puede usar para obtener un tejido tridimensional de fibra. A continuación, se muestran los distintos tipos de tejido que se pueden encontrar en la industria:

- Tejido tradicional: en este tipo de tejido se produce al entrelazar dos conjuntos de hilos: paralelos o urdimbres y de trama. Los hilos paralelos

corren en la dirección de la máquina desde una fuente que puede ser de hilo individual, conjunto de hilos individuales o filetas.

Los hilos de urdimbre llegan direccionados al telar en los que se, tras aplicarle una tensión, son afectados de un mecanismo de elevación (mecánico o electrónico) que crea un espacio llamado cobertizo en el que los hilos de trama se insertan con un ángulo de 90° ; el patrón de tela que se crea depende de la secuencia del mecanismo de elevación para hilos paralelos y el de inserción de los hilos de trama. Del patrón de tejido que se genere dependerán propiedades como el rendimiento mecánico o la fracción volumétrica de fibra.

En la Figura 15 y en la Figura 16 se pueden observar un esquema de un telar tradicional y los patrones típicos de tejido.

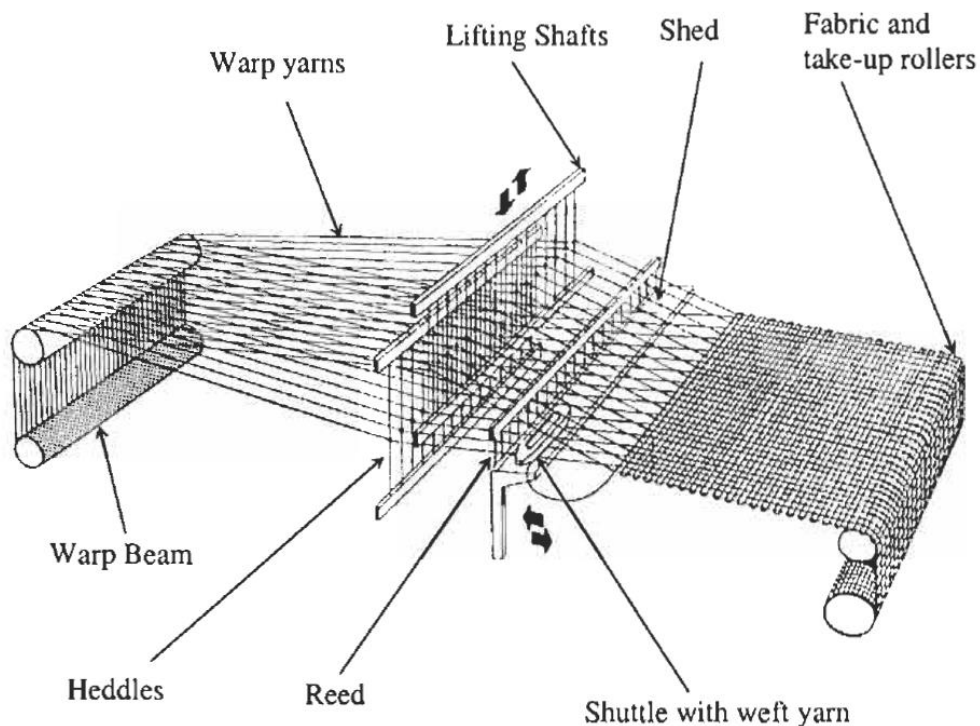


Figura 15. Telar tradicional [13].

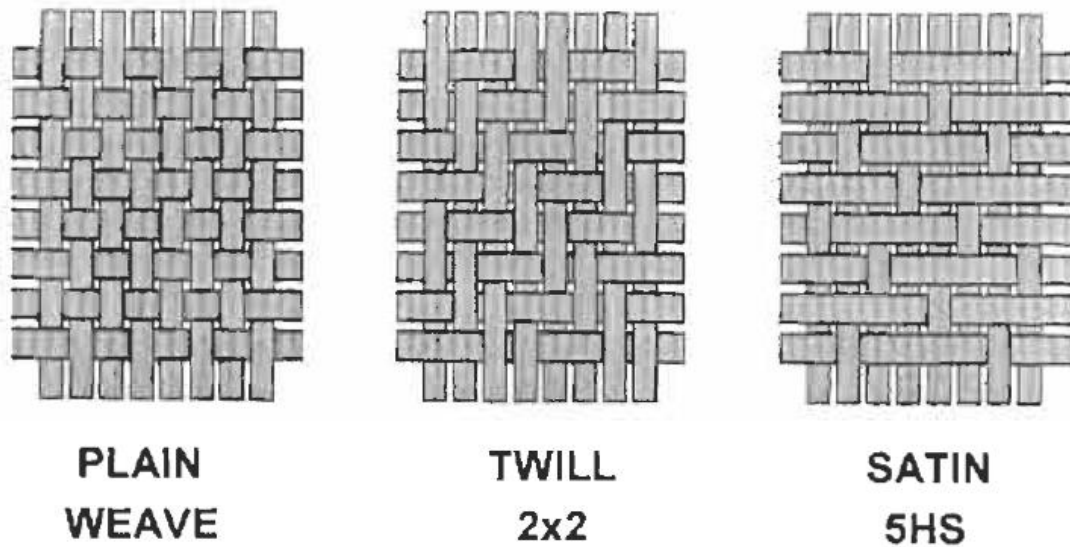


Figura 16. Patrones típicos de tejido [13].

- Tejido tridimensional ortogonal: este tipo de tejido se caracteriza por tener generalmente múltiples capas de hilo paralelo por lo que el telar debe de alimentarse de una mayor cantidad de hilos (Figura 17); las secuencias de elevación e inserción de hilos vuelven a ser cruciales para la obtención de los distintos patrones de tejido tridimensional (los más típicos se pueden observar en la Figura 18).

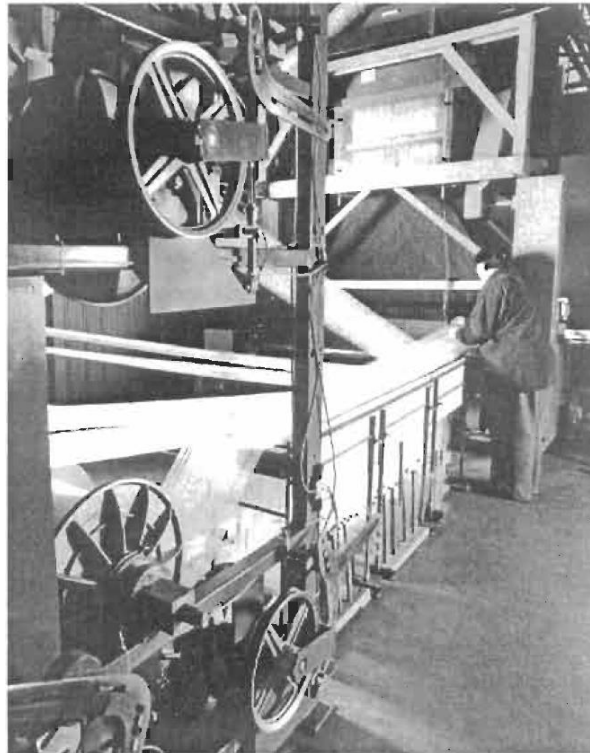


Figura 17. Telar tridimensional [14].

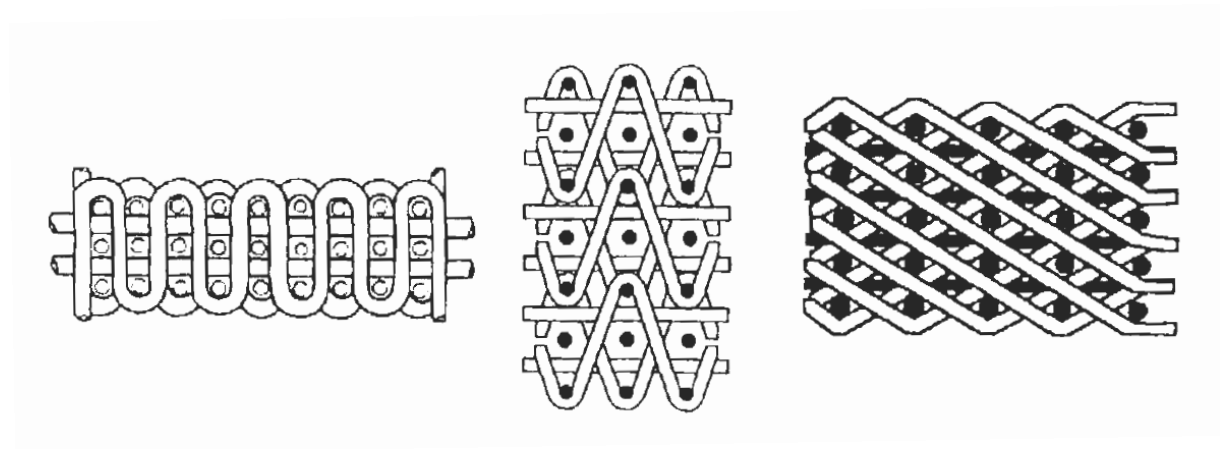


Figura 18. Tejidos tridimensionales típicos [13].

Las telas multicapa no son las únicas estructuras que se pueden tejer en telares convencionales; programando adecuadamente la secuencia de entrehilado se pueden llegar a estructuras complejas como las que se pueden observar en la Figura 19.

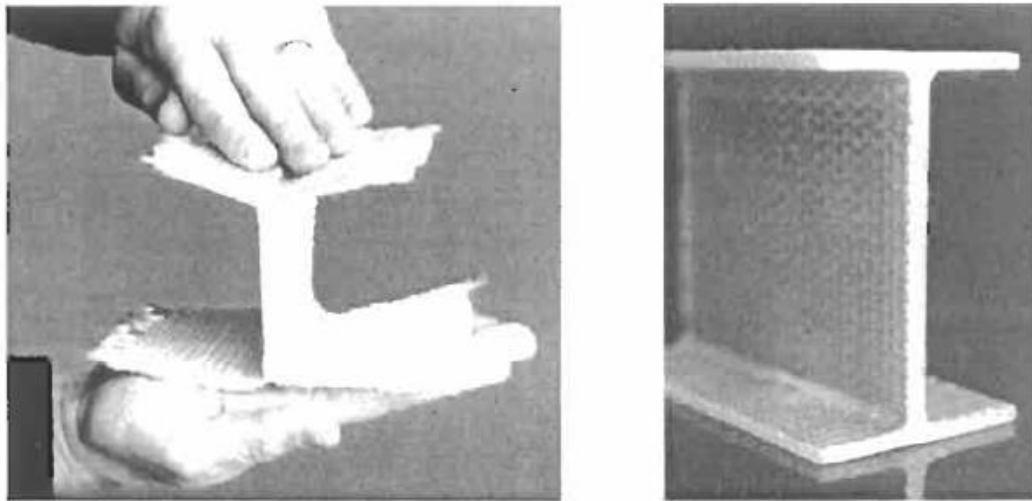


Figura 19. Estructuras tridimensionales de fibra [14].

- Tejido tridimensional no ortogonal: en este caso, los hilos de trama no se insertan perpendicularmente (Figura 20) a los de urdimbre por lo que en algunas fuentes bibliográficas no es considerado tejido, sino que se les denomina estructuras “no tejidas” [15]. La orientación en la que se entrelazan los hilos está minuciosamente controlada por lo que se permite obtener otro tipo de estructuras como se puede ver en la Figura 21.

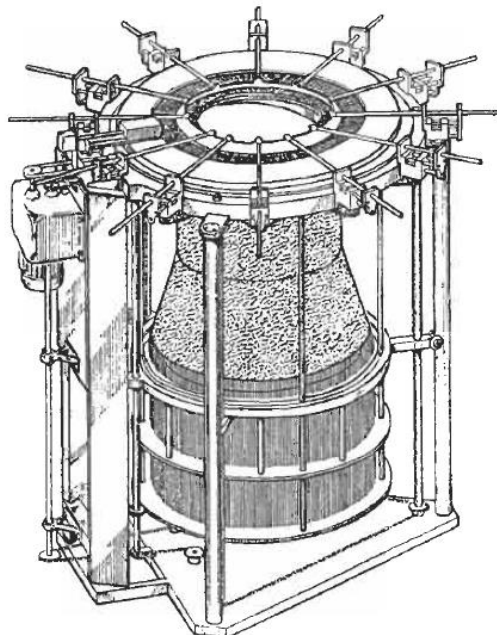


Figura 20. Esquema de producción de estructuras tridimensionales no ortogonales [13].



Figura 21. Ejemplo de estructura tridimensional no ortogonal [13].

2.3.2. *Braiding*

El braiding o trenzado es muy conocido en el campo de la ingeniería; en el caso de materiales fibrados, esta tecnología ha sido utilizada en artículos de alta tecnología como palos de golf, hélices de aviones o estructuras ligeras de puentes [16]. Principalmente podemos encontrar dos tipos de trenzados: 2D y 3D.

El trenzado estándar en 2D (ilustrado en la Figura 22) es fruto de la contrarrotación de dos conjuntos de soportes de hilo alrededor de un marco circular que forma la tela trenzada. Dependiendo del número de hilos de trenzado, su tamaño y el ángulo de trenzado se pueden tener distintos tipos de patrones de tela.

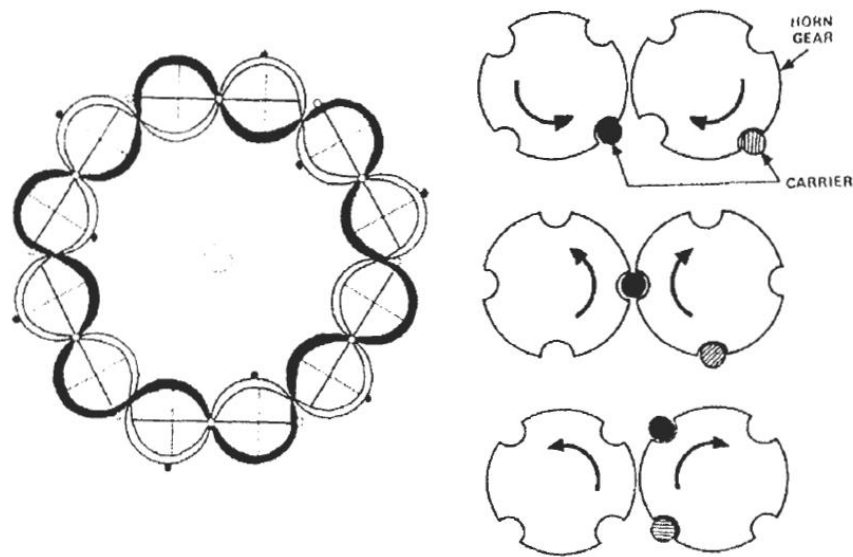


Figura 22. Esquema de trenzado 2D [13].

El trenzado 3D es de gran interés porque permite obtener estructuras de gran interés ingenieril como las mostradas en la Figura 23. Generalmente, este tipo de estructuras son conseguidas mediante la inclusión de tela sobre un “molde” móvil como se esquematiza en la Figura 24 y se muestra en la Figura 25.

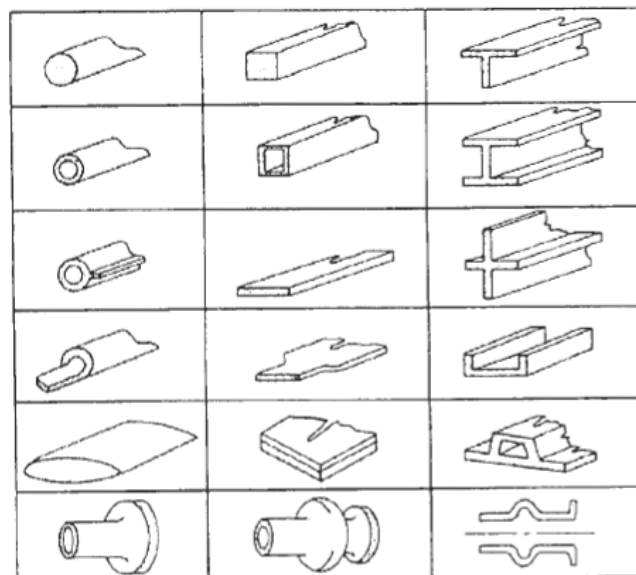


Figura 23. Ejemplos de estructuras obtenibles por trenzado [17].

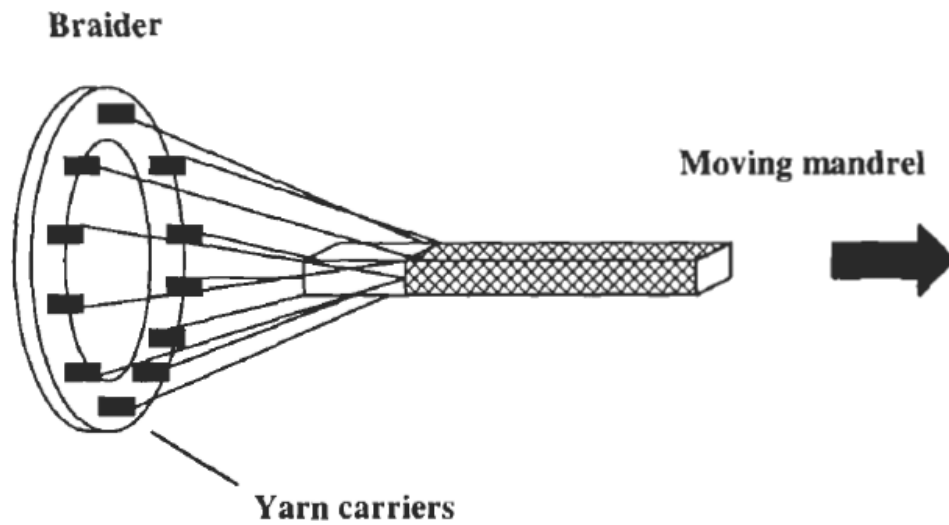


Figura 24. Esquema de trenzado con guía móvil [14].

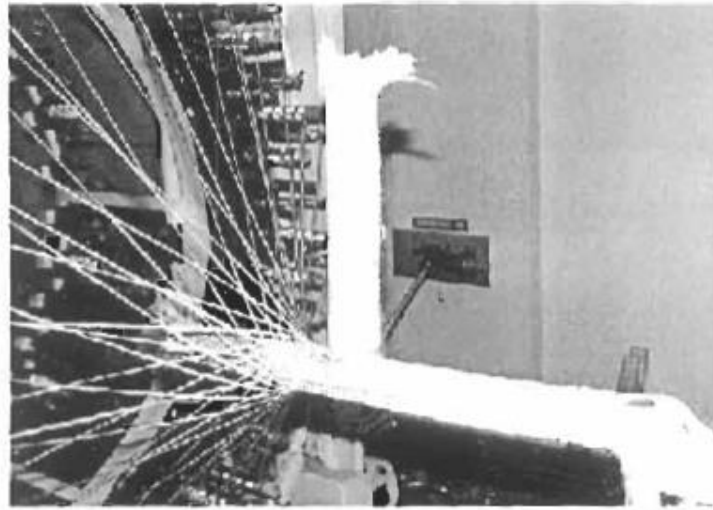


Figura 25. Trenzado con guía móvil [14].

El trenzado 3D, en base al trenzado 2D, puede darse en un proceso de 4 pasos (Figura 26) o 2 pasos (Figura 27). El trenzado en 4 pasos se consigue con un equipo formado por anillos alineados en un eje; estos anillos contienen ranuras sobre las que se apoya un hilo o conjunto de hilos que van de anillo en anillo en una dirección axial. El trenzado en 2 pasos incluye una gran cantidad de hilos fijos en la dirección axial y un número menor de hilos trenzados. El proceso tiene lugar cuando los portadores de hilo trenzado se mueven completamente entre los portadores de hilo axial.

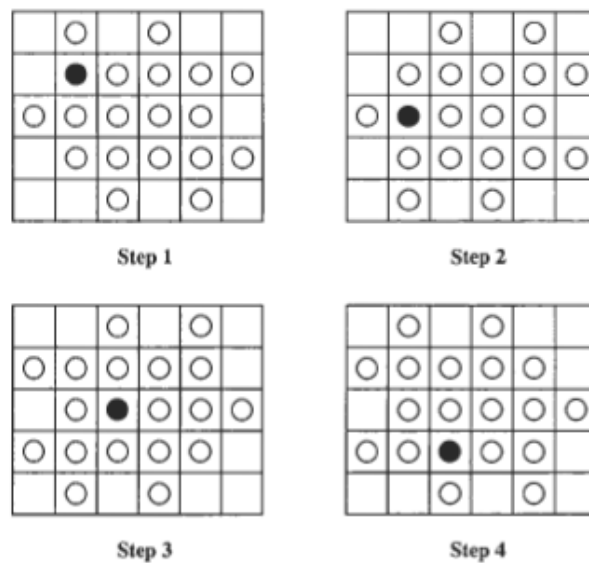


Figura 26. Esquema de trenzado en 4 pasos [13].

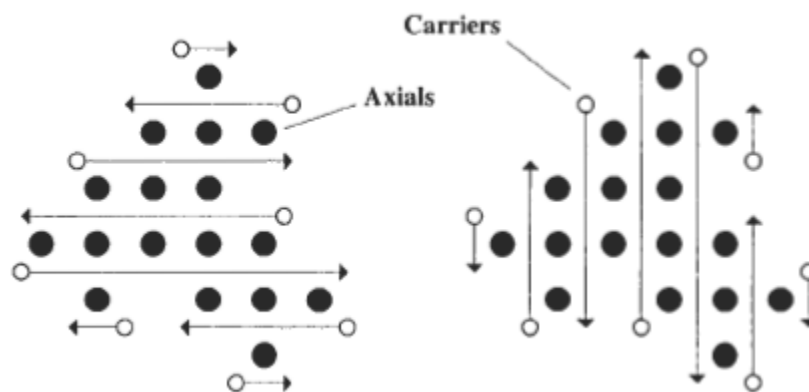


Figura 27. Esquema de trenzado en 2 pasos [13].

2.3.3. Knitting

El Knitting o realización de punto no es una técnica muy usada y, a simple vista, puede parecer una técnica poco útil para los fines de los composites. Aun así, es posible encontrar fibras trabajadas con esta técnica en algunos componentes. Se pueden encontrar principalmente tres tipos de tejido a punto:

- Tejido a punto tradicional: en este caso se puede tener por un lado el tejido de punto (Figura 28a) y, por otro, el tejido de urdimbre (Figura 28b), ambas disponibles en un telar convencional para obtener estructuras deseables. El proceso de tejido se esquematiza en la Figura 29 y con este proceso pueden obtenerse piezas como la expuesta en la Figura 30.

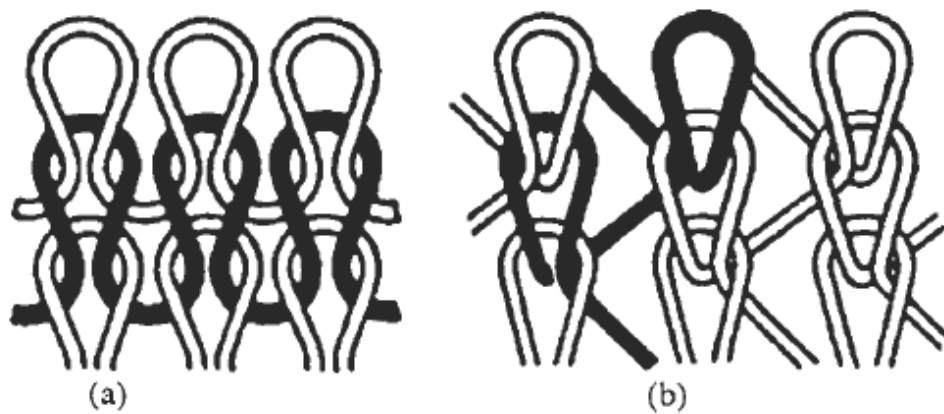


Figura 28. Tejido típico y de urdimbre [13].

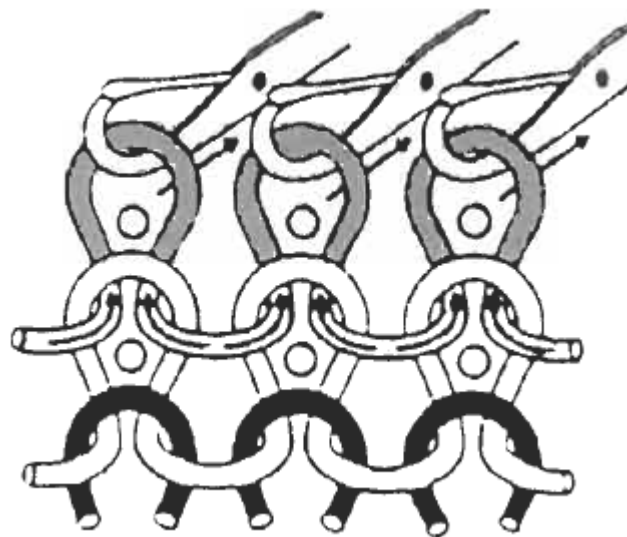


Figura 29. Proceso de tejido [13].

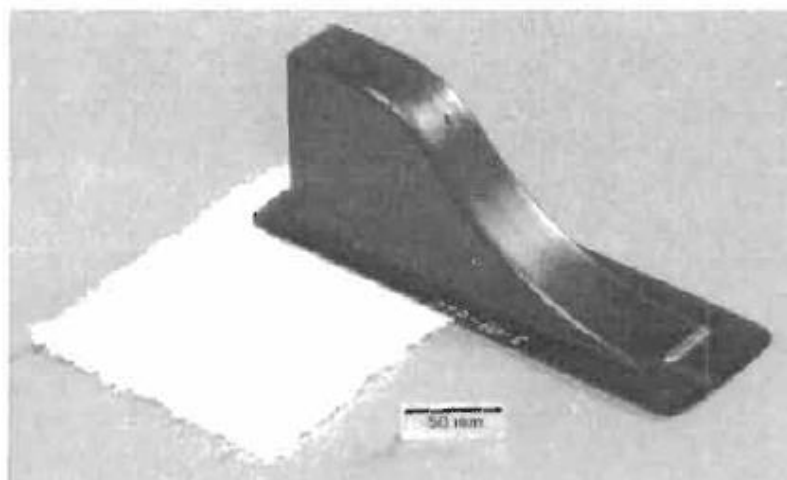


Figura 30. Bolsillos de puerta en helicóptero [14].

- Punto tridimensional: además de existir la posibilidad de producir tela plana altamente confortable, el proceso de tejido se puede utilizar para fabricar objetos con formas complejas gracias a los grandes avances acaecidos desde 1990 en los que se avanzó tanto en la tecnología de la máquina como en el software de diseño y control. En la Figura 31 se observa una muestra de piezas obtenidas con esta tecnología.

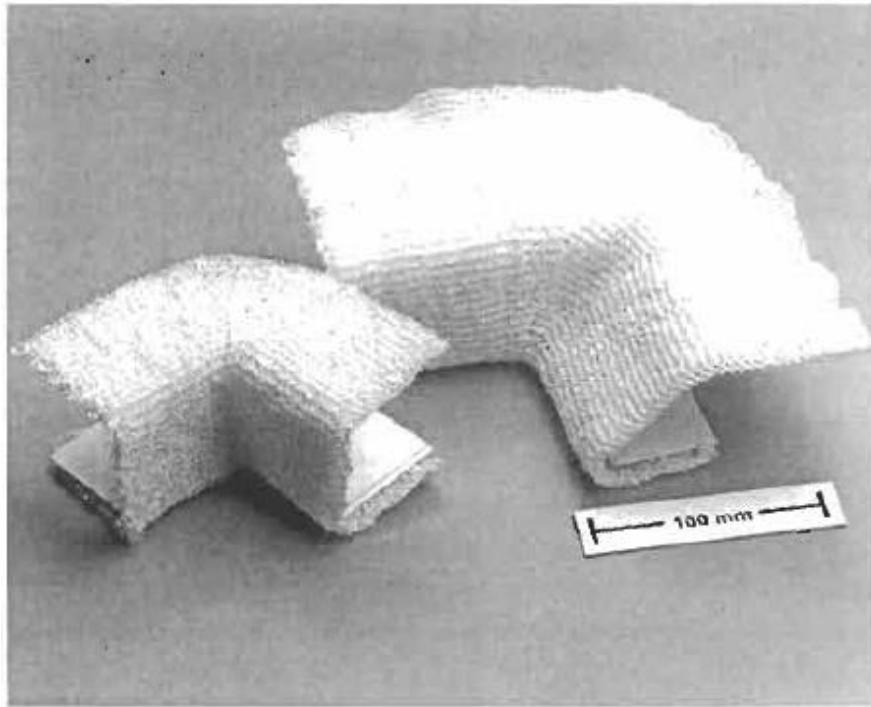


Figura 31. Ejemplos de piezas obtenidas con punto tridimensional [14].

- Telas no engarzadas: esta técnica combina aspectos del telado y del tejido a punto de manera que puede ser conocido como tejido de deformación multiaxial o tejido no engarzado. Existen varios procesos para fabricar estas telas, pero la más común es la usada por la LIBA Machine Company Alemana. En la Figura 32 puede ver un frame sobre la formación de la tela y en la Figura 33 se puede comprobar un ejemplo de tela obtenida con esta técnica.

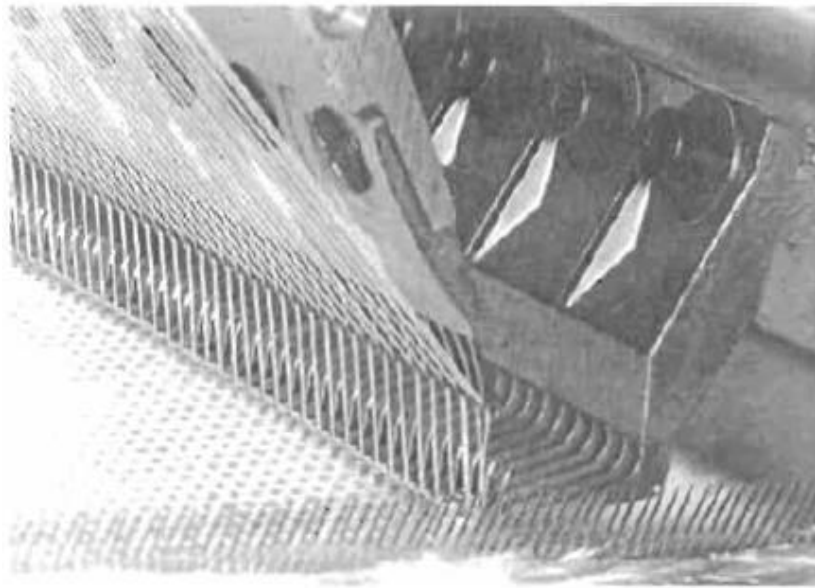


Figura 32. Formación de la tela [18].

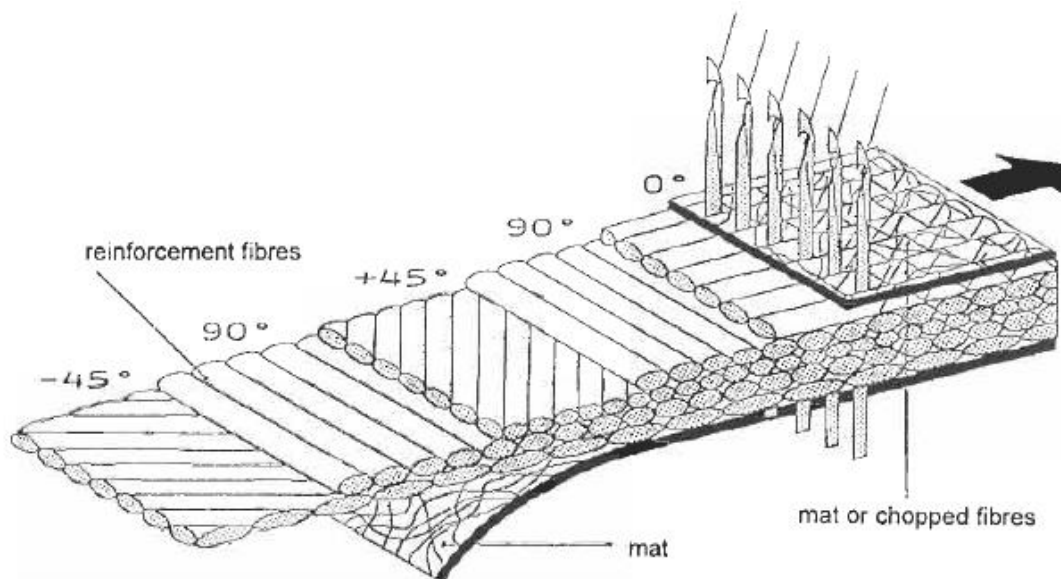


Figura 33. Ejemplo de tejido obtenido con esta tecnología [18].

2.3.4. *Stitching*

El stitching o cosido es el más simple de los procesos textiles mencionados en este punto y la que es realizable con la menor inversión. El proceso de costura consiste en insertar una aguja, que lleva hilo de puntada, a través de una pila de capas de tela para formar una estructura 3D.

Para poder coser un laminado hay que tener en cuenta varios aspectos sobre la máquina de coser y el elemento de cosido:

- La aguja de la máquina de coser debe de ser capaz de penetrar en el laminado.
- El hilo de cosido debe de ser resistente y capaz de mantener la tensión de cosido de manera que se impida el deshilachado.
- La máquina debe de tener potencia suficiente para realizar el cosido a lo largo del laminado.

La tensión en el hilo de cosido depende sobretodo del patrón de puntada (esquema en la Figura 34). El patrón de puntada depende de la máquina de coser, varios ejemplos de estos pueden observarse en la Figura 35.

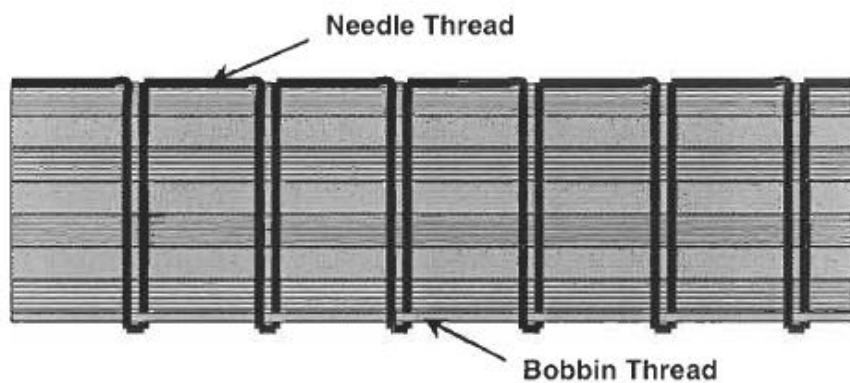


Figura 34. Esquema de patrón de puntada en un laminado [13].

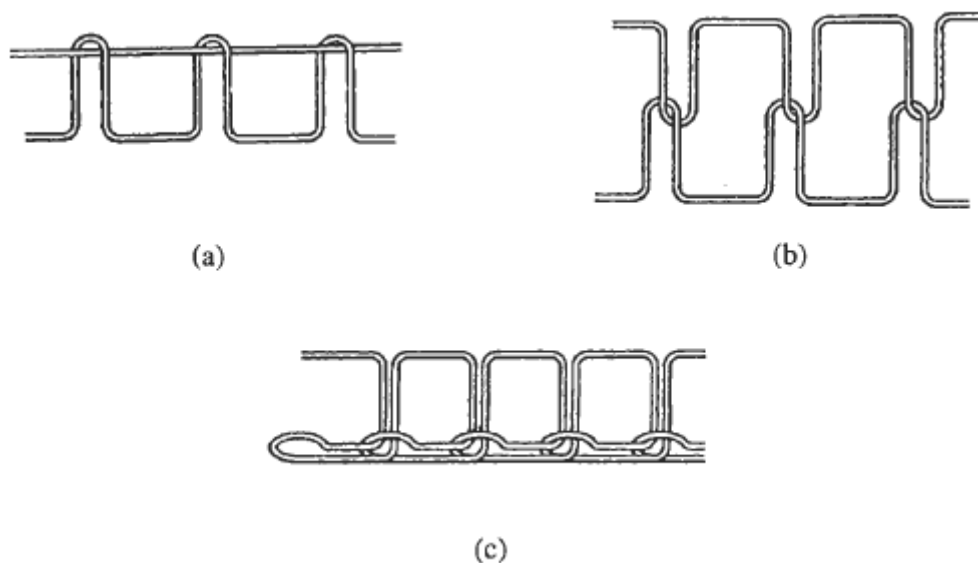


Figura 35. Configuraciones de puntada: de bloqueo modificado (a), puntada de bloqueo (b), punto de cadena (c) [19].

Si es importante la tensión que debe soportar el hilo de cosido, más importante es la unión que aporta esta tecnología a los laminados. La calidad de la unión depende del tipo de cosido que puede ser controlado manualmente en las máquinas de coser tradicionales o por control numérico en las más avanzadas. En la Figura 36 se muestran los 4 tipos principales de cosido: longitudinal (a), diagonal (b), zigzag (c) y cruzada (d).

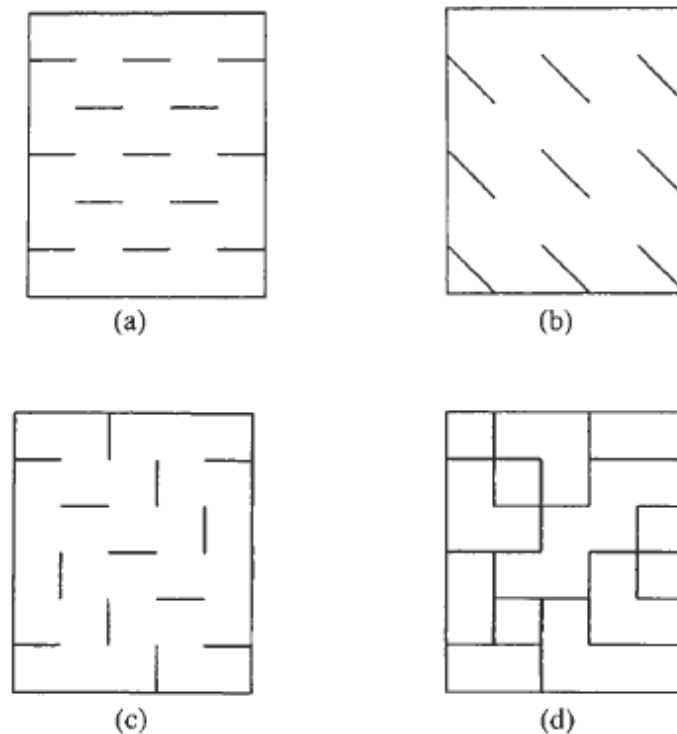


Figura 36. Tipos principales de cosido [20].

Se ha comentado que la tecnología es tan simple como coser diferentes láminas, pero no se ha especificado el tamaño de estas y ahí radica la mayor ventaja de esta tecnología en cuanto a la flexibilidad de uso. El tamaño de las láminas utilizables depende sobre todo de la máquina de coser, por ejemplo se muestra en la Figura 37 una máquina de coser usada para coser láminas que formarán parte de unas alas.

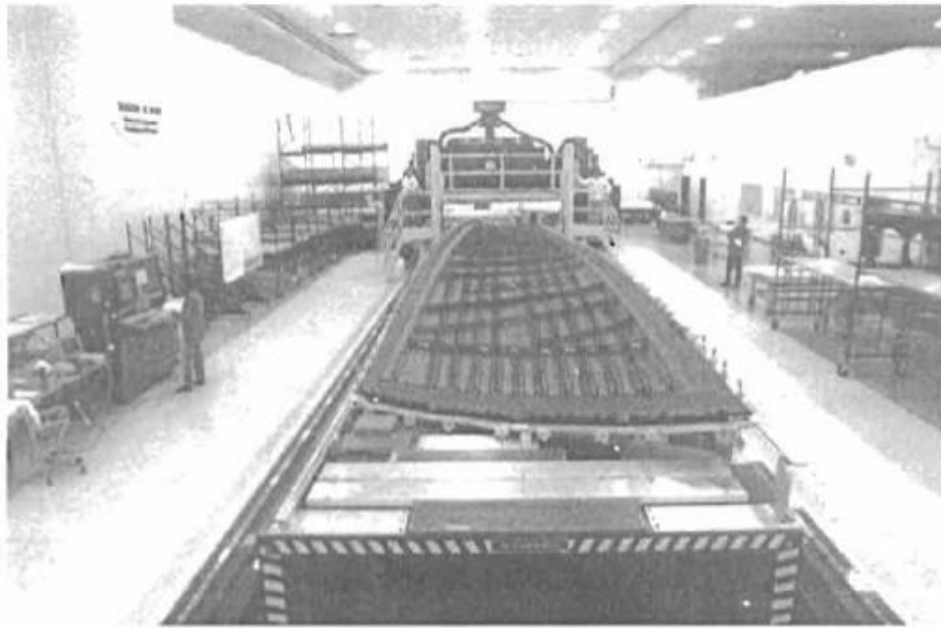


Figura 37. Máquina de coser utilizada para coser alas de material compuesto [21].

La flexibilidad de esta tecnología también se aprecia en la amplitud de formas obtenibles mediante cosido o combinación de láminas cosidas. Un ejemplo de este hecho se muestra en la Figura 38 donde se logra apreciar un ejemplo de la formación de un perfil en base a dos laminados sencillos.

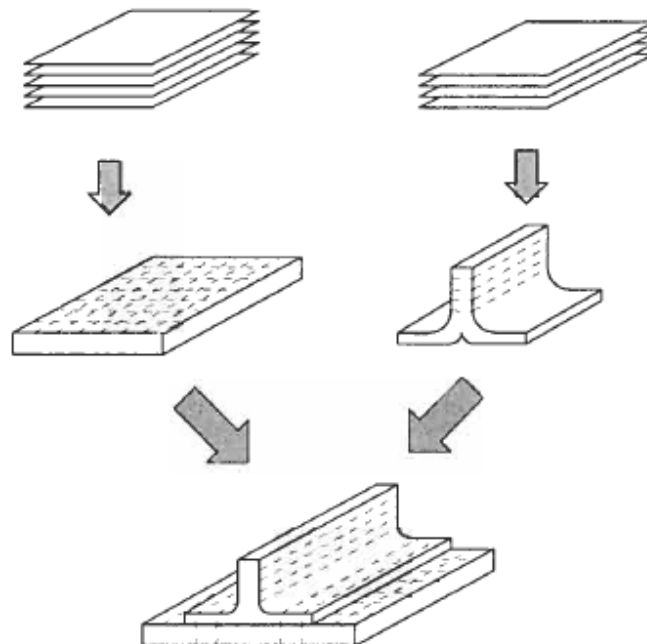


Figura 38. Ejemplo de formación de pieza de material a partir de láminas y usando cosido [13].

2.4. Comportamiento mecánico de los materiales compuestos

En este apartado se van a introducir fundamentos que llevan al cálculo teórico de propiedades en materiales compuestos como pueden ser el módulo elástico o la tensión de rotura mediante la regla de las mezclas teniendo estas limitaciones.

Además, se verá como son las propiedades físicas y elásticas de estos materiales teniendo en cuenta para ello qué tipo de material es y, por último, se verá de manera resumida el comportamiento de un laminado y los distintos criterios de rotura.

2.4.1. Regla de las mezclas

La regla de las mezclas permite la predicción de las características de un material compuesto como pueden ser el módulo elástico, densidad o carga de rotura a partir de las características de la matriz ($E_m, \rho_m, \sigma_{R_m} \dots$) y de las fibras ($E_f, \rho_f, \sigma_{R_f} \dots$). Además de las características de las partes, las características dependerán de las fracciones volumétricas de la matriz (v_m) y de las fibras (v_f) que se definen como:

$$v_m = \frac{V_m}{V_t} \quad v_f = \frac{V_f}{V_t} \quad \text{siendo} \quad \begin{array}{l} V_m: \text{volumen total de la matriz} \\ V_f: \text{volumen total de fibra} \\ V_t: \text{volumen de la probeta} \end{array}$$

Cumpléndose que $v_m + v_f = 1$

Teniendo en cuenta que esta regla sólo permite predecir características del material cuando la carga se orienta de manera longitudinal (Figura 39a) o transversal (Figura 39b), si se quisiera predecir propiedades para otros tipos de orientaciones habría que recurrir a las teorías del comportamiento mecánico de un laminado. Estas teorías permitirían calcular propiedades para una orientación cualquiera o incluso laminados completos conociendo el comportamiento en las direcciones longitudinal y transversal.

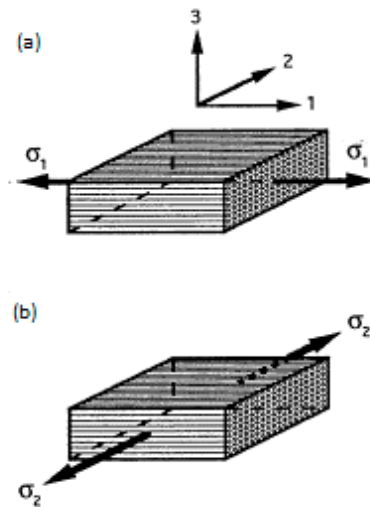


Figura 39. Distribución de la tensión según direcciones [22].

A continuación, se comprobarán desarrollos para la estimación de propiedades; asumiendo condiciones elásticas, las tensiones que soportan tanto fibra como matriz en la dirección longitudinal de carga se pueden expresar como:

$$\sigma_m = \frac{F_m}{A_m} = E_m \cdot \varepsilon_m \quad \sigma_f = \frac{F_f}{A_f} = E_f \cdot \varepsilon_f$$

Para poder estimar el módulo de elasticidad del material compuesto en dirección longitudinal de carga (E_1) hay que tener en cuenta que la tensión que soporta el material (σ_1) es igual a la suma de la tensión soportada por la matriz (σ_m) y por las fibras (σ_f):

$$\sigma_1 = \sigma_m + \sigma_f \rightarrow \frac{F_1}{A} = \frac{F_m}{A_m} + \frac{F_f}{A_f}$$

$$F_1 = F_m + F_f \rightarrow \sigma_1 \cdot A = \sigma_m \cdot A_m + \sigma_f \cdot A_f$$

Teniendo en cuenta la relación entre la tensión y los módulos elásticos y las deformaciones:

$$E_1 \cdot \varepsilon_1 \cdot A = E_m \cdot \varepsilon_m \cdot A_m + E_f \cdot \varepsilon_f \cdot A_f$$

$$E_1 \cdot \varepsilon_1 = E_m \cdot \varepsilon_m \cdot \frac{A_m}{A} + E_f \cdot \varepsilon_f \cdot \frac{A_f}{A}$$

Sabiendo en las deformaciones de los elementos deben de ser iguales:

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_m = \varepsilon_f$$

Además, la longitud de la fibra y de la matriz son iguales al estar en una misma probeta:

$$\begin{aligned} V_m &= A_m \cdot l \rightarrow \frac{A_m}{A} = \frac{V_m/l}{V/l} = v_m \\ V_f &= A_f \cdot l \rightarrow \frac{A_f}{A} = \frac{V_f/l}{V/l} = v_f \end{aligned}$$

Con estas apreciaciones:

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

Desarrollando de manera similar se puede predecir el módulo de elasticidad en la dirección transversal de carga (E_2) sabiendo que las distintas fases están sometidas a la misma tensión (σ_2) y la misma fuerza (F_2):

$$\sigma_2 = \sigma_m = \sigma_f \rightarrow E_2 \cdot \varepsilon_2 = E_m \cdot \varepsilon_m = E_f \cdot \varepsilon_f$$

En el caso de esfuerzo transversal se conoce que el desplazamiento entre las caras del laminado ($\varepsilon_2 \cdot w$) es igual a la suma del desplazamiento de la matriz ($\varepsilon_m \cdot w_m$) y de la fibra ($\varepsilon_f \cdot w_f$) siendo W, W_m, W_f los espesores del laminado, la matriz y la fibra respectivamente, es decir:

$$\varepsilon_2 \cdot w = \varepsilon_m \cdot w_m + \varepsilon_m \cdot w_f \rightarrow \varepsilon_2 = \varepsilon_m \cdot \frac{w_m}{w} + \varepsilon_m \cdot \frac{w_f}{w}$$

$$\begin{aligned} V_m &= A_{l_m} \cdot w_m \rightarrow \frac{w_m}{w} = v_m \\ V_f &= A_{l_f} \cdot w_f \rightarrow \frac{w_f}{w} = v_f \end{aligned} \quad \text{con } A_{l_i}: \text{área en la dirección longitudinal}$$

Teniendo en cuenta esto:

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_m \cdot v_m + \varepsilon_f \cdot v_f$$

$$\frac{\sigma_2}{E_2} = \frac{\sigma_m}{E_m} \cdot v_m + \frac{\sigma_f}{E_f} \cdot v_f$$

$$\sigma_2 = \sigma_m = \sigma_f \rightarrow \frac{1}{E_2} = \frac{v_m}{E_m} + \frac{v_f}{E_f}$$

Conociendo la predicción sobre propiedades con cargas longitudinales y transversales puede predecirse el coeficiente de Poisson en la dirección longitudinal (ν_{12}) definiéndose este como el cociente de la deformación transversal (ε_{22}) y la deformación longitudinal (ε_{11}):

$$\nu_{12} = \frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11}}$$

De una expresión anterior se conoce que $\varepsilon_{22} = \varepsilon_{2m} \cdot v_m + \varepsilon_{2f} \cdot v_f$ y teniendo en cuenta expresión del coeficiente de Poisson se pueden relacionar los espesores, con los coeficientes de Poisson de las fases (ν_m y ν_f) y las fracciones volumétricas de estos (v_f y v_m):

$$\varepsilon_{22} = \varepsilon_{2m} \cdot v_m + \varepsilon_{2f} \cdot v_f$$

$$W \cdot \nu_{12} \cdot \varepsilon_{11} = W \cdot \nu_m \cdot v_m \cdot \varepsilon_{11} + W \cdot \nu_f \cdot v_f \cdot \varepsilon_{11}$$

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

El coeficiente de Poisson en la dirección transversal de carga podría calcularse con el teorema de reciprocidad:

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

Por último, para terminar esta introducción a la regla de las mezclas se va a esbozar el razonamiento necesario para la predicción de la tensión de rotura de un material fibrado.

Al estar tratando con materiales compuestos, es de esperar que el comportamiento ante la rotura sea un caso intermedio entre las características de la fibra y la matriz como se puede observar esquematizado en la Figura 40.

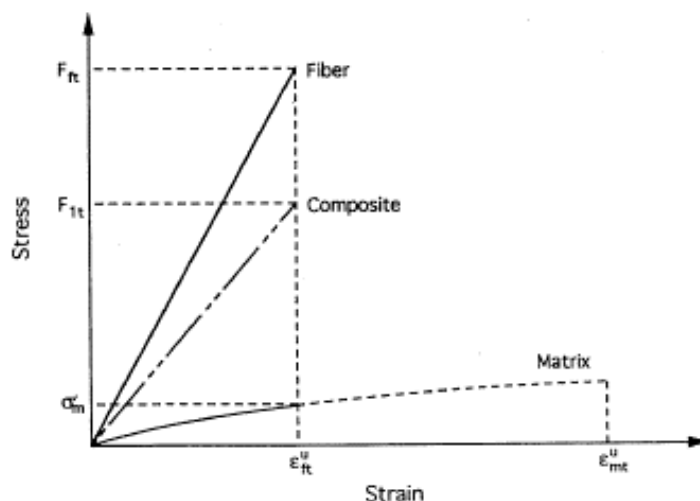


Figura 40. Diagrama $\sigma - \varepsilon$ en fibras y matrices [22].

Atendiendo a la anterior gráfica se asume que la deformación de rotura de la fibra (ε_f^R) es menor que la deformación de rotura de la matriz (ε_m^R). Dependiendo de las fases que compongan el material compuesto puede darse este caso o el contrario, que la deformación de la rotura de la fibra sea mayor que la deformación de rotura de la matriz, es decir:

$$\varepsilon_f^R > \varepsilon_m^R$$

En el caso de estudio de un material compuesto con fibra de vidrio en matriz de resina de poliéster como es este, se está ante el segundo caso tal y como se puede deducir de los apartados de deformaciones de rotura en la Tabla 2 y en la Tabla 3.

Con estas condiciones es de esperar que la matriz, ante un esfuerzo a tracción, rompa antes que la fibra haciendo que la sollicitación se concentre aún más en las fibras. La concentración progresiva de esfuerzo en las fibras hará que llegue un momento que la rotura se produzca aprovechando los huecos de resina rota entre el refuerzo. De manera esquematizada, se puede observar el proceso de rotura de un laminado unidireccional en la Figura 41.

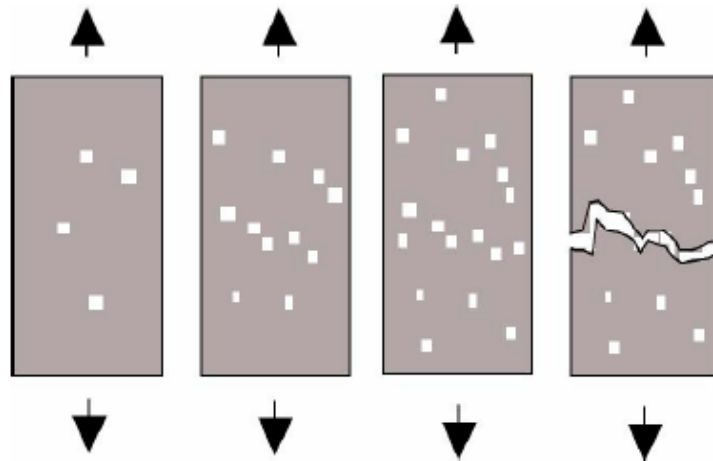


Figura 41. Representación de la rotura a tracción de un laminado [22].

Dado que, debido a la rotura de los enlaces de la matriz, los esfuerzos se van concentrando progresivamente en los refuerzos, es de esperar que la tensión de rotura del material (σ_R) dependa, además de las tensiones de rotura de las fases (σ_R^m, σ_R^f), de la fracción volumétrica de estas (v_f, v_m) al igual que las demás características mecánicas del material.

A diferencia de otras propiedades como el módulo elástico o el coeficiente de Poisson, la tensión de rotura no dependerá de las fracciones volumétricas en forma de media ponderada; Derek Hull en 1987, [4], expuso el diagrama de comportamiento de la tensión de rotura de un material fibrado (Figura 42) en función de las fracciones volumétricas. En este diagrama se puede comprobar que existe un valor de volumen de fibras crítico ($v_{f_{critico}}$) en el que, para valores previos a él, se obtienen resistencias de rotura menores a los de la matriz ($\sigma_R < \sigma_R^m$) y, a partir de él, la resistencia de rotura aumenta de manera proporcional al volumen de fibras hasta un máximo de $\sigma_R = \sigma_R^f$ para $v_f = 1$.

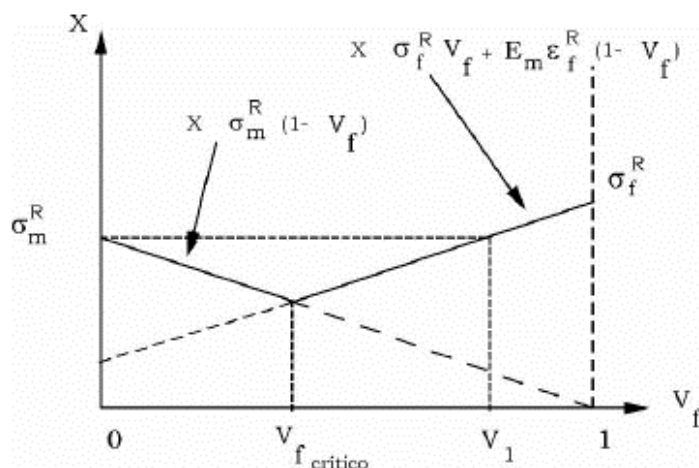


Figura 42. Variación de la resistencia del material con la fracción volumétrica de la fibra [4].

Estas propiedades no son las únicas propiedades que pueden predecirse con la regla de las mezclas pero que, en base a las fracciones de fibra y matriz podrían deducirse otras como el módulo de cizalladura del material o la conductividad eléctrica o térmica. Se han podido comprobar las posibilidades de esta herramienta que, aunque es potente, deja de lado el efecto que pueda producir la porosidad o fallos de adhesión entre las fases que justificarían una diferencia con los datos experimentales que si obtuvieran en ensayos.

2.4.2. Propiedades físicas

En este apartado se va a proceder a la obtención de expresiones válidas para el cálculo teórico de propiedades físicas como la fracción volumétrica de fibras (v_f) enunciada anteriormente, la densidad del material compuesto (ρ) o la fracción volumétrica de huecos (v_{huecos}) no contemplada hasta ahora.

Del apartado anterior se conoce que las fracciones volumétricas de fibra y matriz son:

$$v_m = \frac{V_m}{V_t} \quad v_f = \frac{V_f}{V_t}$$

$$v_m + v_f = 1$$

Sabiendo que el volumen de fibras, V_f , y el de la matriz, V_m , dependen de su masa (m_m, m_f) y densidad (ρ_m, ρ_f) de la forma:

$$V_m = \frac{m_m}{\rho_m} \quad V_f = \frac{m_f}{\rho_f}$$

Además la masa de fibra puede calcularse en función del gramaje de esta (g_f) y la superficie de la probeta ($S_{probeta}$), las masas se pueden calcular como:

$$\begin{aligned} m_f &= N \cdot g_f \cdot S_{probeta} \\ m_m &= m_{probeta} - m_f \end{aligned} \quad \text{con } N: \text{número de láminas}$$

Con todo lo anterior se puede establecer que:

$$\begin{aligned} v_f &= \frac{\frac{N \cdot g_f \cdot S_{probeta}}{\rho_f}}{\frac{N \cdot g_f \cdot S_{probeta}}{\rho_f} + \frac{m_{probeta} - N \cdot g_f \cdot S_{probeta}}{\rho_m}} \\ v_m &= \frac{\frac{m_{probeta} - N \cdot g_f \cdot S_{probeta}}{\rho_m}}{\frac{N \cdot g_f \cdot S_{probeta}}{\rho_f} + \frac{m_{probeta} - N \cdot g_f \cdot S_{probeta}}{\rho_m}} \end{aligned}$$

Conociendo las expresiones de las fracciones volumétricas se puede conocer la densidad de la probeta de material compuesto estableciendo una media ponderada en función de las fracciones volumétricas de la forma:

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

Cabe destacar que en estas consideraciones no se han tenido en cuenta la posible existencia de huecos en el material compuesto, pero se puede dar el caso de la existencia de estos en el laminado. En el caso de su existencia habría que considerar la nueva fase formada por el aire de manera que su fracción volumétrica (v_{huecos}) sea:

$$v_{huecos} = 1 - (v_f + v_m)$$

Para evitar en la medida de lo posible los huecos en el material compuesto conviene conocer qué tipos de huecos hay y sus posibles causas. Respecto a los tipos de huecos se definen dos principalmente: huecos a lo largo de las fibras individuales (esféricos o alargados) y huecos entre láminas y zonas ricas en resina.

Las causas de los huecos pueden ser: impregnación incompleta de las fibras por la resina o la presencia de sustancias volátiles producidas durante el proceso de curado (matrices termoestables) y el proceso de fusión (resinas termoplásticas); se puede fomentar la ausencia de estos con un aporte de resina adecuado así degasificando previamente la matriz.

2.4.3. Propiedades elásticas

En este apartado se va a abordar el estudio elástico del comportamiento de un material desde el punto de vista más general, es decir, un material anisótropo; para ello, hay que tener en cuenta lo que se mencionó al principio de este trabajo y es que, al estar trabajando con materiales heterogéneos, las propiedades de estos cambiarían al considerar unos ejes u otros.

Además de la variación de propiedades según los ejes que se traten, un material anisótropo se caracteriza en la deformada que adquiere ante una sollicitación de carga. Se considera deformada a la posición final resultante de los desplazamientos de los puntos del material en el plano o en el espacio; en la Figura 43 se puede ver, de forma esquemática, la deformada ante esfuerzos de tensión de un material anisótropo respecto a materiales isotropos u ortótropos.

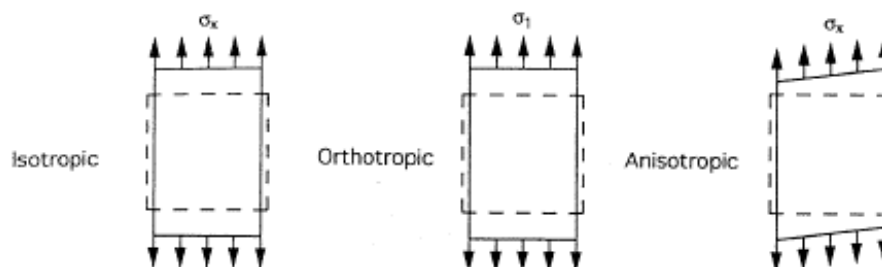


Figura 43. Deformada según tipo de material [22].

Aunque si es cierto que el material compuesto en su concepto se define como un material anisótropo, la geometría de las muestras y las condiciones de carga harán que se puedan tener simplificaciones que se enunciarán más adelante.

En el caso más general, ante un comportamiento elástico y lineal de un material, para establecer la relación entre tensión y deformación se recurre a la ley de comportamiento de Lamé que, en notación de Einstein se reduce a:

$$\sigma_{ij} = C_{ijkl} \cdot \varepsilon_{ij} \quad \text{con} \quad \begin{matrix} i, j, k, l = 1, 2, 3 \\ C: \text{matriz rigidez} \end{matrix}$$

La matriz de rigidez, C, en su formulación inicial dispone de 81 constantes que se ven reducidas ante las siguientes simplificaciones:

- Los tensores de deformaciones y tensiones son simétricos por lo que la matriz de rigidez queda con 36 constantes ($\sigma_i = C_{ij} \cdot \varepsilon_j$)
- Aplicando criterios energéticos, la matriz de rigidez se comprueba que es simétrica ($C_{ij} = C_{ji}$) teniendo solamente 21 constantes elásticas.

Con esto, para un material anisótropo en su comportamiento más general:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{12} \\ \tau_{13} \\ \tau_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & C_{14} & C_{15} & C_{16} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & C_{24} & C_{25} & C_{26} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & C_{34} & C_{35} & C_{36} \\ C_{41} & C_{42} & C_{43} & C_{44} & C_{45} & C_{46} \\ C_{51} & C_{52} & C_{53} & C_{54} & C_{55} & C_{56} \\ C_{61} & C_{62} & C_{63} & C_{64} & C_{65} & C_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12}/2 \\ \gamma_{13}/2 \\ \gamma_{23}/2 \end{bmatrix}$$

Por la disposición uniforme de las fibras y la matriz en los laminados de este trabajo, se puede aplicar la simetría ortótropa quedando 9 constantes elásticas que en forma matricial son:

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{12} \\ \tau_{13} \\ \tau_{23} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & 0 \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & 0 \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12}/2 \\ \gamma_{13}/2 \\ \gamma_{23}/2 \end{bmatrix}$$

Invirtiendo esta ecuación matricial se llega a una nueva en la que el tensor de deformaciones es función del tensor de tensiones y de la matriz de flexibilidad:

$$\varepsilon_i = S_{ij} \cdot \sigma_j$$

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ \gamma_{12}/2 \\ \gamma_{13}/2 \\ \gamma_{23}/2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \tau_{12} \\ \tau_{13} \\ \tau_{23} \end{bmatrix}$$

En base a esta matriz y siguiendo la ley de Hooke generalizada se pueden conocer las deformaciones de forma:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{11} &= \frac{\sigma_{11}}{E} - \frac{\nu}{E} (\sigma_{22} + \sigma_{33}) \\ \varepsilon_{22} &= \frac{\sigma_{22}}{E} - \frac{\nu}{E} (\sigma_{11} + \sigma_{33}) \\ \varepsilon_{33} &= \frac{\sigma_{33}}{E} - \frac{\nu}{E} (\sigma_{11} + \sigma_{22}) \\ \gamma_{12} &= 2 \cdot \frac{1 + \nu}{E} \tau_{12} \\ \gamma_{13} &= 2 \cdot \frac{1 + \nu}{E} \tau_{13} \\ \gamma_{23} &= 2 \cdot \frac{1 + \nu}{E} \tau_{23} \end{aligned}$$

En este caso, definiendo las constantes según las ecuaciones de Lamé:

$$\begin{aligned} \sigma_1 &= 2 \cdot G \cdot \varepsilon_{11} + \lambda \cdot (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) \\ \sigma_2 &= 2 \cdot G \cdot \varepsilon_{22} + \lambda \cdot (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) \\ \sigma_3 &= 2 \cdot G \cdot \varepsilon_{33} + \lambda \cdot (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}) \\ \tau_{12} &= G \cdot \gamma_{12} \\ \tau_{13} &= G \cdot \gamma_{13} \\ \tau_{23} &= G \cdot \gamma_{23} \end{aligned}$$

En el caso de estudio, teniendo en cuenta la geometría de las probetas que se obtendrán de los laminados, se puede asumir estado de tensión plana, es decir, aquel en el que se cumple:

$$\sigma_{33} = 0; \tau_{13} = 0; \tau_{23} = 0$$

$$\gamma_{13} = 0; \gamma_{23} = 0$$

Con esto se tendría un nuevo estado en tensiones y deformaciones regido por las siguientes ecuaciones:

- Ley de Hooke particularizada en tensión plana:

$$\varepsilon_{11} = \frac{\sigma_{11}}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_{22})$$

$$\varepsilon_{22} = \frac{\sigma_{22}}{E} - \frac{\nu}{E}(\sigma_{11})$$

$$\varepsilon_{33} = -\frac{\nu}{E}(\sigma_{11} + \sigma_{22})$$

$$\gamma_{12} = 2 \cdot \frac{1 + \nu}{E} \tau_{12}$$

$$\gamma_{13} = 0$$

$$\gamma_{23} = 0$$

- Ecuaciones de Lamé en tensión plana:

$$\sigma_1 = 2 \cdot G \cdot \varepsilon_{11} + \lambda \cdot (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33})$$

$$\sigma_2 = 2 \cdot G \cdot \varepsilon_{22} + \lambda \cdot (\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33})$$

$$\sigma_3 = 0$$

$$\tau_{12} = G \cdot \gamma_{12}$$

$$\tau_{13} = 0$$

$$\tau_{23} = 0$$

2.4.4. Comportamiento de un laminado y criterios de rotura

Como se indicó en el apartado anterior, los laminados de este estudio se iban a tomar como sólidos por la simplicidad del laminado ya que este sólo se compone de una lámina de fibra reforzada mediante cosido en matriz de resina de poliéster. En la mayoría de las ocasiones esto no es así, los laminados no son tan simples sino que lo forman varias láminas de refuerzo trabajando unas en conjunto con otras; es este caso se trata de laminados compuestos (Figura 44).

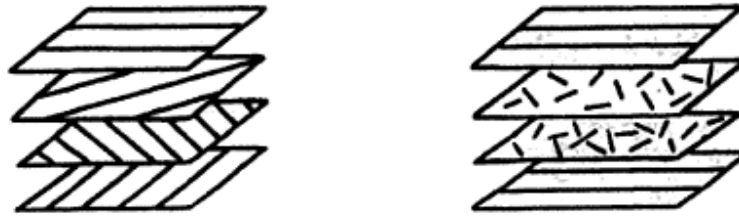


Figura 44. Ejemplos de disposición de láminas para obtención de laminados compuestos [23].

El comportamiento mecánico de los laminados compuestos se puede entender desde dos perspectivas:

- Homogeneizando las propiedades de las distintas capas considerando el laminado como una capa equivalente.
- Tomando el laminado como multicapa.

En el primer enfoque se encuentra principalmente la CLPT (“Classical Laminated Composite Plates Theory”) además de otras teorías de placas deformables por corte. Respecto al segundo enfoque se contempla el alabeo de las secciones haciendo que se vean cumplidas las ecuaciones de equilibrio. Las distintas perspectivas y maneras de entendimiento de la mecánica de los laminados asumen las siguientes simplificaciones:

- Los laminados se comportan según sollicitación de tensión plana
- El espesor del laminado se mantiene constante
- Las rectas o directrices que son perpendiculares al plano medio del laminado antes del esfuerzo, lo siguen siendo después de este.
- El comportamiento del laminado es elástico y lineal, además, la deformación del laminado se asume lineal.
- El espesor del laminado es pequeño frente a las otras dos dimensiones de este.
- Las láminas o capas, trabajan de manera solidaria unas con otras.

Al igual que el comportamiento de los laminados responde a una serie de teorías, los fallos en los laminados en forma de rotura se pueden evaluar en base a distintos criterios.

En primer lugar, es destacable la teoría del esfuerzo máximo que, siendo equivalente al criterio de Rankine, predice que no habrá fractura si el esfuerzo máximo en la dirección longitudinal o transversal a las fibras es menor que la resistencia de la lámina en esas direcciones o si el esfuerzo de cizalladura es mejor que la resistencia al corte.

La teoría del esfuerzo máximo es adecuada para roturas frágiles y permite prever el modo de rotura que tendrá el laminado permitiendo modificar la configuración de las láminas para minimizar la posible falla.

Si antes se producía la rotura ante un esfuerzo máximo, otra teoría considera el fallo en el laminado cuando se alcanza una deformación igual o mayor a la deformación última experimental que produce el fallo, es la teoría de la deformación máxima, equivalente al criterio de Saint-Venant para materiales isótropos.

Este criterio es similar al anterior ya que permite prever el tipo de fallo, pero, debido a la relación existente entre tensiones y deformaciones, este criterio contempla la acción de la interacción de esfuerzos debido a la acción del coeficiente de Poisson.

Mejorando y ampliando el campo de aplicación de estos criterios surgen dos nuevas teorías: la teoría de Tsai-Hill y la de Tsai-Hull.

La primera (teoría de Tsai-Hill) establece un criterio de plastificación similar al de Von-Mises que, estableciendo constantes (G, H, F, L, M, N) asociadas al final del comportamiento elástico y principio del plástico, es decir, a la fractura ya que se supone comportamiento elástico y lineal, indica que el fallo se produce cuando se cumple un estado tensional tal que:

$$(G + H)\sigma_{11}^2 + (F + H)\sigma_{22}^2 + (F + G)\sigma_{33}^2 - 2H\sigma_{11}\sigma_{22} - 2G\sigma_{11}\sigma_{33} - 2F\sigma_{33}\sigma_{22} + 2L\tau_{12}^2 + 2M\tau_{13}^2 + 2N\tau_{23}^2 = 1$$

Este criterio contempla la interacción entre las tensiones normales y tangenciales por lo que mejora a los anteriores.

El criterio de Tsai-Hill no es muy bueno ante materiales que tienen distintas resistencias a tracción y a compresión por lo que, para contemplar esta posibilidad y como necesidad de obtener un método fácilmente programable surge el criterio de Tsai-Wu. Este criterio sostiene que el fallo se da cuando se cumple la condición en base a un tensor de orden 2 (F_i) y otro de orden 4 (F_{ij}):

$$F_i \cdot \sigma_i + F_{ij} \cdot \sigma_i \cdot \sigma_j = 1 \quad \text{con } i, j = 1, 2, \dots, 6$$

Estas cuatro teorías son las principales que aportan conocimiento sobre la rotura de laminados y que, de manera gráfica y esquemática, se pueden observar en la Figura 45.

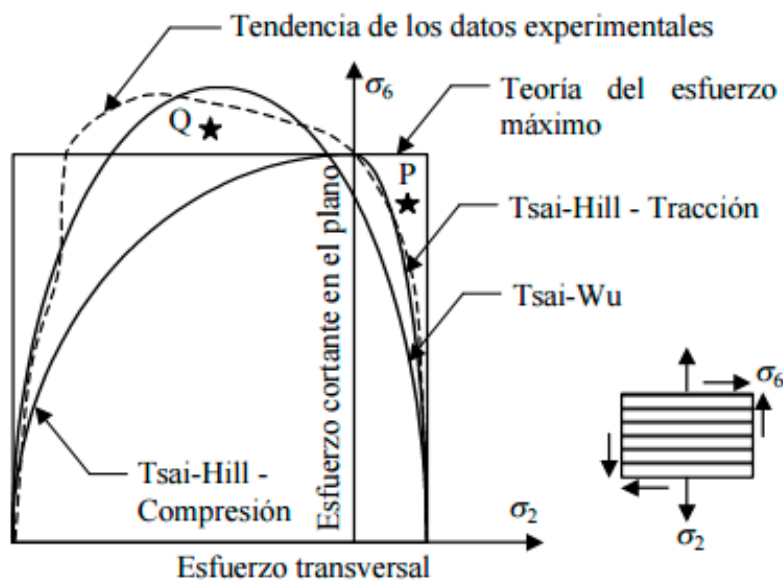


Figura 45. Gráficas teóricas de fallos vs datos experimentales [24].

Gráficamente se puede obtener una visión más adecuada de cuál de los criterios es más restrictivo respecto a la falla como puede ser el método de Tsai-Hill en compresión o el criterio de Tsai-Wu en tracción. Conocer el campo de aplicación de los distintos métodos puede hacer que, en un supuesto caso de diseño de un laminado, el cálculo pueda ir más o menos alejado de la seguridad respecto a otros métodos que incluye mayor relajación.

2.5. Modelos de estimación de propiedades elásticas en materiales cosidos

En este apartado se van a definir dos modelos de cálculo del módulo de Young en laminados cosidos (E_s) y la relación de este con los parámetros que definen el cosido de los laminados. Es de interés definir un parámetro clave de los laminados cosidos como es la densidad de puntada (n_s) definido como la cantidad de puntadas por unidad de área:

$$[n_s] = \frac{1}{L^2} \quad \text{con } L: \text{unidad de longitud}$$

La densidad de puntada se obtiene a partir de dos parámetros: la distancia entre puntadas en la dirección de cosido (a_s) y la distancia entre líneas de cosido (a_p):

$$n_s = \frac{1}{a_p \cdot a_s}$$

Por definición, se ha asumido el proceso de cosido como una tecnología de refuerzo de las fibras, pero a su vez, es una tecnología que interviene físicamente en el laminado principal en forma de puntada. Estas puntadas pueden provocar los siguientes fallos o daños en la disposición inicial de las fibras:

- Rotura de fibras debidas a la costura (Figura 46): generalmente producidas por la fuerza con la que la aguja incide sobre el laminado.

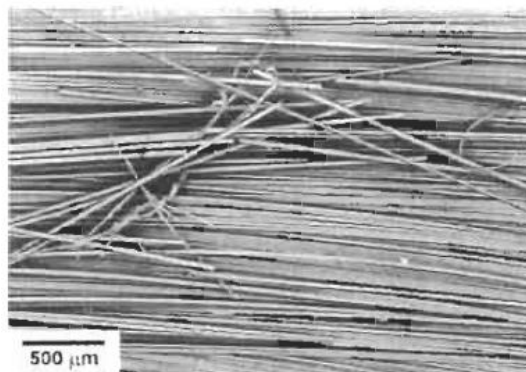


Figura 46. Rotura de fibras [13].

- Desalineación local de la fibra alrededor de una puntada (Figura 48): producida por el espacio que ocupa la puntada entre las fibras.

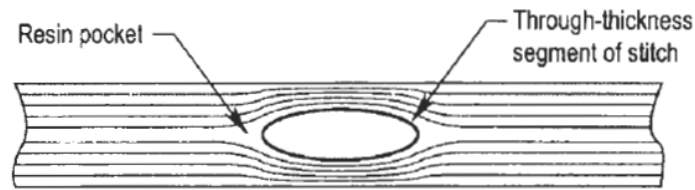


Figura 47. Esquema de la desalineación local [25].

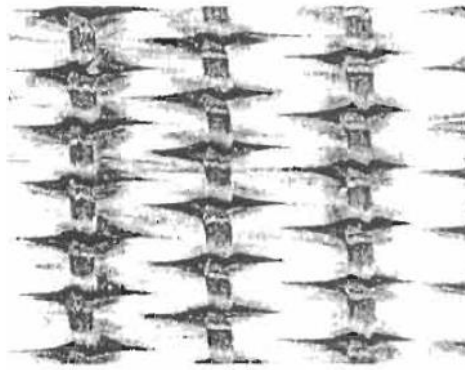


Figura 48. Desalineación local de fibras [26].

- Desalineación parcial de la fibra (Figura 49): similar a la anterior pero situado en el borde del laminado.

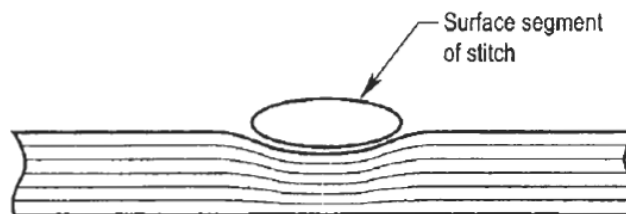


Figura 49. Esquema de la desalineación parcial [25].

- Distorsión en la puntada debida a la compactación del laminado (Figura 50): debido a las tensiones internas del laminado.

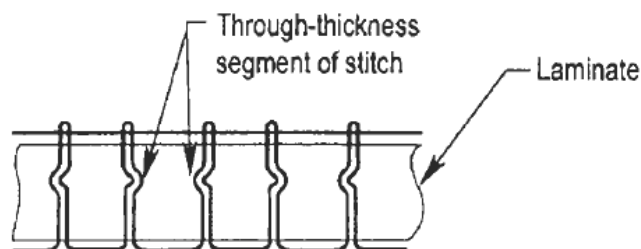


Figura 50. Esquema de la distorsión provocada por la compactación del laminado [25].

Se ha comprobado que el proceso de fabricación de láminas cosidas produce fallos en el laminado en algunos casos y en el cosido en otros y conviene tener una orientación sobre el efecto que tienen estos fallos sobre los resultados. En las siguientes imágenes se muestran gráficos normalizados sobre ensayos de tracción (Figura 51 y Figura 52), compresión (Figura 53) o flexión (Figura 55) a laminados cosidos.

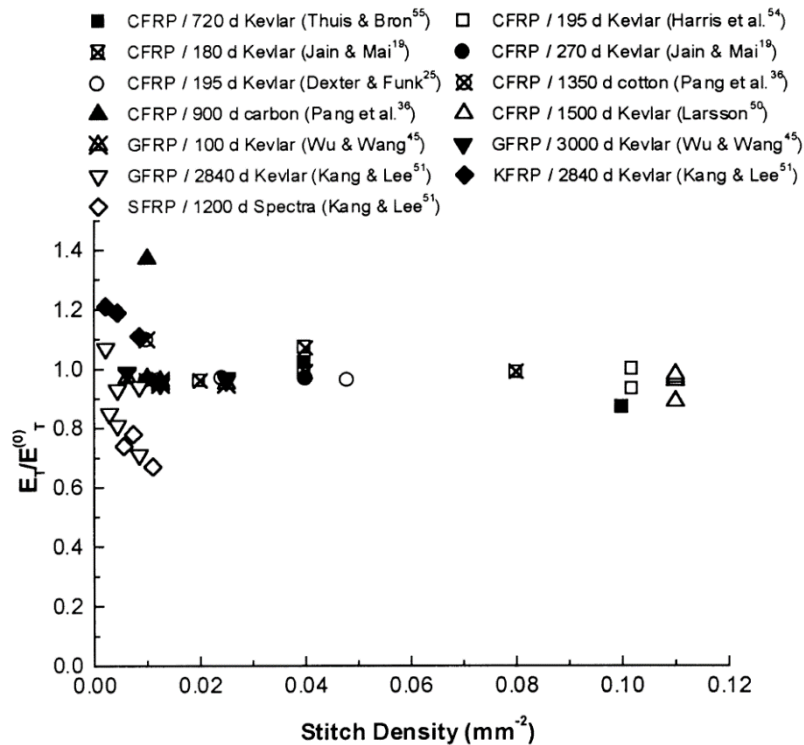


Figura 51. Módulo de Young normalizado en tracción frente a la densidad de puntada [25].

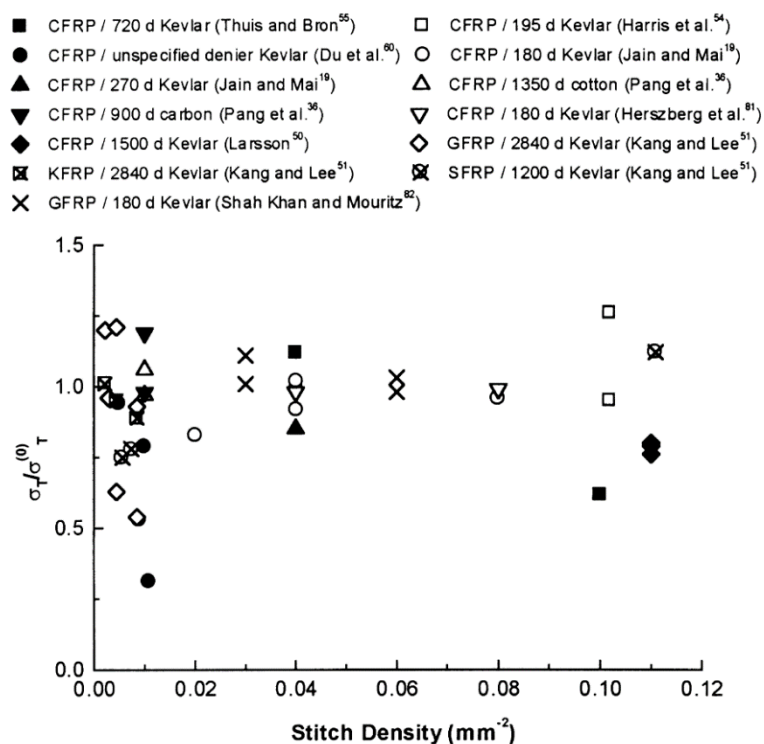


Figura 52. Tensión de rotura normalizada en tracción frente a la densidad de puntada [25].

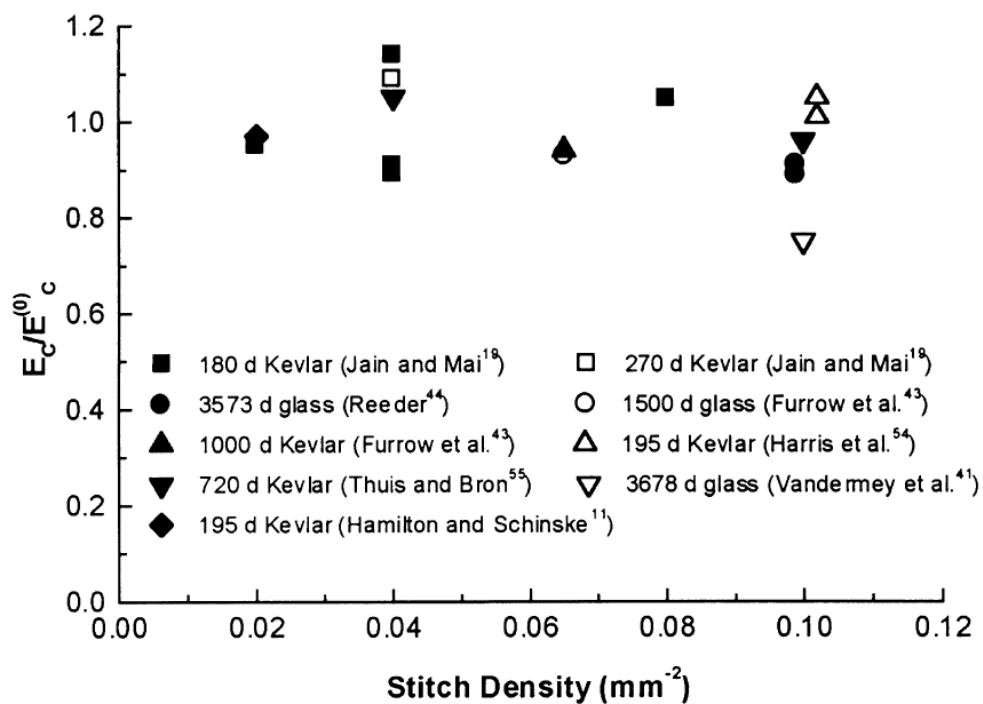


Figura 53. Módulo de Young normalizado en compresión frente a la densidad de puntada [25].

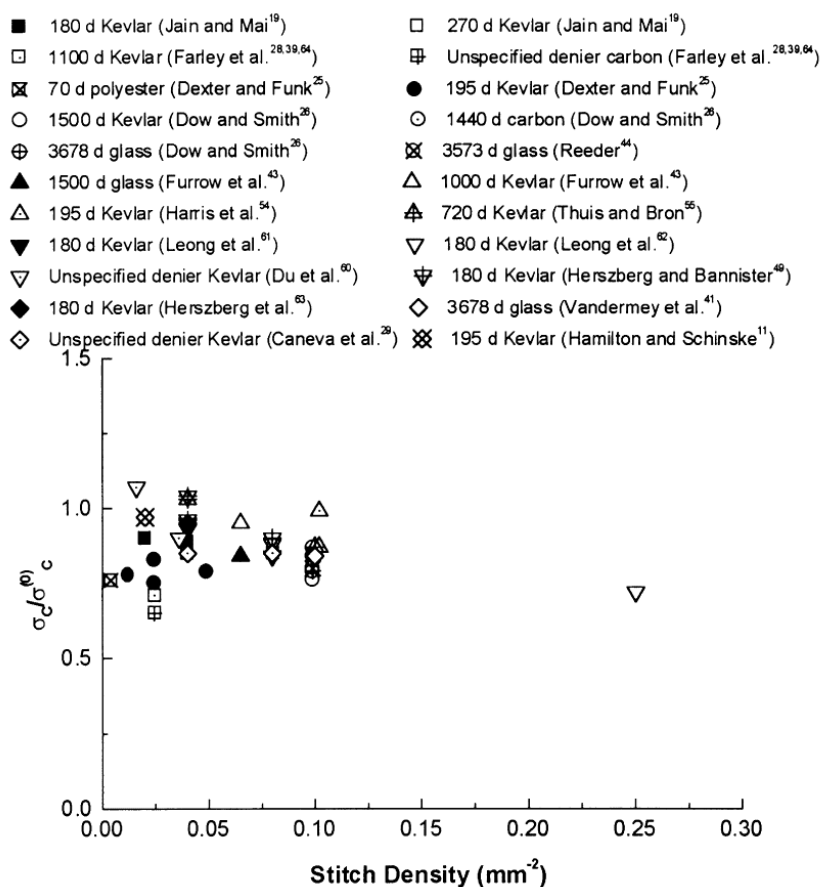


Figura 54. Tensión de rotura normalizada en compresión frente a la densidad de puntada [25].

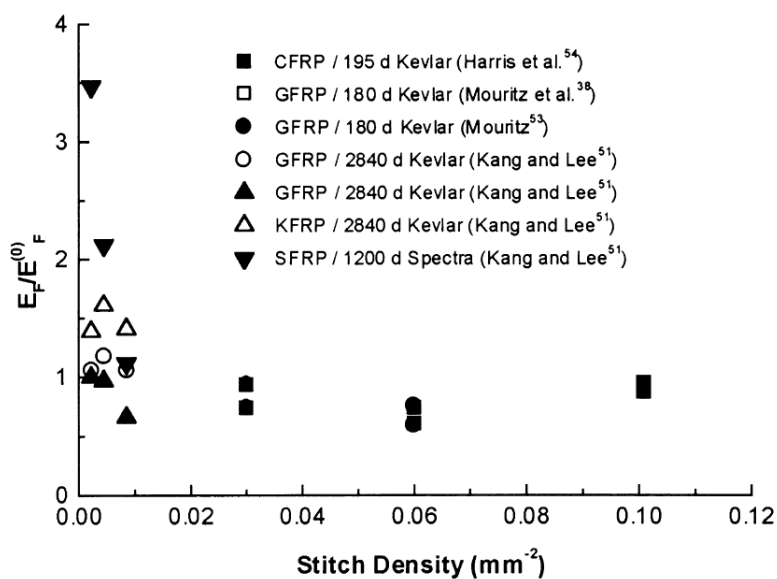


Figura 55. Módulo de Young normalizado en flexión frente a la densidad de puntada [25].

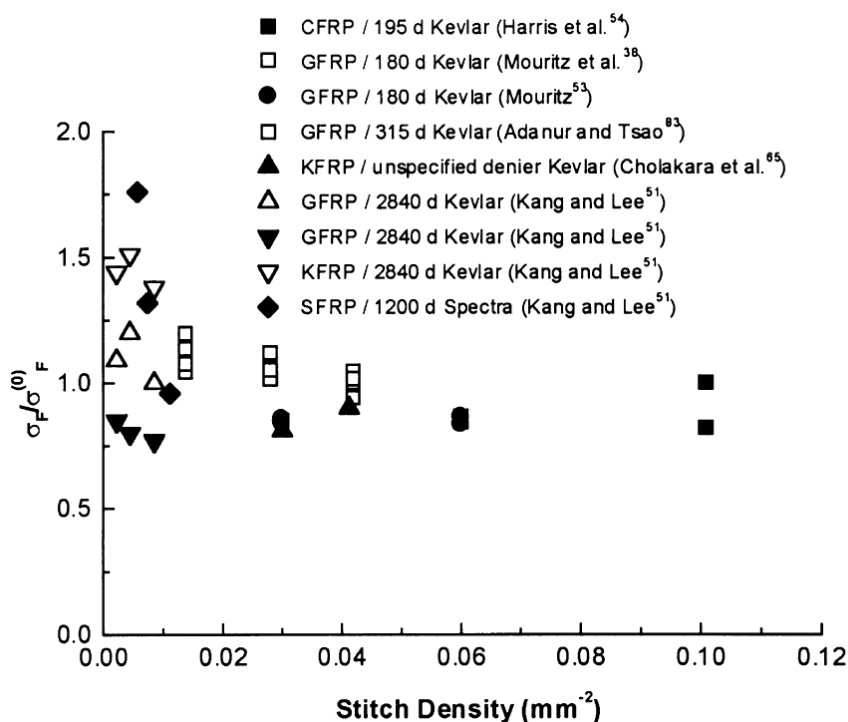


Figura 56. Tensión de rotura normalizada en flexión frente a la densidad de puntada [25].

Ante los resultados expuestos se deduce que, para condiciones en las que se conocen las grandes características de los materiales compuestos (condiciones de tracción), el factor del cosido afecta levemente en condiciones de densidades bajas de puntada y su efecto es despreciable para altas densidades de puntada. Sin embargo, es destacable la mejora que produce el factor de cosido en las condiciones a flexión lo que indica que esta tecnología es muy útil para el refuerzo de las condiciones de los laminados en la sollicitación de carga fuera de plano.

En este trabajo se van a comprobar el efecto de la condición del cosido con varias densidades de puntada sobre datos conocidos de laminados similares ensayados a tracción por lo que se buscará principalmente el módulo de Young del nuevo material (E_s). El módulo de Young que se obtenga experimentalmente se comparará con un módulo calculado teóricamente mediante dos modelos:

- El primero de ellos fue enunciado por Mouritz & Cox [25] en el que establecían que el módulo de Young (E_s) se obtenía mediante la siguiente expresión:

$$E_s = \left(1 - \frac{f_0}{2}\right)E \quad \text{con } E: \text{módulo de Young del laminado sin stitching}$$

El factor f_0 se define como:

$$f_0 = \frac{V_0 n_s}{t}$$

Siendo V_0 el volumen de fibras desalineadas considerando estas las que se desvían más de 10° respecto a la referencia y t el valor del semiespesor del laminado.

Con esto, el valor normalizado sería:

$$\frac{E_s}{E} = 1 - \frac{f_0}{2} = 1 - \frac{V_0 n_s}{2t} = 1 - \frac{V_0}{2t a_s a_p}$$

Es de destacar que, con este modelo de Mouritz & Cox, el módulo de Young normalizado siempre saldrá menor que 1 por lo que no se contempla la opción de mejora de las propiedades tal y como se ha visto en la Figura 51 que se da en algunas condiciones.

- El segundo modelo es una aplicación de la regla de la mezclas propuesto por la administración federal de aviación de Estados Unidos [27] donde, se plantea que el módulo de Young se obtiene de la expresión:

$$E_s = (1 - v_s)E + v_s E^s$$

En este modelo se introduce la acción del módulo de Young del material de cosido (E^s) que en este trabajo será Nylon y define la fracción volumétrica de cosido (v_s) en función de la densidad de puntada y el diámetro de cosido (d_s) como:

$$v_s = \frac{\pi}{4} \frac{d_s^2}{a_s a_p} = \frac{\pi}{4} d_s^2 n_s$$

Con esto, el módulo de Young normalizado será igual a:

$$\frac{E_s}{E} = 1 - v_s + v_s \frac{E^s}{E} = 1 + \left(\frac{E^s}{E} - 1 \right) v_s$$

Este modelo se intuye más completo ya que, dependiendo del término $\frac{E^s}{E}$ el valor normalizado podrá tomar valores mayores, menores o iguales a la unidad, contemplando así las posibles soluciones que se obtienen.

2.6. Conclusiones

A la vista de lo estudiado y observado en los anteriores apartados, se decide centrar este trabajo en el análisis experimental mediante ensayos a tracción de distintos laminados de material compuesto reforzado. El material compuesto estará formado de fibra de vidrio unidireccional (0° y 90°) sobre matriz de resina de poliéster.

La técnica de refuerzo escogida es el cosido o stitching que se llevará a cabo mediante la aplicación de líneas de cosido paralelas a la dirección de carga usando como material de refuerzo hilo de Nylon. Los cosidos se realizarán buscando diferentes densidades de puntada (n_s) variando la distancia entre puntadas (a_s) y la distancia entre líneas de cosido (a_p).

Los datos experimentales que se obtengan de los ensayos a tracción serán comparados con valores teóricos del módulo de Young calculado según dos modelos: el propuesto por Mouritz & Cox y una aplicación de la regla de las mezclas.

3. Metodología y análisis experimental

3.1. Introducción

A continuación, se explicará la metodología experimental desarrollada para la definición y fabricación de las probetas y posterior ensayo de las mismas, De la metodología y análisis experimental se derivarán unos resultados que se mostrarán y discutirán en el punto 4 de este trabajo. En primer lugar, se definirán los ensayos a realizar, la normativa de referencia y los equipos y tecnologías empleados. Según la normativa de referencia se definirá la geometría que deben tener las probetas, la justificación de los ensayos a realizar en base a las expresiones teóricas que se manejan sobre el módulo de Young en materiales afectados del refuerzo mediante cosido y el plan de ensayos a modo de resumen. Respecto a la fabricación de muestras se verán los materiales que se han utilizado, las fases de fabricación y el resultado final de estas.

3.2. Definición de ensayos

En este punto se definen los aspectos más representativos de los ensayos a realizar.

3.2.1. Normativa

Las normativas o estándares que definen la caracterización de los materiales compuestos son varias; por ejemplo, la norma ISO 527 trata la caracterización de propiedades elásticas de los plásticos. Las normas más usadas para la caracterización de materiales por parte de los fabricantes son los estándares ASTM, más concretamente la ASTM D638 y la ASTM D3039.

Debido a las referencias que incluye de materiales compuestos y a su extenso uso, la norma de referencia en este trabajo será la ASTM D3039 [28].

3.2.2. Metodología de ensayo

La metodología de ensayo viene especificada en la normativa de referencia anteriormente mencionada; en ella se especifica desde el equipamiento necesario, la geometría de las probetas, la velocidad de ensayo o la manera de calcular las propiedades mecánicas resultantes del ensayo.

Cabe destacar que la velocidad de ensayo, definida en el punto 11.3 de la norma se toma igual a 2 mm/min ya que se van a realizar ensayos controlados por desplazamiento.

3.2.3. Probetas

Las probetas son la parte esencial de los ensayos ya que, al estar normalizadas, hacen que los resultados obtenidos sean comparables con otros ensayos alejados en el tiempo o en el espacio que hayan sido realizados de acuerdo al estándar de referencia.

En la norma ASTM D3039 se define una probeta para el tipo de material que se trata en este trabajo de tipo rectangular que pueden ir rematada en sus extremos por tacones de agarre o no hacerlo tal y como se muestra en la siguiente figura:

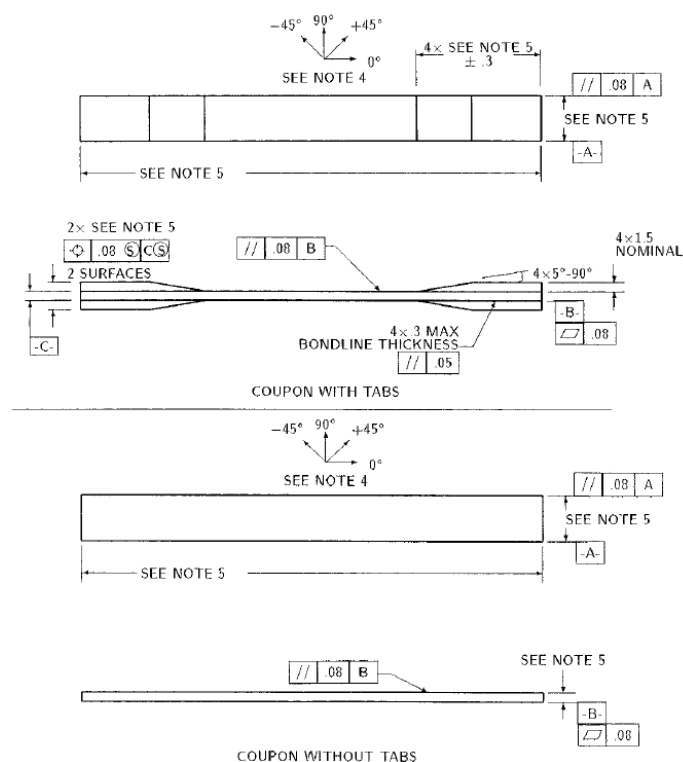


Figura 57. Condiciones de las probetas con y sin tacones [28].

En este trabajo se ha optado por la utilización de tacones de fibra de vidrio para posibilitar un mejor agarre de las mordazas de la máquina de tracción. Los tacones serán cortados de unas láminas normalizadas como se verá en el apartado de fabricación.

Respecto a las dimensiones que deben tener las muestras, la normativa aporta unas dimensiones recomendadas que se pueden consultar en la Tabla 4. Estas dimensiones recomendadas están afectadas de unas tolerancias que se muestran en la Tabla 5.

Tabla 4. Dimensiones recomendadas para las probetas [28].

Fiber Orientation	Width, mm [in.]	Overall Length, mm [in.]	Thickness, mm [in.]	Tab Length, mm [in.]	Tab Thickness, mm [in.]	Tab Bevel Angle, °
0° unidirectional	15 [0.5]	250 [10.0]	1.0 [0.040]	56 [2.25]	1.5 [0.062]	7 or 90
90° unidirectional	25 [1.0]	175 [7.0]	2.0 [0.080]	25 [1.0]	1.5 [0.062]	90
balanced and symmetric	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]	emery cloth	—	—
random-discontinuous	25 [1.0]	250 [10.0]	2.5 [0.100]	emery cloth	—	—

Tabla 5. Tolerancias dimensionales de las probetas [28].

Parameter	Requirement
Coupon Requirements:	
shape	constant rectangular cross-section
minimum length	gripping + 2 times width + gage length
specimen width	as needed ⁴
specimen width tolerance	$\pm 1\%$ of width
specimen thickness	as needed
specimen thickness tolerance	$\pm 4\%$ of thickness
specimen flatness	flat with light finger pressure
Tab Requirements (if used):	
tab material	as needed
fiber orientation (composite tabs)	as needed
tab thickness	as needed
tab thickness variation between tabs	$\pm 1\%$ tab thickness
tab bevel angle	5 to 90°, inclusive
tab step at bevel to specimen	feathered without damaging specimen

De acuerdo a la tipología de muestra y la geometría que aconseja la norma ASTM D3039 las probetas que se van a ensayar en este trabajo tienen las siguientes características:

- Largo de la probeta igual a 250mm.
- Ancho de la probeta igual a 25mm.
- Incluye 4 tacones de fibra de vidrio de dimensiones 25x50mm.

3.2.4. Equipos de ensayo

Para la realización de los ensayos se hará uso de los siguientes equipos disponibles en el laboratorio de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Jaén:

- Máquina de tracción: máquina MTS en la que se realizarán los ensayos.



Figura 58. Máquina de tracción MTS.

- PC de control de ensayo: ordenador continente del software de control de la máquina de tracción que permitirá monitorizar en todo momento el ensayo.



Figura 59. PC de control de máquina MTS.

- Cámara Digital: videocámara encargada de tomar las imágenes de los distintos instantes del ensayo que posteriormente serán procesadas por correlación digital de imágenes para la obtención de las deformaciones.



Figura 60. Cámara DIC.

- PC DIC: ordenador que procesará las imágenes tomadas por la cámara para obtener deformaciones y almacena la fuerza ejercida por la máquina de tracción en cada instante.

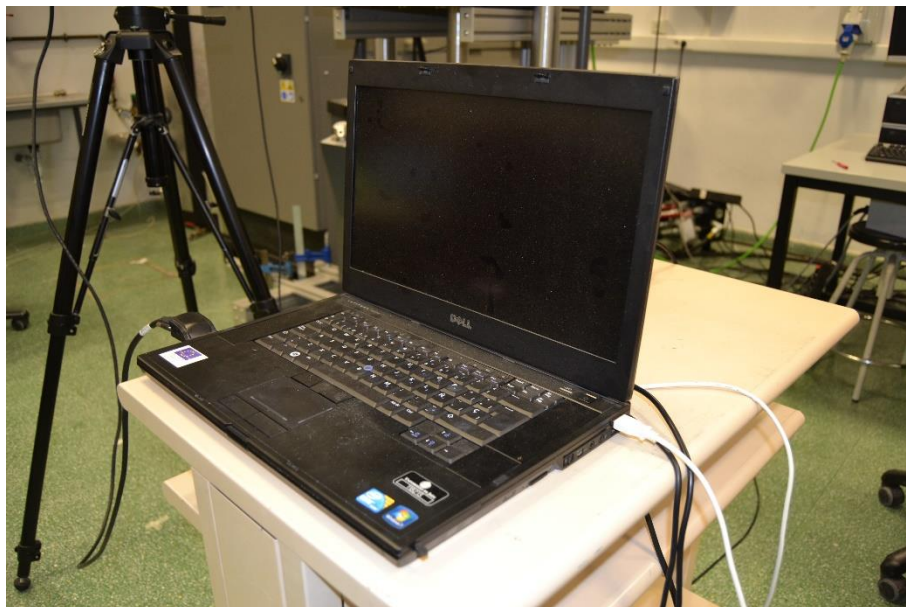


Figura 61. PC DIC.

- Fuente de luz artificial: lámpara auxiliar que permitirá una nítida obtención de imágenes.



Figura 62. Foco de luz artificial.

- Producto de generación de speckle: kit de pinturas que generan sobre la probeta la capa de contraste que toma el software DIC como referencia para el cálculo de deformaciones en los instantes almacenados.



Figura 63. Kit de generación de Speckle.

- Otros elementos: además de los principales equipos mencionados anteriormente, para llevar a cabo un trabajo eficaz y seguro, se hace uso de

otros elementos auxiliares como guantes, mascarilla, bata de laboratorio o llave de cierre de las mordazas.

3.2.5. *Correlación Digital de Imágenes (DIC) [29]*

Para la obtención de deformaciones en el ensayo se utilizará la correlación digital de imágenes (DIC) ya que, debido a la geometría de las muestras, no se puede utilizar el extensómetro mecánico.

Esta técnica permite la obtención del campo de desplazamientos tanto en 2D como en 3D, aunque en este trabajo serán los desplazamientos en el plano los deseados. Tomando como referencia un patrón contrastado fruto de la generación de un speckle blanco sobre un fondo negro, se realiza un seguimiento de los puntos sobre la probeta de manera que las deformaciones serán fruto del desplazamiento relativo entre los puntos del patrón.

El procesamiento de las imágenes se hará con el software VIC-2D disponible en el laboratorio y los resultados finales se obtendrán mediante un algoritmo de Matlab que trata los datos resultantes del procesamiento de imágenes.

En el caso de los materiales compuestos, con la utilización de esta técnica se pueden tener falsos resultados. Estos falsos resultados serán fruto de un posible desprendimiento de fibra en la probeta que puede acarrear el cambio brusco en el patrón interpretado por el software DIC.

3.2.6. *Justificación de ensayos*

Como se pudo comprobar en el apartado 2.5, el módulo de Young de los laminados cosidos depende de la densidad de puntada (n_s) y esta, a su vez depende de las distancias entre puntadas y entre líneas de cosido (a_s y a_p). Esta relación justifica la necesidad de realizar ensayos con diferentes densidades de puntada.

Como se puede deducir de [7], las propiedades elásticas de los materiales compuestos dependen de la orientación de las fibras por lo que se estudiarán los dos casos extremos: laminados cosidos con fibra a 0° y laminados cosidos con fibra a 90° cuyas principales características elásticas se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 6. Propiedades experimentales de materiales compuestos sin refuerzo [7].

Dirección fibra	E (MPa)	σ_R (MPa)	ε_R
0°	23220	484.8	0.0238
90	4550	101	0.0151

Por último, las expresiones para el cálculo de E_s tienen la misma dependencia de a_p y a_s por lo que, si para distintos valores de estos, se tuviera dos densidades n_s iguales, los resultados deberían ser iguales. Teniendo en cuenta eso, se van a proponer dos densidades n_s iguales con distintos valores de a_p y a_s .

Teniendo en cuenta las posibilidades de puntada de la máquina de coser a utilizar y el deseo de que, al menos, cada probeta incorpore dos líneas de cosido se definen las siguientes densidades de puntada:

Tabla 7. Densidades de puntada a ensayar.

n_s	a_s (mm)	a_p (mm)	$n_s(1/mm^2)$
1	3	10	0,033
2	2	12	0,042
3	3	8	0,042

3.2.7. Plan de ensayos

El plan de ensayos se realiza de acuerdo a las características del ensayo y la justificación expuestas en apartados anteriores, teniendo en cuenta esto se realizará:

- Laminados con dos direcciones distintas (0° y 90°)
- Para cada tipología de laminado se realizarán cosidos con tres densidades de puntada (n_s) distinta.
- Las densidades de puntada vienen definidas por la distancia entre puntadas (a_s) y la distancia entre líneas de cosido (a_p)

A modo de resumen, el plan de ensayos se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 8. Plan de ensayos.

Orientación de fibra	Densidad de puntada	Material de cosido	Nº de probetas
0°	ns_1	Nylon	5
0°	ns_2	Nylon	5
0°	ns_3	Nylon	5
90°	ns_1	Nylon	5
90°	ns_2	Nylon	5
90°	ns_3	Nylon	5

Este plan de ensayos permitirá introducir la influencia del cosido en las propiedades elásticas de los materiales compuestos y la variación de estas en función de la distancia entre puntadas y la distancia entre líneas de cosido.

3.3. Fabricación de muestras

En este punto se va a desarrollar el proceso de fabricación de las muestras objeto de este trabajo. En primer lugar, se verán los materiales, equipos y elementos de seguridad utilizados, para continuar con el proceso de cosido de fibras y la realización de la infusión y terminar con el corte y preparación de probetas.

3.3.1. Materiales

Los materiales utilizados en la fabricación de las probetas son:

- Fibra de vidrio: en este trabajo se ha utilizado fibra de vidrio unidireccional (de gramaje igual a 600 g/cm^2) y tipo MAT (de gramaje igual a 300 g/m^2). Además, se ha usado en forma de lámina prefabricada para la generación de los tacones.



Figura 64. Fibra de vidrio unidireccional.



Figura 65. Fibra de vidrio tipo MAT.

- Resina de poliéster y catalizador: materiales fundamentales para la formación de la matriz de las muestras, las propiedades de la resina utilizada se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 9. Características de la matriz.

Magnitud	Valor
ρ (20°C)	1100 kg/m ³
E	3,7 GPa
σ_R	70 MPa
ε_R	2%

- Hilo de nylon: el hilo usado para el cosido de láminas es hilo de Nylon que tiene un módulo de Young de 3 GPa y un diámetro de 0.35 mm.



Figura 66. Hilo de Nylon.

- Otros elementos accesorios: además de esos materiales se han usado otros elementos de apoyo a la fabricación como cinta adhesiva, rejilla para el reparto uniforme de la fibra, tela separadora para un mejor desmoldeo tras la infusión o conductos de plástico para la circulación de la resina.

3.3.2. Equipos

Los equipos utilizados en la fabricación de muestras son los siguientes:

- Bomba de vacío: modelo *Two Stages 80* del fabricante *Edward* compuesta de un control manual y tres tomas de vacío.



Figura 67. Bomba de vacío [7].

- *Máquina de coser: máquina de coser manual e industrial del fabricante japonés Yamata en su modelo FY8600.*



Figura 68. Máquina de coser Yamata FY8600.

- *Maquinaria de corte: en este trabajo se han usado dos equipos distintos de corte, una máquina de corte de hilo de la marca comercial Dremel, modelo MotoSaw, para el corte de probetas y una máquina de corte por disco para la obtención de los tacones de fibra de vidrio. Además, como elemento auxiliar de corte se han usado elementos como tijeras y cúter.*



Figura 69. Dremel MotoSaw 70w [30].

- *Otros equipos: adicionalmente a los más importantes mencionados anteriormente se han usado otros equipos como trampa de vacío para evitar la inclusión de resina en la bomba.*

3.3.3. Seguridad en la fabricación

En todo trabajo, ya sea manual como este o automatizado, es de gran importancia la seguridad en materia de prevención de riesgos. En favor de este concepto y teniendo en cuenta que se ha trabajado con compuestos químicos la prevención de riesgos ha tomado forma en elementos de protección individual:

- Guantes: elemento de protección individual para prevenir el contacto con agentes irritantes directamente sobre la piel.
- Bata: necesaria para proteger de posibles derrames que pudieran acaecer.

- Gafas: protección visual para evitar la caída de sólidos en los ojos o la irritación que pudiera ocasionar el gas producto de una reacción química como la que tiene lugar entre la resina y el agente catalizador.
- Mascarilla: protección básica del aparato respiratorio que prevé de inhalaciones de agentes perjudiciales para el aparato respiratorio u torrente sanguíneo.



Figura 70. Equipos de protección [7].

3.3.4. Cosido de fibras

Acción previa al cosido de láminas, se han cortado los seis laminados a fabricar de acuerdo a unas dimensiones preestablecidas teniendo acabados como los mostrados para fibra unidireccional de 0° (Figura 71) o de 90° (Figura 72)

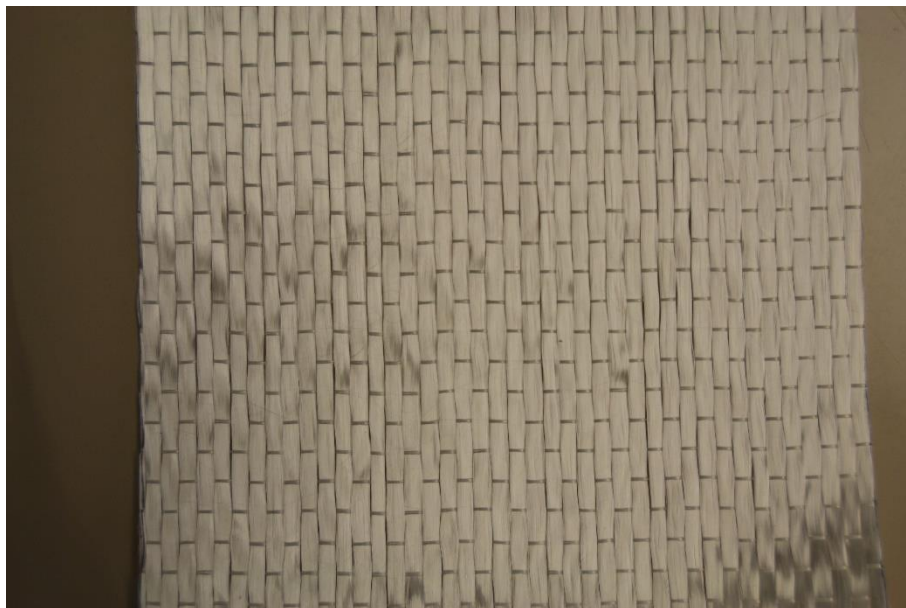


Figura 71. Lámina a 0° .

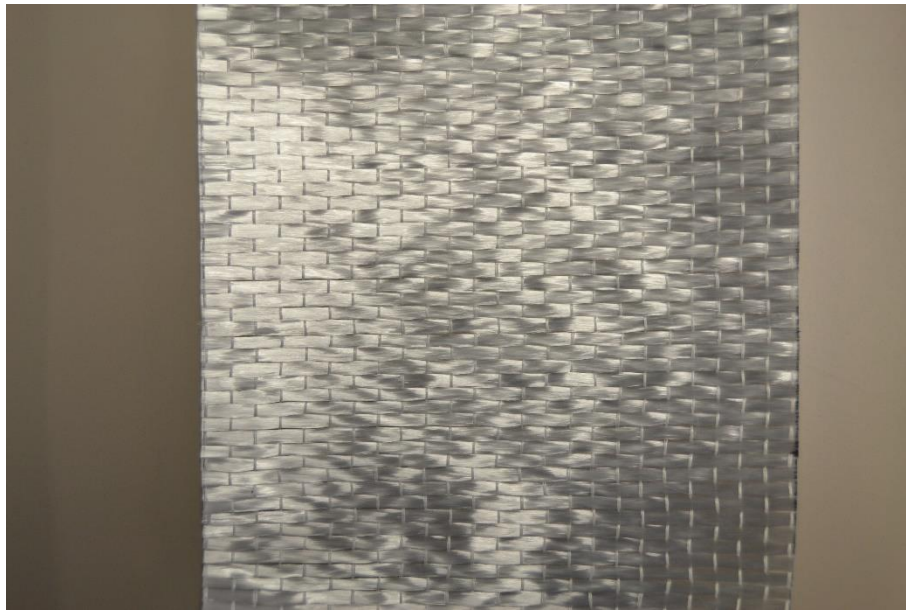


Figura 72. Lámina a 90°.

Para realizar el cosido de las láminas, dependiendo de la densidad de puntada que se persiga para cada una, se selecciona el modo de puntada en la máquina, se enhebra el hilo en la aguja de la máquina de coser tras haber rellenado de hilo la bobina auxiliar o canilla y se pone la máquina en funcionamiento.

Para obtener los laminados cosidos, se han ido realizando sucesivas líneas de puntada de acuerdo a la densidad n_s buscada. En las siguientes imágenes se muestran varias tomas del proceso de cosido de una lámina.

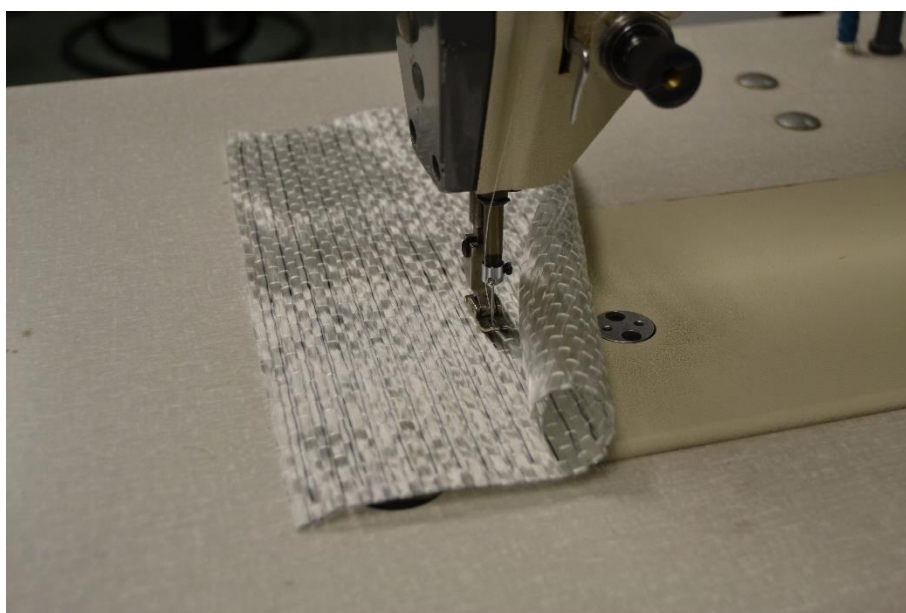


Figura 73. Cosido de una lámina (I).

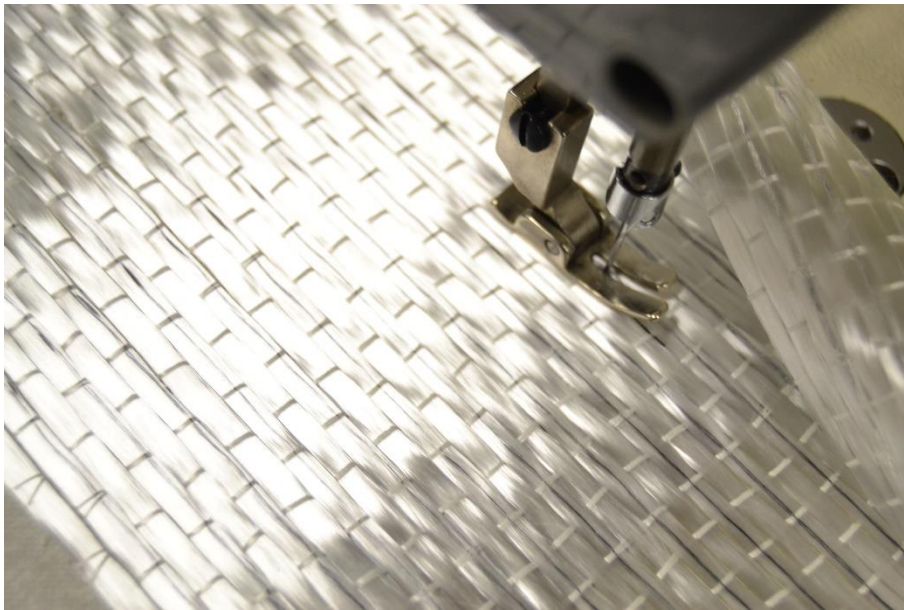


Figura 74. Cosido de una lámina (II).

Tras haber cosido todas las láminas se está en disposición de preparar la infusión (que se verá en el punto siguiente) para la posterior obtención de los laminados deseados. A continuación se pueden observar ejemplos de láminas a 0° (Figura 75) y a 90° (Figura 76) con una densidad de puntada determinada:



Figura 75. Vista de laminado a 0° cosido.



Figura 76. Vista de lámina a 90° cosida.

Es llamativo como, la tensión producida por las líneas de puntada, hace que el laminado llegue a torsionarse en el ejemplo a 0° o a desviar la directriz de las fibras en el caso de refuerzos a 90°. Estos aspectos servirían para complementar el apartado de fallos de la teoría sobre stitching ya que afectan a las condiciones idólicas deseables.

3.3.5. Preparación y realización de la infusión

Una vez realizado el cosido de las láminas, se prepara la infusión para ello se prepara atendiendo a los siguientes esquemas de manera que todos los laminados puedan obtenerse en una sola infusión reduciendo así costes en el trabajo.

En la Figura 77 puede verse la distribución de los distintos casos de estudio en el cristal plano que sirve de molde y ,en la Figura 78, se puede apreciar la disposición de las futuras probetas en los laminados dejando espacio en los bordes previniendo un posible fallo en el reparto de la resina.

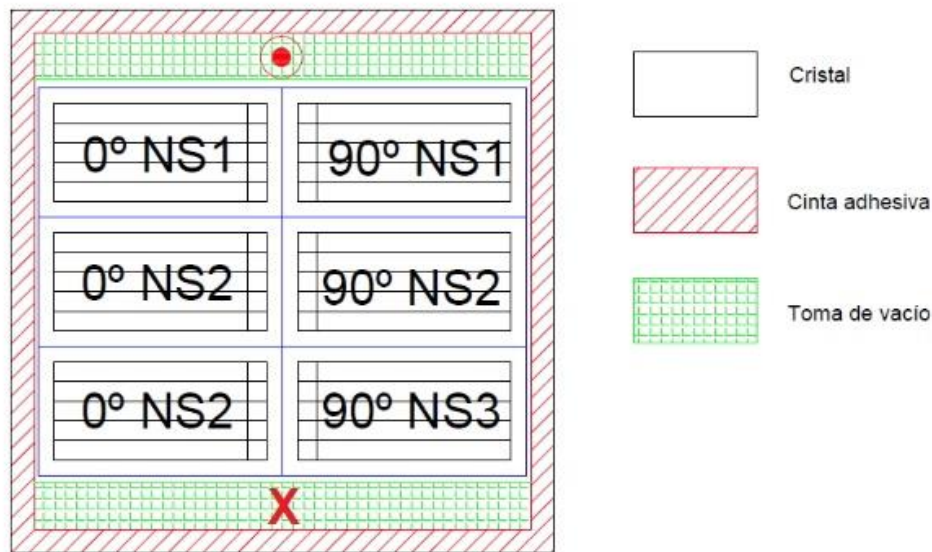


Figura 77. Esquema propuesto de laminados en el molde.



Figura 78. Esquema de disposición de las probetas en los laminados.

Antes de comenzar la preparación de la infusión, es importante mencionar la importancia de la rejilla distribuidora de resina (Figura 79) y de la bolsa de vacío (Figura 80) ya que, gracias a estos elementos se podrá tener un laminado uniforme y bajo la presión de vacío.



Figura 79. Rejilla distribuidora de resina.



Figura 80. Bolsa de vacío.

Además de estos elementos, se muestra el cristal plano que sirve de molde para el laminado plano (Figura 81) y la toma de vacío y resina (Figura 82) encargada de introducir la resina en el molde lo más uniforme posible.

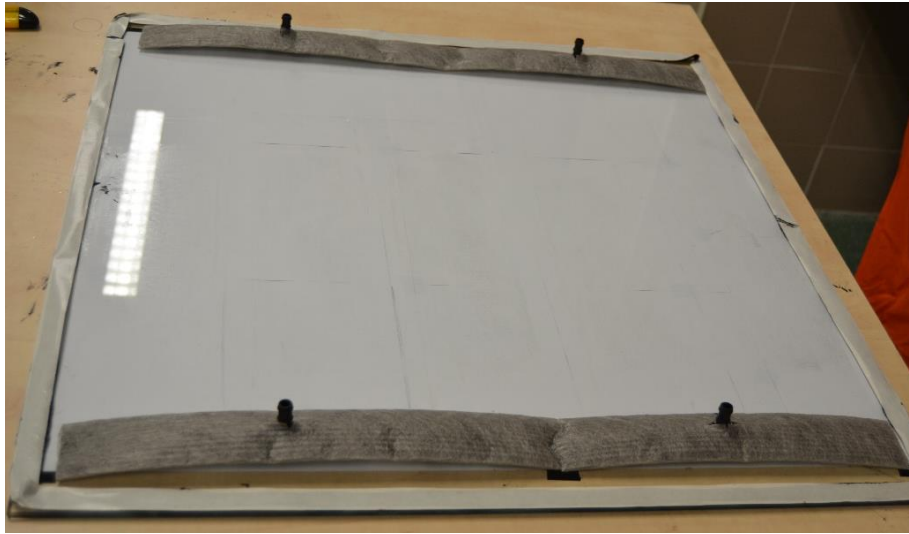


Figura 81. Molde preparado para la colocación de laminados.

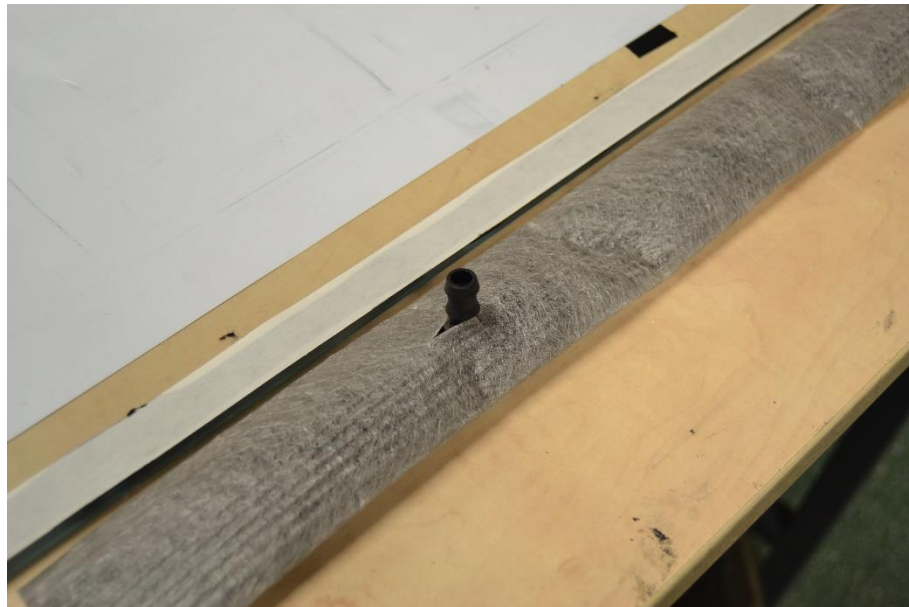


Figura 82. Detalle de la entrada de resina.

Una vez disponibles todos los elementos para preparar la lámina final, esta se debe realizar atendiendo al siguiente orden:

- Aplicación de agente desmoldeante y colocación de muestras previamente preparadas (Figura 83).
- Colocación de elementos de distribución de resina y aislante (Figura 84) que permita su posterior retirada.
- Cierre del molde con la bolsa de vacío (Figura 85).
- Conexión de tubos a la bomba de vacío y al depósito de resina (Figura 86).

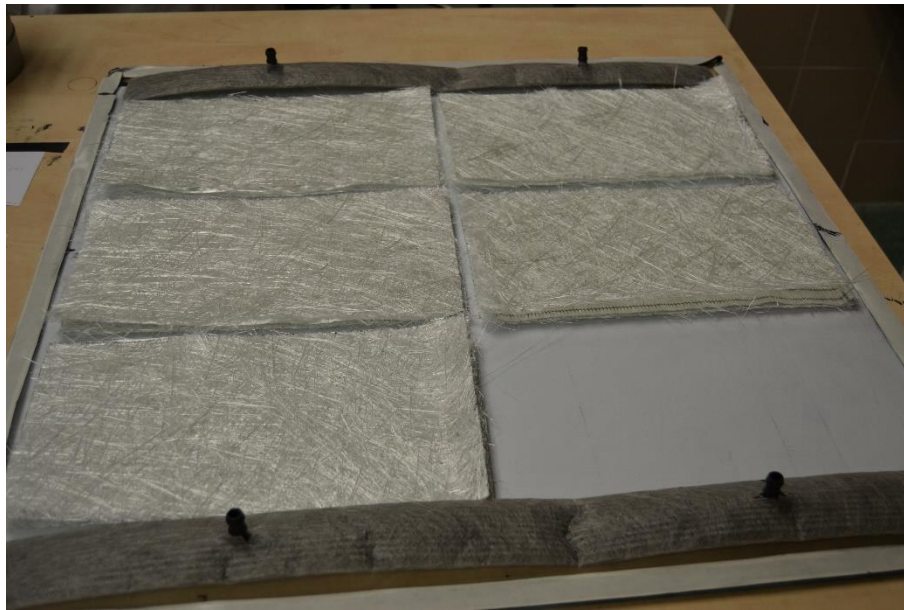


Figura 83. Colocación de laminados.

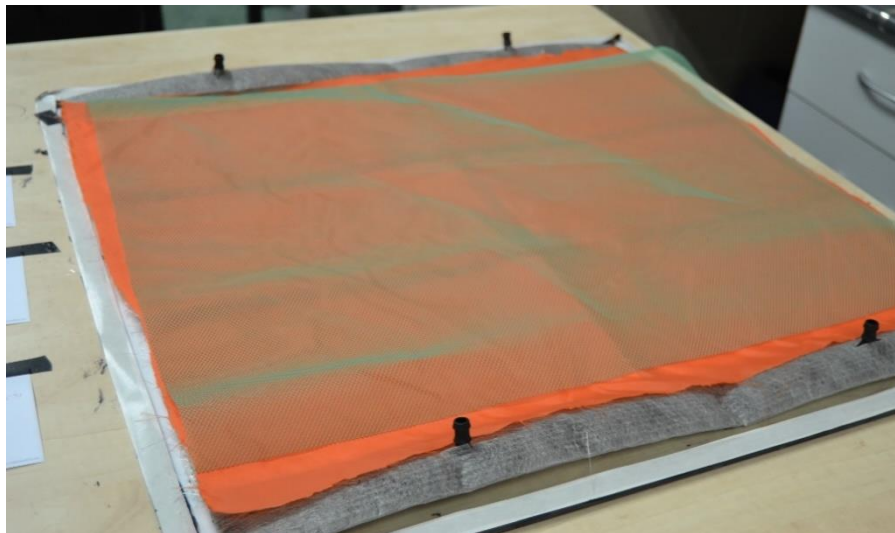


Figura 84. Instante previo al cierre del laminado.



Figura 85. Colocación de la bolsa de vacío.

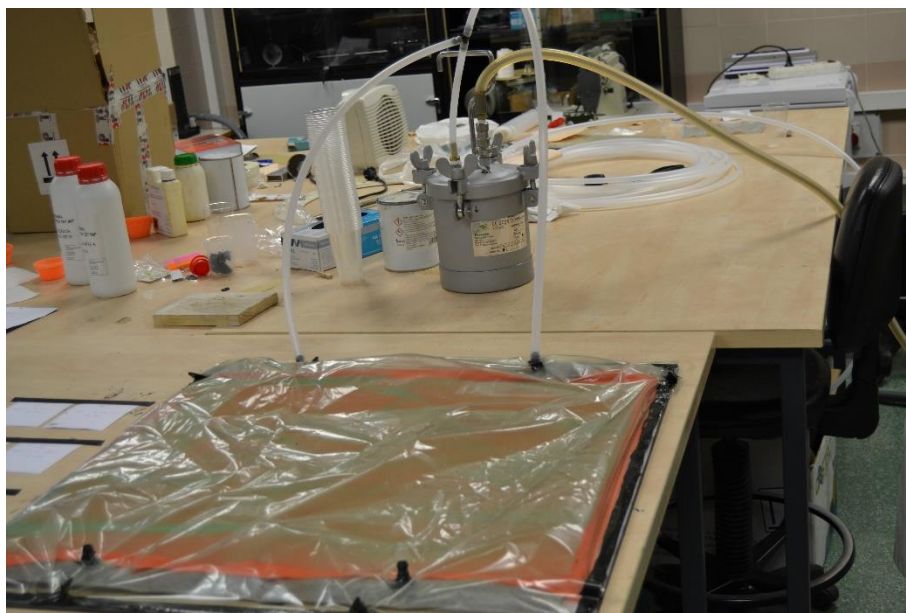


Figura 86. Instante previo al comienzo de la infusión.

Una vez se han cumplido estos pasos, solo queda conectar la bomba de vacío y observar el proceso para evitar posibles entradas de aire en el laminado. Una vez que el molde se ha llenado completamente de resina sólo queda esperar al curado de la matriz (manteniendo el vacío) para su posterior desmoldeo.

En la Figura 87 se puede observar un instante intermedio en la infusión en la que se observa como un sentido favorece el flujo de resina más que otro. Esto se

debe a la disposición de la fibra ya que en un lado (fibras a 90°) se opone menos resistencia al flujo de resina que en el otro (fibras a 0°).

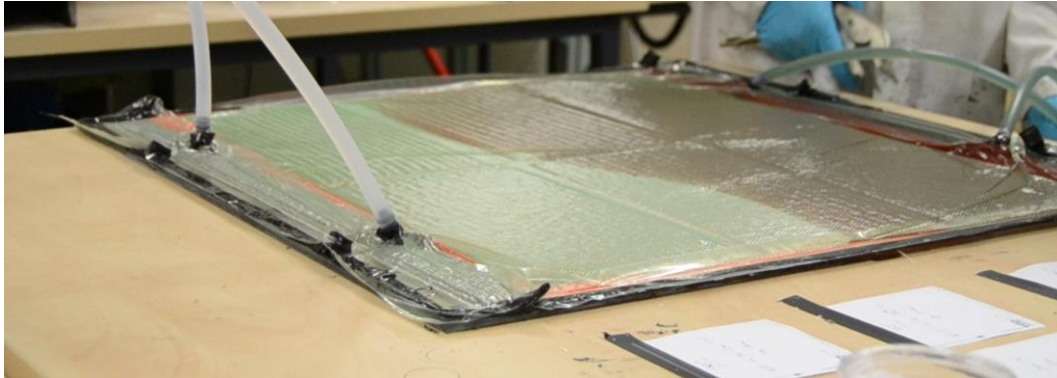


Figura 87. Instante intermedio de la infusión.

Por último, previo al desmoldeo del laminado, se tiene un acabado como el que se muestra en la Figura 88.

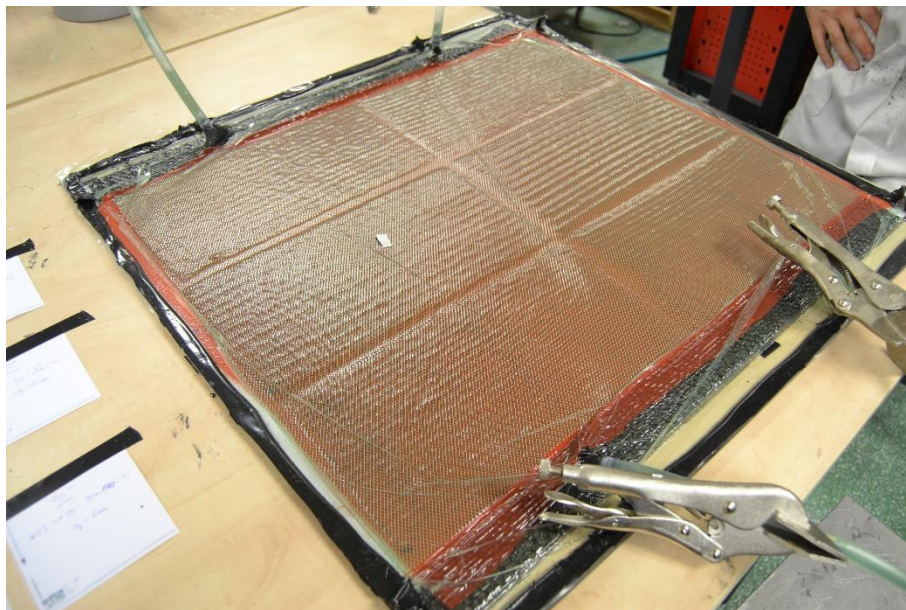


Figura 88. Fin de la infusión.

3.3.6. Preparación y corte de probetas

Una vez finalizada la infusión, se desmoldean los laminados mostrándose acabados como los ejemplificados en las siguientes figuras donde aparecen marcadas las probetas para el posterior corte.

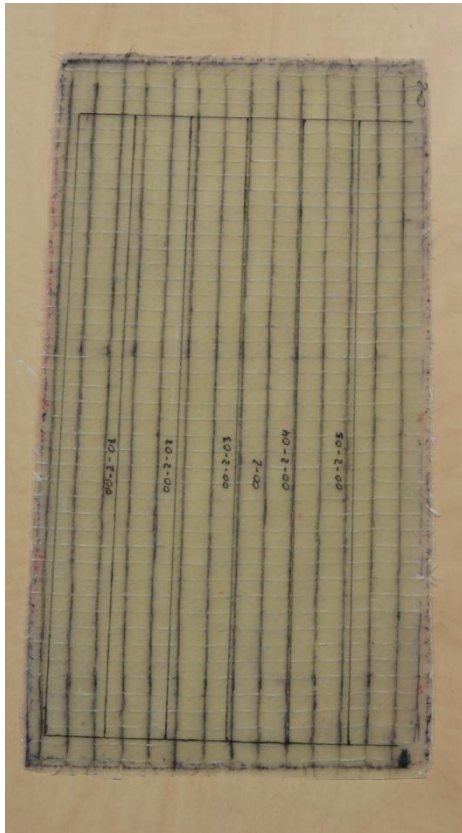


Figura 89. Laminado a 0° desmoldeado.

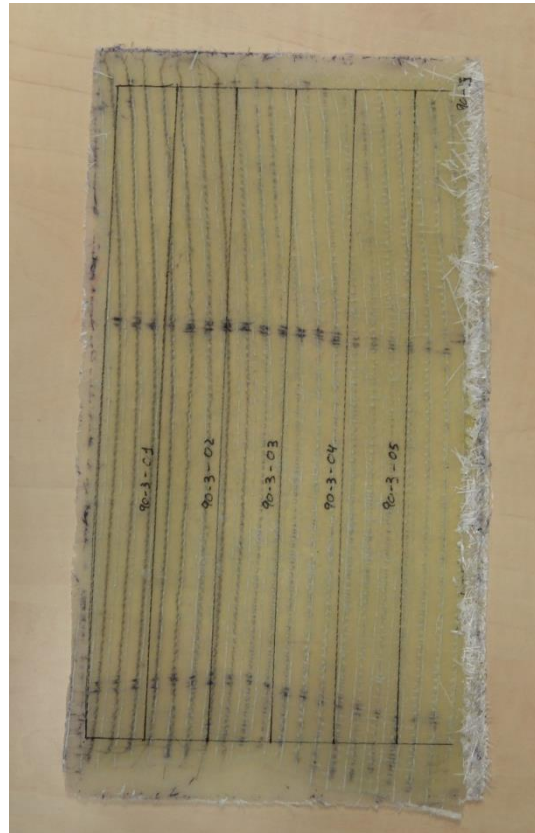


Figura 90. Laminado a 90° desmoldeado.

El corte de las probetas se realiza atendiendo a las marcas que las definen teniendo unos acabados similares a los de los ejemplos de la Figura 91 y de la Figura 92.

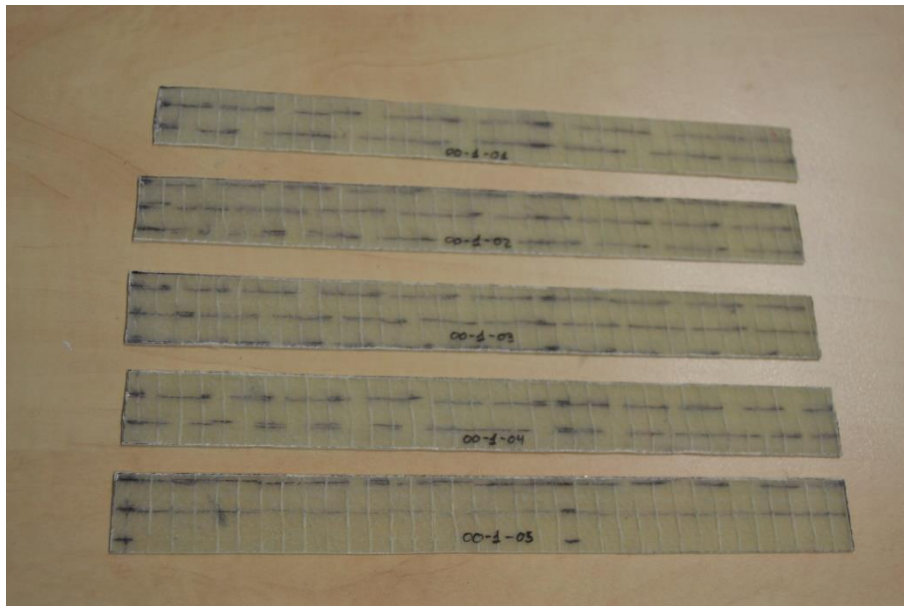


Figura 91. Lámina a 0° cortada.



Figura 92. Lámina a 90° cortada.

Por último, para tener las probetas listas para su ensayo solo queda incluirle los tacones realizándose cuatro por cada probeta y siendo pegados a estas con un producto adhesivo. Para todos los laminados se obtienen acabados similares a los que se muestran en las siguientes figuras:

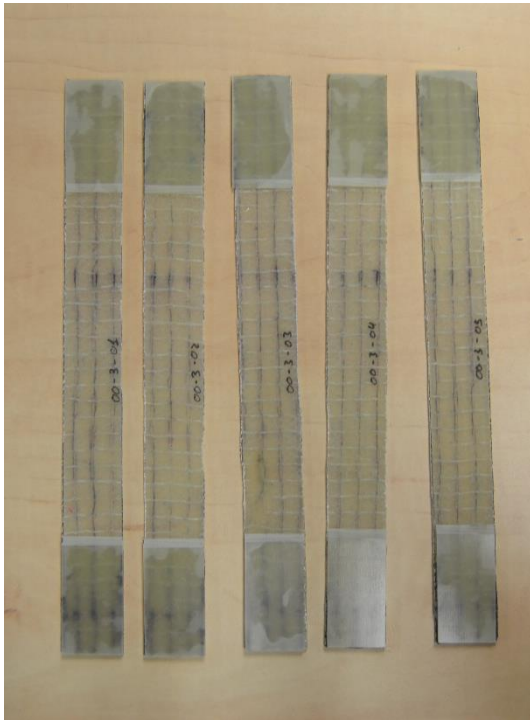


Figura 93. Lámina a 0° con tacones.



Figura 94. Lámina a 90° con tacones

Una vez obtenidos las muestras definitivas, se está en condiciones de realizar los ensayos en las condiciones indicadas en el punto anterior. A modo de referencia, a continuación, se muestra el proceso de ensayo llevado a cabo en una de las treinta probetas ensayadas.



Figura 95. Preparación de probetas para ensayo.

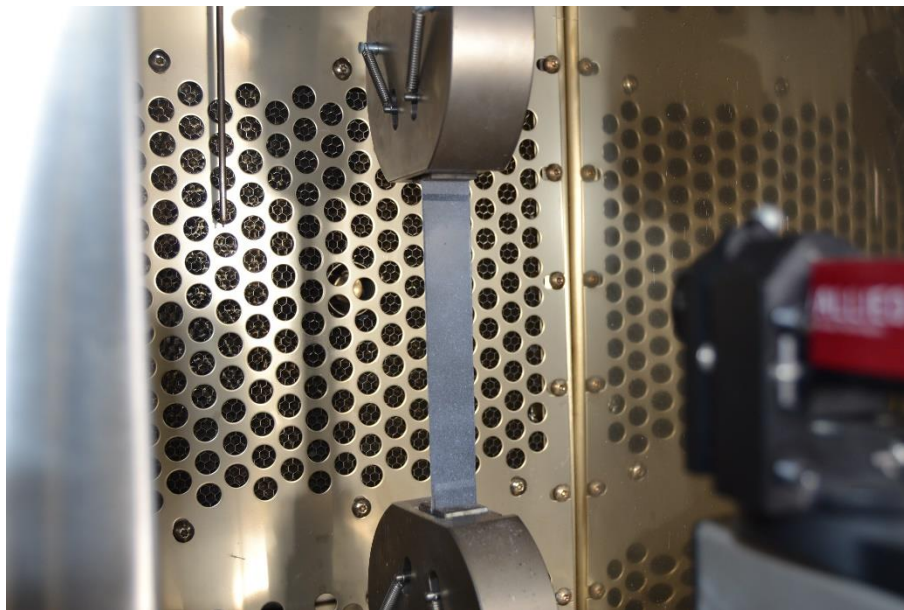


Figura 96. Probeta colocada para ensayo.

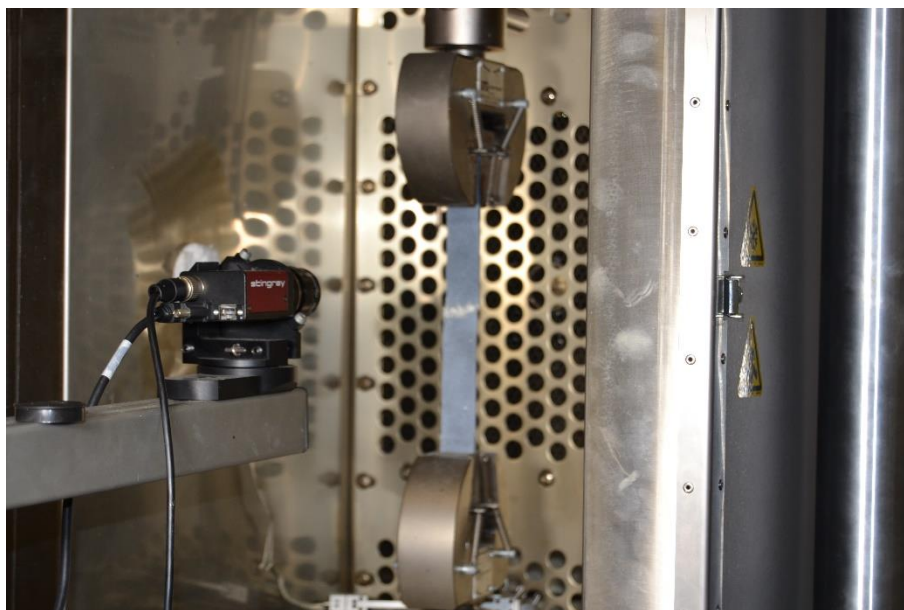


Figura 97. Probeta rota tras el ensayo.

4. Resultados y discusión

Este punto del trabajo aglutina los resultados de los ensayos realizados según el plan definido. En primer lugar, se calcularán teóricamente los módulos de Young de las muestras según los dos modelos que se enunciaron para lo que se obtendrán los volúmenes de fibra desalineada usando imágenes tomadas en un microscopio estereoscópico (Figura 98) disponible en las dependencias de los servicios técnicos de la Universidad de Jaén.

A continuación, se mostrarán de forma tabulada los resultados obtenidos en cada uno de los ensayos de tracción y se verá de forma global los comportamientos de cada una de las probetas mediante los diagramas tensión deformación de cada uno de los ensayos.

Por último, y desde un punto de vista crítico, se abordará la discusión de los resultados obtenidos frente a los valores teóricos del módulo de Young con Stitching y la normalización frente a los valores experimentales de las mismas muestras sin stitching.

4.1. Estimación de valores teóricos

En este apartado se van a estimar los valores teóricos del módulo de Young. Recordando los modelos propuestos en un apartado anterior en este trabajo, se define el módulo de Young según Mouritz & Cox como:

$$E_{s1} = \left(1 - \frac{f_0}{2}\right) E \quad \text{con } E: \text{módulo de Young del laminado sin stitching}$$

El factor f_0 se define como:

$$f_0 = \frac{V_0 n_s}{t}$$

Siendo V_0 el volumen de fibras desalineadas considerando estas las que se desvían más de 10° respecto a la referencia y t el valor del semiespesor del laminado.

Para el cálculo de V_0 se obtienen imágenes de los laminados cosidos en un microscopio estereoscópico del fabricante Leica disponible en autoservicio en los servicios técnicos de la Universidad de Jaén realizando previamente un curso de formación.

4.1.1. Análisis microscópico

Para el análisis microscópico de las muestras se hace uso, tal y como se ha introducido anteriormente, de un microscopio estereoscópico del fabricante *Leica* similar al de la Figura 98. Este equipo y otros similares está disponible en autoservicio en los servicios técnicos de la Universidad de Jaén realizando previamente un curso de formación que certifica el conocimiento para su utilización.



Figura 98. Microscopio estereoscópico [31].

Usando este aparato con el software correspondiente se obtienen imágenes escaladas en el que se aprecia con la magnificación deseada la zona de interés. En las siguientes imágenes se observan imágenes obtenidas de los distintos cosidos marcando el ángulo máximo de desalineación de fibras:

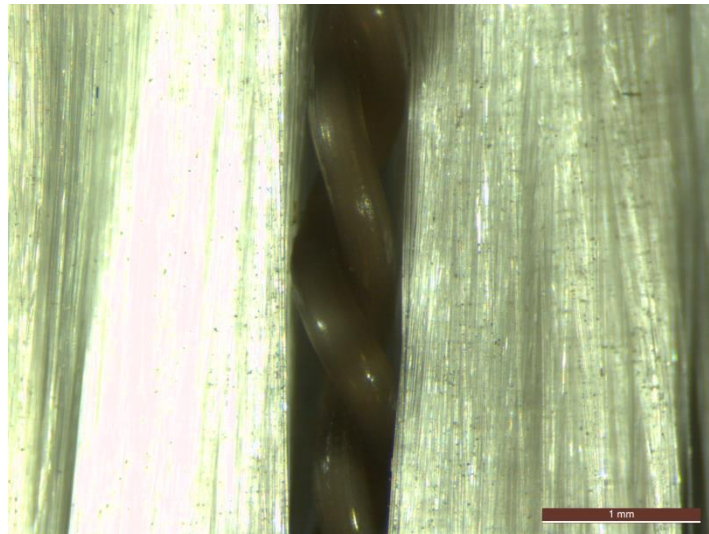


Figura 99. Desalineación en probetas con fibras a 0°.

En las probetas con fibras a 0° se puede comprobar que el cosido se integra en la fibra como si fuese una fibra más por lo que se considerará el volumen desalineado en estas muestras es nulo.

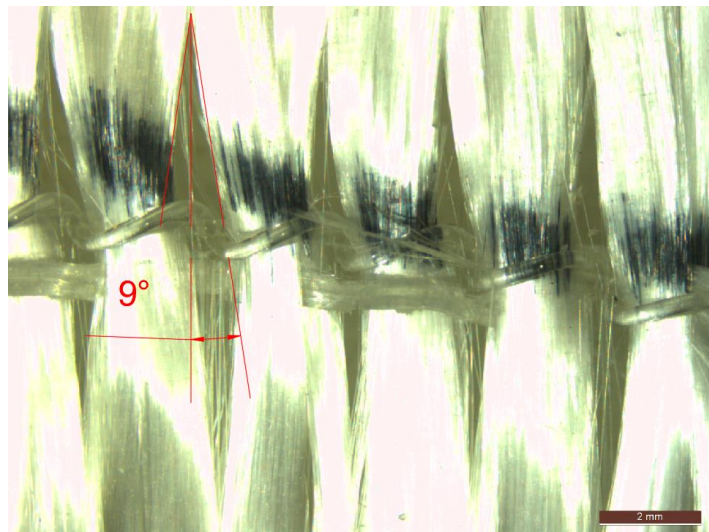


Figura 100. Desalineación máxima para $a_s = 5mm$ en fibras con 90°.

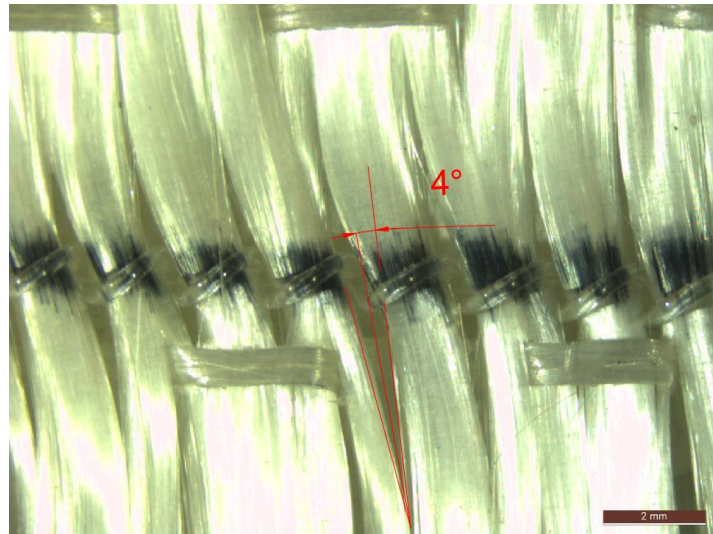


Figura 101. Desalineación máxima para $a_s = 4mm$ en fibras de 90°

Para las muestras a 90° se comprueba que se produce desalineación, pero esta no llega a ser mayor a 10° , condición para considerar el volumen de fibra [25]. Al no superarse el ángulo permitido, para estas probetas se considerará este volumen también nulo.

Para terminar este apartado se recordará el modelo fruto de la aplicación de la regla de las mezclas. en este se define el módulo de Young como:

$$E_{s2} = (1 - v_s)E + v_s E^s$$

Siendo la fracción volumétrica de cosido definida por la siguiente expresión:

$$v_s = \frac{\pi d_s^2}{4 a_s a_p} = \frac{\pi}{4} d_s^2 n_s$$

4.1.2. Propiedades estimadas teóricamente

De acuerdo a los datos teóricos de los materiales compuestos sin stitching [7], el módulo de Young del material de costura ($E^s = 3000MPa$), el diámetro de puntada ($0.35mm$) y las densidades de puntada expuestos en el plan de ensayos, a continuación se muestran los módulos de Young teóricos.

En primer lugar se muestra el módulo de Young calculado según el modelo de Mouritz & Cox (Tabla 10)

Tabla 10. Cálculo de E_s según el modelo de Mouritz & Cox.

Orientación	n_s	Valor ($1/mm^2$)	E (MPa)	V_0	E_{s1} (MPa)
0	1	0,0333	23220	0	23220
0	2	0,0417	23220	0	23220
0	3	0,0417	23220	0	23220
90	1	0,0333	4550	0	4550
90	2	0,0417	4550	0	4550
90	3	0,0417	4550	0	4550

En la Tabla 11 se muestra el cálculo teórico del módulo de Young según la regla de las mezclas:

Tabla 11. Cálculo de E_s según la regla de las mezclas.

Orientación	n_s	Valor ($1/mm^2$)	E (MPa)	E^s	d_s (mm)	v_s	E_{s2} (MPa)
0	1	0,0333	23220	3000	0,35	0,0032	23155,15
0	2	0,0417	23220	3000	0,35	0,0040	23138,94
0	3	0,0417	23220	3000	0,35	0,0040	23138,94
90	1	0,0333	4550	3000	0,35	0,0032	4545,03
90	2	0,0417	4550	3000	0,35	0,0040	4543,79
90	3	0,0417	4550	3000	0,35	0,0040	4543,79

4.2. Ensayos a tracción

En este apartado se comprobarán los resultados obtenidos, para ellos, de forma previa a los ensayos, se tomaron medidas geométricas en tres puntos (Figura 102) de la anchura y el espesor de las probetas de manera que se permita calcular la sección eficaz de la probeta para el posterior cálculo de la tensión.

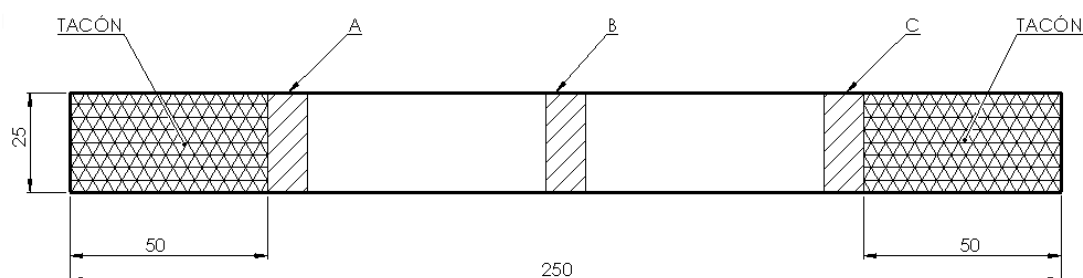


Figura 102. Esquema de probeta con los puntos en los que se toman medidas [7].

En las siguientes tablas se muestran las distintas medidas geométricas de las probetas siendo de utilidad la última magnitud indirecta (área) para el cálculo de

tensiones en las probetas ya que el equipo de ensayo sólo almacena datos de fuerza:

Tabla 12. Probetas unidireccionales (0°) cosidas con densidad de cosido ns_1 .

Código probeta	Medida anchura (mm)	Medida espesor (mm)	Anchura media (mm)	Espesor medio (mm)	Área (mm ²)
00-1-01	24,50	1,28	24,54	1,23	30,27
	24,40	1,20			
	24,72	1,22			
00-1-02	25,32	1,28	25,20	1,28	32,34
	25,12	1,18			
	25,15	1,39			
00-1-03	25,30	1,31	25,32	1,29	32,67
	25,43	1,30			
	25,24	1,26			
00-1-04	25,02	1,29	24,98	1,31	32,80
	24,93	1,31			
	24,98	1,34			
00-1-05	25,17	1,30	25,31	1,25	31,63
	25,32	1,21			
	25,43	1,24			

Tabla 13. Probetas unidireccionales (0°) cosidas con densidad de cosido ns_2 .

Código probeta	Medida anchura (mm)	Medida espesor (mm)	Anchura media (mm)	Espesor medio (mm)	Área (mm ²)
00-2-01	25,20	1,38	25,14	1,30	32,69
	25,14	1,31			
	25,09	1,21			
00-2-02	25,16	1,34	25,23	1,34	33,73
	25,11	1,45			
	25,43	1,22			
00-2-03	25,45	1,29	25,35	1,33	33,80
	25,36	1,35			
	25,23	1,36			
00-2-04	25,25	1,35	25,25	1,38	34,76
	25,34	1,48			
	25,15	1,30			
00-2-05	25,05	1,64	25,05	1,49	37,32
	24,95	1,41			
	25,15	1,42			

Tabla 14. Probetas unidireccionales (0°) cosidas con densidad de cosido ns_3 .

Código probeta	Medida anchura (mm)	Medida espesor (mm)	Anchura media (mm)	Espesor medio (mm)	Área (mm ²)
00-3-01	25,17	1,36	25,17	1,42	35,66
	25,03	1,54			
	25,31	1,35			
00-3-02	25,13	1,25	25,26	1,33	33,68
	25,41	1,47			
	25,25	1,28			
00-3-03	25,38	1,40	25,34	1,36	34,46
	25,40	1,39			
	25,24	1,29			
00-3-04	25,39	1,39	25,11	1,44	36,16
	24,86	1,47			
	25,08	1,46			
00-3-05	25,21	1,42	25,01	1,42	35,52
	24,76	1,28			
	25,07	1,56			

Tabla 15. Probetas unidireccionales (90°) cosidas con densidad de cosido ns_1 .

Código probeta	Medida anchura (mm)	Medida espesor (mm)	Anchura media (mm)	Espesor medio (mm)	Área (mm ²)
90-1-01	25,42	1,84	25,13	1,75	43,98
	25,14	1,75			
	24,84	1,66			
90-1-02	25,08	1,80	25,14	1,75	44,00
	25,30	1,75			
	25,05	1,70			
90-1-03	25,46	1,73	25,29	1,83	46,20
	25,22	1,90			
	25,19	1,85			
90-1-04	24,81	1,85	25,06	1,80	45,20
	24,93	1,77			
	25,45	1,79			
90-1-05	25,04	1,65	25,07	1,71	42,78
	24,79	1,70			
	25,37	1,77			

Tabla 16. Probetas unidireccionales (90°) cosidas con densidad de cosido ns_2 .

Código probeta	Medida anchura (mm)	Medida espesor (mm)	Anchura media (mm)	Espesor medio (mm)	Área (mm ²)
90-2-01	25,19	1,74	25,09	1,82	45,58
	25,18	1,93			
	24,90	1,78			
90-2-02	25,45	2,03	25,15	1,87	47,03
	24,71	1,72			
	25,29	1,86			
90-2-03	25,49	1,82	25,36	1,78	45,14
	25,35	1,71			
	25,24	1,81			
90-2-04	25,07	1,64	24,83	1,83	45,36
	24,72	1,78			
	24,71	2,06			
90-2-05	24,80	1,73	24,90	1,76	43,74
	25,15	1,69			
	24,75	1,85			

Tabla 17. Probetas unidireccionales (90°) cosidas con densidad de cosido ns_3 .

Código probeta	Medida anchura (mm)	Medida espesor (mm)	Anchura media (mm)	Espesor medio (mm)	Área (mm ²)
90-3-01	24,80	1,77	24,93	1,83	45,70
	25,13	1,98			
	24,85	1,75			
90-3-02	24,73	1,88	24,73	1,79	44,19
	24,85	1,77			
	24,62	1,71			
90-3-03	24,65	1,73	24,77	1,88	46,64
	24,72	2,03			
	24,93	1,89			
90-3-04	24,80	1,58	24,95	1,66	41,42
	24,94	1,61			
	25,11	1,79			
90-3-05	25,26	1,66	25,25	1,83	46,21
	25,32	1,74			
	25,17	2,09			

4.2.1. Fibras cosidas a 0°

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en los distintos ensayos llevados a cabo con fibra unidireccional a 0° con densidad de puntada n_{s1} , fibra unidireccional a 0° con densidad de puntada n_{s2} y fibra unidireccional a 0° con densidad de puntada n_{s3} .

Tabla 18. Resultados de probetas unidireccionales (0°) con densidad n_{s1}

Probeta	E_s (MPa)	σ_R (MPa)	ε_R
00-1-01	21015,18	410,67	0,01754
00-1-02	19430,85	308,66	0,01951
00-1-03	18826,03	372,05	0,01657
00-1-04	18355,17	342,23	0,01811
00-1-05	25770,74	181,76	0,00867
Media	20679,59	323,07	0,01608

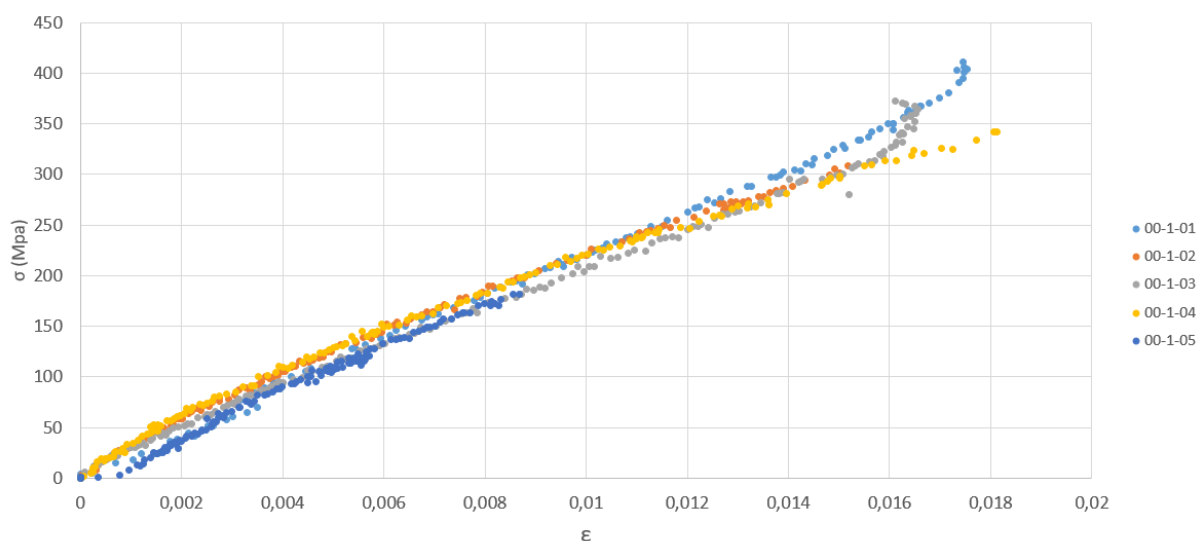
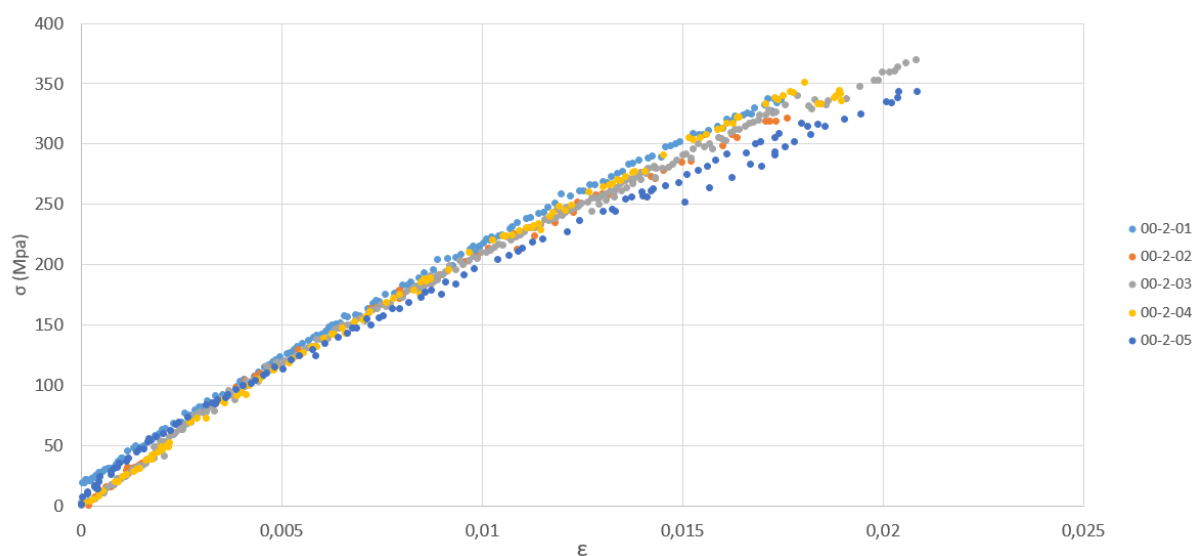


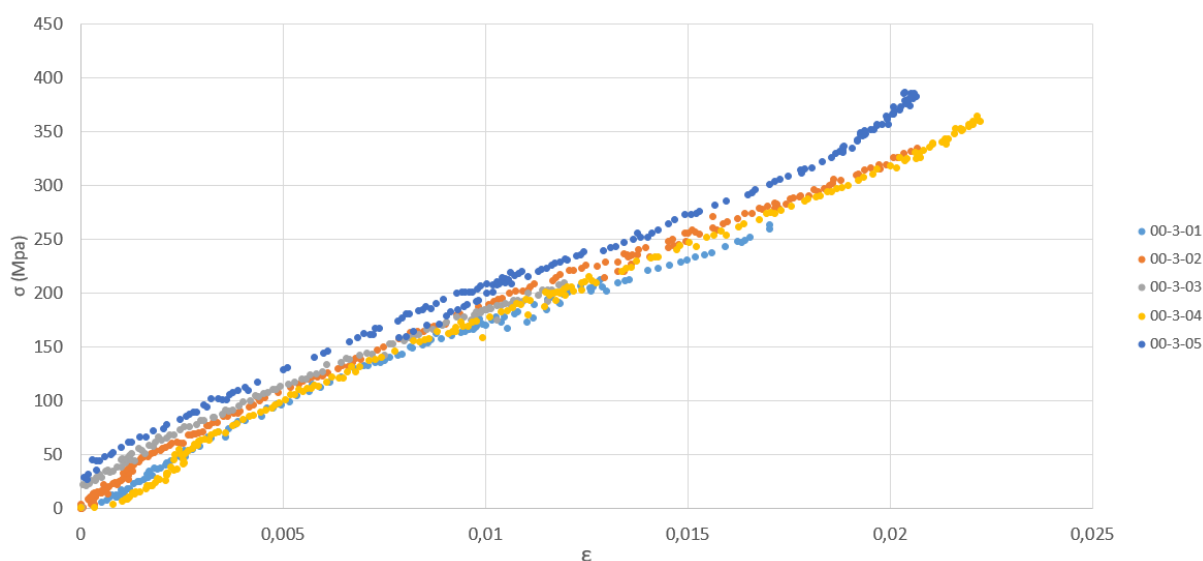
Figura 103. Diagrama $\sigma - \varepsilon$ de probetas unidireccionales (0°) con densidad n_{s1}

Tabla 19. Resultados de probetas unidireccionales (0°) con densidad n_{s2}

Probeta	E_s (MPa)	σ_R (MPa)	ε_R
00-2-01	19191,01	337,93	0,017468
00-2-02	18076	321,67	0,01761
00-2-03	17976,57	369,73	0,02081
00-2-04	19427,03	351,69	0,01897
00-2-05	16437,34	344,02	0,02084
Media	18221,59	345,01	0,01914

Figura 104. Diagrama $\sigma - \varepsilon$ de probetas unidireccionales (0°) con densidad ns_2 Tabla 20. Resultados de probetas unidireccionales (0°) con densidad ns_3

Probeta	E_s (MPa)	σ_R (MPa)	ε_R
00-3-01	16045,8	262,73	0,01703
00-3-02	16118,99	334,35	0,02067
00-3-03	16226,9	209,69	0,01194
00-3-04	15008,49	363,8	0,2224
00-3-05	15754,1	385,81	0,2063
Media	15830,86	311,28	0,09567

Figura 105. Diagrama $\sigma - \varepsilon$ de probetas unidireccionales (0°) con densidad ns_3

4.2.2. Fibras cosidas a 90°

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en los distintos ensayos llevados a cabo con fibra unidireccional a 90° con densidad de puntada n_{s1} , fibra unidireccional a 90° con densidad de puntada n_{s2} y fibra unidireccional a 90° con densidad de puntada n_{s3} .

Tabla 21. Resultados de probetas unidireccionales (90°) con densidad n_{s1}

Probeta	E_s (MPa)	σ_R (MPa)	ε_R
90-1-01	4889,23	51,16	0,00989
90-1-02	5208,16	67,06	0,1467
90-1-03	5488,34	41,88	0,00921
90-1-04	5802,18	47,45	0,00731
90-1-05	3737,8	47,22	0,01148
Media	5025,14	50,95	0,03692

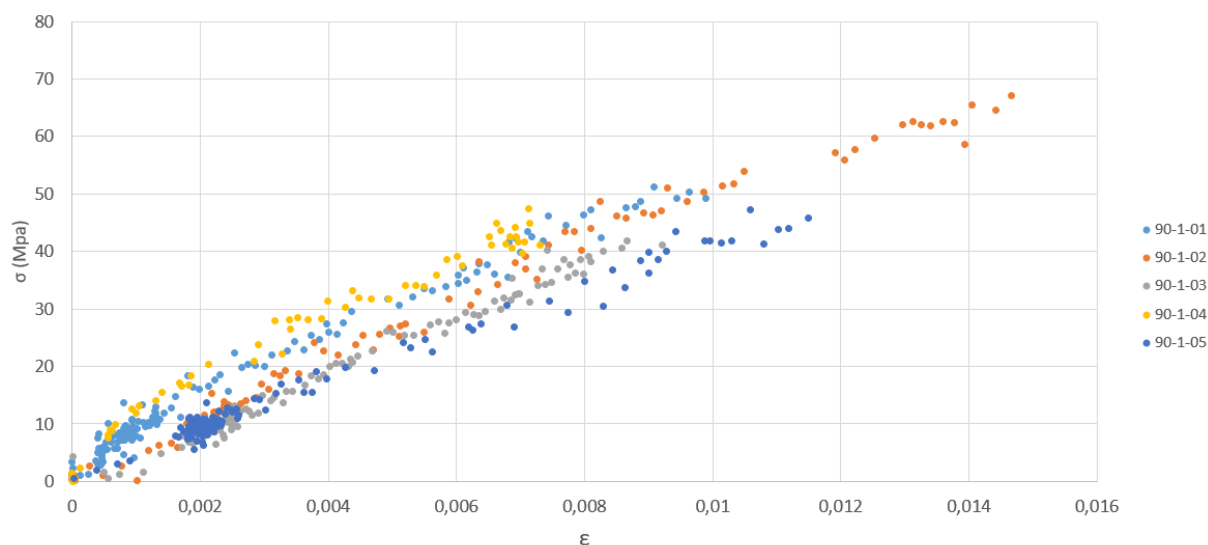
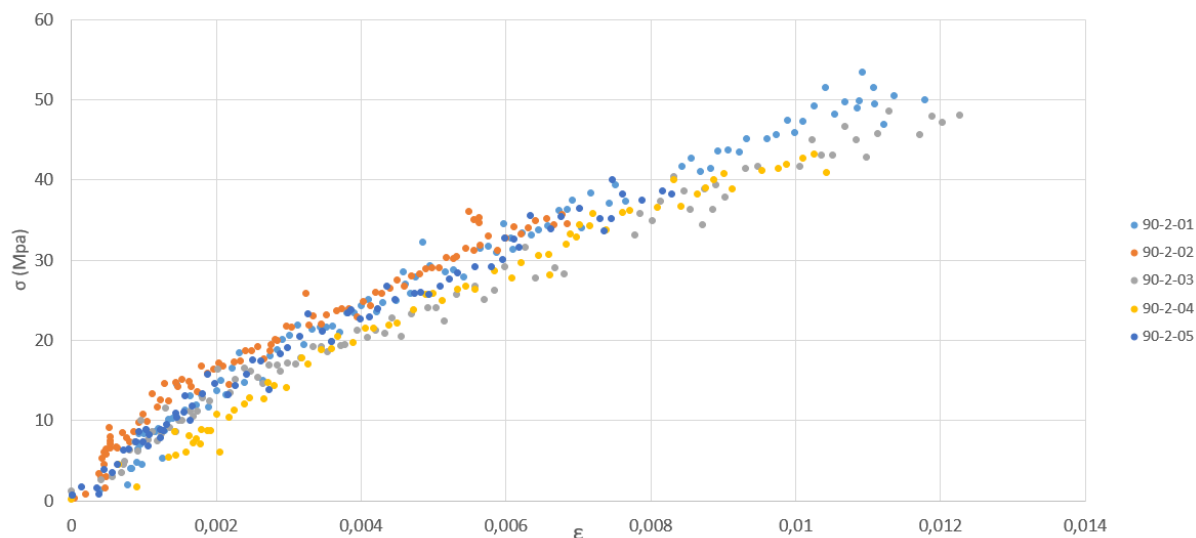


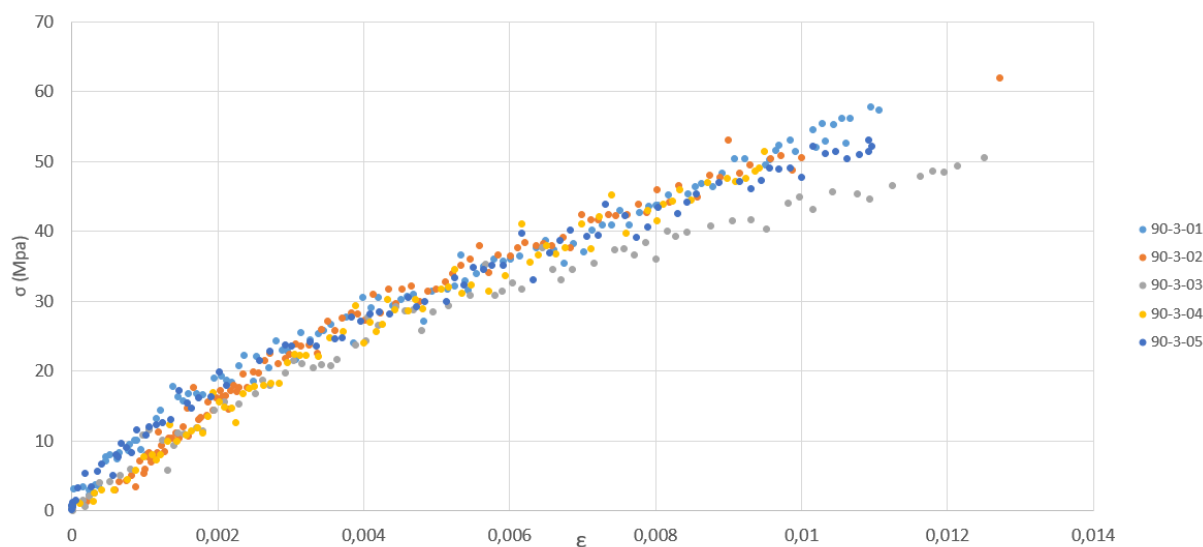
Figura 106. Diagrama $\sigma - \varepsilon$ de probetas unidireccionales (90°) con densidad n_{s1}

Tabla 22. Resultados de probetas unidireccionales (90°) con densidad n_{s2}

Probeta	E_s (MPa)	σ_R (MPa)	ε_R
90-2-01	4357,97	53,42	0,01178
90-2-02	4863,76	36,1	0,00684
90-2-03	3494,16	48,53	0,01226
90-2-04	4825,14	43,23	0,01042
90-2-05	4308	40,03	0,00828
Media	4369,81	44,26	0,00992

Figura 107. Diagrama $\sigma - \epsilon$ de probetas unidireccionales (90°) con densidad ns_2 Tabla 23. Resultados de probetas unidireccionales (90°) con densidad ns_3

Probeta	E_s (MPa)	σ_R (MPa)	ϵ_R
90-3-01	4203,47	57,72	0,01105
90-3-02	4620,56	61,87	0,01272
90-3-03	4401,56	50,58	0,01250
90-3-04	5328,34	51,40	0,00948
90-3-05	4165,92	52,97	0,01096
Media	4543,97	54,91	0,01134

Figura 108. Diagrama $\sigma - \epsilon$ de probetas unidireccionales (90°) con densidad ns_3

4.2.3. Resumen de resultados

En la Tabla 24 se muestra un resumen de los resultados obtenidos en los ensayos:

Tabla 24. Resumen de resultados de los ensayos.

Dirección fibra	n_s (1/mm ²)	E_s (MPa)	σ_R (MPa)	ε_R	
0°	n_{s1}	0,033	20679,59	323,07	0,01608
0°	n_{s2}	0,042	18221,59	345,01	0,01914
0°	n_{s3}	0,042	15830,86	311,28	0,09567
90°	n_{s1}	0,033	5025,14	50,95	0,03692
90°	n_{s2}	0,042	4369,81	44,26	0,00992
90	n_{s3}	0,042	4543,97	54,91	0,01134

Como era de esperar al plantear el plan de ensayos, ante una misma densidad de puntada n_{s2} y n_{s3} se obtienen diferentes resultados; este hecho indica, que las propiedades de los materiales con stitching no tiene la misma relación con la distancia entre puntadas (a_s) y la distancia entre líneas de cosido (a_p).

4.3. Comparativa y normalización de resultados

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en los ensayos y las estimaciones realizadas teóricamente, en la Tabla 25 se muestra la comparativa con el modelo de Mouritz & Cox y, en la Tabla 26, la comparativa con el modelo resultante de la aplicación de la regla de las mezclas.

Tabla 25. Comparativo con E calculado según el modelo de Mouritz & Cox.

Muestra	$E_{experimental}$ (MPa)	$E_{teórico}$ (MPa)	Error
0-NS1	20679,59	23220	10,94%
0-NS2	18221,59	23220	21,53%
0-NS3	15830,86	23220	31,82%
90-NS1	5025,14	4550	10,44%
90-NS2	4369,81	4550	3,96%
90-NS3	4543,97	4550	0,13%

A la vista de esta comparativa se comprueba que el primer modelo presenta más error en la estimación respecto a las fibras orientadas a 0° que respecto a las fibras orientadas a 90° debido a que, aunque el volumen de huecos se toma nulo debido al no cumplimiento del criterio de ángulo de fibras desalineadas, se pudo comprobar en la Figura 99 que el cosido se integra en la fibra formando un volumen

desocupado. Es destacable que, para el cálculo de E con este modelo ha sido necesario el uso de microscopio lo que incrementa la necesidad de equipos para una estimación teórica.

Tabla 26. Comparativo con E calculado según la regla de las mezclas.

Muestra	$E_{experimental} (MPa)$	$E_{teórico} (MPa)$	Error
0-NS1	20679,59	23155,15	10,69%
0-NS2	18221,59	23138,94	21,25%
0-NS3	15830,86	23138,94	31,58%
90-NS1	5025,14	4545,03	10,56%
90-NS2	4369,81	4543,79	3,83%
90-NS3	4543,97	4543,79	0,00%

Respecto a este segundo modelo se comprueba que, para la mayoría de los casos estudiados, es más fiable que el modelo de estimación de E enunciado por Mouritz & Cox ya que se disminuye el error en la estimación.

A diferencia de lo que los modelos planteaban, es decir, que las propiedades de los materiales cosidos dependen de la densidad de puntada sin valorar la influencia las posibles configuraciones de la distancia entre puntadas (a_s) y la distancia entre líneas de cosido (a_p). Se ha comprobado, en base a los resultados experimentales, que no es así.

A la de vista de los resultados obtenidos se comprueba que, en el caso de tener fibras orientadas 0° y la misma densidad de puntada, se tienen mejores propiedades del material final teniendo líneas de cosido más separadas en favor de una menor distancia de puntadas.

A diferencia del caso anterior, para las fibras orientadas 90°, ocurre lo contrario por lo que se ve mejor comportamiento elástico con una mayor distancia entre puntadas. Este hecho lo justifica el hecho de que, al tener mayor distancia entre puntadas, los concentradores de tensión que se introducen por unidad de longitud es menor por lo que la resistencia no se ve tan perjudicada.

Para tener una idea representativa de la influencia del Stitching en los laminados se expresan los resultados en función de los valores de referencia de

laminados similares sin stitching [7]. En la siguiente tabla se muestran los resultados normalizados del módulo de Young (E_s/E) y de la tensión de rotura (σ_{R_s}/σ_R):

Tabla 27. Cálculo de valores normalizados.

Muestra	E_s (MPa)	E (MPa)	E_s/E	σ_{R_s} (MPa)	σ_R (MPa)	σ_{R_s}/σ_R
0-NS1	20679,59	23220	0,89	323,07	484,8	0,67
0-NS2	18221,59	23220	0,78	345,01	484,8	0,71
0-NS3	15830,86	23220	0,68	311,28	484,8	0,64
90-NS1	5025,14	4550	1,10	50,95	101	0,60
90-NS2	4369,81	4550	0,96	44,26	101	0,52
90-NS3	4543,97	4550	1,00	54,91	101	0,65

Finalmente, para terminar este apartado se van a superponer estos resultados con los datos recopilados por Mouritz y Cox [25] y expuestos anteriormente. Esta superposición se muestra en la Figura 109 y en la Figura 110:

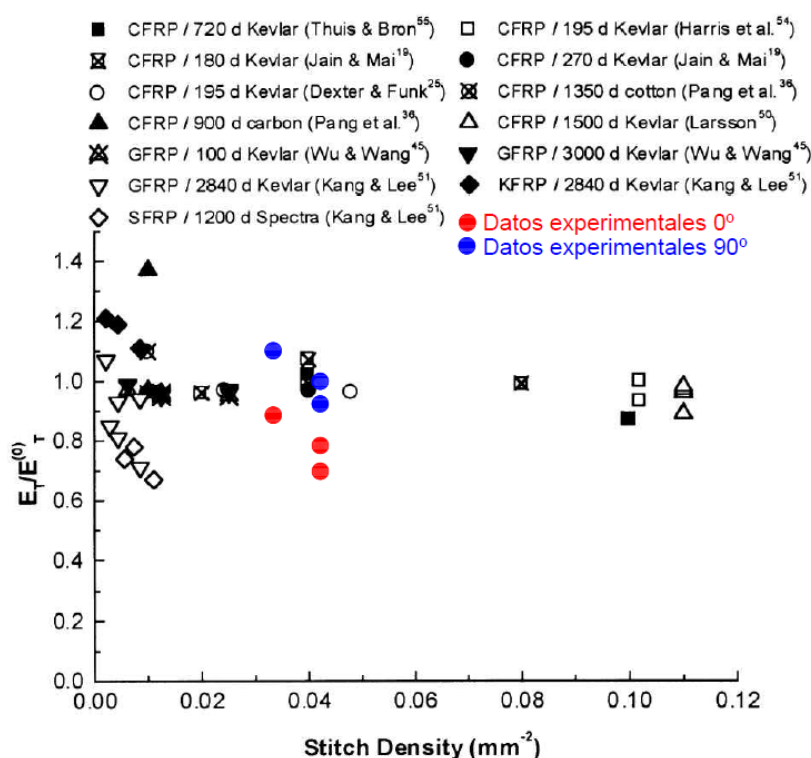


Figura 109. Módulo de Young normalizado en función de la densidad de puntada.

A la vista de los resultados normalizados del módulo de Young respecto a ese parámetro de los mismos materiales sin el factor stitching y viéndolos gráficamente se comprueba, en primer lugar, que el módulo de Young empeora desde un 10% a un 30% con la fibra reforzada. Este hecho es debido a que el hilo de cosido se ha integrado en el laminado (Figura 99) como si de una fibra más se tratase con la particularidad de que el hilo de Nylon es menos resistente que la fibra de vidrio; este

hecho hace que el volumen generado se comporte como una cierta discontinuidad y se obtengan alargamientos mayores que con el material sin reforzar ante una misma sollicitación.

Respecto a las probetas realizadas con fibra unidireccional a 90°, se contempla el hecho de que la propiedad normalizada se encuentra sobre la unidad, mejorando para una menor densidad de puntada, el módulo de Young del material sin reforzar. Esto indica que, en efecto, se llega a reforzar el material con esta técnica.

Teniendo en cuenta otros ensayos bibliográficos con fibra de vidrio y que vienen especificados en la leyenda del gráfico (bajo las siglas GFRP), se observa que los ensayos realizados están en armonía con la tendencia dada por anteriores investigaciones por lo que el estudio realizado resulta de utilidad.

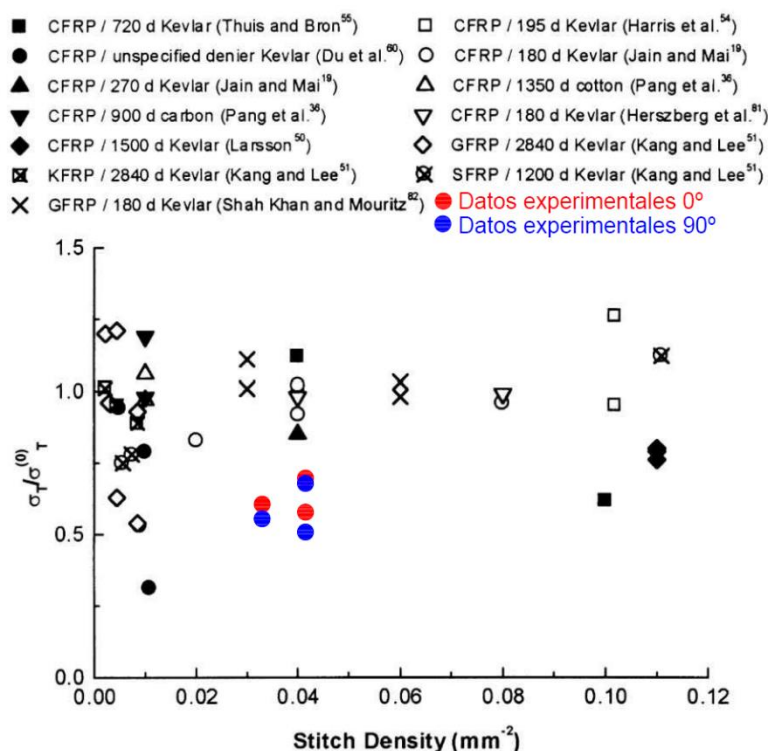


Figura 110. Tensión de rotura normalizada en función de la densidad de puntada.

Respecto a la tensión de rotura normalizada, los ensayos realizados muestran un empeoramiento de la resistencia a tracción respecto a esta propiedad en el material sin reforzar. Esto indica la importancia que adquiere los concentradores de tensión incluidos en el cosido en forma de volúmenes sin fibra; esta concentración de tensión tiene mayor efecto debido a que el material de cosido introducido no es

capaz de soportar el incremento de tensión que se produce, haciendo pensar la necesidad de usar hilos de mayor resistencia.

Teniendo en cuenta los ensayos anteriores realizados y muestreados en la gráfica anterior se ve que las mejores propiedades elásticas se han tenido usando como hilo de cosido fibras de Kevlar, por lo que sería interesante el planteamiento de realización futura de cosidos con este material.

5. Conclusiones

La principal conclusión que se puede obtener de este trabajo es la ampliación de la visión sobre la realidad industrial que supone un conocimiento con los materiales compuestos fibrados. El extendido uso de los materiales compuestos ha hecho tener en cuenta la necesidad del refuerzo de los materiales para su uso en aplicaciones cada vez más variadas y complejas.

Ante la necesidad de reforzar el material se ha hecho un estudio de introducción al cosido o stitching de manera que se ha comprobado cómo, dependiendo de las condiciones de cosido, las propiedades elásticas generalmente empeoran ya que la introducción del factor de cosido ha introducido concentradores de tensión en el laminado que no han sido capaces de ser absorbidos por el material de refuerzo (Nylon).

La revisión bibliográfica ha hecho ver la influencia del factor stitching a los materiales sometidos a distintas sollicitaciones. En el análisis a tracción realizado en este trabajo se ha comprobado que el cosido con hilo de Nylon posibilita el planteamiento de realización de estudios con materiales de cosido más resistentes o en otras disposiciones ya que, incluso con un material de poca resistencia respecto a la fibra, se ha llegado a mejorar en algún caso estudiado propiedades de laminados a 90°. El campo del refuerzo 3D de las fibras amplía su posibilidad de uso y, con este, la implantación que se realiza con más asiduidad en industrial como la automovilística o la aeronáutica.

Al realizar en este trabajo un estudio sobre las propiedades elásticas de los materiales compuestos fibrados reforzados por stitching, se ha llegado a la conclusión de que, además de depender el módulo de Young de la densidad de puntada (n_s) como variable independiente del cosido, los resultados dependen de cómo se ha llegado a esa densidad de puntada en función de la distancia entre puntadas (a_s) y la distancia entre líneas de puntada (a_p). Esta conclusión abre la posibilidad de la realización de más estudios propuestos en el siguiente punto.

La colocación de los resultados experimentales en la misma gráfica de la fuente bibliográfica [25] ha permitido conocer la situación de este trabajo respecto a anteriores investigadores y contemplar otros supuestos como el uso del hilo de Nylon como factor de refuerzo.

6. Trabajos futuros

Como continuaciones futuras a este trabajo se proponen estudios relacionados con:

- La ampliación del conocimiento sobre la influencia del stitching complementando los ensayos realizados con otros variando parámetros como el diámetro de hilo de cosido, la densidad de puntada, la orientación de las fibras o el número de láminas.
- Inclusión del factor Stitching a materiales que sean ensayados a flexión de manera se compruebe la mejora de propiedades ante esfuerzos fuera de plano.
- Estudios de influencia de la velocidad de llenado durante la infusión mediante los ensayos de laminados fabricados con distintas condiciones.
- Estudios económicos de la fabricación de materiales compuestos y el planteamiento de recuperación de inversión mediante reciclado o reutilización para otras actividades o usos del material.
- Estudio de la influencia del ciclo de curado de la resina en la fabricación de muestras mediante ensayos de laminados infusionados en condiciones distintas de temperatura y presión.

Bibliografía

- [1] J. F. Shackelford, Introducción a materiales compuestos para ingenieros, 1998.
- [2] Why National Composite Center, [En línea]. Available: <http://compositecenter.org/index.php/whycomposites>.
- [3] A. Miravete, Materiales Compuestos I, Reverté, 2000.
- [4] D. Hull, Materiales Compuestos, Reverté, 1987.
- [5] G. Lubin, Handbook of Composites, 1982.
- [6] P. A. Benitez, Los Materiales Compuestos de fibra de vidrio, Universidad de Zaragoza, 1991.
- [7] J. A. Almazán Lázaro, Estudio del comportamiento mecánico de materiales compuestos. Fabricación mediante técnicas de vacío e infusión. Ensayos experimentales y validación numérica, Jaén: Departamento de Ingeniería Mecánica. Escuela Politécnica Superior de Jaén. Universidad de Jaén, 2014.
- [8] A. F. Johnson, Engineering desing properties of G.R.P., Londres, 1979.
- [9] AEMAC, [En línea]. Available: www.aemac.org.
- [10] W. Wake, «Theories of adhesion ans uses of adhesives,» 1978. [En línea].
- [11] C. ATE, «Tecnologías de fabricación,» [En línea]. Available: <http://www.composites-ate.com/tecnologias-de-fabricacion/>.
- [12] C. U. Be. [En línea]. Available: http://www.composites.ugent.be/home_made_composites/organizing_your_composite_works.
- [13] L. Tong, A. Mouritz y M. Bannister, 3D Fibre Reinforced Polymer Composites, 2002.
- [14] C. R. C. f. A. C. Structures, Artist, [Art].
- [15] N. Khokar, 3D fabric-forming processes: Distinguishing between 2D-ewaving, 3D-weaving and an unspecified non-interlacing process, 1996.
- [16] P. Popper, «Braiding,» *International Encyclopaedia of Composites*, 1991.
- [17] F. Ko, Three-dimensional fabrics for composites, Composite Materials Series, 1989.
- [18] L.-M. GmbH, Artist, [Art].

- [19] A. Morales, Structural stitching of textile performs, 1990.
- [20] K. Dransfield, C. Baillie y Y. Mai, Improving the delamination resistance of CFRP by stitching, 1994.
- [21] S. Beckworth y C. Hyland, Resin transfer moulding: a decade of technology advances, SAMPE J., 1998.
- [22] I. M. Daniel, Engineering Mechanics of Composite Materials, Oxford: Oxford University Press, 1994.
- [23] P. Mallick, Fiber Reinforced Composites: Materials, Manufacturing and Design, 2008.
- [24] L. Luz Stella Arias Maya, «Falla de los materiales compuestos laminados,» *Scientia ei Technica*, 2004.
- [25] A. Mouritz y B. Cox, «A mechanistic approach to the properties of stitched laminates,» 2000.
- [26] E. Wu y J. Liao, «Impact of unstitched laminates by line loading,» 1994.
- [27] Design, Manufacturing, and Performance of Stitched Stiffened Composite Panels With and Without Impact Damage, 2002.
- [28] ASTM, D 3039 Standard Test Method for TEnsile Properties of Polymer MATrix Composite Materials, 2008.
- [29] H. Schereir y J. Orteu J, «Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements,» 2009.
- [30] Dremel. [En línea]. Available: www.dremeleurope.com.
- [31] Leica. [En línea]. Available: www.leica.com.
- [32] Moldex3D, [En línea]. Available: www.moldex3d.com.
- [33] N. Composites, «Naval Composites,» [En línea]. Available: www.navalcomposites.com.
- [34] CTMI, Artist, [Art].