



Universidad de Jaén

Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

DISEÑO, FABRICACIÓN Y ENSAYO DE UN SISTEMA TUBULAR DE MATERIAL COMPUESTO Y SU RESISTENCIA DEPENDIENDO DEL PROCESO DE STITCHING

Alumno: María López Cano

Tutor: Prof. D. Elías López Alba

Prof. D. Juan Antonio Almazán Lázaro

Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera

Septiembre, 2023



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Informática

Don ELÍAS LÓPEZ ALBA y Don JUAN ANTONIO ALMAZÁN LÁZARO , tutor del Proyecto Fin de Carrera titulado: DISEÑO, FABRICACIÓN Y ENSAYO DE UN SISTEMA TUBULAR DE MATERIAL COMPUESTO Y SU RESISTENCIA DEPENDIENDO DEL PROCESO DE STITCHING, que presenta MARÍA LÓPEZ CANO, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, SEPTIEMBRE de 2023

El alumno:

Los tutores:

MARÍA LÓPEZ CANO

ELÍAS LÓPEZ ALBA

JUAN ANTONIO ALMAZÁN LÁZARO

A mi familia.

Resumen

El objeto de este trabajo consiste en el diseño, fabricación y ensayo de una unión tubular realizada con materiales compuestos. Se pretende evaluar la unión y el efecto de la técnica de refuerzo 3D basada en el stitching en una de las configuraciones.

Para este trabajo se utilizará la fibra de yute debido a sus buenas propiedades y que es respetuoso con el medioambiente ya que es 100% reciclable y se obtiene de fuentes renovables.

En primer lugar, se realizará una introducción a las uniones tubulares existentes en la industria y en los fundamentos teóricos de los materiales compuestos, su fabricación y refuerzo 3D de las fibras. Una vez conocido el fundamento teórico se realizará la fabricación de las muestras y su proceso de infusión. Además, se realizará el diseño y fabricación de un útil necesario para realizar el ensayo dado que no existe una norma específica para las uniones tubulares. También se introducirán unos breves conceptos sobre la correlación digital de imágenes (DIC), técnica que se utilizará durante el ensayo para obtener información.

Seguidamente, se realizará el ensayo y compararán los resultados obtenidos para el caso de una muestra con y sin stitching. Se comentarán los resultados obtenidos con la correlación digital de imágenes para ver si realmente el stitching mejora o empeora este tipo de uniones.

Como resultado, se han obtenido valores similares en el comportamiento de ambas configuraciones, concluyendo que la unión ha mostrado una resistencia incluso superior a la de los tubos que une. Análisis futuros permitirán extraer conclusiones más específicas acerca del comportamiento del stitching.

Índice

1. Antecedentes y motivación.....	11
2. Objetivos	12
3. Fundamento teórico	12
3.1. Introducción	12
3.2. Uniones de tubos en materiales compuestos	13
3.3. Materiales compuestos	16
3.3.1. Concepto.....	16
3.3.2. Fibras	17
3.3.3. Matrices	21
3.3.4. Unión fibra matriz	25
3.3.5. Fabricación	26
3.4. Sistemas de refuerzo 3D	28
3.4.1. Weaving	28
3.4.2. Braiding	32
3.4.3. Knitting	35
3.4.4. Stitching	38
3.5. Comportamiento mecánico de los materiales compuestos	41
3.5.1. Regla de las mezclas	41
3.6. Conclusiones.....	43
4. Metodología y análisis experimental.....	44
4.1. Introducción	44
4.2. Fabricación de muestras	44
4.2.1. Materiales	44
4.2.2. Equipos	49
4.2.3. Seguridad en la fabricación	51
4.2.4. Fabricación del molde	51
4.2.5. Fabricación de muestras	52
4.2.6. Cosido.....	57
4.2.7. Infusionado de las muestras.....	60
4.2.8. Muestras resultantes	64
4.2.8.1. Análisis microscópico	66
4.3. Fabricación del útil de ensayo	68
4.3.1. Concepto inicial.....	68
4.3.2. Mejoras durante el proceso de ensayo.....	72

4.4.	Puntos de mejora	74
4.5.	Definición de ensayos	77
4.5.1.	Normativa.....	77
4.5.2.	Metodología de ensayo	77
4.5.3.	Equipos de ensayo.....	78
4.5.4.	Correlación Digital de Imágenes	81
4.6.	Realización de ensayo	82
4.6.1.	Preparación de muestras	82
5.	Resultados y discusión.....	85
5.1.	Correlación digital de imágenes (DIC).....	93
5.2.	Estimación teórica del comportamiento de los tubos	101
5.3.	Resumen de resultados	102
6.	Conclusión	104
7.	Trabajos futuros	105
	Bibliografía	106
8.	Anexo I. Planos	109

1. Antecedentes y motivación

Los materiales compuestos en la actualidad se conocen como materiales novedosos que se usan en la actualidad en los sectores de la aeronáutica y de la automoción. Sin embargo, a lo largo de los años se han usado diferentes materiales como materiales compuestos.

Estos materiales llevan usándose miles de años en las construcciones antiguas donde se usaba una mezcla de barro y paja para crear ladrillos resistentes hasta la actualidad donde se utiliza una mezcla de hormigón armado en la construcción de todos los edificios que vemos hoy en día.

También existen los materiales fibrados, en el que se basa este trabajo, que consta de una mezcla heterogénea de una matriz (resina) cuya función es la de distribuir los esfuerzos y un refuerzo (fibra) que se encarga de soportarlos.

La experiencia del Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera de la Universidad de Jaén ha demostrado que los materiales fibrados tienen un buen comportamiento bajo condiciones de tracción, pero no tan buenos si se somete a esfuerzos de flexión. Además, se han llevado a cabo otros proyectos de refuerzo de los laminados en probetas 2D pero no en probetas 3D. Es ahí que surge el interés de este proyecto: estudiar el refuerzo de un sistema tubular y estudiar su comportamiento.

Para este proyecto la tecnología de refuerzo 3D elegida es el cosido de fibras, también conocido como stitching, se realizarán cosidos en ambas direcciones con hilo de Nylon y posteriormente infundidos en resina epoxi. De este estudio se tendrán resultados numéricos del módulo de Young y resistencia a tracción que serán comparados y se comparará el efecto del stitching sobre la unión.

2. Objetivos

En este apartado se pretende dar a conocer los objetivos que se pretende alcanzar con este trabajo.

El objeto de este trabajo consiste en:

- El estudio de la unión existente entre dos tubos, para ello se fabricarán dos muestras de material compuesto (con y sin stitching) y así conocer el comportamiento de ambas.
- Estudiar si realizar una unión con stitching mejora o empeora las propiedades frente a otra que no está cosida.
- Evaluar el comportamiento a tracción entre ambos tubos.
- Conocer la importancia de utilizar un material tan novedoso como es la fibra de yute, no solo por sus buenas propiedades sino también por ser respetuoso con el medio ambiente.
- Diseñar y fabricar un útil para la realización del ensayo y se desarrollará un método para ensayar este tipo de geometría nunca antes realizada y ver posibles mejoras de cara al futuro.

3. Fundamento teórico

3.1. Introducción

En este apartado se tratarán los conceptos de uniones de tubos en materiales compuestos, así como nociones básicas sobre los materiales compuestos y su composición (fibra y matriz), así como la fabricación de estos.

Además, se introducirán conceptos breves sobre los diferentes métodos de refuerzo 3D, dando mayor importancia al cosido de fibras (stitching), objeto de este trabajo.

3.2. Uniones de tubos en materiales compuestos

En este apartado se pretende enunciar la importancia de las uniones en tubos (fabricación y diseño) sobre la que nace el presente trabajo.

Las uniones tubulares se encuentran presentes en muchos campos de la industria, ya sea para circulación de fluidos o en aplicaciones estructurales. Por ejemplo, según la Figura 1 se realizan uniones en K para puentes, realizadas en acero y rellenas de hormigón.

Según Chao Hou y Lin-Hai Han en su artículo [1] estas uniones se realizan para obtener alta resistencia, alta rigidez o gran capacidad de absorción de energía. Por tanto, es una solución bastante favorable para grandes estructuras como pueden ser torres, puentes o cerchas.

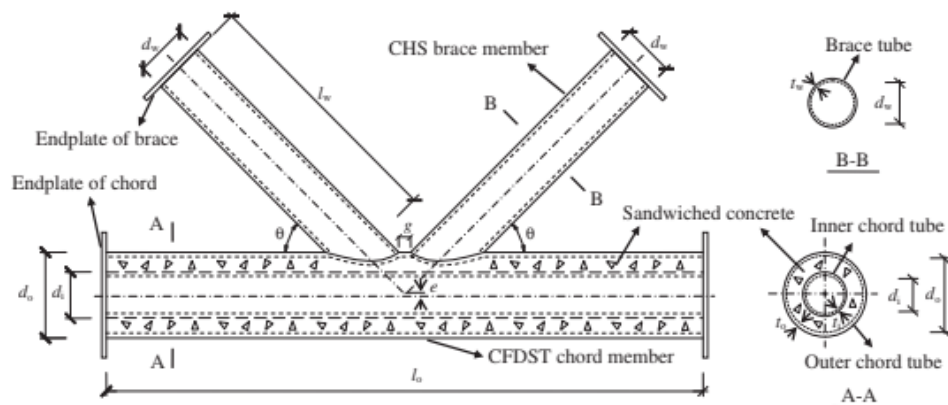


Figura 1. Esquema de una unión en K

También podemos ver uniones tubulares en los chasis de un automóvil, muchos de ellos en su conjunto, están formados por estas uniones. Generalmente, estos están realizados en acero y aluminio y, por tanto, es difícil saber su comportamiento si se realiza con materiales compuestos.



Figura 2. Chasis tubular automóvil

Como se muestra en la Figura 2, un chasis tubular no solo aporta rigidez en torsión sino que también mejora la dinámica del automóvil y protección para los ocupantes.

Si hablamos de uniones en materiales compuestos, son pocas las que se pueden ver con forma de T y tubulares. Según Di Bella en su artículo [2] en la industria naval es común el uso de uniones en T para dividir el casco en varios compartimentos debido a que mantiene la rigidez del buque en diversas condiciones de carga.

Con esta unión (Figura 3) se busca transferir cargas y mantener la estanqueidad. En este caso la unión que se obtiene es una plana. Esta unión se realiza con aluminio y resina epoxi.

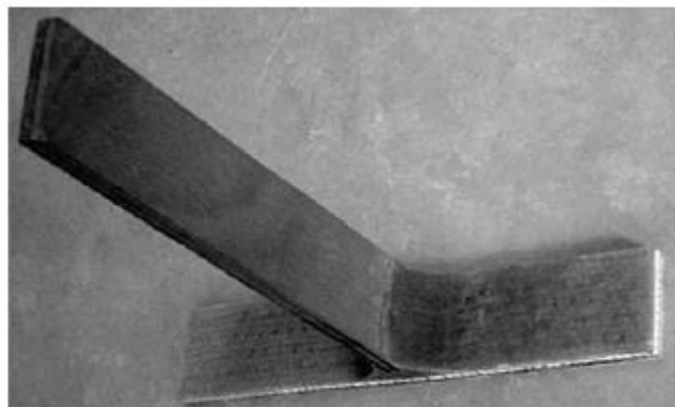


Figura 3. Unión en T plana [2]

Aparte de las uniones vistas anteriormente, también existen conectores de materiales compuestos que unen dos tubos, consiguiendo así una unión tubular sin necesidad de realizarla en el proceso de fabricación.

Una de las uniones más utilizadas en este caso son las de fibra de carbono (Figura 4) que permiten crear estructuras complejas y rígidas simplemente colocando los tubos deseados y poner adhesivo estructural para así adquirir la máxima resistencia en la unión.



Figura 4. Unión en fibra de carbono [3]

Este tipo de uniones no solo nos permiten realizar uniones en T sino también en L, o con cierto ángulo (Figura 5). Estas uniones son bastantes útiles ya que al colocarse una vez fabricados los elementos no interfieren en el proceso de fabricación, además, al estar hechas de fibra de carbono cuentan con alta flexibilidad, alta resistencia, bajo peso o tolerancia a altas temperaturas entre otras propiedades.



Figura 5. Otros tipos de uniones en fibra de carbono [4]

Sin embargo, las uniones tubulares en materiales compuestos se pueden encontrar para el transporte de fluidos, pero no en aplicaciones estructurales y, si se realizan en este ámbito, están realizadas en elementos metálicas. Es aquí donde reside la importancia de este trabajo, estudiar y conocer el comportamiento de una unión tubular de material compuesto (realizada en este caso con fibra de yute) para poder usarla como elemento estructural. Además, como se verá más adelante el yute es una fibra que se puede destruir cuando finalice su vida útil por lo que sería respetuoso con el medio ambiente.

3.3. Materiales compuestos

3.3.1. Concepto

Se entiende por material compuesto aquel que consta de dos o más materiales físicamente distintos y separables mecánicamente. Puede fabricarse mezclando los distintos materiales de tal forma que la dispersión de un material en el otro pueda hacerse de manera controlada para alcanzar unas propiedades óptimas. Las propiedades son superiores, y posiblemente únicas en algún aspecto específico, a las propiedades de los componentes por separado. [5]

Los materiales compuestos están formados por dos fases o componentes principales. Por un lado, tenemos la matriz que actúa como ligante manteniendo el

refuerzo en su posición fija y sirve de transmisor de tensiones entre los elementos de refuerzo. El refuerzo se encarga de absorber las tensiones, incrementa la rigidez y la resistencia del conjunto.

Con esta unión se busca obtener propiedades mecánicas diferentes a las que se obtienen considerando cada material por separado, aunque cabe destacar que no solo se depende de las propiedades de los factores sino también de otros factores como pueden ser: la cantidad de cada material, la orientación, el tamaño, forma y distribución de la forma continua.

La combinación adecuada de las fases continua y discontinua origina unos materiales con una mejora de las propiedades a cambio de aumentar el coste y la fabricación de estos materiales.

Destacar, que las fases de un material compuesto, siendo heterogéneas, no deben de fusionarse completamente entre ellos. Esta heterogeneidad hace que los materiales se comporten de manera diferente según la orientación de la carga y por tanto las propiedades dependerán de dicha orientación.

3.3.2. Fibras

El refuerzo en los materiales compuestos se puede disponer de diversas maneras según se observa en la Figura 6. En esta figura se puede ver como existen refuerzos en forma de partícula y de fibra. Aunque en este trabajo se va a centrar en el uso de refuerzo mediante fibras.

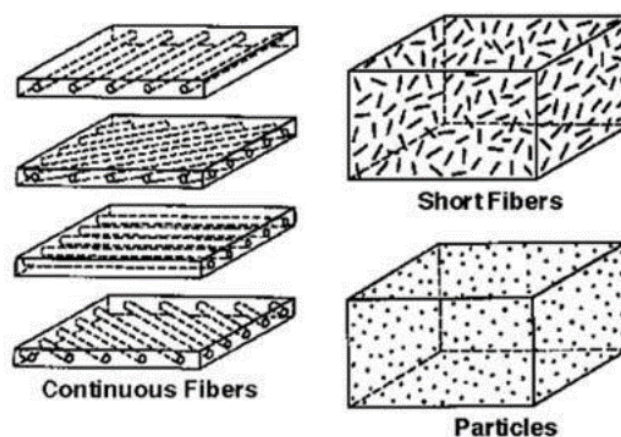


Figura 6. Tipos de refuerzo [6]

Los materiales compuestos reforzados con fibras son materiales muy utilizados en diversos sectores (automoción, aeronáutica, construcción, etc) y tienen una gran aplicación según el tipo de fibra que se utilice. Como se puede observar en la Figura 7, el origen de las fibras pueden ser de origen vegetal, animal y mineral. Las fibras de origen vegetal son principalmente de celulosa y entre ellas se encuentra la fibra de yute con la que se realiza este estudio.

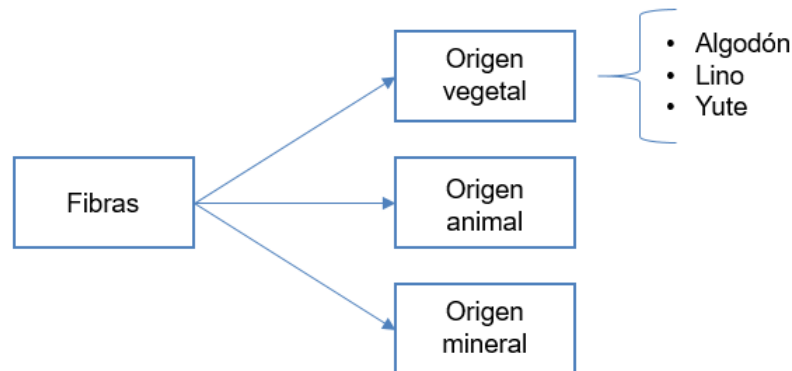


Figura 7. Clasificación de las fibras según su origen

La función principal de los refuerzos es soportar los esfuerzos solicitados, es por ello que es de interés conocer las propiedades mecánicas de algunos tipos de fibras.

Hay que tener en cuenta que las características de las fibras vegetales varían considerablemente dependiendo de múltiples factores como el origen de la fibra (si procede tallo o de hoja), la calidad de la localización de la planta y los tratamientos aplicados sobre la fibra [7].

Las propiedades más interesantes pertenecen al grupo de las denominadas fibras-duras, a este grupo corresponden las fibras provenientes de líber y hoja (las fibras extraídas del lino o yute) pertenecen a este grupo [7].

Otro de los factores condicionantes de las propiedades de las fibras vegetales es su composición. Prácticamente en todos los casos la celulosa es el componente principal de las fibras vegetales lo que explica su naturaleza hidrofilia y el contenido en humedad que presentan 8-12.6%. Es importante destacar que la fuerza y la resistencia de las fibras está relacionada con el alto contenido en celulosa, en concreto en relación con las fibrillas de las macromoléculas de celulosa, estas forman espirales

a lo largo del eje de la fibra, cuanto menor sea el ángulo entre el eje y las fibrillas de la fibra, mayor son las propiedades mecánicas de la fibra, a parte del contenido en celulosa también influyen las dimensiones celulares [7].

En las siguientes tablas (Tabla 1 y Tabla 2) se puede observar las propiedades de distintas fibras vegetales.

Tabla 1. Propiedades de distintas fibras vegetales [7] [8]

Fibra	Celulosa (%)	Tamaño de celda (mm)	Angulo de la espira (°)	Resistencia a tracción (MPa)	Módulo de Young (GPa)
Yute	61.0	2.3	8.0	393-800	13-26.5
Lino	71.0	20.0	10.0	345-1830	27-65
Cáñamo	74.4	23.0	6.2	550-1100	38-70
Ramio	68.6	154.0	7.5	400-938	61.4-128
Sisal	78.0	2.2	20.0	468-700	9.4-22
Coco	43.0	0.8	45.0	131-220	4-6

Tabla 2. Propiedades de distintas fibras vegetales y sintéticas [9] [10]

Fibra	Densidad (g/cm³)	Deformación de rotura (%)	Resistencia a tracción (MPa)	Módulo de Young (GPa)
Algodón	1.50	7-8	287-597	5.5-12.6
Yute	1.30	1.5-1.8	393-773	26.5
Lino	1.50	2.7-3.2	345-1025	27.5
Bambú	0.80	-	391-1000	48-89
Piña	-	1.6	413-1627	34.5-82.5
Madera blanda	1.50	-	1000	40
Vidrio	2.55	2.5-3.7	2000-3500	70-73
Carbono	1.78	1.4-1.8	3400-4800	240-425
Kevlar	1.44	2.5-3.7	3000	60
Acero	7.85	10-30	215-830	210

Como se indicó anteriormente en este estudio se va a utilizar la fibra de Yute debido a su gran ligereza, su baja conductividad térmica, sus buenas propiedades aislantes, no se oxida y sobre todo es biodegradable al cien por cien y por tanto no emite gases durante su combustión. Este material ya ha sido utilizado previamente por otros autores, como [8], que realizaron estudios sobre distintas configuraciones de tejido, resumiendo los resultados en la Tabla 3.

Tabla 3. Propiedades longitudinales a tracción del compuesto yute+epoxy

Properties	Laminate Type	Strength MPa	SD	Strain To Failure	SD	Stiffness GPa	SD
Tensile	0-0	112.69	18.31	0.82%	0.17%	14.59	2.28
	0-45	64.31	13.18	0.64%	0.15%	10.46	0.56
	0-90	42.54	6.42	0.43%	0.05%	11.13	1.47

La fibra de yute se extrae de la corteza de la planta de yute blanco, es un cultivo anual y necesita 120 días para ser desarrollada. Crece sobre todo en zonas tropicales con una humedad entre el 60%-90% y además, es un cultivo de secano que no necesita el uso de fertilizantes o pesticidas [9].

Es considerada la segunda fibra natural después del algodón en cuanto a cantidad producida y pluralidad de uso de fibras vegetales.

Esta fibra está compuesta principalmente por fibras vegetales tales como la celulosa y la lignina (primordialmente componente de la madera).

Es una fibra muy respetuosa con el medio ambiente ya que en 100% biodegradable y reciclable. Una hectárea de plantas de yute consume en torno a 15 toneladas de CO₂ y libera 11 toneladas de O₂. Finalmente, cuando la fibra de yute es devuelta a la atmosfera esta se utiliza como abono en los diferentes cultivos y además no produce gases tóxicos durante el quemado [9].

En la siguiente Figura 8 se puede observar el tipo de fibra utilizada en el estudio.



Figura 8. Fibra de Yute

3.3.3. Matrices

Después de las fibras, otro elemento importante es la matriz en los materiales compuestos. Esta permite tanto la unión del refuerzo como la distribución de cargas.

Las matrices pueden ser de tipo orgánico que a su vez pueden ser termoestables o termoplásticas. Y de tipo inorgánico que son de origen mineral y pueden ser matrices metálicas o cerámicas utilizadas cotidianamente en trabajos de arquitectura o ingeniería.

En la Figura 9 se puede observar la clasificación de los diferentes tipos de matrices:

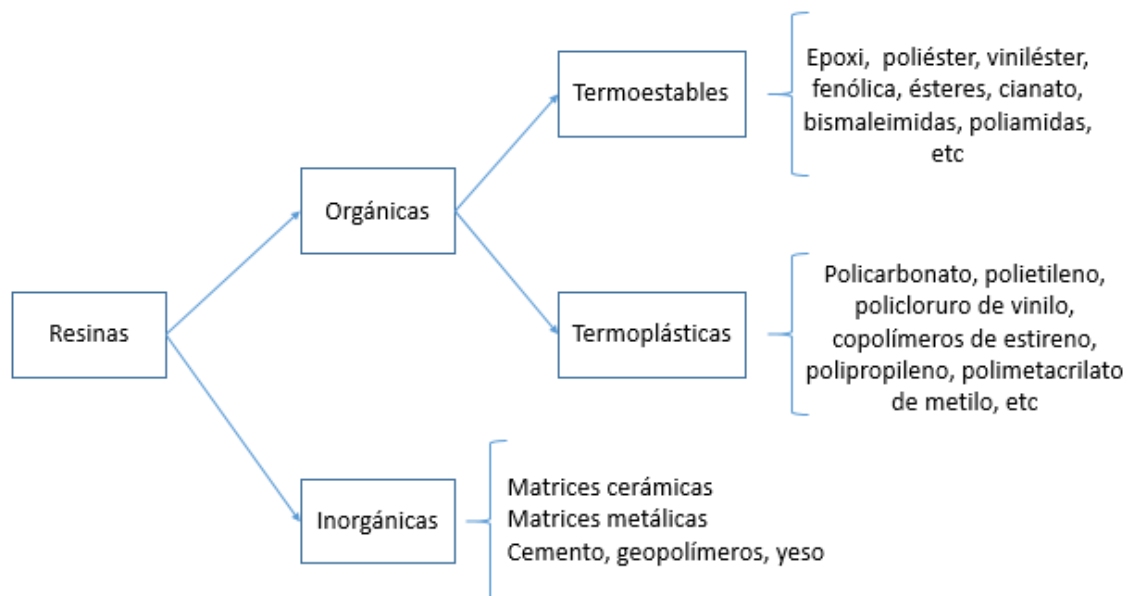


Figura 9. Clasificación de matrices en materiales compuestos.

Para este estudio la matriz usada ha sido de tipo orgánica que está basada en compuestos orgánicos con un alto peso molecular, originados en reacciones de polimerización por adición o condensación. Más en concreto, la matriz usada ha sido de tipo termoestable siguiendo la clasificación de la figura anterior.

Una matriz termoestable se caracteriza por una elevada estabilidad térmica, alta rigidez, bajo peso, una buena resistencia a la termofluencia y deformación a baja carga. Este tipo de matriz a temperatura ambiente se encuentra líquida y necesita un tiempo de curación para solidificar y obtener algunas propiedades mecánicas. En cuanto al curado, este se fomenta mediante el uso de un catalizador y puede llevarse a cabo a temperatura ambiente o en un horno, pero siempre usando la información proporcionada por el fabricante.

Durante el proceso de curado, se lleva a cabo 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 en la porosidad del laminado final siendo este perjudicial en las propiedades mecánicas del final y cuya influencia no se tratará en este estudio.

En la Figura 10 y Tabla 4 se puede observar las diferentes curvas tensión-deformación y principales propiedades de las resinas epoxi y poliéster.

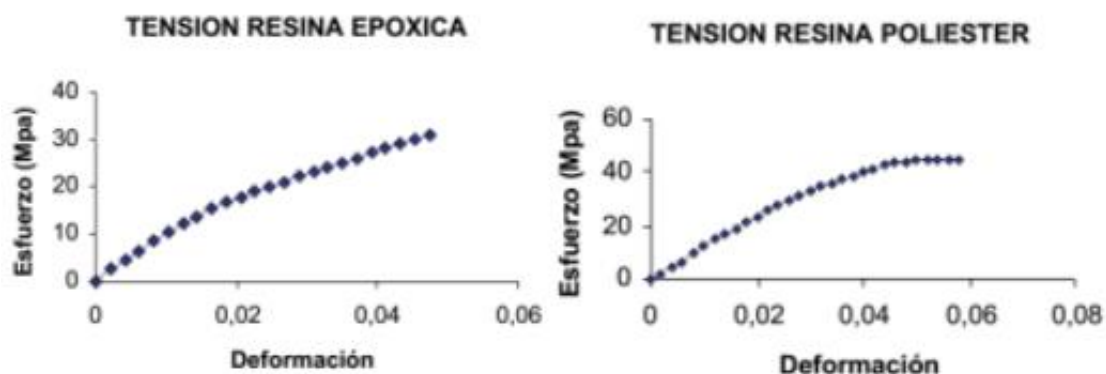


Figura 10. Diagrama tensión-deformación de las resinas epoxi y poliéster [10]

Tabla 4. Propiedades de las resinas epoxi y poliéster [11]

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 estudio se utilizará resina epoxi por sus buenas propiedades mecánicas y bajo coste, además de soportar altas temperaturas sin deformarse. Esta resina se utiliza en la formulación de pintura para la carrocería de automóviles aumentando la resistencia a la corrosión y la vida útil, también se utilizar en la industria de construcción.

Al tratarse de resina epoxi en este caso, según las características del vendedor se pueden alcanzar diferentes valores de temperatura durante el curado. La resina utilizada en este trabajo debe curarse a 60 °C .

Conocida la temperatura de curado de la resina es conveniente conocer cuál es el proceso de curado que se lleva a cabo, en la Figura 11 se puede observar detalladamente dicho proceso.

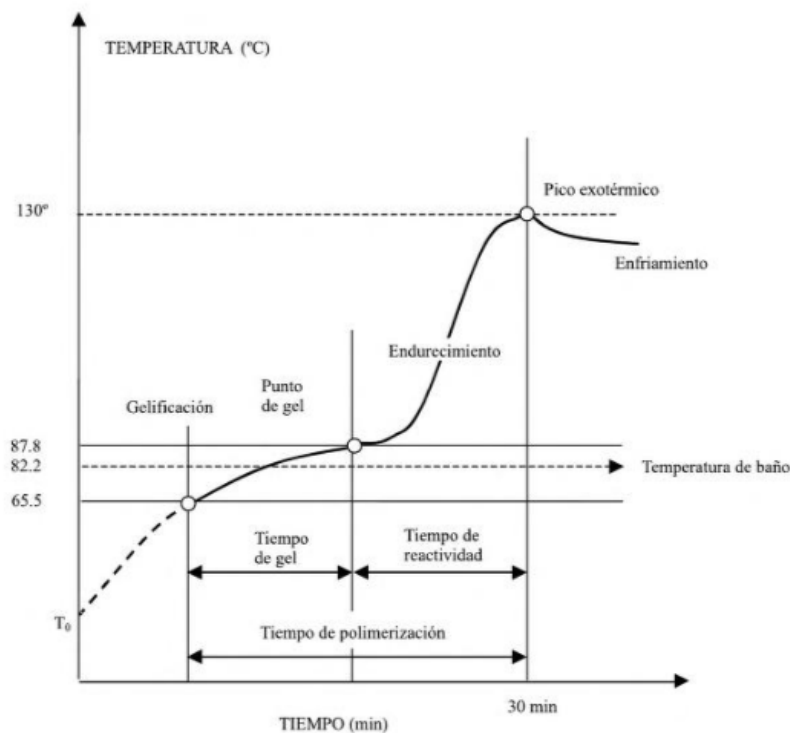


Figura 11. Proceso de curado de la resina epoxi [12]

- Tiempo de gelificación: tiempo que transcurre desde que se añade la mezcla formada por la resina y el catalizador y el comienzo de la polimerización.
- Tiempo de gel: tiempo que transcurre desde que comienza la polimerización hasta que se alcanza el punto de gel.
- Tiempo de reactividad o endurecimiento: tiempo en el que el material comienza a endurecer y conlleva un aumento de la temperatura.
- Tiempo de polimerización: tiempo completo del proceso desde que comienza la polimerización hasta que termina el proceso de endurecimiento.
- Punto de gel: momento en el que el material deja de fluir y ya no puede ser procesado.
- Pico exotérmico: temperatura máxima que alcanza la resina durante el proceso de endurecimiento, marca el final del proceso de polimerización y da paso al proceso de enfriamiento.

3.3.4. Unión fibra matriz

Llegados a este punto se ha definido la importancia de la matriz y del refuerzo para la distribución y resistencia frente los esfuerzos, pero esta combinación solo es posible si se realiza una buena unión entre ellos.

Según Wake en 1978 enunció cinco mecanismos de adhesión (Figura 12) mientras que Miravete en 2007 tomó como más importantes cuatro de ellos (Figura 12 b-e).

- Adsorción y humectación (Figura 12 a): se fundamenta en la tensión superficial. La resina rellena las pequeñas cavidades existentes entre las dos superficies originando una unión por efecto de la tensión superficial.
- Interdifusión (Figura 12 b): se fundamenta en el mecanismo de difusión existente entre redes poliméricas, 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 12 c): se basa en la diferencia de polaridad existente entre dos superficies teniendo así una superficie con carga positiva y la otra con carga negativa.
- Enlace químico (Figura 12 d): se basa en la formación de un enlace químico entre la superficie de la fibra y el grupo químico de la resina. Muy importante en compuestos fibrados y su calidad va a depender del número y tipo de enlaces químicos.
- Adhesión mecánica (Figura 12 e): basada en la rugosidad existente entre superficies que son cubiertas por la matriz. Le efectividad es directamente proporcional a la rugosidad que tenga la superficie.

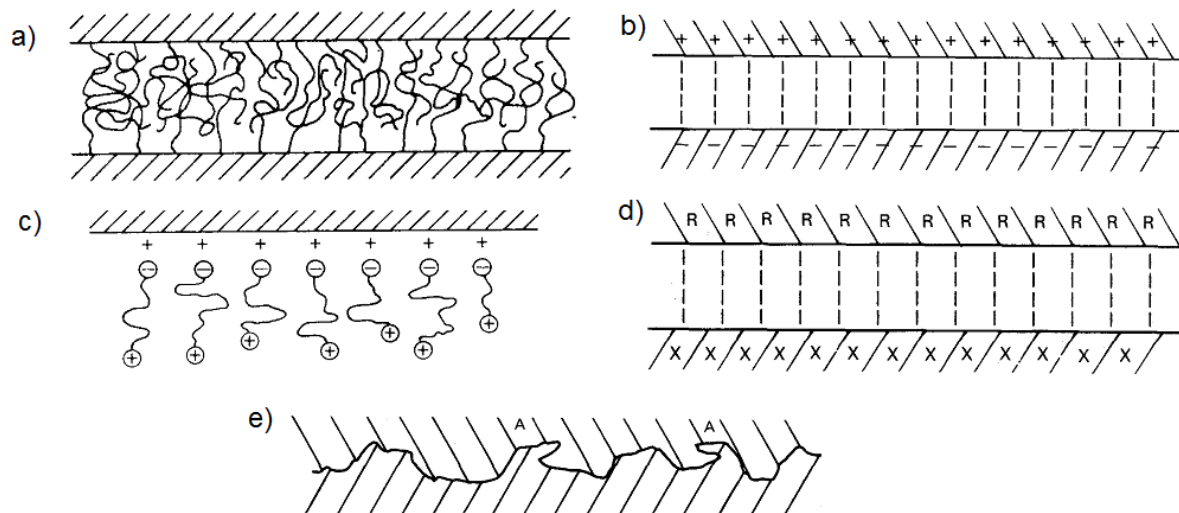


Figura 12. Interfases fibra-matriz [13]

3.3.5. Fabricación

En este apartado se pretende dar a conocer algunos de los procesos de fabricación de materiales compuestos más utilizados en la industria: fabricación manual, fabricación por vacío y fabricación por infusión. En este trabajo la fabricación se ha realizado mediante infusión.

La fabricación manual se utiliza para piezas de grandes dimensiones como pueden ser embarcaciones o carrocerías. Es el proceso más utilizado de todos debido a su bajo coste y ofrece la posibilidad de hacer laminados a temperatura ambiente sin necesidad de añadir una sobrepresión.

Sin embargo, hay que tener en cuenta que el hecho de realizar la fabricación manual tiene algunas desventajas como puede ser un acabado irregular de la superficie o un aumento de la porosidad.

Tanto en este proceso como en los siguientes hay que tener en cuenta el uso de un agente desmoldeante para facilitar la separación del molde.

En la Figura 13 se puede observar el proceso de fabricación manual.

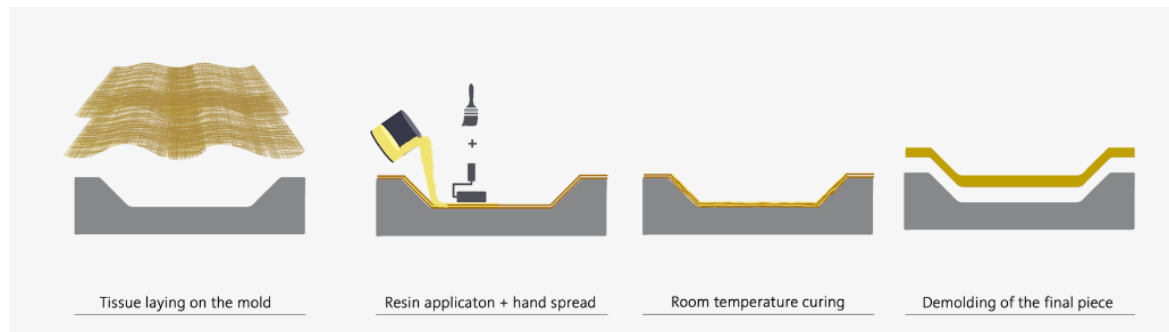


Figura 13. Fabricación manual en molde abierto [14]

Se procede colocando las capas de fibra, posteriormente se aplica la resina y se extiende manualmente. El proceso de curado se realiza a temperatura ambiente.

La fabricación por vacío (Figura 14) ofrece mejores resultados que la fabricación manual ya que al reducir la presión dentro de la bolsa se elimina el exceso de resina y compacta el laminado obteniendo un mayor porcentaje de refuerzo. Además, se consigue una disminución en la porosidad mejorando así las características mecánicas.

Este proceso de fabricación consiste en la impregnación del laminado y posteriormente aplicar el vacío. Para poder realizarlo, a diferencia del caso anterior es necesario tener bolsa de vacío y tejidos que favorezcan el desmoldeo.

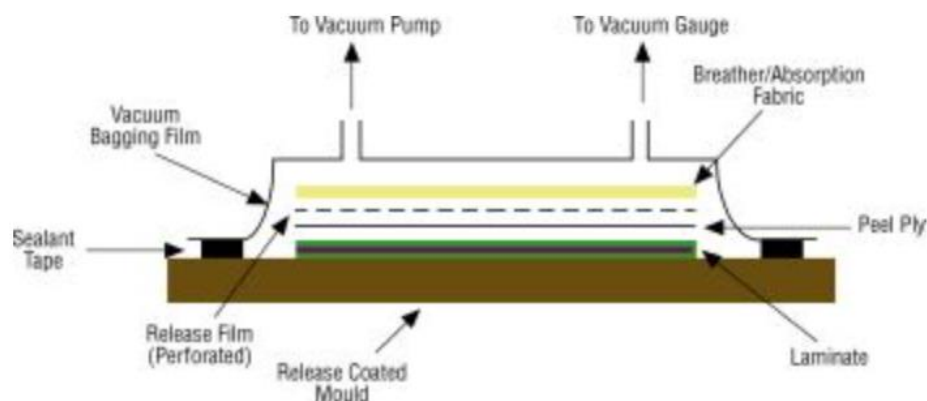


Figura 14. Fabricación por vacío [15]

La fabricación por infusión (Figura 15) cuenta con el mejor acabado de las tres tecnologías que se han tratado partiendo de un laminado seco. Primero se coloca una fibra en seco sobre un molde abierto y posteriormente se hace una bolsa de vacío

sellando todo el perímetro, se realiza el vacío y finalmente se inyecta una resina. Otra de sus ventajas es la excelente relación entre la resina y la fibra que disminuye la resina sobrante y mejora el acabado.

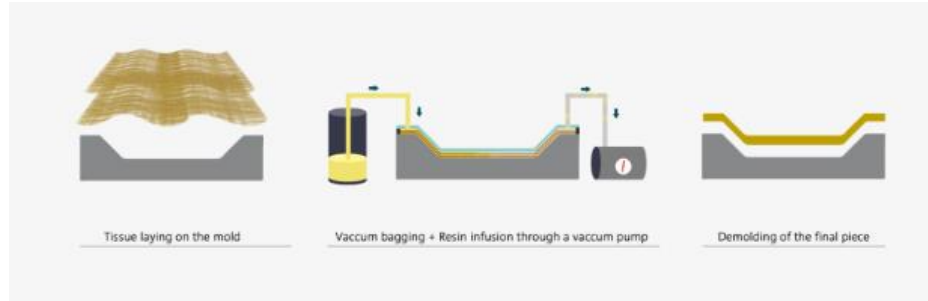


Figura 15. Fabricación por infusión [14]

3.4. Sistemas de refuerzo 3D

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

El fundamento del refuerzo 3D reside en la importancia de mejorar el comportamiento del material fibrado en otros planos diferentes a los de carga mediante fibras unidireccionales evitando así recurrir a los laminados compuestos.

3.4.1. Weaving

El sistema de refuerzo mediante weaving o tejido es utilizado sobretudo en la industria textil pero también es bastante utilizado en la industria de los materiales compuestos.

Para poder realizarlo se necesita un equipo de tejido conocido como telar que permite obtener la mayoría de las láminas en un tejido 2D, aunque también se puede utilizar para obtener un tejido tridimensional. A continuación, se muestran los distintos tipos de tejidos que se pueden utilizar en la industria:

- Tejido tradicional: se realiza mediante el entrelazado de dos conjuntos hilos: urdimbre y de trama.

Los hilos de urdimbre siguen la dirección principal de la máquina y parten de una fuente que puede consistir en una multitud de hilos colocados en un

bastidor. Estos hilos llegan direccionados al telar donde se le aplica una tensión mediante un mecanismo de elevación, creando un espacio llamado cobertizo donde los hilos de trama se insertan con un ángulo de 90° .

El patrón de tela que se obtiene va a depender de la secuencia del mecanismo de elevación para hilos paralelos y de el de la inserción de los hilos de trama.

En las siguientes figuras (Figura 16 y Figura 17) se puede observar un telar tradicional y patrones típicos de los tejidos.

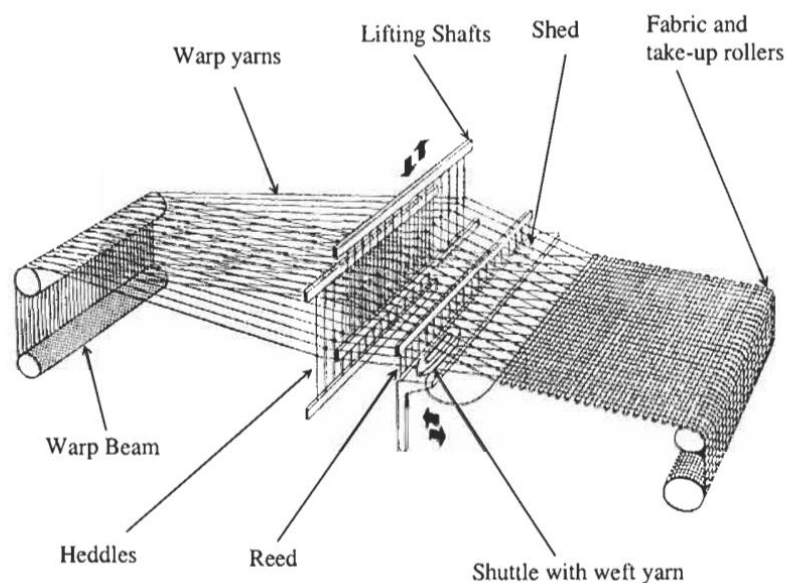


Figura 16. Telar tradicional [16]

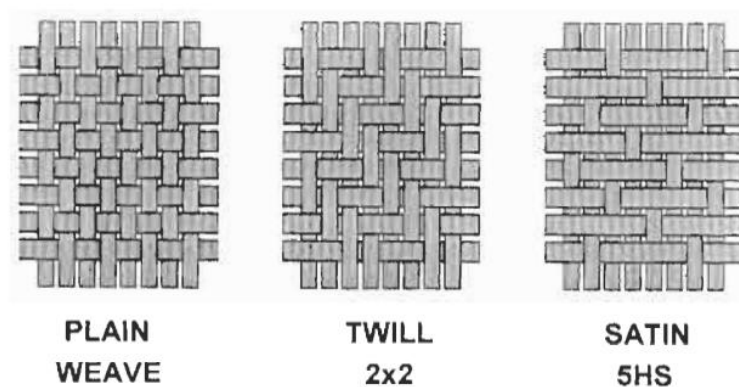


Figura 17. Patrones de tejidos [16]

- Tejido tridimensional ortogonal: este tipo de tejido cuenta con múltiples capas de hilo en paralelo por tanto el telar debe ser alimentado con una mayor cantidad de hilo (Figura 18). En este caso las secuencias de elevación e

inserción de hilos vuelven a ser vitales para la obtención de los distintos tipos de patrones (Figura 19).

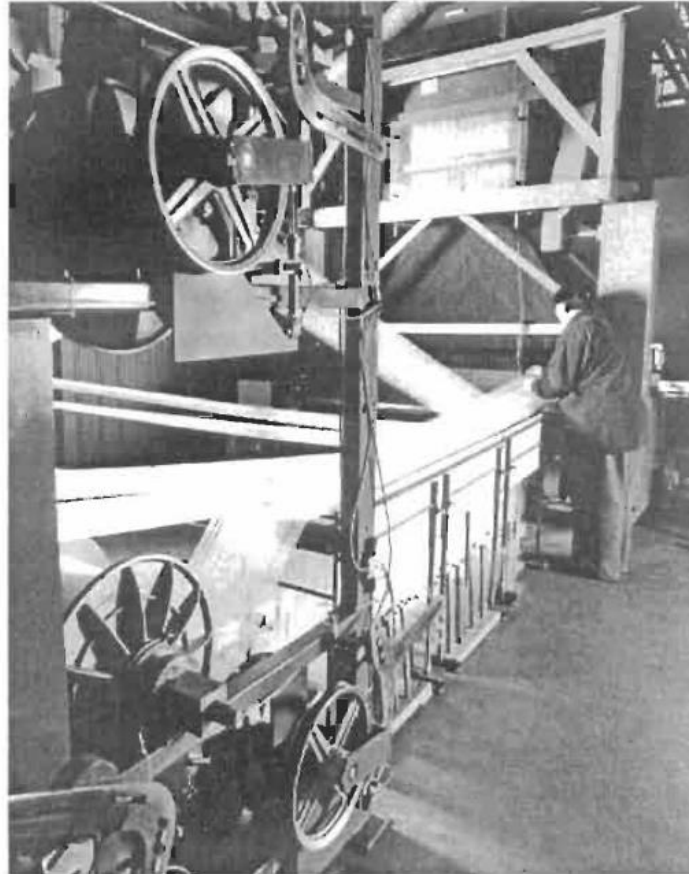


Figura 18. Telar tridimensional [16]

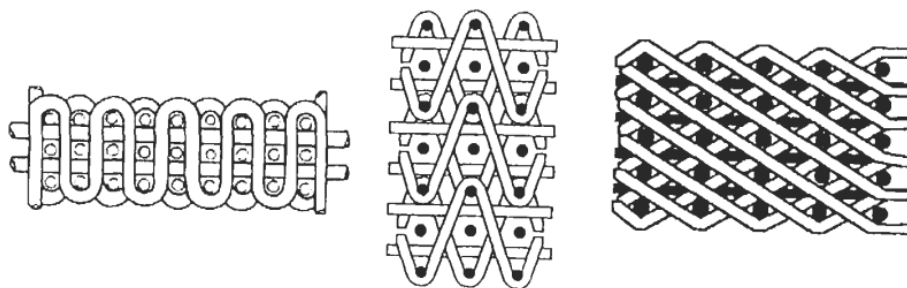


Figura 19. Patrones de tejido más importantes [16]

Programando cuidadosamente la secuencia de entrehilado en los telares convencionales se pueden obtener estructuras más complejas (Figura 20) a las telas multicapa.

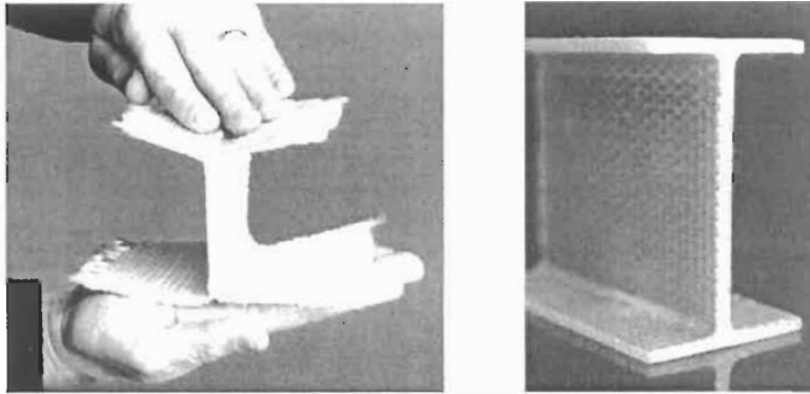


Figura 20. Estructuras tridimensionales de fibra [16]

- Tejido tridimensional no ortogonal: en este caso los hilos de trama no se insertan perpendicularmente (Figura 21) a los de urdimbre como en el caso anterior por tanto en algunas bibliografías no se considera tejido, sino que se considera estructuras “no tejidas” [17]. La orientación en la que se entrelazan los hilos está muy controlada permitiendo así la obtención de estructuras más complejas (Figura 22).

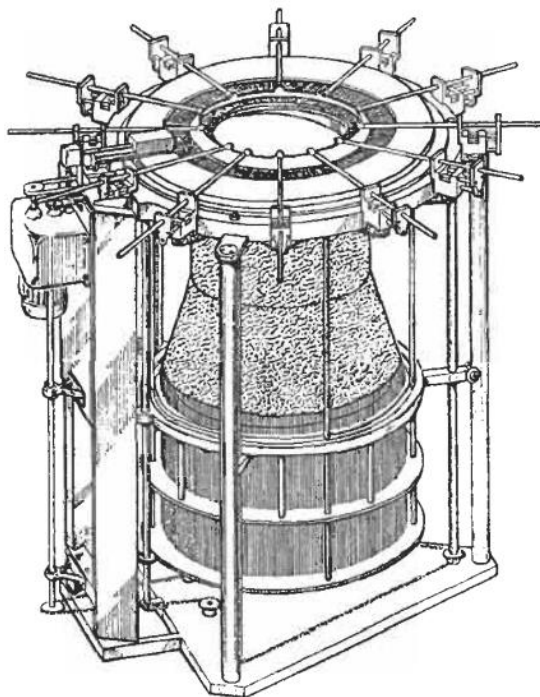


Figura 21. Producción de estructuras tridimensionales no ortogonales [16]



Figura 22. Ejemplo de estructura tridimensional no ortogonal [16]

3.4.2. Braiding

El braiding o tejido es muy conocido en el campo de la ingeniería, sobretodo en el caso de materiales fibrados. Esta tecnología se ha utilizado en artículos de alta tecnología como son las hélices de aviones o estructuras ligeras [18]. Se pueden encontrar principalmente dos tipos de trenzados: 2D y 3D.

El trenzado 2D (Figura 23) se obtiene mediante la contrarrotación de dos conjuntos de soportes de hilo alrededor de un marco circular, formando así la tela trenzada. Se pueden obtener distintos patrones de trenzado según el número de hilos, tamaño y ángulo.

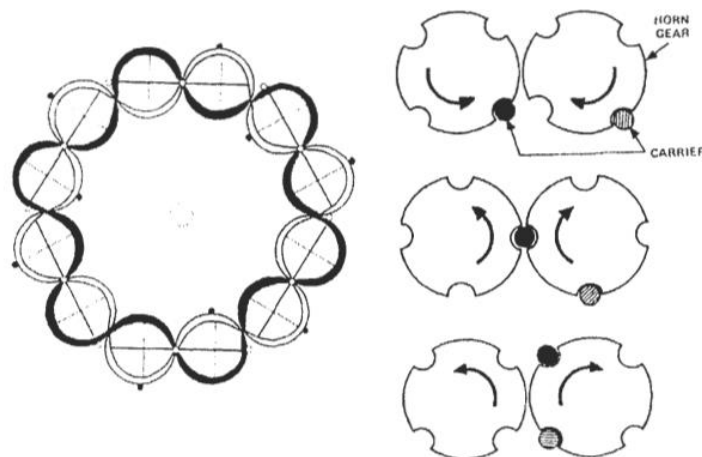


Figura 23. Trenzado 2D [16]

El trenzado 3D permite obtener estructuras de gran interés dentro de la ingeniería (Figura 24). Este tipo de estructuras generalmente se obtienen mediante la inclusión de una tela dentro de un “molde” móvil (Figura 26 y Figura 27). En la Figura 25 se puede observar la obtención de un tubo circular utilizando esta técnica.

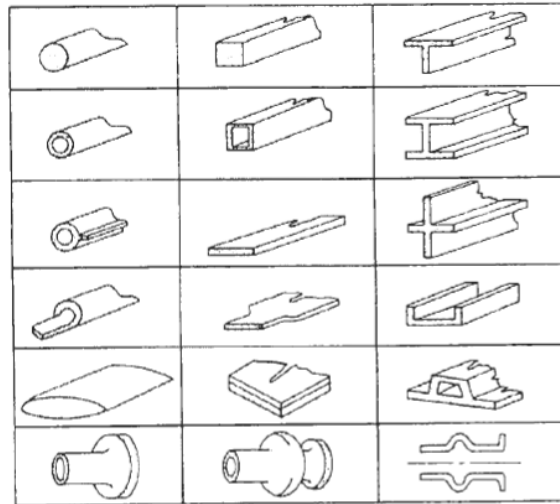


Figura 24. Ejemplos de estructuras obtenidas por trenzado 3D [19]

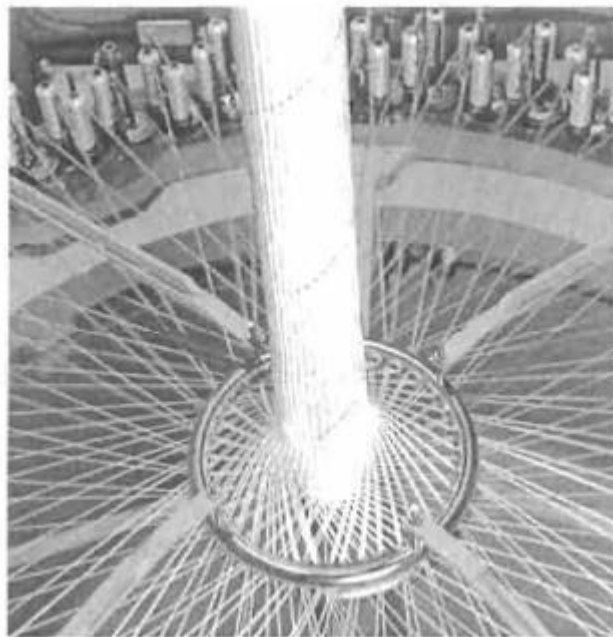


Figura 25. Trenzado de un tubo circular [16]

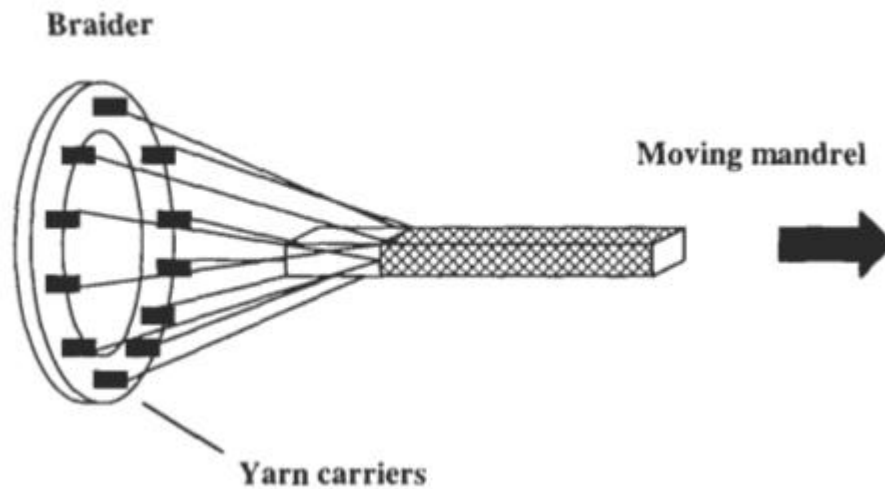


Figura 26. Esquema de trenzado mediante guía móvil [16]

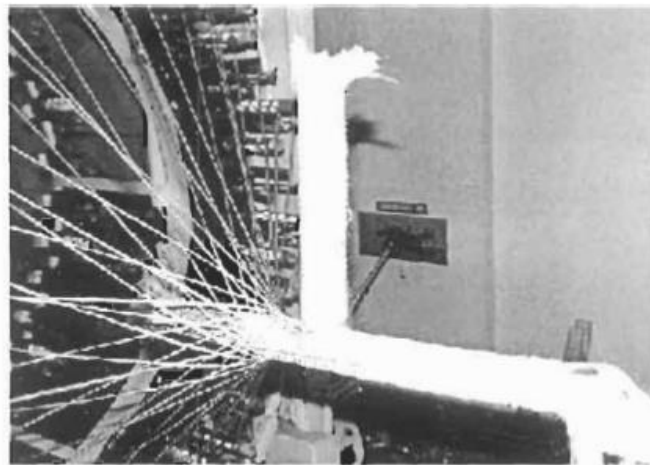


Figura 27. Trenzado con guía móvil [16]

El trenzado 3D puede realizarse en un proceso de 4 pasos o de 2 pasos. El trenzado mediante 4 (Figura 28) 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 y van de ranura en ranura siguiendo una dirección axial. El trenzado en 2 pasos (Figura 29) contiene una gran cantidad de hilos fijos en la dirección axial y un número menor de hilos trenzados. El proceso se obtiene cuando los portadores de hilos trenzados se mueven completamente entre los portadores de hilo axial.

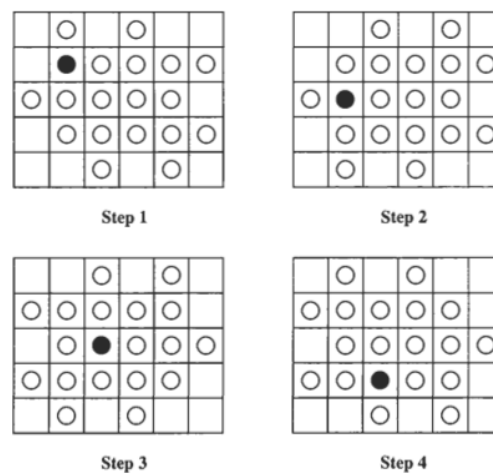


Figura 28. Trenzado 3D en 4 pasos [16]

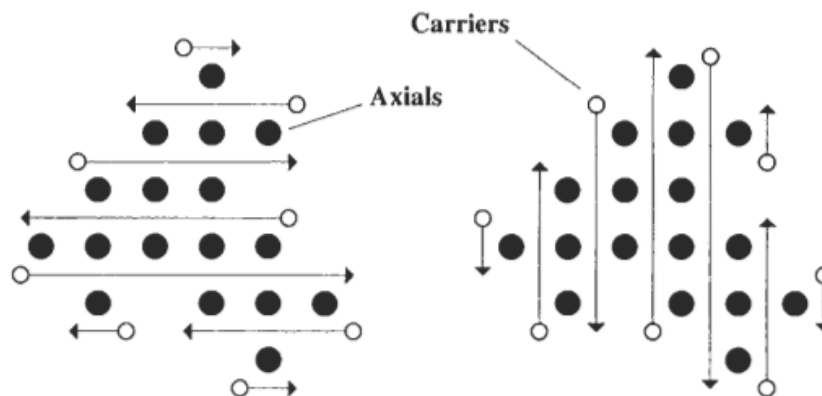


Figura 29. Trenzado 3D en 2 pasos [16]

3.4.3. Knitting

El knitting o realización de punto es una técnica poco usada, y a simple vista poco útil para utilizar en los materiales compuestos. Se pueden encontrar tres tipos de tejido a punto:

- Tejido a punto tradicional: se tiene por un lado el tejido de punto (Figura 30 a) y, por otro, el tejido de urdimbre (Figura 30 b), ambas sobre un telar convencional para obtener la estructura deseable. En la Figura 31 se observa el esquema del proceso y en la Figura 32 un producto obtenido.

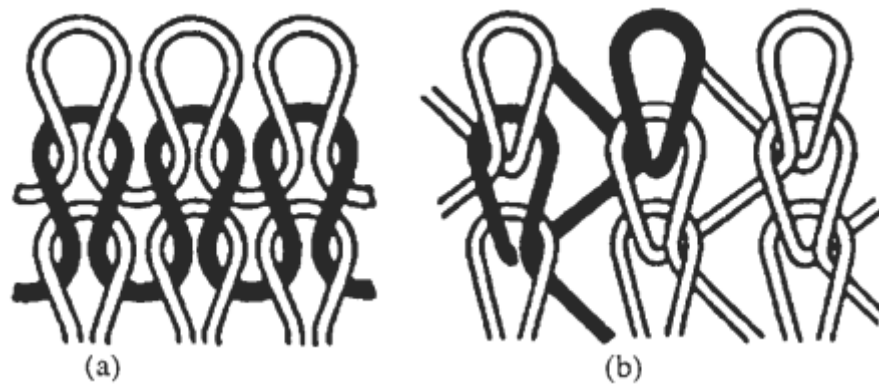


Figura 30. Tejido de punto y de urdimbre [16]

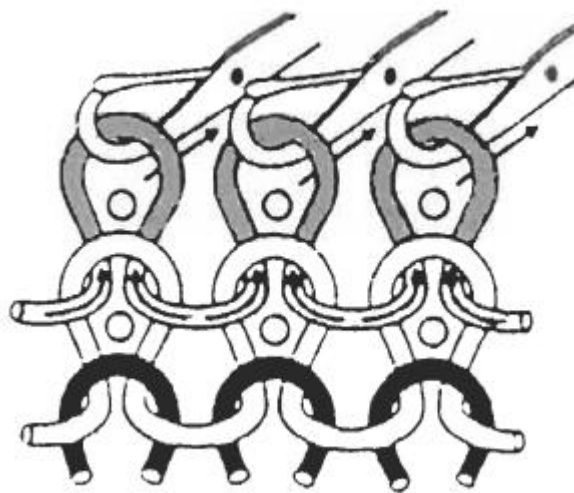


Figura 31. Esquema del tejido [16]

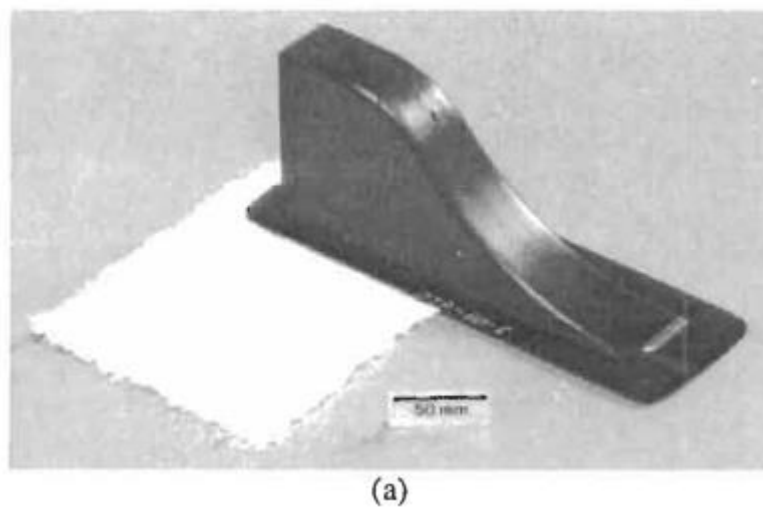


Figura 32. Bolsillos para la puerta de un helicóptero [16]

- Tejido a punto tridimensional: esta técnica no solo nos permite obtener tela plana altamente confortable, sino que también se pueden obtener formas complejas. Gracias a los avances acaecidos desde 1990 en la tecnología de la máquina como en el software es posible obtener este tipo de piezas. En la Figura 33.

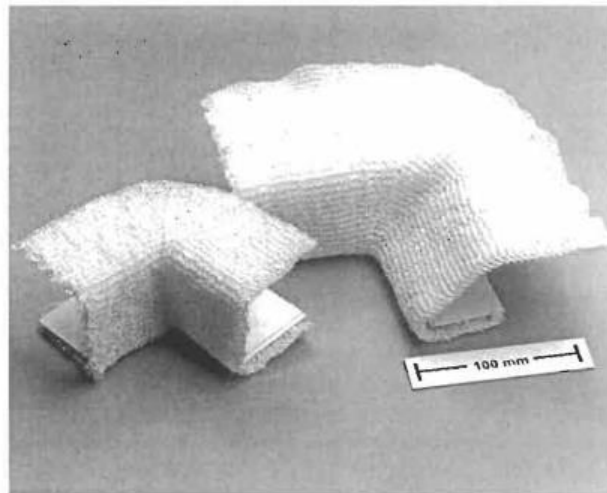


Figura 33. Ejemplos de piezas obtenidas con punto tridimensional [16]

- Telas no engarzadas: esta técnica combina aspectos del telado y del tejido a punto que puede ser conocido como tejido de deformación multiaxial o tejido no engarzado. En la Figura 34. Formación de la tela se puede ver cómo se forma la tela y en la Figura 35. Tejido obtenido con esta técnica se puede ver un ejemplo de tela obtenida con esta técnica.

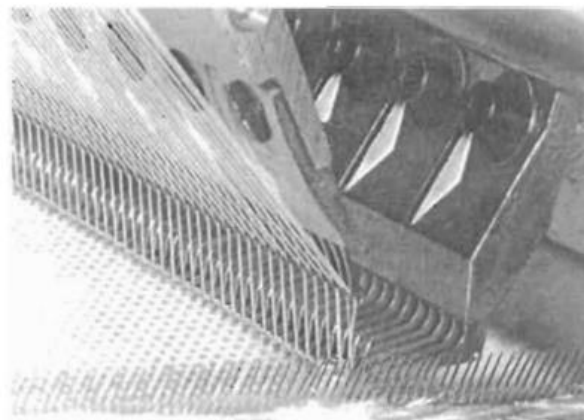


Figura 34. Formación de la tela [16]

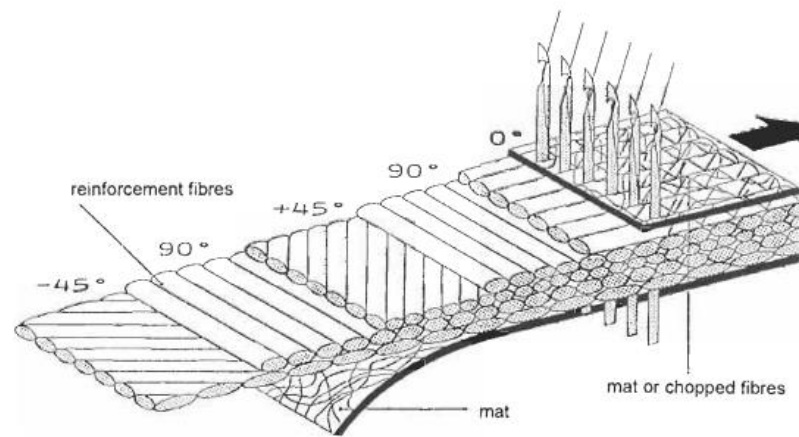


Figura 35. Tejido obtenido con esta técnica [16]

3.4.4. *Stitching*

El Stitching o cosido es el proceso textil más simple de los mencionados en este punto y el que se puede realizar a un menor coste. El proceso de costura consiste en insertar una aguja que lleva hilo de puntada a través de una pila de capas de tela.

Para poder realizar el cosido hay que tener en cuenta varios aspectos de la máquina de coser y del elemento cosido:

- La aguja de coser debe ser capaz de atravesar 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 tensión en el hilo de cosido depende sobretodo del patrón de puntada (Figura 36). El patrón de puntada va a depender de la máquina de coser, varios ejemplos se pueden observar en la Figura 37.

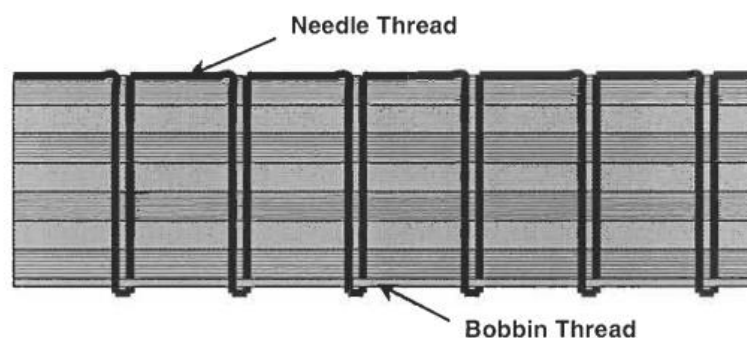


Figura 36. Esquema de patrón de puntada en un laminado [16]

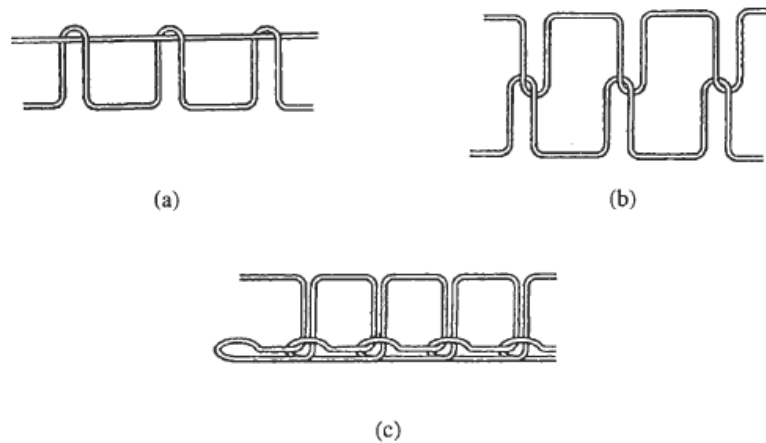


Figura 37. Configuraciones de puntada: a) bloqueo modificado, b) bloqueo, c) de cadena [20]

No solo es importante la tensión que soporta el hilo de cosido, sino también la unión que aporta esta tecnología. La calidad de la unión va a depender del tipo de cosido, y este puede ser controlado manualmente por las máquinas de coser o mediante control numérico en las más avanzadas. En la Figura 38 se pueden ver los 4 tipos principales de cosido.

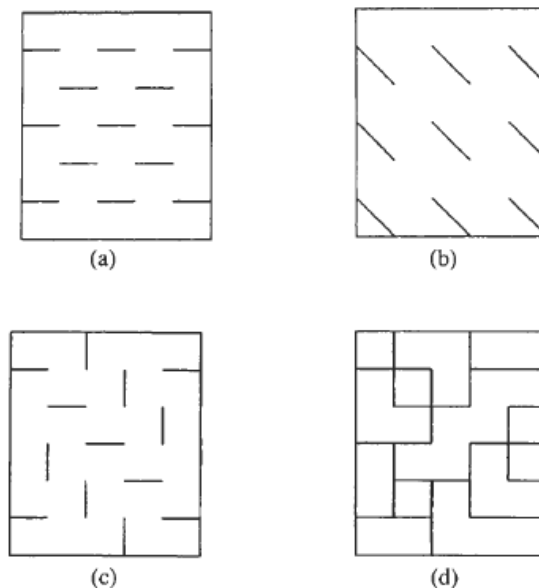


Figura 38. Tipos principales de cosido: a) longitudinal, b) diagonal, c) zigzag, d) cruzada [21]

Se ha comentado que esta tecnología es tan simple como coser diferentes capas, pero no se ha mencionado 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 va a depender sobretodo del tamaño de la máquina de coser (Figura 39).

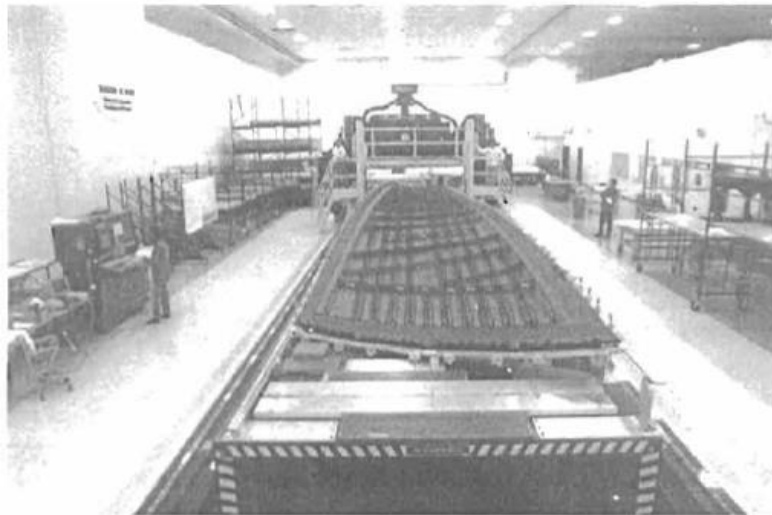


Figura 39. Máquina de coser utilizada para coser alas de materiales compuestos [22]

La flexibilidad de esta técnica también reside en la amplitud de formas que se pueden obtener mediante cosido o combinación de láminas cosidas. En la Figura 40 se puede apreciar un ejemplo de esto donde se consigue un perfil mediante dos laminados sencillos.

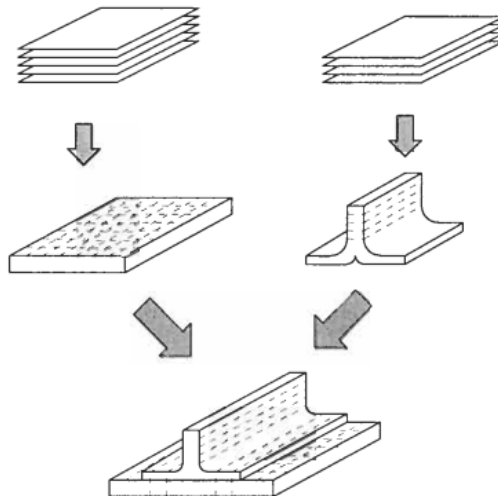


Figura 40. Obtención de un perfil mediante laminas y cosido [16]

3.5. Comportamiento mecánico de los materiales compuestos

En este apartado se van a introducir los conceptos teóricos a cerca del cálculo de las propiedades mecánicas en materiales compuestos como pueden ser: el módulo elástico o la tensión de rotura empleando para ello la regla de las mezclas.

3.5.1. Regla de las mezclas

La regla de las mezclas nos permite predecir algunas características del material compuesto como pueden ser el módulo elástico o la carga de rotura a partir de la característica que tenga la matriz ($E_m, \rho_m, \sigma_{Rm}, \dots$) y las características de la fibra ($E_f, \rho_f, \sigma_{Rf}, \dots$). Hay que tener en cuenta que las características también van a depender de la fracción volumétrica de la matriz (v_m) y de la fibra (v_f).

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

Dónde:

- V_m : volumen total de la matriz
- V_f : volumen total de fibra
- V_t : volumen de la probeta

Cumpliendo que $v_m + v_f = 1$

Sabiendo que la regla de las mezclas solo permite conocer las características cuando la carga se aplica en dirección longitudinal o en dirección transversal (Figura 41), sería necesario recurrir a las teorías del comportamiento si se quiere conocer el comportamiento del material en otros tipos de orientación.

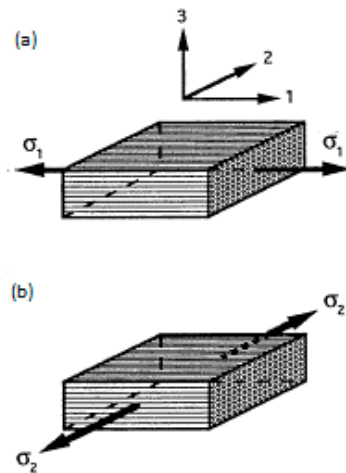


Figura 41. Distribución de la tensión según las direcciones [23]

Asumiendo condiciones elásticas, las tensiones que soportan la fibra y la matriz pueden expresarse de la siguiente manera:

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

Para poder calcular el módulo de elasticidad del material compuesto en la dirección de la carga (E_1), la tensión que soporta el material (σ_1) se puede obtener como la suma de las tensiones que soporta la fibra (σ_f) y la matriz (σ_m).

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

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

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

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

Sabiendo que las deformaciones de los elementos deben de ser iguales y que la longitud de la fibra y de la matriz son iguales al estar en la misma probeta:

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

$$\begin{cases} V_f = A_f \cdot l \\ V_m = A_m \cdot l \end{cases} \begin{cases} \frac{A_f}{A} = \frac{V_f/l}{V_T/l} = v_f \\ \frac{A_m}{A} = \frac{V_m/l}{V_T/l} = v_m \end{cases}$$

Con estas apreciaciones tenemos:

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

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

Teniendo en cuenta estas consideraciones se puede calcular ahora el módulo de elasticidad en dirección transversal a la carga (E_2) sabiendo que la probeta se encuentra sometida a la misma tensión (σ_2) y a la misma fuerza (F_2):

$$\sigma_2 = \sigma_f = \sigma_m$$

$$E_2 \cdot \varepsilon_2 = E_f \cdot \varepsilon_f + E_m \cdot \varepsilon_m$$

3.6. Conclusiones

Según los contenidos de los apartados anteriores, este trabajo se va a centrar en el análisis de un sistema tubular sometiéndolo a ensayos a tracción. El material compuesto estará formado por material de yute sobre una matriz de resina epoxi.

En cuanto al refuerzo se utilizará la técnica de stitching realizando puntadas a mano paralelas a la dirección de carga y transversales a ella. Los cosidos se realizarán usando hilo de Nylon.

Una vez realizado el ensayo a tracción se pretende conocer el módulo de Young y la resistencia a tracción y compararlos con los valores teórico.

4. Metodología y análisis experimental

4.1. Introducción

En este apartado, se desarrolla la metodología seguida para el diseño, fabricación y ensayo del sistema tubular objeto de este estudio. Una vez realizado el ensayo, los datos experimentales obtenidos se mostrarán y discutirán en el apartado 4 de este documento.

En cuanto a la fabricación y el diseño de las muestras ensayadas, se muestran los pasos seguidos, así como los materiales utilizados siendo fabricadas para este estudio dos muestras de sistemas tubulares: una con stitching y otra sin stitching.

Finalmente, respecto al ensayo se muestra el diseño, fabricación y mejoras del utillaje específico utilizado.

4.2. Fabricación de muestras

En este punto se desarrolla la fabricación de las muestras, objeto de este trabajo. En primer lugar, se habla sobre los materiales utilizados, continuando con la fabricación de las muestras incluyendo el cosido de las fibras y finalmente, la realización de la infusión.

4.2.1. Materiales

Los materiales utilizados en la fabricación han sido:

- Fibra de yute: en este trabajo se ha utilizado fibra de yute (Figura 42), del fabricante Deyute [24], concretamente esta fibra tiene un gramaje de 250 gr/cm² y 100 cm de ancho.



Figura 42. Fibra de yute

- Resina epoxi y catalizador: materiales utilizados para la fabricación de la matriz, en la Tabla 5 se pueden observar las propiedades de cada elemento, la resina epoxi utilizada ha sido la Resina Elantech 157 INF (Figura 43), adquirida al comerciante TF3P [25].

Tabla 5. Propiedades de la resina epoxi

Magnitud	Valor
Proporción de mezcla en peso	100:30
ρ (25°C) resina	1130 kg/m ³
ρ (25°C) endurecedor	1002-1006 kg/m ³



Figura 43. Resina Epoxi parte A y B

- Hilo de nylon: para el proceso de Stitching se ha utilizado hilo de Nylon (Figura 44) de módulo de Young de 3 GPa y un diámetro de 0.35 mm comercializado por BZS [26].



Figura 44. Hilo de Nylon

- Tubo de PVC: a modo de soporte y superficie sobre la que crear la geometría del sistema tubular deseado (Figura 45 y Figura 46), se han utilizado varias muestras de un tubo de PVC de 50 mm de diámetro y 3 mm de espesor, fabricado por Adequa [27].



Figura 45. Tubos de PVC



Figura 46. Unión tubular en tubo de PVC

Como se verá en el punto 4.2.6 de este documento, el tubo de PVC permanecerá en el interior de la muestra cuando se realice el ensayo. En la Tabla 6 se pueden observar algunas propiedades de dicho material, ya que afectará a la hora de realizar el ensayo.

Tabla 6. Propiedades material PVC [28]

Campo de temperatura	0 hasta +60°C
Módulo de Young (MPa)	3300
Densidad (kg/m ³)	1440
Dureza	82 Shore D

- Aguja: utilizadas en el proceso de stitching de las fibras, se han tomado dos tipos de agujas (Figura 47) usando una aguja curva para el cosido y otra plana para realizar las puntadas. Las agujas tienen un diámetro de 0.15 mm y la aguja curva tiene un radio de curvatura de 75 mm, de la marca Pony [29].



Figura 47. Aguja para realizar el cosido

- Bolsa de vacío: bolsa utilizada para realizar la infusión (Figura 48). El material de esta bolsa es de nylon y aguanta altas temperaturas, hasta los 212°C. Comprada a la tienda T3PF [30].



Figura 48. Bolsa de vacío

- Otros elementos: además de los elementos mencionados anteriormente se han utilizado otros como cinta de carrozero, bridas, cinta adhesiva, cinta de alta permeabilidad y diverso material para la circulación de resina.

4.2.2. Equipos

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

- Bomba de vacío: la bomba utilizada es la Two Stages 80 del fabricante Edward (Figura 49) que está compuesta de un control manual y tres bobas de vacío.



Figura 49. Bomba de vacío

- Trampa de vacío: utilizada para evitar que la resina acceda a la bomba de vacío. Es de la marca Airtech, modelo de 5 litros (Figura 50).



Figura 50. Trampa de vacío

- Microscopio de mano: utilizado para obtener detalles de algunos cortes realizados a las muestras, en concreto, se ha utilizada un microscopio de la marca PCE Instrumental, modelo PCE-MM200 (Figura 51)



Figura 51. Microscopio de mano

- Otros equipos: además de los equipos mencionados se han utilizado algunas máquinas del taller mecánico como el torno, la fresadora o la sierra. Adicionalmente, se ha utilizado otros equipos más sencillos como las tijeras, la sierra de mano o limas de diferentes gramajes.

4.2.3. Seguridad en la fabricación

Hay que tener en cuenta que en todo tipo de trabajo la seguridad es de gran importancia para prevenir futuros riesgos. Por tanto, teniendo en cuenta que para realizar estas muestras se han utilizado productos químicos, la seguridad que se ha tomado ha sido de manera individual. Los elementos utilizados (Figura 52) han sido los siguientes:

- Gafas: evita la caída de algún sólido o la irritación ocasionada por el gas que se desprende en la reacción química entre la resina y el catalizador.
- Mascarilla: protección básica del aparato respiratorio que prevé las inhalaciones de agentes perjudiciales.
- Guantes: elemento de protección individual para prevenir el contacto con agentes irritantes sobre la piel.
- Bata: protege de posibles derrames.



Figura 52. Equipos de protección individual [10]

4.2.4. Fabricación del molde

Para poder realizar las muestras, previamente se fabrica un molde que consiste, en un tubo continuo de 260 mm al que se le intersecta otro tubo de 240 mm (Figura 45). Como se puede observar en la Figura 46 el tubo superior ha sido mecanizado

con una forma específica para asegurar que se amolda perfectamente al tubo inferior y así evitar que queden huecos entre ambos.

En la Figura 53 se puede ver un esquema de cómo sería el molde que se desea fabricar.

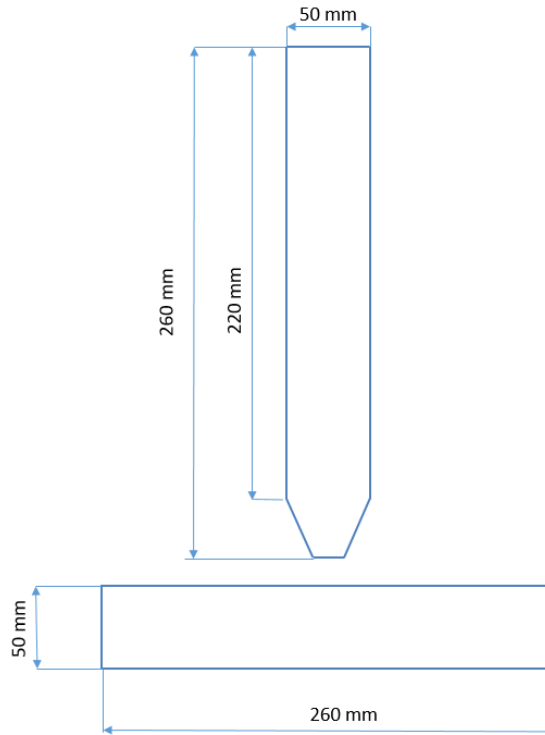


Figura 53. Esquema molde

4.2.5. Fabricación de muestras

Como se ha indicado previamente, se han fabricado dos muestras tubulares: una sin stitching y otra con stitching.

En la Figura 54 se puede observar el esquema inicial de cómo quedarán las muestras una vez realizada. Como se puede ver la fibra no llega hasta los extremos para así tener espacio donde agarrar la bolsa a la hora de realizar el vacío.

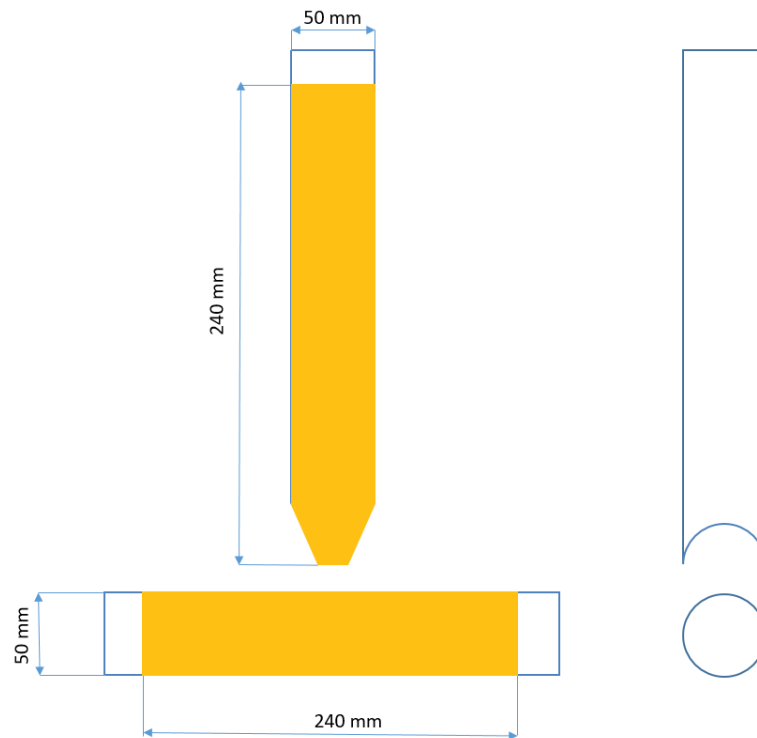


Figura 54. Esquema de la muestra

Para realizar la fabricación y con ayuda de los tubos de PVC para poder conseguir la forma, se debe enrollar una capa continua de fibra alrededor del tubo hasta conseguir 4 capas para conformar cada uno de los tubos que lleva la unión. Para poder fijar la forma mientras se realiza la fabricación, se coloca cinta de carroceros al final de la fibra para evitar que se deslice. En las siguientes figuras (Figura 55 y Figura 56) se muestran la formación de cada uno de los tubos.



Figura 55. Tubo horizontal con fibra



Figura 56. Tubo vertical con fibra

Como se puede observar en la Figura 45 y en la Figura 56 al tubo vertical se le tienen que hacer dos ranuras para poder acoplarlo al tubo horizontal perfectamente, por tanto esas mismas ranuras deben de ser realizadas también en la fibra para poder acoplarlo sin ningún problema.

En la siguiente figura se puede observar cómo quedan los dos tubos ensamblados:



Figura 57. Colocación del sistema tubular

En la Figura 57 se puede ver como al sistema le falta sujeción en la unión por tanto, se debe colocar una falda formada por 4 capas circulares de fibra (Figura 58). Las capas que se colocan tienen un diámetro de 12 cm y en el centro de estas se realiza una apertura en forma de cruz para facilitar la colocación. Posteriormente, será el lugar donde se realice el cosido.

En las Figura 59 y Figura 60 se observan cómo quedan las capas de la falda colocadas en el tubo.



Figura 58. Capas circulares de fibra

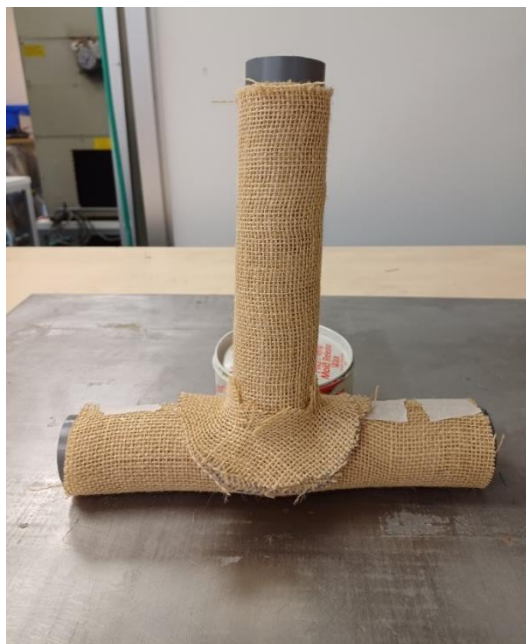


Figura 59. Sistema tubular con la falda de fibras



Figura 60. Detalle de la falda

Para conseguir que el tubo vertical se amolde perfectamente al tubo horizontal y que luego todo el sistema internamente quede hueco, se dibuja la forma del tubo vertical en el otro quedando como se observa en la Figura 61.

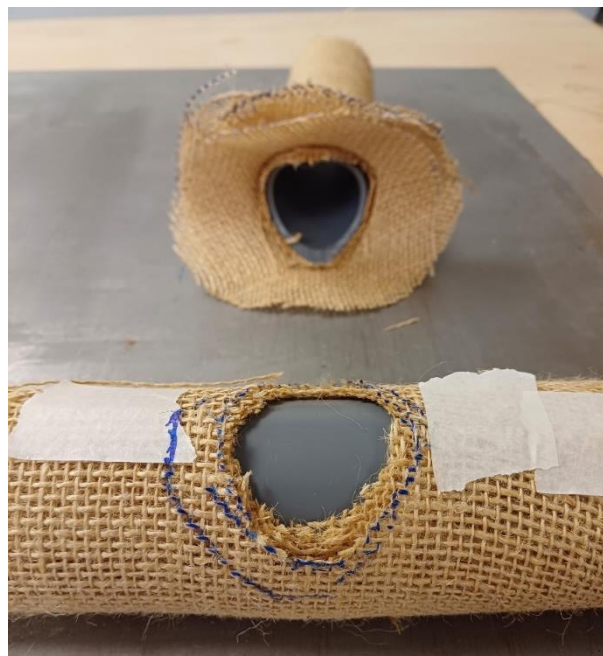


Figura 61. Detalle de la unión internamente

Llegados a este punto, una de las muestras ya se encuentra preparada para ser infundida mientras que la otra debe de ser cosida como se podrá observar en el siguiente punto.

4.2.6. *Cosido*

Como se ha mencionado previamente, debido a la complejidad de la muestra el cosido no se puede realizar con una máquina de coser, sino que las puntadas tienen que ser hechas a mano.

Para realizar el cosido se quitan los tubos de PVC para facilitar el cosido y la entrada de la aguja en las diferentes partes.

Primero se realiza el cosido de la parte superior de las faldas con el tubo vertical (Figura 62 y Figura 63). Las puntadas se tienen que realizar en la misma dirección de la carga utilizando una aguja plana para mayor comodidad (Figura 47), en este caso se tiene una separación entre puntada de medio centímetro y también entre líneas de cosido.



Figura 62. Cosido de la parte superior con la falda



Figura 63. Detalle del cosido superior

Una vez realizado el cosido de la parte superior se realiza el cosido inferior con puntadas paralelas a la forma de la falda (Figura 64 y Figura 65), en este caso se utiliza la aguja curva (Figura 47) debido a la curvatura de la fibra.



Figura 64. Cosido de la parte inferior



Figura 65. Detalle del cosido inferior

Finalmente, para reforzar el cosido de la muestra se realizan puntadas en dirección de la carga desde la parte inferior de la falda hasta el tubo superior (Figura 66), pasando por encima de las puntadas ya hechas para así reforzarlas. En la Figura 67 se observa el estado final de la muestra tras realizar el cosido.



Figura 66. Detalle del cosido de refuerzo

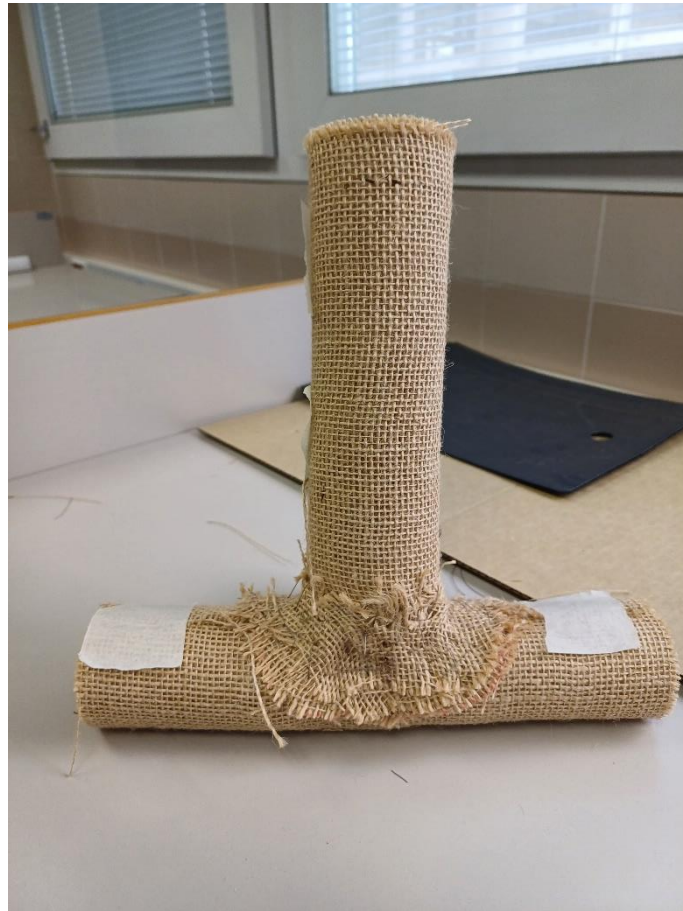


Figura 67. Muestra final tras el cosido

4.2.7. *Infusionado de las muestras*

Previamente a la infusión las muestras deben de ser preparadas, para ello se coloca una tira de un tejido de alta permeabilidad en cada una de los extremos sujetado con bridas para así facilitar que la resina se distribuya de manera uniforme por todos los lados. Además, se colocan tres codos, uno en cada una de los extremos. Por estos codos entrará y saldrá la resina sobrante durante el proceso de infusión (Figura 68 y Figura 69).

Para poder desmoldar la muestra y sacar los tubos de PVC una vez finalizado el proceso de infusión se ha de aplicar un agente desmoldeante a cada uno de los tubos.

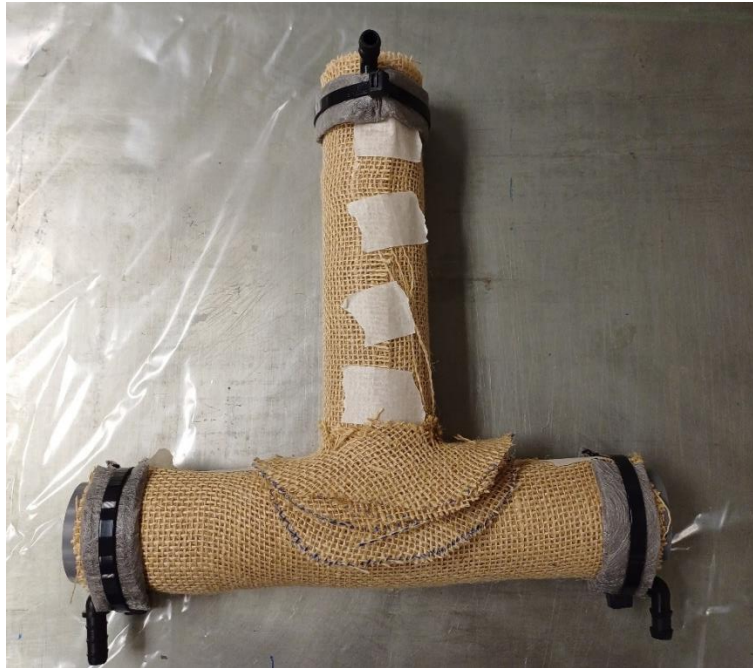


Figura 68. Muestra preparada para infundir



Figura 69. Detalle tira alta permeabilidad

Para realizar la infusión, hay que destacar la importancia del plástico con el que se va a realizar la bolsa (Figura 48) ya que debe de ser un plástico que aguante altas temperaturas porque la resina epoxi alcanza altas temperaturas durante el proceso de curado.

Para poder realizar la bolsa de vacío es necesario usar cinta adhesiva asegurando la estanqueidad del sistema y así asegurar el vacío durante el proceso de infusión.

En la Figura 70 se muestra el estado final de la bolsa de vacío para una de las muestras, destacando que la parte superior será la zona de entrada de la resina mientras que por las dos tomas de la parte inferior se realiza el vacío.



Figura 70. Bolsa de vacío con la muestra

Destacar que el extremo del tubo superior se encuentra sometido al vacío dentro de la bolsa mientras que en los extremos del tubo inferior se deben de encontrar a presión atmosférica:

Con la bolsa ya realizada y una vez que se ha comprobado que se obtiene vacío en todos los puntos se pueden colocar los tubos de la parte inferior que van a la trampa de vacío y el tubo en la parte superior para introducir la resina.

Con todos estos pasos realizados ya se puede proceder a realizar la infusión, en la Figura 71 se puede ver el proceso de avance de la resina por la muestra en dos momentos concretos.



Figura 71. Proceso de infusión

Cabe destacar, que tras realizar la infusión a la primera muestra, se observó que en el extremo superior se ejercía demasiado vacío llegando a romperse la bolsa, por tanto, para la segunda infusión se decidió introducir un nuevo perfil de plástico (Figura 72) en el interior del tubo para así solventar dicho problema.



Figura 72. Perfil de plástico en el interior del tubo

Durante el proceso de infusión, la resina entró por la unión de los dos tubos de PVC siendo imposible desmoldar la pieza. Por tanto, se observará como las muestras llevan en su interior dichos tubos para los ensayos variando así el plan original de ensayo para lo que, en consonancia, se modificará el utillaje como se expondrá en el punto específico de este proyecto. Aunque se incluya desmoldeante, las altas

temperaturas pueden provocar que este se degrade, además, la resina+fibra ejercen una elevada presión haciendo que ambos hechos dificulten la extracción del tubo.

Sin embargo, esto no supone un alejamiento de la realidad en cuanto a la fabricación se trata ya que en un entorno industrial hay veces en las que se asume que el molde quedará dentro de la muestra. Este hecho abre una posibilidad de estudio de cara a futuros proyectos para conseguir extraer el molde de la muestra.

4.2.8. Muestras resultantes

En este punto se puede ver el estatus final de las muestras después del proceso de curado, tras pasar por la cámara climática.

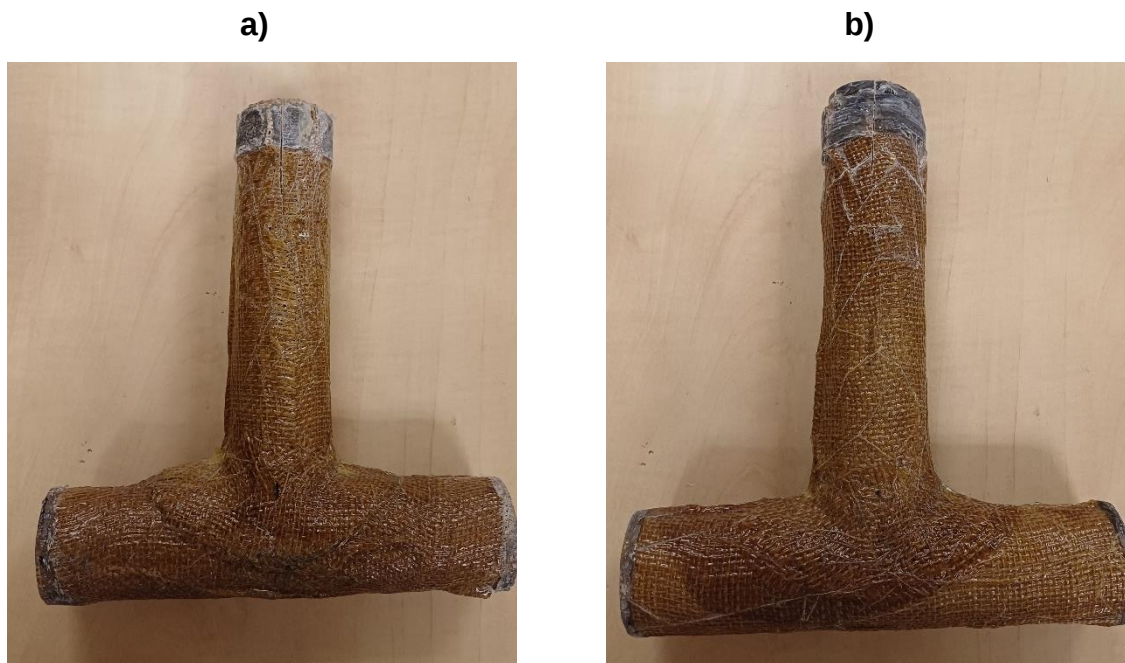


Figura 73. Muestras una vez finalizado el proceso de curado, a) sin stitching, b) con stitching

Como se puede observar en la Figura 73, se han cortado los extremos de las muestras para prepararlas para el ensayo.

Se realiza una tercera muestra, con stitching, la cual no se ensaya, pero se le realizan algunos cortes para obtener su sección (Figura 74 y Figura 75).



Figura 74. Muestra con stitching seccionada



Figura 75. Detalle sección

En el siguiente apartado, los recortes se han observado en el microscopio para ver el estado de las fibras en condiciones normales y también algunos defectos.

4.2.8.1. Análisis microscópico

Los recortes que se realizan a las muestras se observan con el microscopio para ver algunos defectos existentes o también el estado de la fibra en condiciones normales.

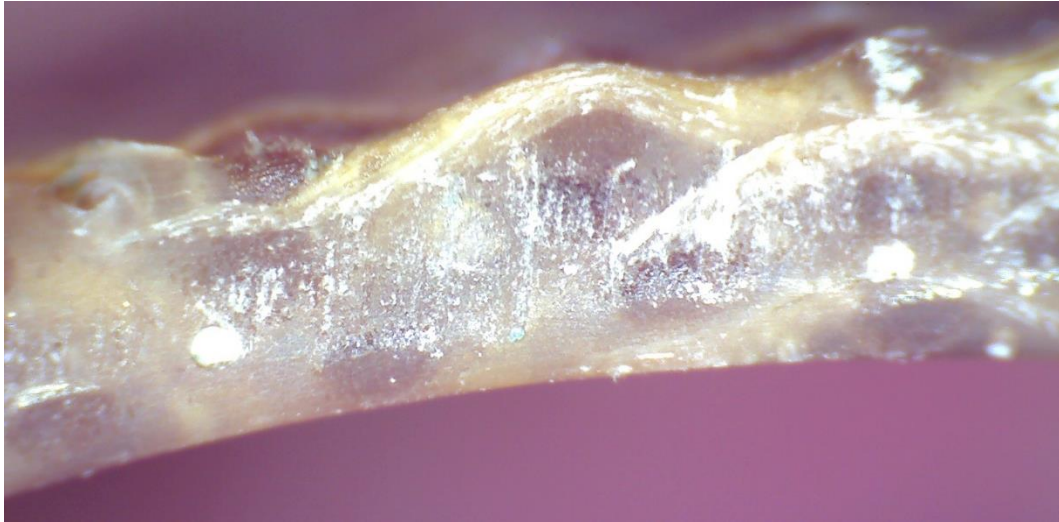


Figura 76. Condiciones normales de la fibra

Tal y como se puede ver en la Figura 76, al cortar la muestra por una zona alejada a los extremos, se observa como la fibra mantiene un comportamiento estable con algunos poros pero con todas sus fibras bien compactadas.

Sin embargo, en las siguientes figuras se pueden ver algunos defectos que se obtienen en los recortes de los extremos de las muestras.

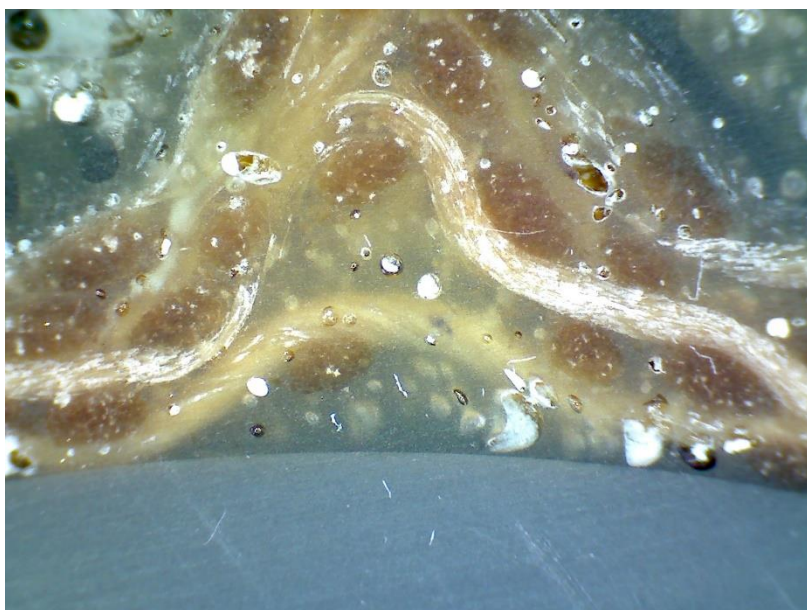


Figura 77. Defecto de pliegue

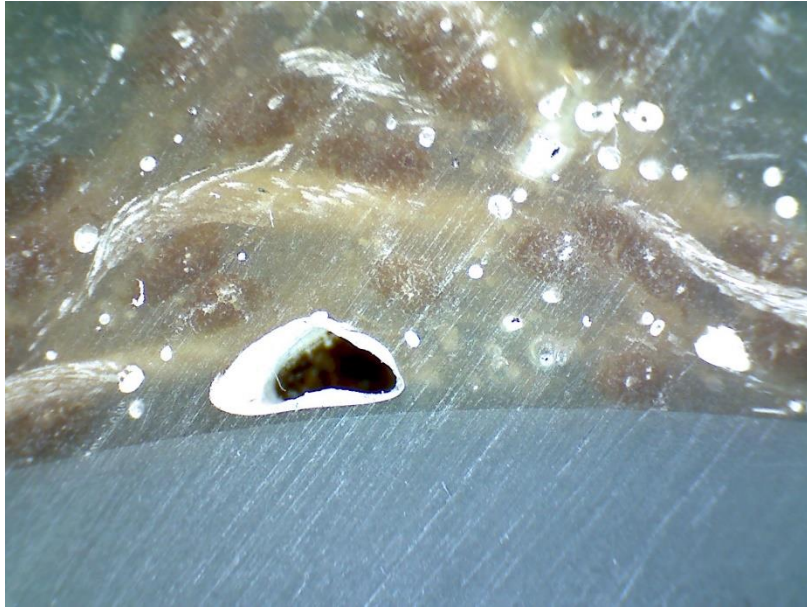


Figura 78. Huecos y poros

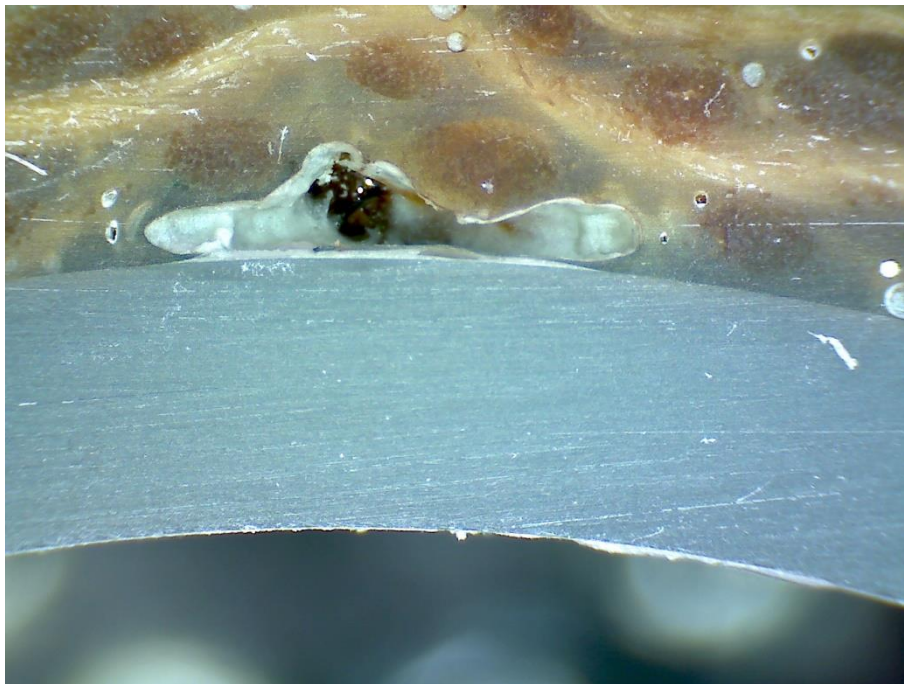


Figura 79. Hueco y despegue del molde

Como se observa en la Figura 77 se pueden encontrar varios pliegues a lo largo de los recortes como consecuencia de la cinta de alta permeabilidad que, al ser colocada sobre la muestra, dobla alguna capa de fibra.

En la Figura 78 y Figura 79 se observan varios poros y huecos que pueden ser debido a que previamente a la infusión la bolsa se encuentra llena de aire y si en

algunas zonas el paso de la resina se realiza demasiado rápido no se llega a eliminar el aire existente por completo [31].

4.3. Fabricación del útil de ensayo

En este apartado se detalla el diseño y fabricación del útil para realizar el ensayo. Posteriormente, se detallarán las modificaciones que ha sufrido durante el proceso de ensayo.

En el apartado 8 “Anexo I” de este documento se pueden ver los diferentes planos utilizados para la realización del útil.

4.3.1. Concepto inicial

Como concepto inicial se plantea el que se observa en la Figura 80. En él se puede ver como inicialmente se plantea una parte inferior del útil muy parecida a la que finalmente se realiza (Figura 83 y Figura 100) donde tanto la placa inferior como la pletina de agarre a la máquina se realizan en piezas individuales en vez de ser soldadas al conjunto.

En cuanto a la parte superior del útil, inicialmente se plantea una idea bastante parecida a la que realmente se diseña posteriormente (Figura 81) donde la pletina superior de agarre a la máquina finalmente se diseña como una pieza maciza que se unirá al tubo mediante unos tornillos.

En la figura también se puede observar cómo quedará finalmente la muestra una vez colocada en el útil y como se planteó inicialmente el concepto de las faldas para unir ambos tubos, aunque a la hora de fabricación se realiza con forma circular (Figura 58) por facilidad para colocarlas.

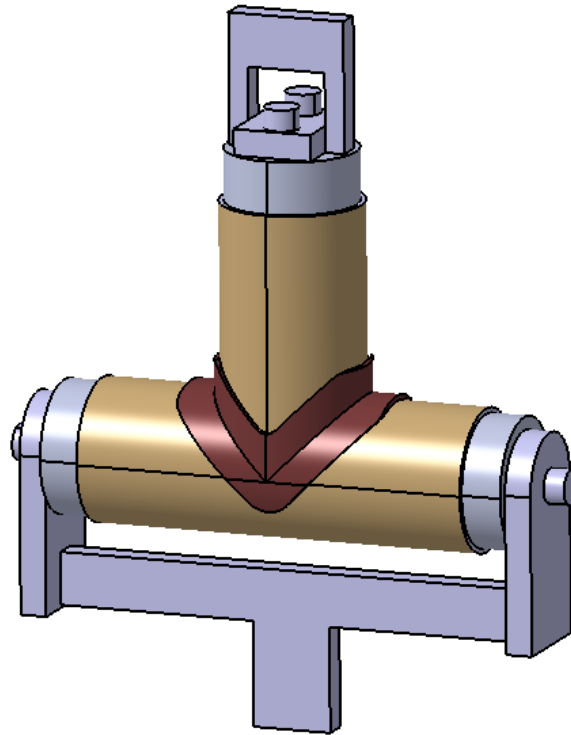


Figura 80. Diseño inicial útil

En cuanto a la parte superior del útil, se parte de la idea de hacer un tubo macizo con una pletina. Previamente, la pletina se iba a unir al tubo mediante 4 tornillos (Figura 81) pero a la hora de fabricarla es más práctico hacerlo todo en una misma pieza, con la pletina soldada al tubo (Figura 82).

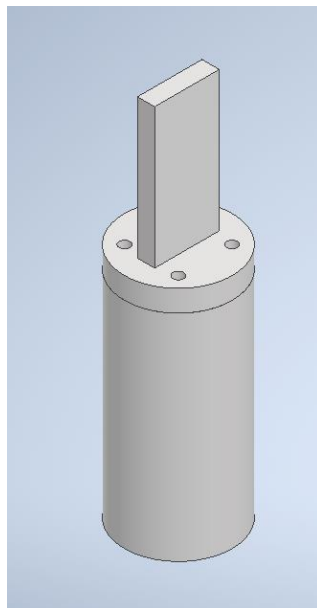


Figura 81. Diseño parte superior útil



Figura 82. Parte superior del útil

En cuanto a la parte inferior del útil (Figura 80), se decide fabricar un conjunto formado por:

- Cilindro macizo que atraviese la zona inferior del conjunto tubular
- Zona de anclaje inferior donde va enganchada la pletina de enganche a la máquina.
- Dos placas que hacen de unión entre el cilindro y la zona de anclaje

La función de esta parte del útil es la de proporcionar la mayor estabilidad a la parte inferior de la muestra distribuyendo de manera uniforme las tensiones a la hora de realizar el ensayo para así evitar los concentradores de esfuerzos.

En las siguientes figuras (Figura 83 hasta Figura 86) se puede ver el diseño que se realiza para todo el conjunto, para ello se hace uso del software “Autodesk Inventor” bajo licencia de uso estudiantil.

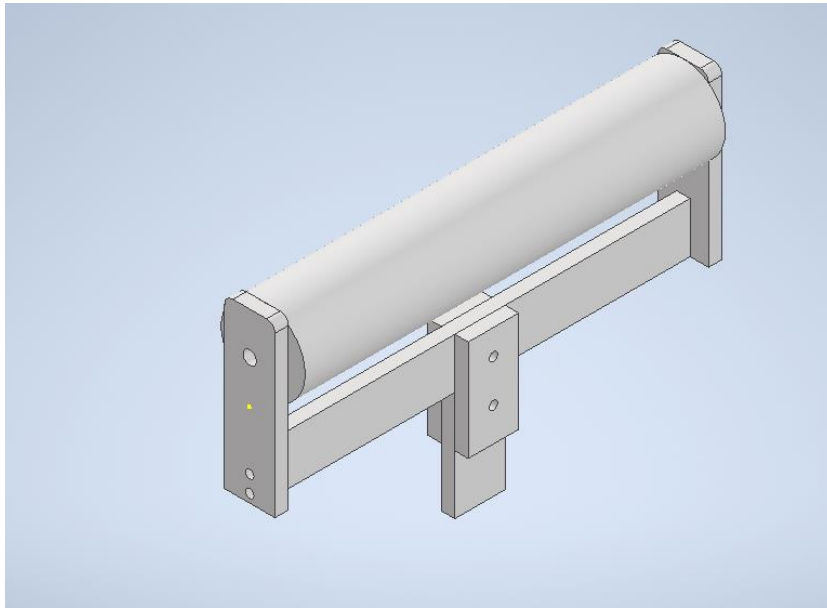


Figura 83. Diseño parte inferior útil



Figura 84. Cilindro macizo útil



Figura 85. Perfil inferior del útil



Figura 86. Placa de agarre útil inferior

Tal y como se puede ver en la Figura 83 se decide colocar el perfil inferior en esa posición para así tener mayor momento de inercia.

4.3.2. Mejoras durante el proceso de ensayo

En este punto se va a ver los diferentes cambios que ha experimentado el útil a la hora de realizar el ensayo.

Como se ha indicado en el punto 4.2.7 de este documento, los tubos de PVC permanecen dentro de la muestra y teniendo en cuenta que el cilindro macizo tiene un diámetro de 50 mm se tiene que rebajar dicho diámetro. Para ello, se usa el torno (Figura 87) ubicado en el taller mecánico de la Universidad de Jaén.



Figura 87. Torno con el cilindro

Cuando se realiza el ensayo se observa que al alcanzar los 3 kN de carga se produce un deslizamiento de la muestra con respecto al útil.

Como se puede ver en la Figura 88 se tiene que aumentar la rugosidad en el útil superior para impedir que deslice dentro de la muestra cuando se realiza el ensayo.



Figura 88. Útil superior con mayor rugosidad

Además de aumentar la rugosidad, también se llena el interior del tubo de PVC con un adhesivo para PVC y metal (Figura 92 y Figura 93).

Con estas mejoras, se observa que la muestra aguanta hasta los 12 kN que se vuelve a producir deslizamiento sin llegar a romper la muestras. Es por ello, que se decide hacer 6 agujeros ciegos a la muestra (útil incluido, Figura 89) para colocar 6 tornillos (Figura 101) de métrica 6 con arandelas para asegurar una mejor distribución de los esfuerzo. De esta manera, se asegura que la muestra ya no desliza por el útil.

Como se puede ver en la Figura 94 en la última abrazadera no se colocan tornillos para no dañar la muestra.

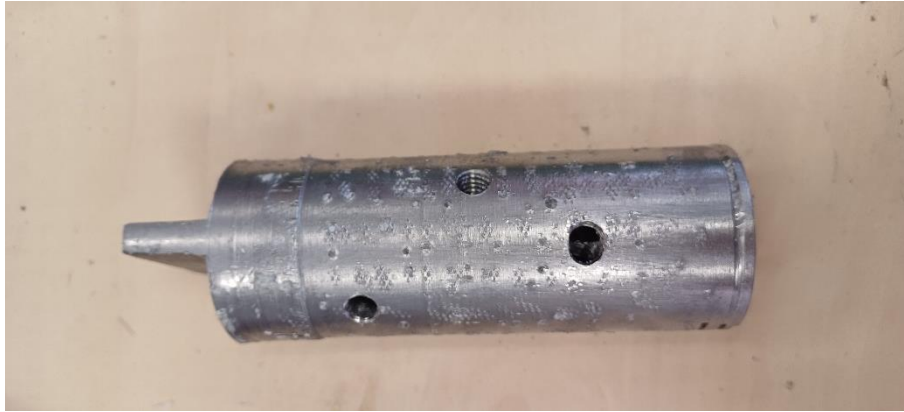


Figura 89. Útil superior con agujeros

4.4. Puntos de mejora

En este punto se van a destacar los procesos de mejora que se llevan a cabo durante la realización del ensayo.

La primera modificación que se realiza en la muestra es la de realizar dos incisiones cortas en la parte superior del tubo (Figura 90) para así permitir que las abrazaderas pudieran apretar la muestra al útil.



Figura 90. Detalle de la incisión

La primera modificación que se realiza es la de aumentar la rugosidad superficial del útil superior (Figura 88) y además pegar el tubo con un material adhesivo para así evitar que el cilindro del útil superior deslice dentro del tubo al aplicar la carga debido a que el agarre que realizan las abrazaderas no es suficiente.

Como adhesivo se utiliza el de la marca Quilosa, concretamente el Instant Strong (Figura 91) de secado rápido que aguanta hasta 400 ton/m² que asegura un secado rápido en 20 minutos.



Figura 91. Adhesivo utilizado



Figura 92. Mejora del sistema de ensayo con adhesivo



Figura 93. Detalle del adhesivo dentro del tubo

Sin el adhesivo, a los 3 kN se observa como la muestra se desliza del tubo mientras que con el adhesivo a los 12 kN se vuelve a producir deslizamiento sin llegar a romper la muestra, por tanto, se decide atravesar la parte superior de la muestra, donde se encuentran las bridas para así evitar que la muestra vuelva a deslizarse del útil.



Figura 94. Detalle de las abrazaderas con tornillos

Como se observa en la Figura 94 se deja libre la última la abrazadera para así liberar esa zona de tensiones y evitar que rompa la muestra por esa zona.

Con esta última modificación a la muestra se consigue realizar el ensayo hasta la rotura.

4.5. Definición de ensayos

En este punto se van a tratar los aspectos más importantes sobre el ensayo a realizar.

4.5.1. Normativa

Dado que no existe una normativa que indique como deben de ensayarse las uniones de tubos, se plantea como solución emplear el útil fabricado en el punto 4.3 de este documento.

En cuanto a la caracterización de los materiales compuestos por parte de los fabricantes son los estándares ASTM, concretamente la ASTM D638 [32] y la ASTM D3039 [33]. Ambas normativas son para realizar ensayos de tracción.

En este ensayo la norma de referencia es la ASTM D3039 [33] debido a las referencias acerca de los materiales compuestos. Al ser este ensayo muy parecido al de tracción se ha tomado 2 mm/min como valor de velocidad.

4.5.2. Metodología de ensayo

La metodología viene definida en la normativa mencionada anteriormente, donde se especifica el equipamiento, la velocidad de ensayo o la manera de calcular las propiedades mecánicas.

La velocidad del ensayo se encuentra definida en el punto 11.3 de la normativa y se toma un valor igual a 2 mm/min. Además, mediante la correlación digital de imágenes se va a controlar el desplazamiento de la muestra en diferentes puntos.

4.5.3. Equipos de ensayo

Para realizar el ensayo se hará uso de los siguientes equipos que se encuentran en el laboratorio de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Jaén.

- Máquina de tracción: máquina hidráulica (Figura 95) de la marca MTS 370.10 dónde se realizarán los ensayos. Esta máquina es aplicar hasta 100 kN en régimen dinámico y 120 kN en estático.



Figura 95. Máquina de tracción hidráulica

- PC controlador de los ensayos y DIC (Digital Image Correlation): un ordenador contiene el software de control de la máquina de tracción mientras que el otro controla las cámaras (Figura 96).



Figura 96. Ordenadores utilizados durante el ensayo

Para la realización de la correlación digital de imágenes se han usados dos cámaras de la marca Stingray, modelo F504B A56.

- Cámara digital: videocámara Canon 600D encargada de realizar videos durante el proceso de ensayo para después poder visualizar el momento de la rotura.

En la Figura 97 se puede observar el setup que se realiza para el ensayo.

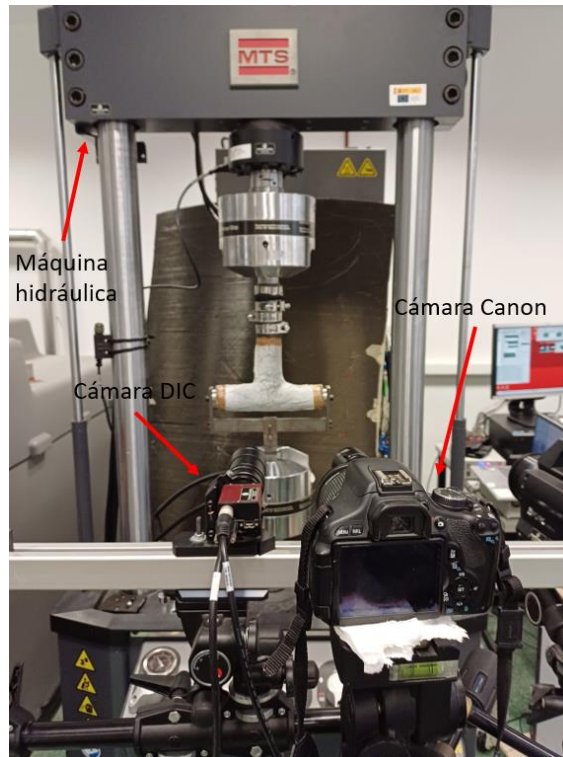


Figura 97. Setup del ensayo con los diferentes elementos

- Generación de speckle: kit de pinturas (Figura 98) que crean una capa de contraste sobre la muestra para posteriormente ser reconocida por el software DIC para poder calcular las deformaciones.



Figura 98. Sprays utilizados para realizar el speckle

- Otros elementos: aparte de los elementos mencionados anteriormente se hace uso de varias llaves para el cierre de mordazas o una cámara de fotos profesional para captar momentos durante el ensayo.

4.5.4. *Correlación Digital de Imágenes*

Como se ha mencionado anteriormente, para obtener información acerca de las deformaciones experimentadas por la muestra se utilizará la correlación digital de imágenes (DIC).

En este trabajo se va a utilizar concretamente la técnica DIC en 3D. Se obtienen mediciones, sin contacto, de desplazamientos y deformaciones tanto de materiales como de estructuras. Es realmente conocida por ser capaz de realizar mediciones rápidas de campo completo y obtener la caracterización de materiales completos, proporciona en cuanto a resultados el equivalente a 10000 galgas extensométricas.

La DIC 3D se utiliza en todas las industrias para mejorar la calidad y la precisión de los datos recogidos para comprender mejor los comportamientos mecánicos de los componentes o validar los modelos de elementos finitos [34].

Consiste en apuntar dos cámaras de alta resolución a la muestra a la que previamente se le ha generado un speckle negro sobre fondo blanco. La DIC 3D utiliza la fotogrametría para determinar la ubicación de cada una de las dos cámaras en el espacio tridimensional y combinar las dos imágenes en un espacio tridimensional. El patrón mencionado anteriormente (speckle) se deforma junto con la muestra y es la entrada principal para que el algoritmo rastree la expansión o compresión de la superficie del material [34].

En la Figura 99 se puede observar un ejemplo de DIC 3D aplicada a un tejido biaxial.

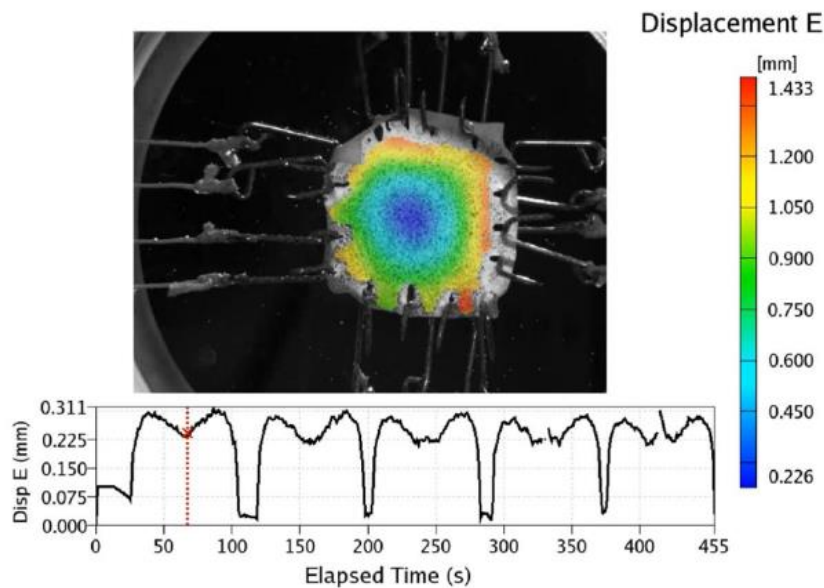


Figura 99. Ejemplo de tejido biaxial medida con DIC 3D, mostrando el campo de desplazamiento [34]

El procesamiento de las imágenes se hará mediante el software Vic-3D de la marca Correlated Solutions y para el procesado de los datos se utilizará un algoritmo en Matlab.

En el caso de los materiales compuestos, el uso de esta técnica puede conllevar la obtención de falsos resultados por medio del desprendimiento de una fibra en la probeta acarreando un cambio brusco en el patrón.

4.6. Realización de ensayo

En este punto se trata la realización en si del ensayo, desde la preparación de las muestras hasta las distintas mejoras que se tienen que realizar para poder conseguir que el ensayo se desarrolle en óptimas condiciones.

4.6.1. Preparación de muestras

Para conseguir que la parte superior de la muestra se agarre al útil se colocan tres abrazaderas de 55-59 mm y una de 51-55 mm (Figura 100). Además, se coloca varias tiras de caucho entre las abrazaderas (Figura 101) y la muestra para conseguir que la distribución de tensiones se produzca de manera homogénea.



Figura 100. Muestra colocada en el útil con las abrazaderas



Figura 101. Detalle del agarre con las abrazaderas

Una vez que la muestra se coloca sobre el útil se procede, a la realización del speckle (Figura 102) para poder obtener información de las deformaciones haciendo uso de la técnica de correlación digital.



Figura 102. Detalle del speckle

Posteriormente, se coloca la muestra en la máquina de ensayo y se calibran las diferentes cámaras haciendo uso de un patrón (Figura 103).

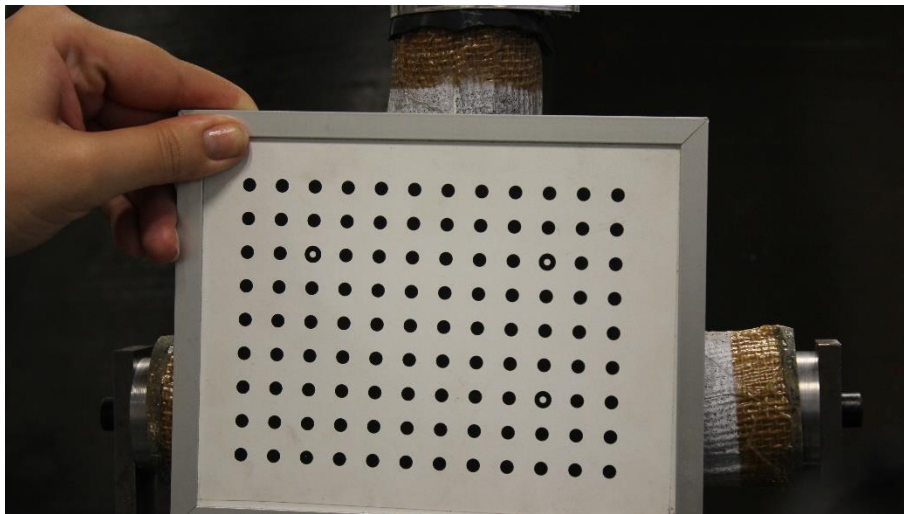


Figura 103. Patrón de calibrado

Una vez que se verifica la correcta calibración de las cámaras, se realiza el ensayo a las diferentes muestras hasta conseguir la rotura de ambas.

5. Resultados y discusión

En este apartado se pretende analizar los datos obtenidos durante la realización del ensayo y comparar el comportamiento de cada una de las muestras (con y sin stitching). Cabe destacar, que estas muestras no cuentan con mucha plasticidad ya que como se puede ver a continuación, las muestras rompen sin variar mucho su geometría.

En las siguientes figuras (Figura 104 y Figura 105) se puede ver como la muestra que contiene el stitching rompe por la parte inferior debido a un esfuerzo de tracción y una pequeña componente de flexión alrededor del eje del tubo mayor debida a la diferencia entre el diámetro interior y el soporte de ensayo.

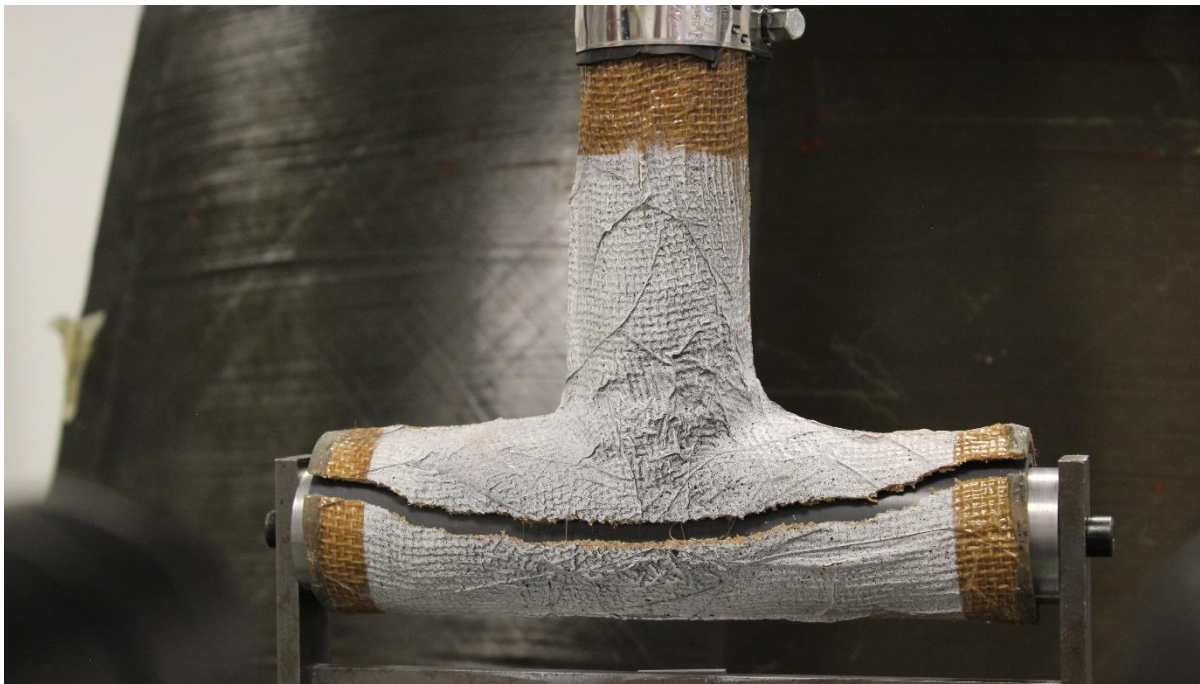


Figura 104. Rotura de la probeta con stitching



Figura 105. Detalle del stitching tras la rotura

En las siguientes figuras (Figura 106 y Figura 107) se puede ver el instante previo a la rotura y dicha rotura. Además, cuando la muestra se rompe se observa que hay algunas puntadas que han resistido y permanecen unidas, esto se puede observar con más detalle en la Figura 105.



Figura 106. Instante previo a la rotura muestra con stitching

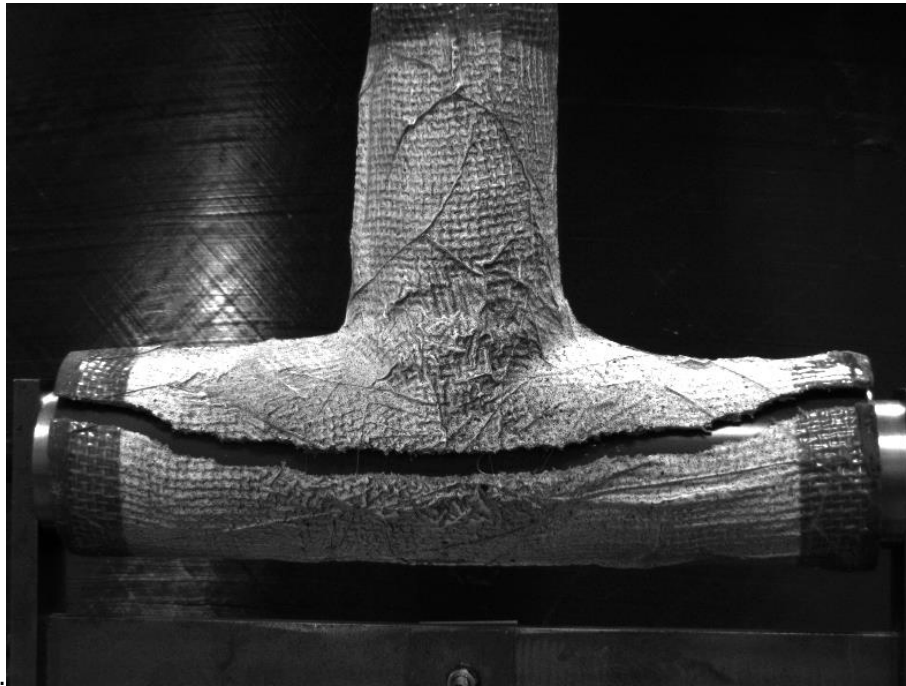
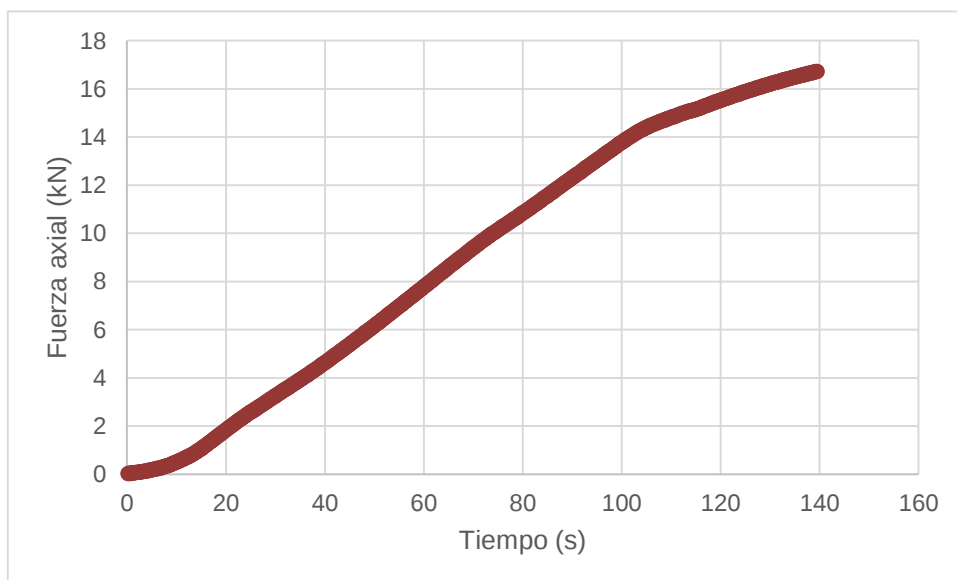


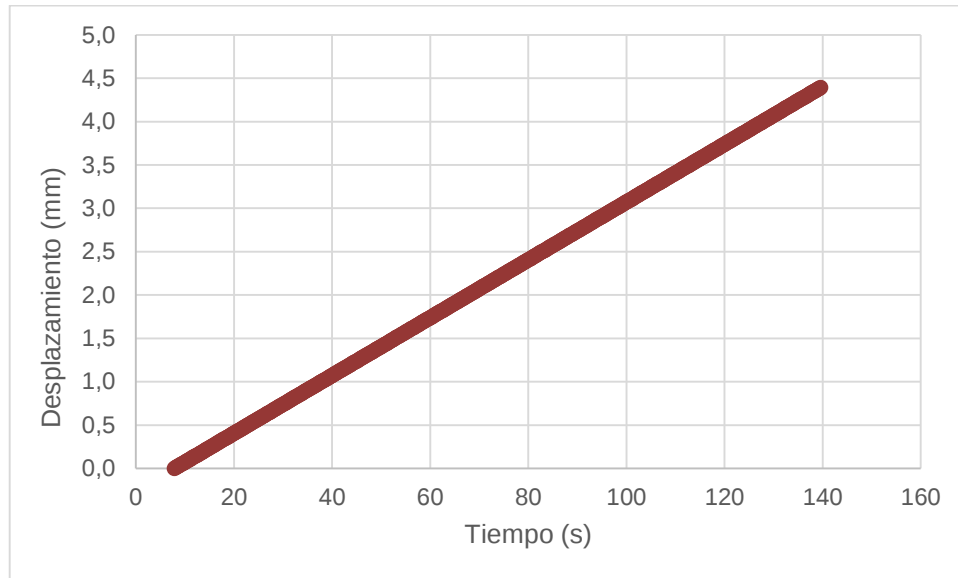
Figura 107. Rotura de la muestra con stitching

Como se puede ver en la Gráfica 1, la muestra rompe a 16,72 kN. Hasta los 14 kN mantiene un comportamiento lineal y se observa una reducción en la rigidez previa a la rotura.



Gráfica 1. Fuerza-tiempo de la muestra con stitching

También, en la Gráfica 2 se puede ver el desplazamiento de la muestra con stitching durante el proceso de ensayo, correspondiente a una velocidad constante de 2 mm/min.



Gráfica 2. Desplazamiento-tiempo de la muestra con stitching

En cuanto a la segunda muestra (sin stitching), se observa en la Figura 108 como la muestra rompe por el tubo superior debido en este caso a un esfuerzo de tracción pura. Se puede ver con más detalle en la Figura 109.

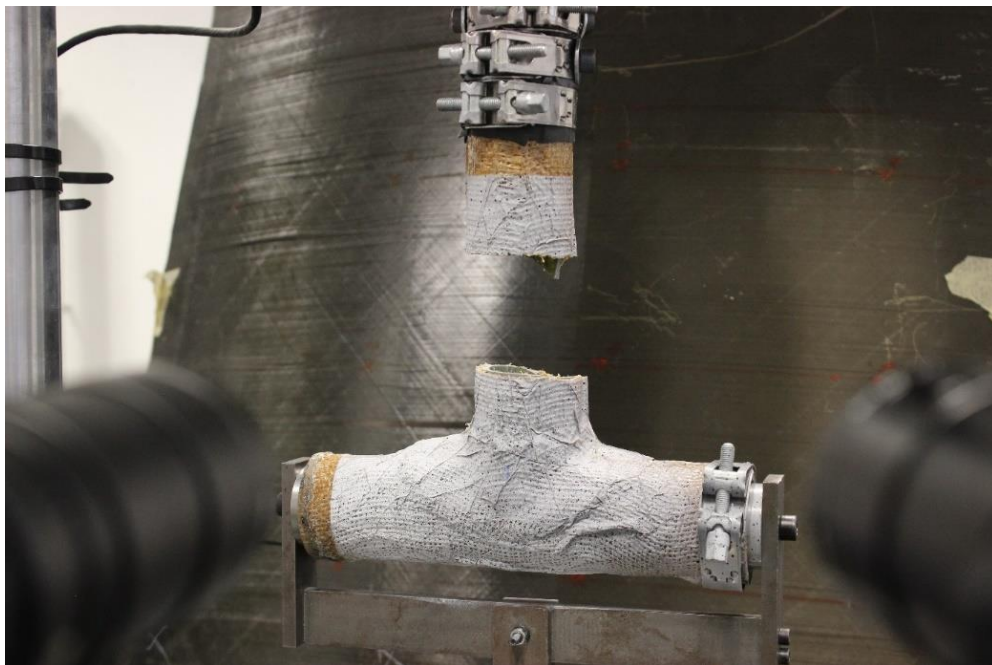


Figura 108. Rotura de la probeta sin stitching



Figura 109. Detalle de la rotura

En las siguientes figuras (Figura 110 y Figura 111) se puede observar el instante previo a la rotura y la rotura captadas por las cámaras de DIC.

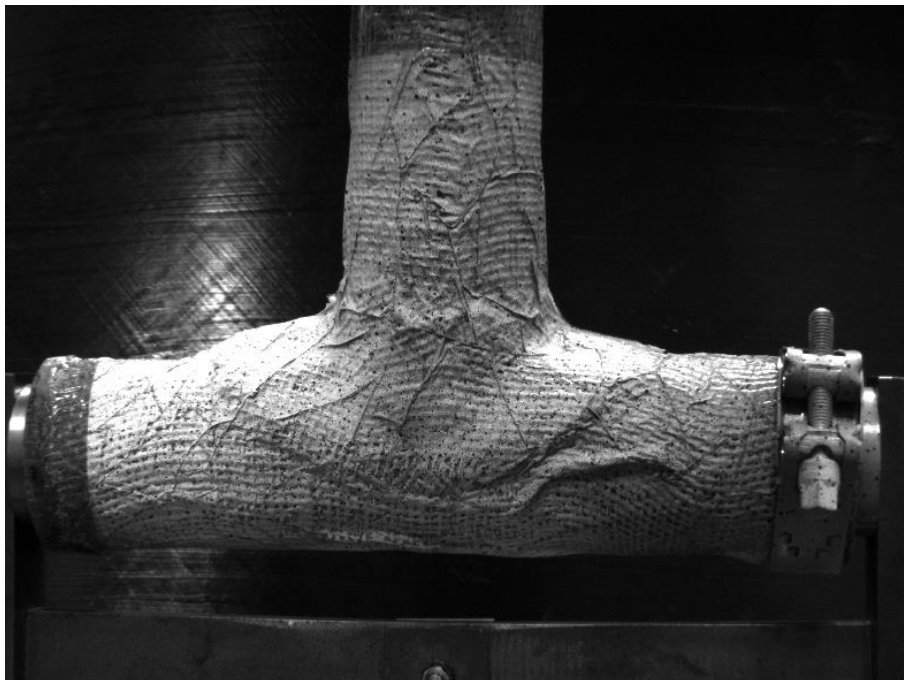
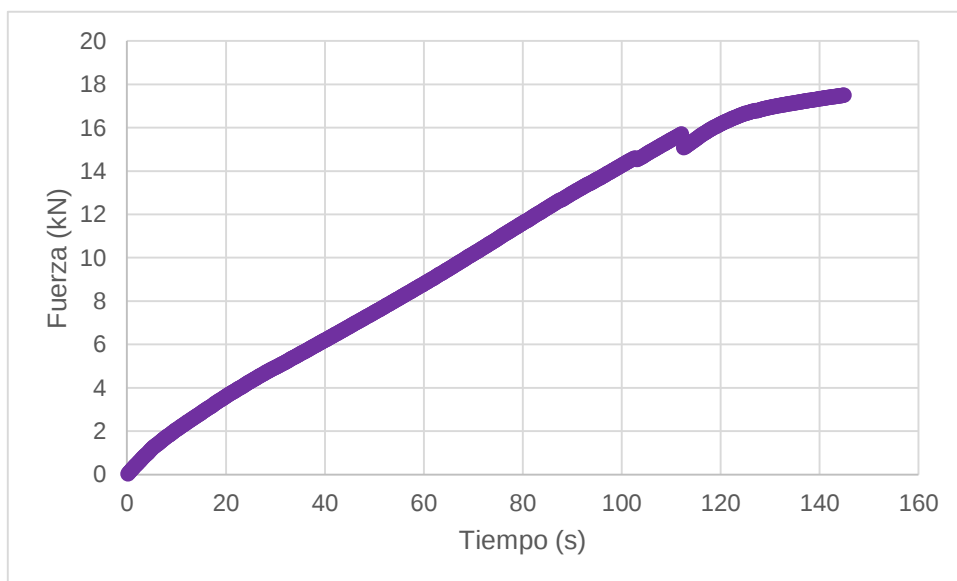


Figura 110. Instante previo a la rotura muestra sin stitching

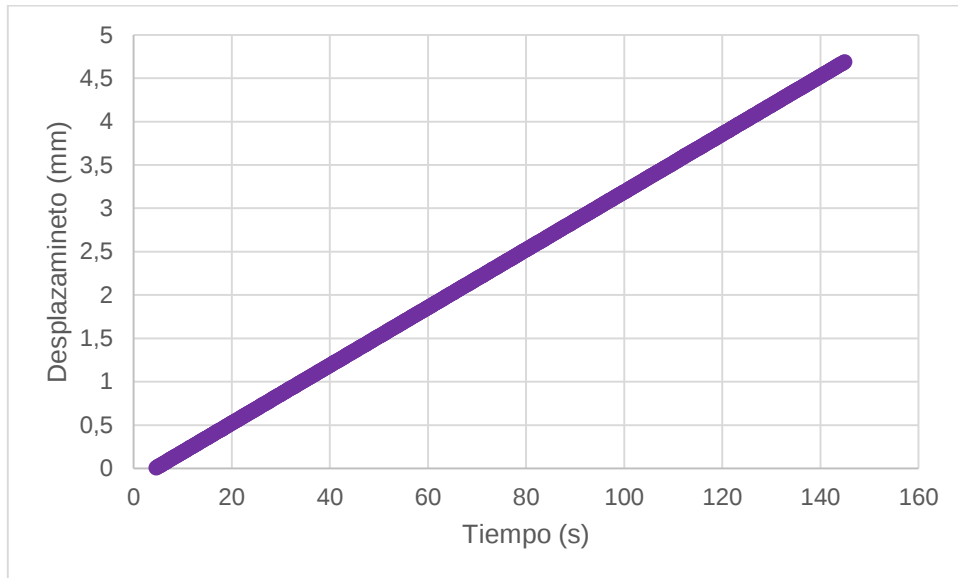


Figura 111. Rotura muestra sin stitching

Para el caso de la muestra sin stitching se puede ver en la Gráfica 3 que en este caso la muestra rompe a 17,49 kN, sin embargo, a 15,45 kN se puede ver como la muestra sufre una pequeña rotura, probablemente asociada a la rotura de un grupo localizado de fibras, aunque posteriormente la carga sigue aumentando por encima de tal valor.



Gráfica 3. Fuerza-tiempo de la muestra sin stitching



Gráfica 4. Desplazamiento-tiempo de la muestra sin stitching

En la Gráfica 4 se observa como el desplazamiento de nuevo corresponde a una velocidad constante de 2 mm/min.

Conocida la carga y la sección transversal de ambos tubos, la tensión de rotura puede conocerse como:

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

$$\sigma_1 = \frac{F_1}{S_1} = \frac{16720 \text{ N}}{474,94 \text{ mm}^2} = 35.2 \text{ MPa}$$

$$\sigma_2 = \frac{17490 \text{ N}}{384,76 \text{ mm}^2} = 45.45 \text{ MPa}$$

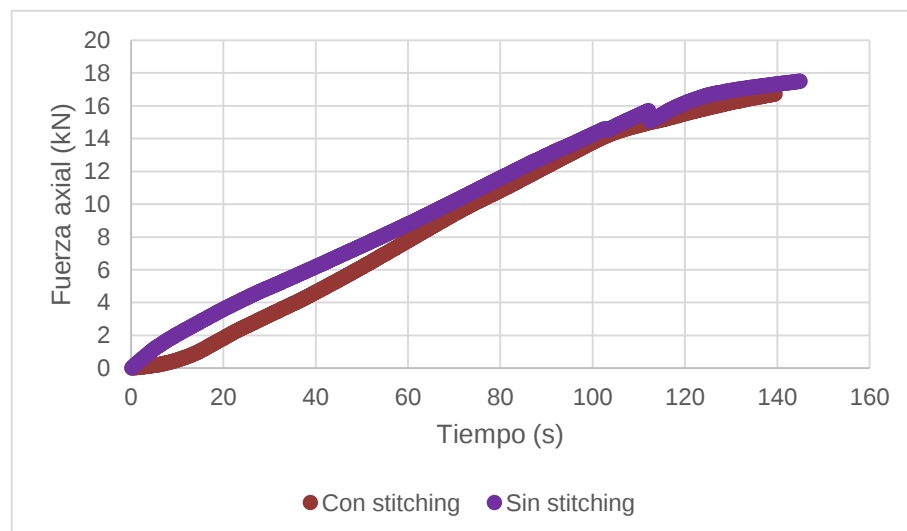
El valor de tensión de rotura resulta muy similar al reportado por el trabajo de [8], asumiendo que las pequeñas diferencias puedan deberse a defectos, no homogeneidad de espesor o cantidad de fibra.

En la Tabla 7 se puede observar a modo de resumen la carga soportada por cada una de las muestras y el esfuerzo al que se encuentra solicitada previo a la rotura.

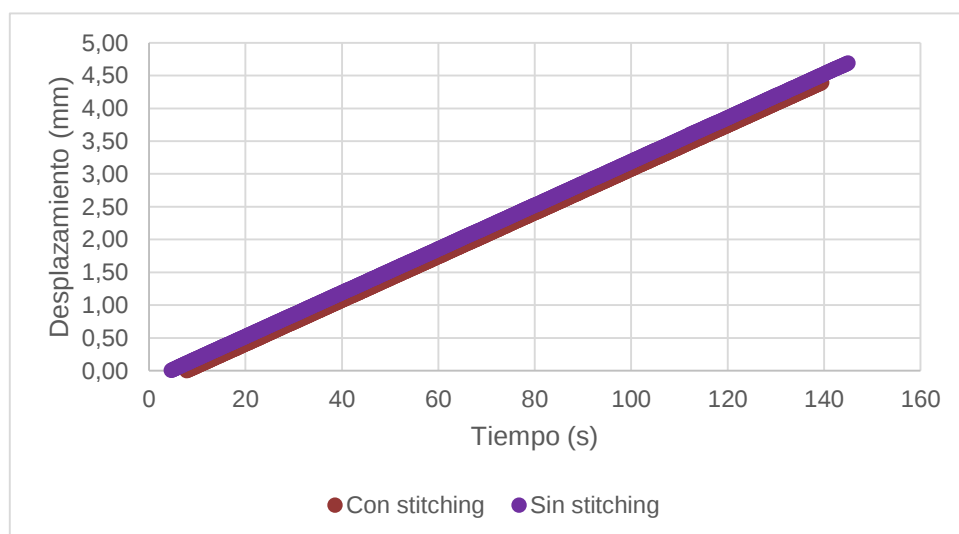
Tabla 7. Datos obtenidos tras el ensayo

Tipo de muestra	Carga máxima (kN)	Esfuerzo predominante en la zona de rotura	Tensión de rotura (MPa)
Con stitching	16.72	Tracción y flexión	35.20
Sin stitching	17.49	Tracción	45.45

En las siguientes gráficas se puede observar el comportamiento de ambas muestras conjuntamente.



Gráfica 5. Fuerza-tiempo de ambas muestras



Gráfica 6. Desplazamiento-tiempo de ambas muestras

Se puede ver en la Gráfica 5 como ambas muestras tienen un comportamiento parecido y en cuanto al desplazamiento (Gráfica 6) ambas muestran la misma pendiente de 2 mm/min.

5.1. Correlación digital de imágenes (DIC)

En este apartado se pretende ver los resultados obtenidos mediante correlación digital de imágenes (DIC). Como se indica en el punto 4.5.4 de este documento, con esta técnica se pretende obtener información sobre los desplazamientos de diferentes puntos de la muestra y conocer su estado en cada momento del ensayo.

En las siguientes figuras (Figura 112 y Figura 113) se puede ver el patrón realizado a las muestras para visualizar la información

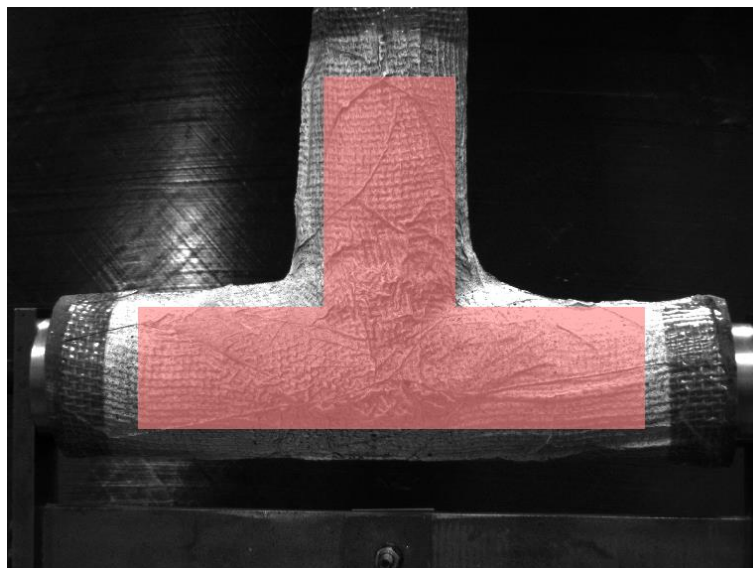


Figura 112. Zona de estudio muestra stitching

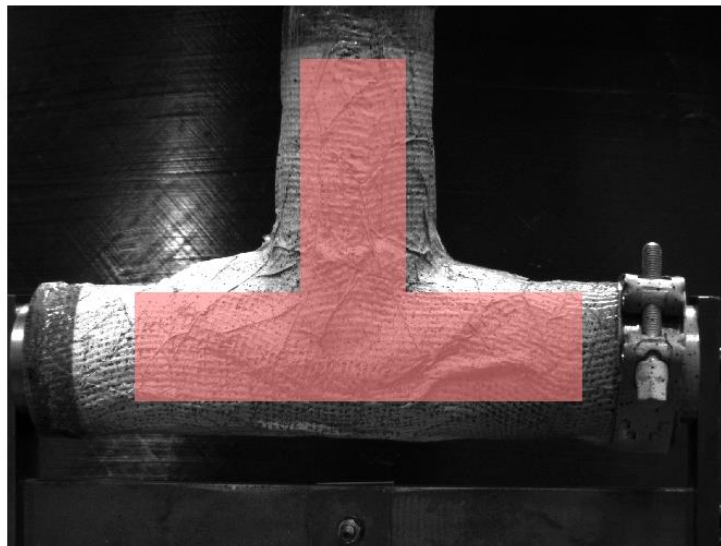


Figura 113. Zona de estudio muestra sin stitching

Si nos centramos en la muestra con stitching se puede ver en la Figura 114 la localización de los puntos a estudiar.

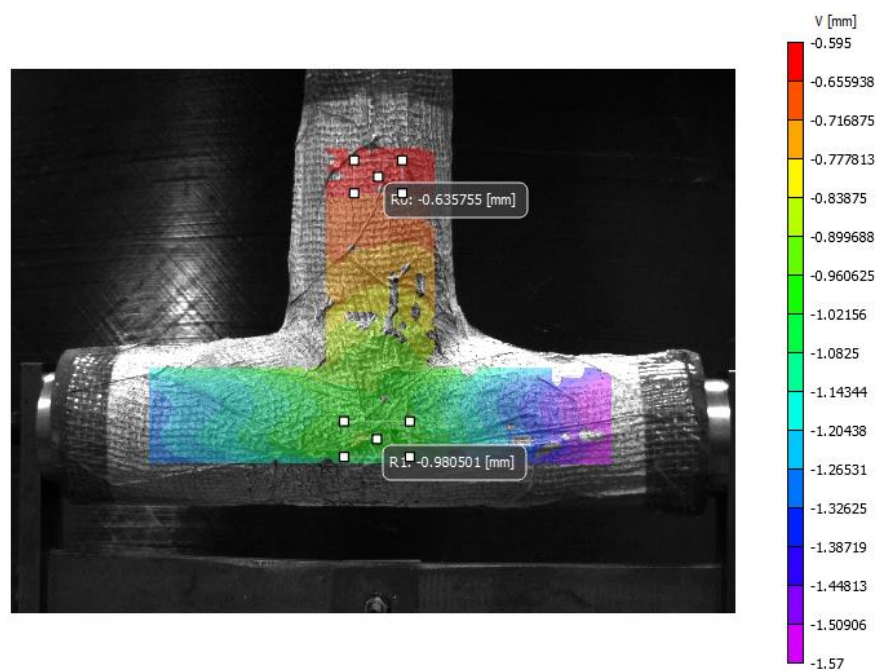


Figura 114. Localización puntos de estudio muestra con stitching

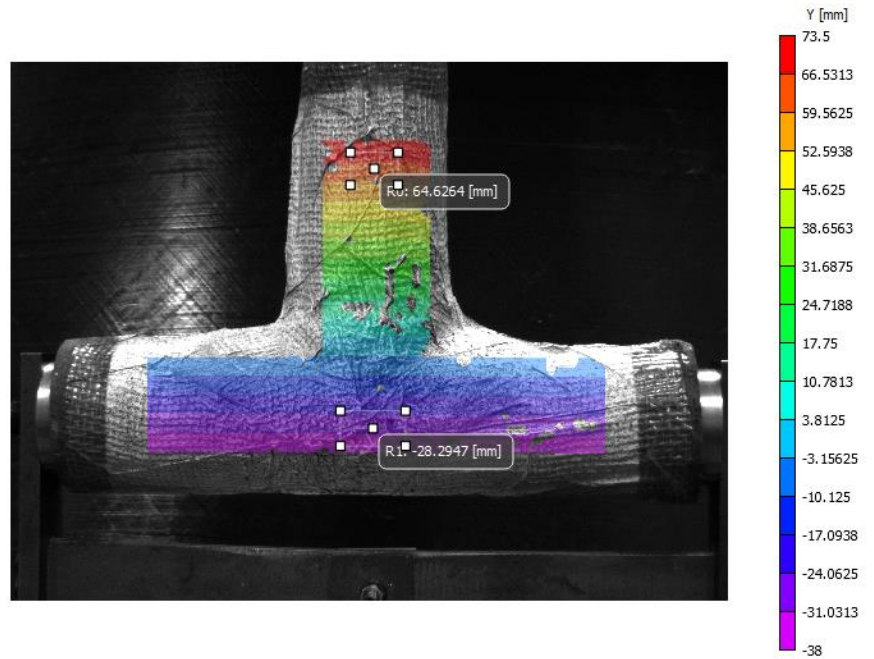


Figura 115. Localización puntos de ensayo muestra con stitching

Como se puede ver, entre ambos puntos existe un alargamiento de 0.3958 mm entre ambos en el instante previo a la rotura y según la Figura 115 antes del ensayo existe una distancia de 92.9211 mm entre ambos puntos. Por tanto, después del ensayo se observa que ambos puntos (R0 y R1) se encuentran a 93.3169 mm.

El valor de deformación a rotura del tubo sin stitching puede calcularse como:

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta L_1}{L_{01}} = \frac{0.3958}{92.9211} = 0.004259 \rightarrow \varepsilon_1 = 0.43\%$$

El valor obtenido resulta muy similar al obtenido por [8], de 0.43%.

Si observamos la Figura 116 podemos ver como instantes antes de la rotura se observa que, a medida que la muestra se separa por efecto de la carga, se obtiene un mayor desplazamiento de los puntos (zona roja) y además en la parte inferior de la muestra se observa que el esfuerzo de tracción es tan elevado que provoca un esfuerzo de flexión (zona morada) y por tanto en esa zona las fibras se están comprimiendo.

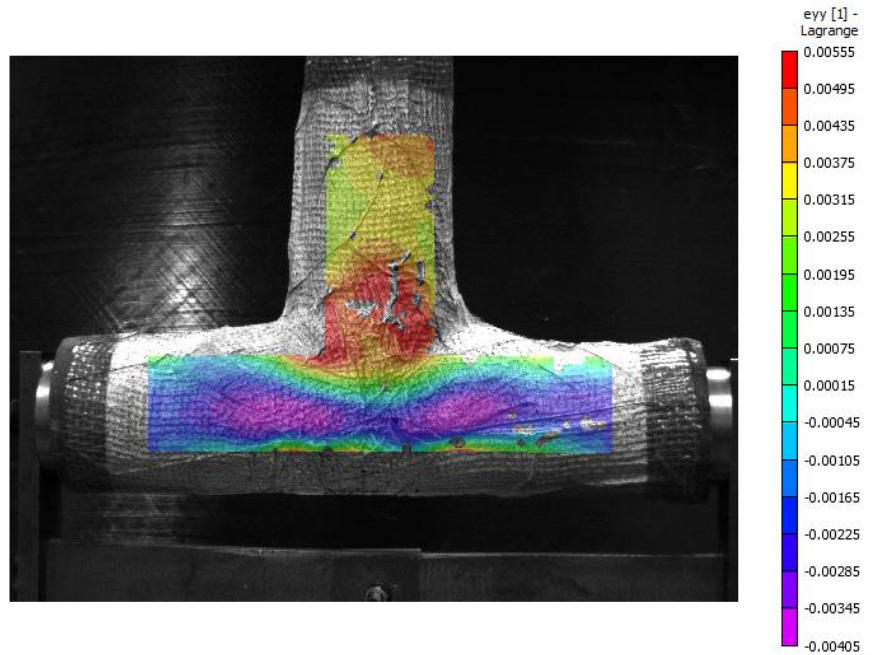
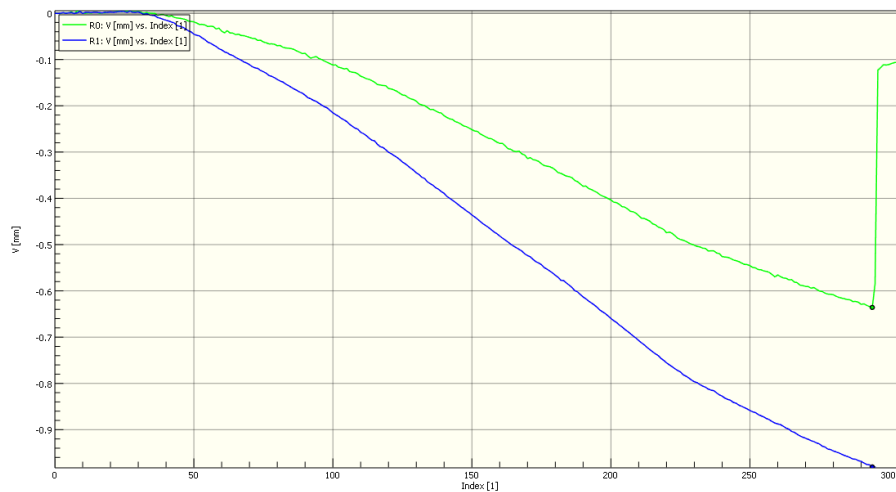
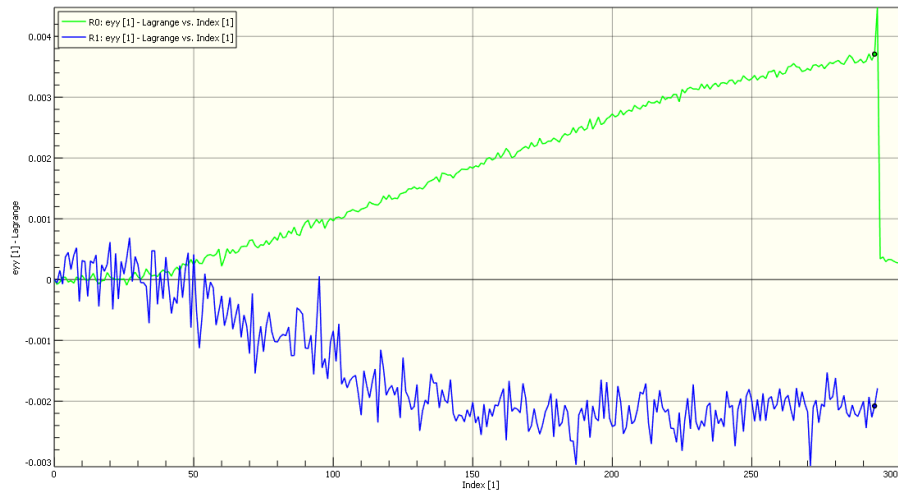


Figura 116. Deformaciones en el eje Y de la muestra con stitching

Graficando (Gráfica 7) los datos obtenidos se puede ver el desplazamiento de ambos puntos durante todo el ensayo y las deformaciones experimentadas en el eje Y (Gráfica 8).



Gráfica 7. Desplazamiento de los puntos muestra con stitching



Gráfica 8. Deformación de los puntos muestra con stitching

Si analizamos ahora la muestra que no tiene stitching, los puntos de estudio son los siguientes (Figura 117):

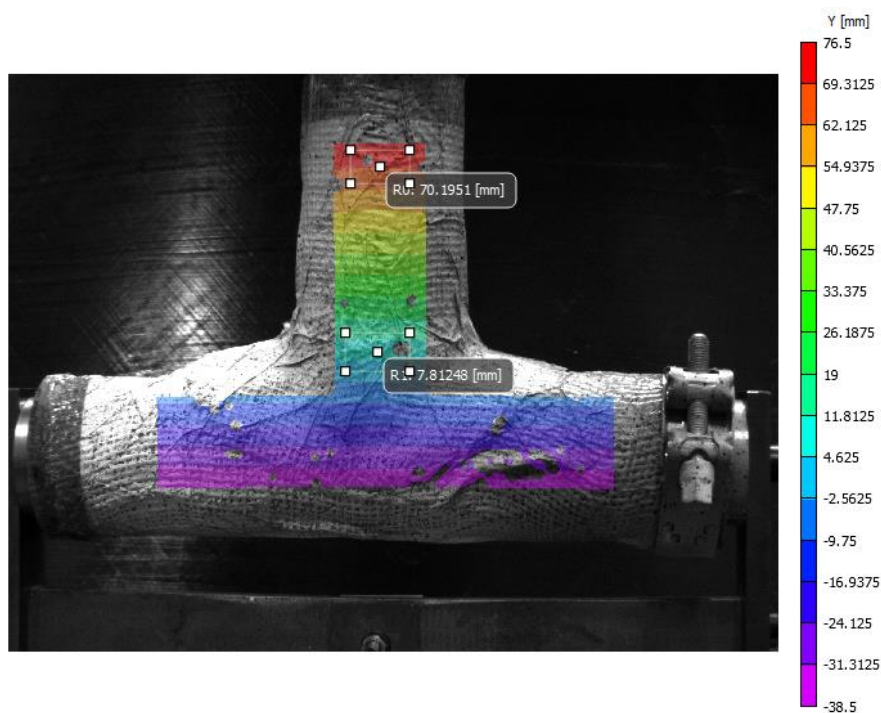


Figura 117. Localización puntos de ensayo muestra sin stitching

Estos puntos se encuentran separados una distancia de 62.3826 mm antes de iniciar el ensayo y según la Figura 118, instantes antes de la rotura se ha producido un desplazamiento de 0.3113 mm. Por tanto, los puntos están separados 62.6939 mm instantes previos a la rotura.

El valor de deformación a rotura del tubo sin stitching puede calcularse como:

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta L_2}{L_{02}} = \frac{0.3113}{62.3826} = 0.005 \rightarrow \varepsilon_2 = 0.50\%$$

El valor obtenido resulta muy similar al obtenido por [8], de 0.50%.

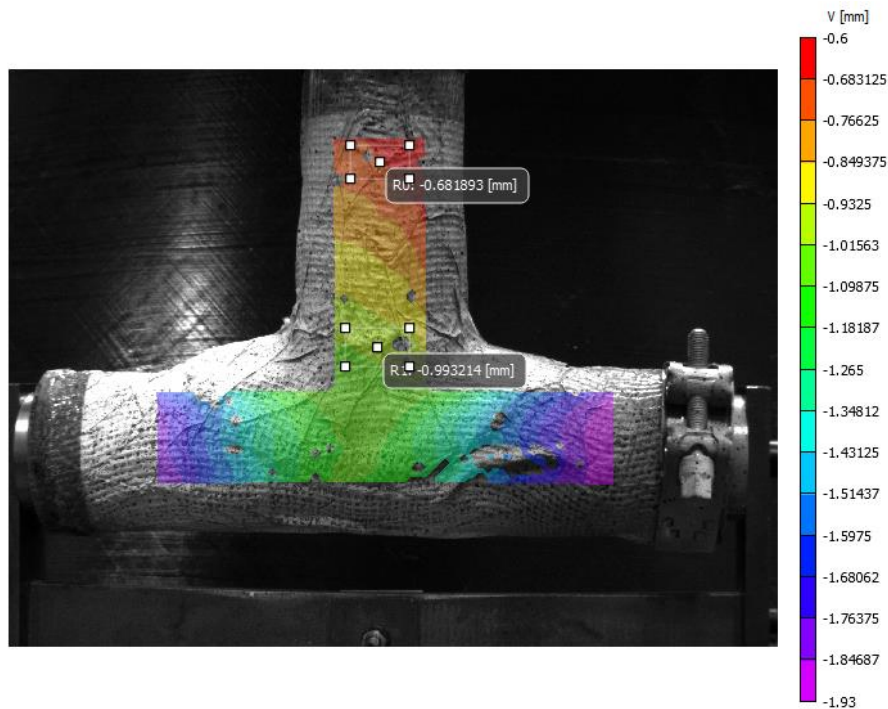


Figura 118. Desplazamiento de los puntos muestra sin stitching

El estado de las fibras durante el ensayo según el eje Y (Figura 119) muestra un comportamiento uniforme en toda la parte superior del tubo (zona verde) mientras que, en la parte inferior se observa una zona dónde las fibras se están comprimiendo (zona morada) debido al esfuerzo elevado de tracción, provocando un efecto de flexión.

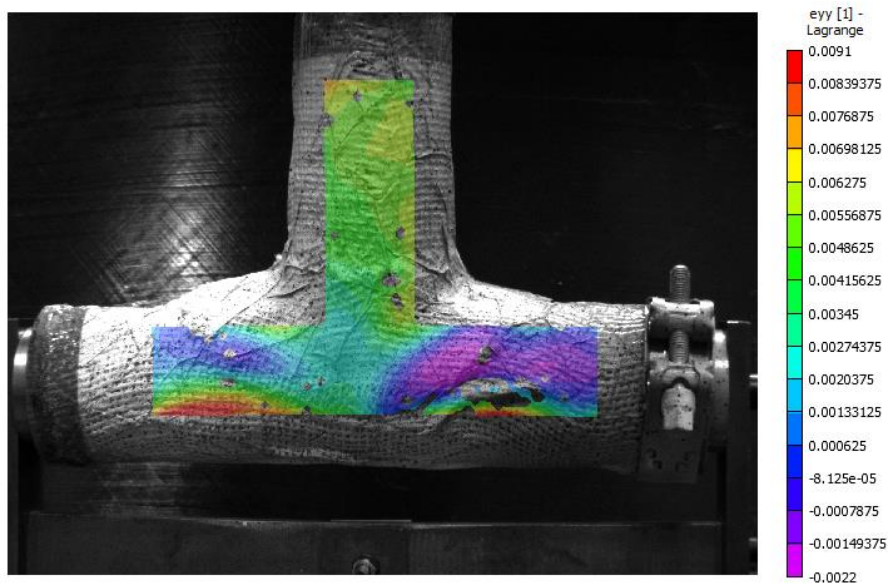
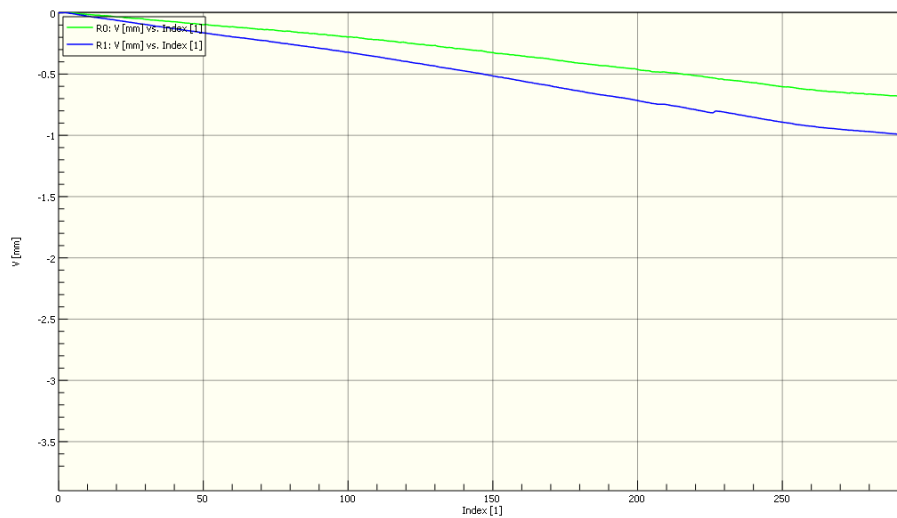
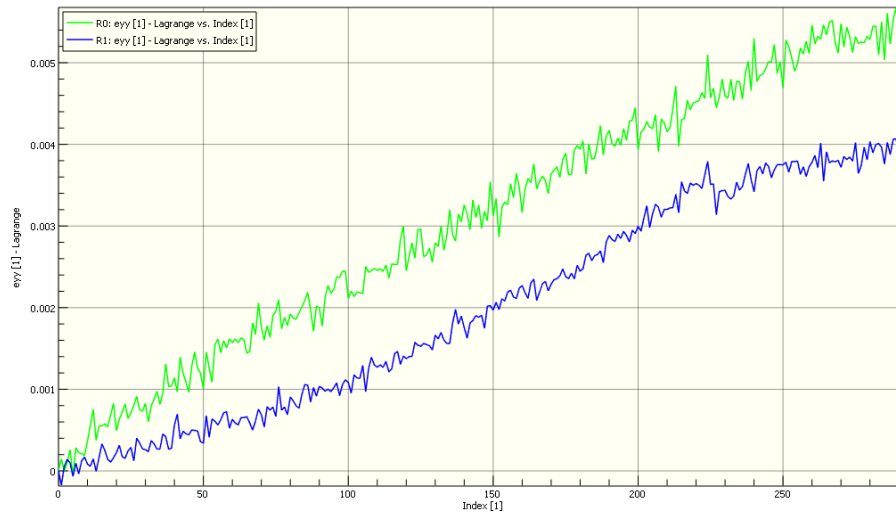


Figura 119. Deformación en el eje y de la muestra sin stitching

En las siguientes gráficas, se puede la separación de ambos puntos (Gráfica 9) durante todo el ensayo y la deformación que experimenta cada uno (Gráfica 10).



Gráfica 9. Desplazamiento de los puntos muestra sin stitching



Gráfica 10. Deformación de los puntos muestra sin stitching

En esta última gráfica se observa como ambos puntos sufren prácticamente la misma deformación, además en el recorrido del punto R1 se puede ver la rotura previa que sufren las fibras tal y como se indicó en la Gráfica 3.

La rigidez en el punto de rotura de cada uno de los tubos puede evaluarse con la tensión a rotura y la deformación a rotura de cada uno de los tubos, según se calculó anteriormente.

$$Rigidez\ de\ rotura_1 = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_1} = \frac{35.20}{0.0043} = 8186.05\ Mpa$$

$$Rigidez\ de\ rotura_1 = 8.2\ GPa$$

En cuanto a la muestra 2, sin stitching:

$$Rigidez\ de\ rotura_2 = \frac{\sigma_2}{\varepsilon_2} = \frac{45.45}{0.005} = 9090\ MPa$$

$$Rigidez\ de\ rotura_2 = 9.1\ GPa$$

Los resultados obtenidos de rigidez se parecen a los obtenidos en [8], Tabla 3. Estas variaciones pueden deberse a defectos, no homogeneidad en el espesor o cantidad de fibra.

5.2. Estimación teórica del comportamiento de los tubos

Asumiendo que el composite tiene una deformación a rotura mucho mas pequeña que el PVC, se considera que una vez se fracture el composite, se producirá el fallo de todo el conjunto.

La estimación de la carga de rotura puede realizarse teniendo en cuenta el valor de resistencia aportado por [8], que realizó experimentos con material compuesto fabricado por infusión. En sus experimentos reportó un valor de resistencia a rotura de 42.54 MPa para tejidos 0/90 como el utilizado en este trabajo.

La carga a rotura puede calcularse como:

$$F_R = \sigma \cdot S$$

Para el tubo 1, con stitching, sería:

$$F_{R_1} = 42,54 \text{ MPa} \cdot 474,94 \text{ mm}^2 = 20203.94 \text{ N}$$

$$F_{R_1} = 20.20 \text{ kN}$$

Para el tubo 2, sin stitching:

$$F_{R_2} = 42.54 \text{ MPa} \cdot 384.76 \text{ mm}^2 = 16367.70 \text{ N}$$

$$F_{R_2} = 16.37 \text{ kN}$$

Los valores obtenidos para ambos tubos son similares a los obtenidos en los ensayos. Las pequeñas diferencias que se pueden apreciar pueden asociarse a pequeñas variaciones de espesor (como se muestra en las figuras de microscopio del apartado 4.2.8.1) y a la existencia de defectos como pueden ser los atrapamientos de aire.

5.3. Resumen de resultados

Tras realizar los ensayos y debido a la configuración de las muestras se ha podido ver en las Figura 107 y Figura 111 que ninguna de las dos muestras ha roto por la unión, por tanto, no se ha podido evaluar el efecto del stitching. Sí cabe destacar que, en ambos casos, la unión ha mostrado una resistencia superior a la de los tubos base, lo cual implica que un solape de 4 capas entre ambos es suficiente para evitar la rotura en los puntos de unión.

En la Tabla 8 se puede observar a modo de resumen los datos obtenidos para cada muestra.

Tabla 8. Resultados del ensayo

Muestra	Carga máxima (kN)	Esfuerzo predominante en la zona de rotura	Separación inicial (mm)	Separación final (mm)	Deformación de rotura
Con stitching	16.72	Tracción y flexión	92.9211	93.3169	0.43%
Sin stitching	17.49	Tracción	62.3826	62.6939	0.50%

Tabla 9. Comparativa de propiedades muestra con stitching

Muestra con stitching	Carga máxima (kN)	Tensión de rotura (MPa)	Deformación rotura (%)	Rigidez de rotura (MPa)
Experimental	16.72	35.20	0.43	8.20
Teórico	20.20	42.54	0.43	11.13
Error	17.22%	17.25%	0%	26.32%

Tabla 10. Comparativa de propiedades muestra con stitching

Muestra sin stitching	Carga máxima (kN)	Tensión de rotura (MPa)	Deformación rotura (%)	Rigidez de rotura (MPa)
Experimental	17.49	45.45	0.50	9.10
Teórico	16.37	42.54	0.43	11.13
Error	6.52%	6.84%	16.27%	18.23%

Se puede ver que los resultados son bastante similares a los obtenidos en [8], el error existente se puede deber a defectos, no homogeneidad de espesor o cantidad de fibra.

6. Conclusión

La principal conclusión de este trabajo es la importancia de los materiales compuestos en la industria. El extendido uso de los materiales compuesto ha supuesto el motivo principal de este trabajo al estudiar la unión de dos tubos con un material novedoso como es la fibra de yute y su importancia con el medio ambiente.

Surge la necesidad de reforzar el material y comprobar su eficacia frente a una misma muestra que no tiene refuerzo, por tanto, se ha hecho un estudio introductorio a la técnica del cosido o stitching.

Al tratarse de un estudio novedoso, se han obtenido resultados no esperados y por tanto, la unión no se ha podido comprobar y ver si realmente el stitching tiene algún efecto positivo o negativo. También se ha demostrado que con esta configuración de fibras la unión ha resistido más que el mismo tubo.

Además, gracias a la técnica DIC se ha podido conocer el estado de ambas muestras durante todo el ensayo y poder conocer el desplazamiento de los puntos instantes antes de la rotura y el estado de las fibras, obteniéndose valores de deformación similares a otros investigadores.

Finalmente, como conclusión final de este trabajo, se ha observado que, con la configuración de capas de fibra sobre la unión de la muestra, se obtiene una unión que resiste más que el propio tubo, rompiendo ambas muestras por zonas diferentes a la unión. Con esta conclusión abre la opción de realizar más estudios en este campo como se puede observar en el siguiente punto.

7. Trabajos futuros

Tras la realización de este trabajo se proponen estudios relacionados con:

- Utilizar como molde un material que no afecte estructuralmente a la muestra a la hora de realizarla por si no se puede extraer después de realizar la infusión.
- Como alternativa, utilizar un agente desmoldeante de alta calidad para desmoldar las piezas.
- Fijar y sellar la unión entre los dos tubos para así evitar que la resina se introduzca en el interior durante el proceso de infusión.
- Realizar las muestras con menos capas de fibra de yute en la zona de unión para así obtener una unión menos rígida y poder valorar el efecto del stitching.
- Diseñar un sistema de agarre muestra-útil para mejorar el proceso de ensayo.

Bibliografía

- [1] Chao Hou y Lin-Hai Han, *Analytical behaviour of CFDST chord to CHS brace composite K-joints*, 2010.
- [2] G. Di Bella, C. Borsellino, E. Pollicino y V. Ruisi, *Experimental and numerical study of composite T-joints for marine application*, Italy, 2010.
- [3] Dragon Plate. [En línea]. Available: <https://dragonplate.com/new-tee-joint-carbon-fiber-tube-connector>.
- [4] Rock West Composites. [En línea]. Available: <https://www.rockwestcomposites.com/shop/connector-accessories/other-joints>.
- [5] D. Hull, *Materiales Compuestos*, Barcelona: Reverté, 1987.
- [6] «Why National Composite Center,» [En línea]. Available: <http://compositecenter.org/index.php/whycomposites>.
- [7] A. Bledzki, S. Reihmane y J. Gassan, «Properties and modification methods for vegetable fibers for natural fiber composites.,» de *Journal of Applied Polymer Science.*, 1996, pp. 1329-1336.
- [8] M. Rashnal Hossain, M. Aminul Islam, A. Van Vuurea y I. Verpoest, «Tensile behavior of environment friendly jute epoxy laminated composite,» de *5th BSME International Conference on Thermal Engineering* , Dhaka, Bangladesh, 2013.
- [9] Características fibra de yute. [En línea]. Available: <https://www.textiles-tejidos.net/fibras/fibra-de-yute/>.
- [10] 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.
- [11] A. F. Johnson, *Engineering desing properties of G.R.P*, Londres, 1979.
- [12] A. Miravete, *Materiales Compuestos I*, Reverté, 2000.
- [13] W. Wake, *Theories of adhesion and uses of adhesives*, 1978.
- [14] C. ATE, «Tecnologías de fabricación,» [En línea]. Available: <https://www.composites-ate.com/tecnologias-de-fabricacion/>.

- [15] C. U. Be.. [En línea]. Available: https://composites.ugent.be/home_made_composites/organizing_your_composite_workshop.html.
- [16] L. Tong, A. Mouritz y M. Bannister, 3D Fibre Reinforced Polymer Composites, 2002.
- [17] N. Khokar, 3D fabric-forming processes: Distinguishing between 2D-weaving, 3D-weaving and an unspecified non-interlacing process, 1996.
- [18] P. Popper, «Braiding,» de *International Encyclopedia of Composites*, 1991.
- [19] F. Ko, Three-dimensional fabrics for composites, Composite Materials Series, 1989.
- [20] A. Morales, Structural stitching of textile performs, 1990.
- [21] K. Dransfield, C. Baillie y Y. Mai, Improving the delamination resistance of CFRP by stitching, 1994.
- [22] S. Beckworth y C. Hyland, Resin transfer moulding: a decade of technology advances, SAMPE J., 1998.
- [23] I. M. Daniel, Engineering Mechanics of Composite Materials, Oxford: Oxford Univeristy Press, 1994.
- [24] Deyute. [En línea]. Available: <https://www.deyute.com/producto/yute-doblado-al-lomo/102>.
- [25] TF3P, «Resina Epoxi,» [En línea]. Available: <https://tf3p.com/resina-epoxi/427-resina-epoxi-infusion-vacio-elantech-157.html>.
- [26] Amazon. [En línea]. Available: https://www.amazon.es/BZS-Expert-Coarse-Fishing-monofilament/dp/B07VP1WCH5/ref=asc_df_B07VP1WCH5/?tag=&linkCode=df0&hvadd=420334632673&hvpos=&hvnetw=g&hvrnd=8232095316747896659&hvpone=&hvptwo=&hvmqmt=&hvdev=c&hvdvcmdl=&hvlocint=&hvlocphy=1005416&hvtargid.
- [27] Leroy Merlin, «Tubo PVC 50 mm,» [En línea]. Available: https://www.leroymerlin.es/productos/jardin-y-terrazza/piscinas/recambios-y-repuestos-para-piscinas/tubo-de-evacuacion-de-pvc-diam-50-mm-l-1-m-56178773.html?utm_source=awin&utm_medium=afiliacion&utm_term=376257&awc=20598_1693815787_1f2237289c13c876017e9dd3.
- [28] PROMOTEC, «Propiedades PVC,» [En línea]. Available: <https://www.promoteciberica.com/plasticos-tecnicos/pvc-rigido/>.
- [29] Aguajas Pony, «Stoklasa,» [En línea]. Available: <https://www.stoklasa.es/aguajas-pony-para-tapiceria->

x150391?gclid=Cj0KCQjwgNanBhDUARIsAAelcAucj12YiyWntdSza0ISxXZE2LakJemf5
o8TjgACyiPw_1hCKfB6tLoaApqtEALw_wcB.

- [30] Bolsa de vacío. [En línea]. Available: <https://tf3p.com/bolsas-vacio-composites/448-bolsa-de-vacio-iplon-km-1300.html>.
- [31] J. A. Almazán Lázaro, E. López Alba y F. A. Díaz Garrido, *Improving Composite Tensile Properties during Resin Infusion Based on a Computer Vision Flow-Control Approach*, 2018.
- [32] ASTM, *D638 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*, 2017.
- [33] ASTM, *D 3039 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*, 2008.
- [34] C.-O. Amyot, J. Pickworth, J. Tyson y J. Bucieniski, *3D Digital Image Correlation: The Ultimate Biomechanics Tool For Displacements And Strains Testing*, USA, 2019.
- [35] J. G. Velasco, *Energías renovables*, Editorial Reverte, 2009.
- [36] Y. Benkler, *El Pingüino y el Leviatán: Por qué la cooperación es nuestra arma más valiosa para mejorar el bienestar de la sociedad*, 2012.
- [37] G. Koronis, A. Silva y M. Fontul, «Green composites: A review of adequate materials for automotive applications,» de *Composites Part B: Engineering*, 2013, pp. 120-127.
- [38] A. Rubio López, *Predicción del comportamiento frente a impactos de estructuras de materiales compuestos biodegradables.*, Universidad Carlos III de Madrid, 2014.
- [39] V. Hoang Hoang, *Characterization and impact study of flax/PLA biocomposites for aerospace-oriented applications.*, Universidad Carlos III de Madrid, 2017.

8. Anexo I. Planos

