

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Caracterización termo-mecánica de material  
compuesto carbono/epoxi con láminas  
ultradelgadas

Autor: Jorge Marín Raya

Tutores: Serafín Sánchez Carmona

Alberto Barroso Caro

**Dpto. Mecánica de Medios Continuos y Teoría  
de Estructuras**

**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**

Sevilla, 2022





Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

# **Caracterización termo-mecánica de material compuesto carbono/epoxi con láminas ultradelgadas**

Autor:  
Jorge Marín Raya

Tutores:  
Serafín Sánchez  
Contrato predoctoral  
Alberto Barroso Caro  
Profesor titular

Dpto. Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2022



Proyecto Fin de Carrera: Caracterización termo-mecánica de material compuesto carbono/epoxi con láminas ultradelgadas

Autor: Jorge Marín Raya

Tutores: Serafín Sánchez Carmona  
Alberto Barroso Caro

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2022

El Secretario del Tribunal



# Agradecimientos

---

El camino para ser ingeniero es difícil, requiere de mucho tiempo y sacrificio para lograr alcanzar esa meta. Hace ya 5 años desde que ese chico de 18 años se decidió por este mundo y emprendió su idea de ser ingeniero. Durante estos años, he aprendido que nada de esto sería posible sin el apoyo incondicional de la gente que te quiere. Estos párrafos van dedicados a ellos.

A mi hermano Guillermo, por tener una persona en la que confiar, en la que poder contar tanto en las buenas como en las malas, que me sigue queriendo aun cuando muchos días no tenemos apenas tiempo para vernos, porque considero que es un pilar fundamental en mi vida para poder siempre seguir adelante.

A mis padres, por sus consejos y recomendaciones cuando las he necesitado, por su apoyo en los momentos de mayor dificultad, por aguantarme cuando he tenido malos días...

A mi novia M<sup>o</sup>Carmen, por apoyarme diariamente, confiar en mí, escuchar mis quejas, por lograr inhibirme del resto de cosas y hacer que mis días sean más llevaderos. Te doy las gracias por ser como eres.

A mis compañeros de carrera, muchos desperdigados por el camino. Quiero darle las gracias a Fernando, amigo de la infancia, por los buenos ratos echados en clase durante los primeros años; a Raúl y Jesús, por hacerme más amenas las clases; a Claudia porque sin ella no hubiese tenido el apoyo para enfrentarme a muchas asignaturas; y sobre todo a Cristina, por haber sido en estos últimos años la persona con la que poder compartir las vivencias del día a día.

También quiero agradecerles a Serafín y Alberto, mis tutores, por ayudarme en todo lo necesario para finalizar esta etapa, en especial a Serafín, por sufrir mis consultas y dudas diarias, y a pesar de ello resolvérmelas con una sonrisa; a Federico por sus sabias enseñanzas que han hecho que el mundo de la Elasticidad me apasione; y no se me olvida Israel, por su forma de ser y su parsimonia para hacerme entender las cosas.

Vuestro apoyo no será en vano. Espero con ilusión el día en el que pueda devolveros el favor.

*Jorge Marín Raya*

*Graduado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales*

*Sevilla, 2022*



# RESUMEN

---

El objetivo de este trabajo reside en la caracterización de un material compuesto de fibra de carbono-epoxi de espesor ultradelgado (UTP, del inglés *Ultra Thin Ply*) utilizando distintos gramajes para la determinación de sus propiedades, siendo sus gramajes de 100 g/m<sup>2</sup>, 50 g/m<sup>2</sup> y 30 g/m<sup>2</sup>.

El proceso de caracterización consta de tres partes. En primer lugar, se realizará un análisis mecánico del material mediante ensayos a tracción de laminados unidireccionales de 0° y 90° mediante el empleo de una máquina universal de ensayos, con el objetivo de determinar los valores de  $X_t$ ,  $Y_t$ ,  $E_{11}$ ,  $E_{22}$  y  $\nu_{12}$  a partir de los laminados fabricados con cada gramaje. En segundo lugar, mediante un análisis térmico se obtendrán los coeficientes de expansión  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  de cada uno de ellos, así como el coeficiente  $\alpha_3$  a partir del *prepreg* de 100 g/m<sup>2</sup>. El objetivo principal de estas dos partes es observar si el empleo de distintos gramajes puede afectar significativamente a las propiedades del material obtenidas durante los ensayos, y observar si los coeficientes  $\alpha_2$  y  $\alpha_3$  guardan similitud en los valores obtenidos. Por último, con el objetivo de ver la influencia de las tensiones de curado inducidas durante el proceso de curado de estos materiales y el efecto de éstas a lo largo del tiempo, se procederá mediante el muestreo de fotografías a evaluar el efecto de dichas tensiones en laminados [0<sub>4</sub>/90<sub>4</sub>] fabricados con 100 y 30 g/m<sup>2</sup>, tomando como referencia las variaciones de altura y curvatura que sufren debido a su propia relajación natural. Además, estas variaciones se relacionarán con el porcentaje de enfriamiento real al que equivaldría dicho instante, para evaluar si con el paso del tiempo, es posible emplear en los cálculos un porcentaje del valor del enfriamiento real, de cara a poder determinar las tensiones residuales para cada momento.

Este trabajo se divide en dos partes: el proceso de fabricación, desde la preparación de los laminados mediante corte y apilado manual, posterior curado en autoclave y preparación de las probetas; y, por otro lado, la realización y análisis de los objetivos planteados mostrando el procedimiento seguido, los cálculos desarrollados y las conclusiones tomadas.



# ABSTRACT

---

The objective of this work is the characterization of an Ultra Thin Ply (UTP) carbon-epoxy fiber composite material using different grammages for the determination of its properties, being their grammages 100 g/m<sup>2</sup>, 50 g/m<sup>2</sup> and 30 g/m<sup>2</sup>.

The characterization process consists of three parts. First, a mechanical analysis of the material will be carried out by means of tensile testing of 0° and 90° unidirectional laminates using a universal testing machine, with the aim of determining the values of  $X_t$ ,  $Y_t$ ,  $E_{11}$ ,  $E_{22}$  and  $\nu_{12}$  for each grammage. Second, by means of a thermal analysis, the coefficients of expansion  $\alpha_1$  and  $\alpha_2$  of each grammage will be obtained, as well as the coefficient  $\alpha_3$  of the 100 g/m<sup>2</sup> prepreg. The main objective of these two parts is to observe whether the use of different grammages can significantly affect the thermo-mechanical properties obtained during the tests. Finally, in order to see the influence of the curing stresses induced at these materials and their effect over time, laminates [0<sub>4</sub>/90<sub>4</sub>] of 100 and 30 g/m<sup>2</sup> will be evaluated by sampling photographs to understand the effect of these stresses, taking as reference the variations in height and curvature that they suffer due to their own natural relaxation. Moreover, these variations will be related to the percentage of real cooling that would be equivalent to that instant in order to evaluate the possibility of use a percentage of the value of the real cooling in the calculations after a certain time, being able to determine the residual stresses for each moment.

This work is divided into two main parts: on the one hand, the manufacturing process, from the preparation of the laminates by manual cutting and stacking, subsequent autoclave curing and preparation of the specimens; and on the other hand, the performance and analysis of the objectives set, showing the procedure followed, the calculations developed and the conclusions drawn.



Agradecimientos .....	vii
Resumen .....	ix
Abstract.....	xi
Índice .....	xiii
Índice de Tablas .....	xv
Índice de Figuras .....	xvi
<b>1 Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1. <i>Materiales compuestos en la industria aeronáutica</i> .....	1
1.2. <i>Qué es un material compuesto</i> .....	2
1.3. <i>Importancia de la caracterización en los materiales compuestos</i> .....	3
1.4. <i>Motivación y objetivos</i> .....	4
1.4.1. <i>Motivación</i> .....	4
1.4.2. <i>Objetivos</i> .....	8
<b>2 Proceso de fabricación.....</b>	<b>9</b>
2.1. <i>Diseño</i> .....	9
2.2. <i>Fabricación de los laminados</i> .....	9
2.2.1. <i>Corte del material</i> .....	10
2.2.2. <i>Apilado y pre-compactación</i> .....	10
2.2.3. <i>Preparación de la bolsa de vacío</i> .....	10
2.2.4. <i>Curado en autoclave</i> .....	12
<b>3 Preparación de probetas .....</b>	<b>11</b>
3.1. <i>Resanado</i> .....	11
3.2. <i>Preparación de los tacos de compuesto vidrio/epoxy</i> .....	11
3.3. <i>Colocación de las galgas extensométricas</i> .....	13
<b>4 Caracterización del material .....</b>	<b>15</b>
4.1. <i>Ensayos mecánicos</i> .....	15
4.1.1. <i>Equipo empleado</i> .....	15
4.1.2. <i>Ensayo de tracción a 0°</i> .....	15
4.1.2.1. <i>Probetas UTP30</i> .....	17
4.1.2.2. <i>Probetas UTP50</i> .....	18
4.1.2.3. <i>Probetas UTP100</i> .....	20
4.1.3. <i>Ensayo de tracción a 90°</i> .....	21
4.1.3.1. <i>Probetas UTP30</i> .....	22
4.1.3.2. <i>Probetas UTP50</i> .....	23
4.3.1.3. <i>Probetas UTP100</i> .....	24
4.2. <i>Determinación de los coeficientes de dilatación</i> .....	26
4.2.1. <i>Equipo empleado</i> .....	26
4.2.2. <i>Laminado UTP30</i> .....	27
4.2.3. <i>Laminado UTP50</i> .....	27
4.2.4. <i>Laminado UTP100</i> .....	28
4.3. <i>Relajación de las tensiones residuales de curado</i> .....	28
4.3.1. <i>Equipo empleado</i> .....	29

4.3.2. Toma de fotografías .....	29
4.3.3. Modelo numérico en Ansys .....	33
<b>5 Discusión de los resultados .....</b>	<b>35</b>
5.1. Ensayo a tracción $0^\circ$ y $90^\circ$ .....	35
5.2. Coeficientes de dilatación .....	36
5.3. Tensiones residuales de curado .....	37
<b>6 Conclusiones y trabajos futuros .....</b>	<b>39</b>
6.1. Conclusiones.....	39
6.2. Trabajos futuros.....	39
<b>7 Bibliografía .....</b>	<b>40</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1.1. Propiedades de materiales compuestos y convencionales [4].	3
Tabla 1.2. Gramajes habituales de diferentes <i>prepregs</i> [6].	4
Tabla 4.1. Valores geométricos, carga y resistencias máximas a tracción de las probetas ensayadas a 0°.	17
Tabla 4.2. Propiedades obtenidas del proceso de caracterización a partir de los puntos más cercanos a los niveles de deformación exigidos por la norma.	18
Tabla 4.3. Valores geométricos, carga y resistencia máximas de los ensayos del material de 50 g/m <sup>2</sup> .	19
Tabla 4.4. Propiedades obtenidas de los ensayos del material de 50 g/m <sup>2</sup> .	19
Tabla 4.5. Valores geométricos, resistencia y carga máxima de las probetas de 100 g/m <sup>2</sup> .	20
Tabla 4.6. Propiedades obtenidas de las probetas UTP100 tras los ensayos.	20
Tabla 4.7. Datos geométricos, carga y resistencia máximas obtenidas.	22
Tabla 4.8. Propiedades obtenidas tras los ensayos de las probetas UTP30 tomando como referencia los puntos al 25 y 50% de la deformación máxima ( $\epsilon_{max}$ ).	22
Tabla 4.9. Datos geométricos, carga y resistencia máxima de probetas UTP50 frente a ensayo a 90°.	23
Tabla 4.10. Valor de las propiedades obtenidas durante el ensayo a 90° de las probetas UTP50.	24
Tabla 4.11. Valores geométricos, carga y resistencia máxima de las probetas UTP100 frente a ensayo de 90°.	25
Tabla 4.12. Valores obtenidos del ensayo a 90° de las probetas UTP100.	25
Tabla 4.13. Valores medidos por el puente de Wheatstone en el laminado UTP30.	27
Tabla 4.14. Valor de los coeficientes para distintos incrementos de temperatura ( $\Delta T$ ).	27
Tabla 4.15. Valores de las deformaciones para distintas temperaturas en laminado UTP50.	28
Tabla 4.16. Propiedades obtenidas en laminado UTP50.	28
Tabla 4.17. Deformaciones obtenidas para distintas temperaturas en el laminado UTP100.	28
Tabla 4.18. Valores obtenidos en laminado UTP100.	28
Tabla 4.19. Valores de $h(t)$ y $R_c(t)$ de los laminados UTP30 y UTP100 para distintos instantes de tiempo.	30
Tabla 5.1. Estadísticas de los ensayos a 0° y 90° de los tres gramajes.	35
Tabla 5.2. Valores finales promediados del valor promedio de cada conjunto de probetas.	36
Tabla 5.3. Valor promedio del conjunto de los 3 gramajes diferentes.	37

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Materiales empleados en un A350 XWB [1]. .....	1
Figura 1.2. Configuración de un laminado <i>cross-ply</i> mediante el apilado de diferentes láminas en distintas orientaciones [2]. .....	2
Figura 1.3. Disposiciones habituales de fibra y matriz en una lámina de material compuesto [3]. .....	3
Figura 1.4. Etapas de la pirámide de ensayos [5].....	4
Figura 1.5. a) Incremento de la deformación hasta el fallo transversal en laminados <i>cross-ply</i> según el espesor de la lámina de 90° [7]. .....	5
Figura 1.6. a) y b) Regiones ricas en resina en laminados fabricados con láminas convencionales y ultradelgadas respectivamente [6] c) Defectos en la geometría de las fibras [7]. .....	6
Figura 1.7. Daño producido en la lámina de 90° en dirección de la carga [8]. .....	6
Figura 1.8. a) Configuración laminado <i>cross-ply</i> sometido a tracción [8], y b) Tensiones $\sigma_y$ originadas en los bordes debido a la diferencia de rigideces en dirección de la fibra y de la matriz [2]. .....	7
Figura 1.9. Efecto de las deformaciones debido al incremento de temperatura durante el proceso de curado y su dependencia con $\alpha_i$ [8].....	7
Figura 1.10. Efecto del curado debido al enfriamiento en laminados $[0_4/90_4]$ tras el curado en autoclave [8].8	
Figura 2.1. Herramientas empleadas en el proceso de fabricación. ....	10
Figura 2.2. a) Disposición de los laminados en la bolsa de vacío y b) Introducción de la bolsa de vacío en el autoclave.....	11
Figura 2.3. Ciclo de curado utilizado basado en el datasheet del fabricante.....	12
Figura 3.1. Máquina de corte radial utilizada en el proceso de fabricación. ....	11
Figura 3.2. a) Tacos de vidrio/epoxy y laminados junto a las tiras de adhesivo, b) Laminados preparados tras aplicar presión y calor manual, y c) Recubrimiento de teflón previo a la preparación de la bolsa de vacío... ..	12
Figura 3.3. Probetas preparadas para el ensayo a tracción a 90°. .....	14
Figura 4.1. a) Instron 4482, y b) Instron 4483 empleadas durante el proceso de caracterización. ....	15
Figura 4.2. a) Disposición general del ensayo a 0°, y b) Rotura de las probetas ensayadas a 0°. .....	16
Figura 4.3. Esquema general empleado para el cálculo de propiedades de las probetas ensayadas a 0°. .....	17
Figura 4.4. Representación tensión-deformación de las probetas UTP30 .....	18
Figura 4.5. Representación tensión-deformación de las probetas UTP50. ....	19
Figura 4.6. Representación tensión-deformación de las probetas UTP100. ....	20
Figura 4.7. a) Esquema general del ensayo a 90°, y b) Rotura originada por fallo en la matriz de probeta UTP30. ....	21
Figura 4.8. Esquema general utilizado para el cálculo de las propiedades de las probetas. ....	21
Figura 4.9. Representación tensión-deformación del ensayo a 90° de probetas UTP30.....	23
Figura 4.10. Representación gráfica de la evolución tensión-deformación de las probetas UTP50.....	24

Figura 4.11. Representación tensión-deformación ensayo a 90° de las probetas UTP100. ....	25
Figura 4.13. a) Zona fotográfica, y b) Toma de la altura h(t) mediante regla y papel milimetrado. ....	29
Figura 14.14. Laminado UTP30 en instantes: a) t=0.00 h, b) t=92.50 h, y c) t=1674.50 h.....	31
Figura 14.15. Laminado UTP100 en instantes: a) t=0.00 h, b) t=92.50 h, y c) t=1674.50 h.....	32
Figura 4.16. a) Condiciones de simetría impuestas en el modelo de Ansys, y b) Configuración deformada e indeformada de una de las dos ramas del laminado al aplicar un $\Delta T$ . ....	33
Figura 4.17. Geometría para un punto cualquiera del laminado. ....	34
Figura 4.18. Resultados del radio de curvatura a lo largo de la longitud del laminado. ....	34
Figura 5.1. Roturas producidas en las probetas ensayadas a 0° a) UTP100, b) UTP50, y c) UTP30.....	36
Figura 5.3. Comparativa entre los radios de curvatura experimentales, y los numéricos para distintos incrementos de temperatura. ....	38
Figura 5.2. Comparativa entre la altura experimental y la altura numérica para distintos incrementos de temperatura.....	38



# 1 INTRODUCCIÓN

*“Todo gran logro se ha caracterizado por un cuidado extremo, un esmero infinito hasta el más mínimo detalle”*

*- Elbert Hubbard -*

El proceso de caracterización de un material resulta de vital importancia en el mundo ingenieril para poder estimar y comprender de forma adecuada el comportamiento de éstos ante distintas solicitaciones. En concreto, los materiales compuestos debido a su carácter anisótropo y heterogéneo, su análisis y uso es más complejo que el de otros materiales convencionales como los metales. Debido a ello, el proceso de caracterización de estos materiales es bastante más extenso y ha de realizarse con exhaustividad. De hecho, el conocimiento de las propiedades de un material compuesto es fundamental en sectores como el aeronáutico donde el nivel de exigencias en exactitud y precisión es muy elevado.

## 1.1. Materiales compuestos en la industria aeronáutica

Desde los comienzos de la aviación en el siglo XX a manos de los hermanos Wright, la aviación ha sufrido grandes transformaciones en apenas algo más de un siglo, y con ellas la búsqueda de nuevos materiales para suplir las distintas necesidades. Con la creciente demanda de potencia en las aeronaves debido al crecimiento de éstas en tamaño y capacidad, surgió la necesidad de sustituir la madera por materiales metálicos. Sin embargo, la necesidad de encontrar un material más liviano y con un mejor comportamiento a fatiga (causa principal de fallo en estas estructuras) hizo a los materiales compuestos el mejor candidato. Además de esta propiedad, una ventaja importante de los materiales compuestos son sus elevadas propiedades específicas (valor de sus propiedades en relación con su peso) como pueden ser su elevada resistencia mecánica o rigidez específicas, así como una alta resistencia a la corrosión y a la abrasión. Actualmente AIRBUS utiliza en algunos aviones de su flota como el A350 aproximadamente un 50% de material compuesto [1]. En la figura 1.1. se muestra un esquema de los materiales que conforman la mayoría de los aviones modernos.

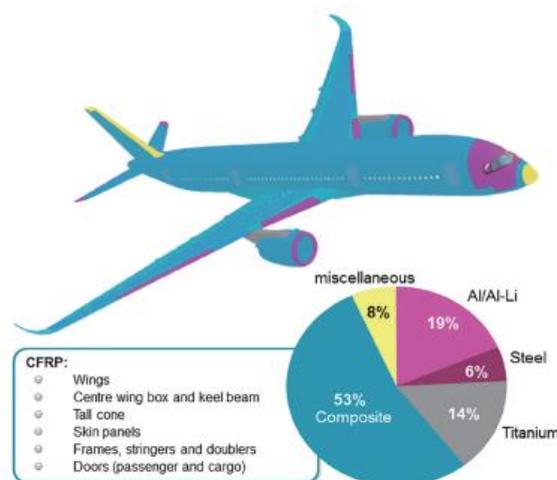


Figura 1.1. Materiales empleados en un A350 XWB [1].

## 1.2. Qué es un material compuesto

Un material compuesto es una combinación a escala microscópica de, al menos, dos materiales diferentes que logran entre sí un efecto sinérgico en el material, logrando mejores propiedades que dichos materiales trabajando de forma independiente. Los materiales compuestos suelen estar constituidos por un material de “refuerzo” el cual confiere las excelentes propiedades que presentan estos materiales, y uno que trabaje como “matriz” que le confiera la cohesión y consistencia necesaria al material para que éste pueda ser utilizado. La superficie generada entre fibras y matriz comúnmente se denomina interfase y es uno de los factores más importantes en estos materiales debido a su función como mecanismo de absorción de energía.

El objetivo de este tipo de materiales es orientar el material de refuerzo en la dirección de la sollicitación con el objetivo de obtener un mejor comportamiento frente a estas cargas. Sin embargo, habitualmente los laminados de material compuesto suelen enfrentarse a diversas sollicitaciones que normalmente no provienen de una misma dirección, como puede ser por ejemplo el impacto de aves en aerogeneradores o en otro tipo de estructuras. Por ello que los materiales compuestos generalmente se dispongan en una sucesión apilada de láminas en las que las fibras se presenten en más de una dirección. A este conjunto de láminas se le denomina laminado. En la figura 1.2. se muestra el esquema general de un laminado *cross-ply* (compuesto por una sucesión de láminas orientadas a  $0^\circ$  y  $90^\circ$ ) [2].

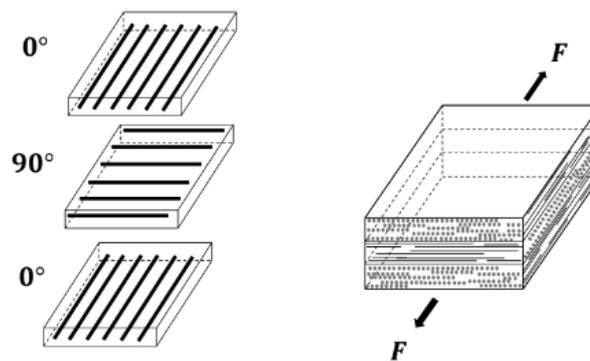


Figura 1.2. Configuración de un laminado *cross-ply* mediante el apilado de diferentes láminas en distintas orientaciones [2].

Existen diferentes formas de clasificar los materiales compuestos: en función de qué materiales sean, de cómo se encuentren dispuestos fibra y matriz entre sí, por su proceso de fabricación, etc. Habitualmente las láminas unidireccionales de material compuesto se presentan en forma de un conjunto de fibras bañadas en una resina polimérica sin polimerizar denominados *prepregs*. Esta resina, mediante un proceso de calentamiento y enfriamiento, polimeriza y acaba obteniéndose las propiedades finales del material. En la figura 1.3. se muestra las configuraciones más habituales de fibra-matriz en una lámina de *prepreg* [3].

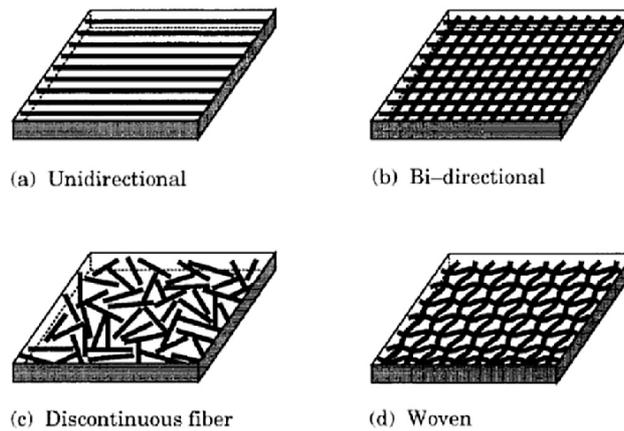


Figura 1.3. Disposiciones habituales de fibra y matriz en una lámina de material compuesto [3].

De todas estas configuraciones, en la tabla 1.1. se muestra una comparativa entre las propiedades de materiales convencionales como los metales, frente a laminados *cross-ply* de material compuesto [4], donde pueden observarse grandes ventajas de los materiales compuestos en las propiedades mencionadas en el apartado 1.1.

Tabla 1.1. Propiedades de materiales compuestos y convencionales [4].

Material	Fración en volumen de fibra ( $V_f$ ) (%)	Módulo de Elasticidad (E) (GPa)	Resistencia a la tracción ( $\sigma_u$ ) (GPa)	Densidad ( $\rho$ ) ( $g/cm^3$ )	Módulo específico (E/ $\rho$ )	Resistencia específica ( $\sigma_u/\rho$ )
Acero	---	210	0.45-0.83	7.8	26.9	0.058-0.106
Aluminio						
2024-T4	---	73	0.41	2.7	27.0	0.152
6061-T6	---	69	0.26	2.7	25.5	0.096
Vidrio(E)-Epoxy	57	21.5	0.57	1.97	10.9	0.26
Kevlar 49-Epoxy	60	40	0.80	1.40	29.0	0.57
Carbono-Epoxy	60	83	0.97	1.54	53.9	0.63

### 1.3. Importancia de la caracterización en los materiales compuestos

A pesar de que los materiales compuestos presentan muchas ventajas frente a otros materiales, la principal desventaja de éstos radica en la presencia de diversos fenómenos y mecanismos de fallo que aún están bajo estudio. Además, en la comunidad científica se sigue investigando en busca de un criterio de fallo lo más fidedigno posible debido a que los existentes actualmente no son capaces de captar las evidencias experimentales completamente. Esta situación es muy diferente a la de otros materiales como los metálicos, donde los mecanismos de fallo están bien establecidos. Por ello que el estudio del comportamiento de estos materiales sea fundamental, dado que el ensayo exhaustivo de estos materiales es la única manera de corroborar su comportamiento y obtener datos esenciales para su empleo en estructuras y/o componentes.

Además de esta naturaleza particular de los materiales compuestos, otro motivo que respalda la importancia del proceso de caracterización es el proceso de fabricación y manufactura de dichos materiales, en los cuales se pueden encontrar diversos defectos a su paso por las distintas etapas. Entre ellos los más habituales pueden ser debidos a aire atrapado durante el proceso de polimerización, lo que conlleva porosidad residual que puede derivar en concentradores de tensiones; inclusiones debido a la suciedad; daño en las fibras; exceso de resina entre láminas, etc. Por ello, es importante realizar un buen procedimiento de fabricación previo a la caracterización, para que ésta sea lo mejor posible.

Debido a todos estos factores, en la industria aeronáutica es común seguir un procedimiento exhaustivo y bien establecido de ensayos, habitualmente conocido como “Pirámide de ensayos”. Esta pirámide combina no solo los métodos de caracterización tradicionales, sino también la labor primordial de los estudios numéricos y computacionales. En la figura 1.4. se aprecian los diferentes niveles dentro del proceso de caracterización [5], normalmente establecido en 6 niveles.

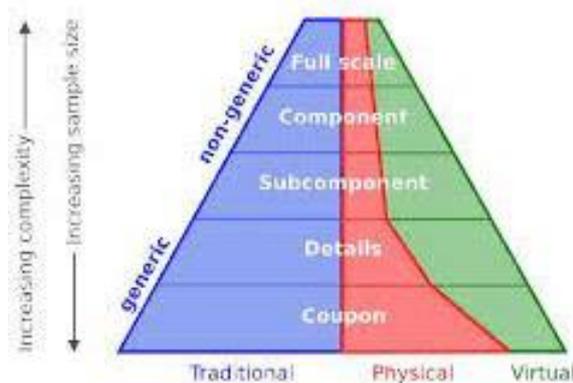


Figura 1.4. Etapas de la pirámide de ensayos [5].

## 1.4. Motivación y objetivos

El Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales (GERM) de la Universidad de Sevilla está realizando diversos proyectos en los cuáles se emplea el uso de láminas ultradelgadas. Existen diferentes estudios que motivan la realización de este trabajo de cara a proporcionar datos fidedignos de las propiedades de este material compuesto con distintos gramajes.

### 1.4.1. Motivación

Las láminas ultradelgadas surgieron en la década de los 90, y desde entonces, ha existido una gran labor de investigación por parte de la comunidad científica. Estos materiales habitualmente presentados en formato de *prepregs* o *non-crimp fabrics (NCFs)*, se definen como aquellos que están conformados por láminas de espesor inferior a  $100\ \mu\text{m}$  o láminas con un peso por unidad de área inferior a  $100\ \text{g/m}^2$  aproximadamente, a diferencia de los *prepregs* convencionales ( $\sim 125\ \mu\text{m}$ ) o gruesos ( $>200\ \mu\text{m}$ ). En la tabla 1.2. se muestra un esquema general del peso por unidad de área en *prepregs* de distintos materiales [6].

Tabla 1.2. Gramajes habituales de diferentes *prepregs* [6].

Fibre type	Typical thin-ply prepreg areal weights ( $\text{g/m}^2$ ) [3]	Typical standard-ply and thick-ply prepreg areal weights ( $\text{g/m}^2$ )
Carbon	15–100	100–450
Glass	48–150	150–800
Aramid	20–150	150–500
Quartz	30–150	150–300
Polybenzoxazole (PBO)	30–150	150–300

Inicialmente, su aparición surgió por dos motivos principalmente. En primer lugar, se conseguía introducir un mayor número de orientaciones para un mismo espesor de laminado gracias al avance de nuevas técnicas de fabricación. Esto significaba una gran ventaja especialmente en componentes de pequeño tamaño donde el espesor del laminado es un gran condicionante, ofreciendo un mayor margen de diseño. Por otro lado, numerosos ensayos realizados desde el descubrimiento de este tipo de materiales han mostrado que el empleo de un menor gramaje en la lámina de  $90^\circ$  de laminados *cross-ply* [ $0_n/90_m$ ] conlleva un cambio en los mecanismos de aparición del daño. Este fenómeno conocido en la literatura como “efecto escala” se traduce en un retraso en la aparición del fallo transversal en la lámina más débil de un laminado (como es la lámina de  $90^\circ$  en los laminados *cross-ply*) conforme se va disminuyendo el espesor de dicha lámina. En los primeros estudios de este retraso en el fallo de la lámina de  $90^\circ$  se puede apreciar que la deformación a la cual se produce el fallo transversal de la lámina de  $90^\circ$  es mayor conforme se reduce el espesor de dicha lámina [7]. En la figura 1.5. se muestran los resultados obtenidos en sus ensayos.

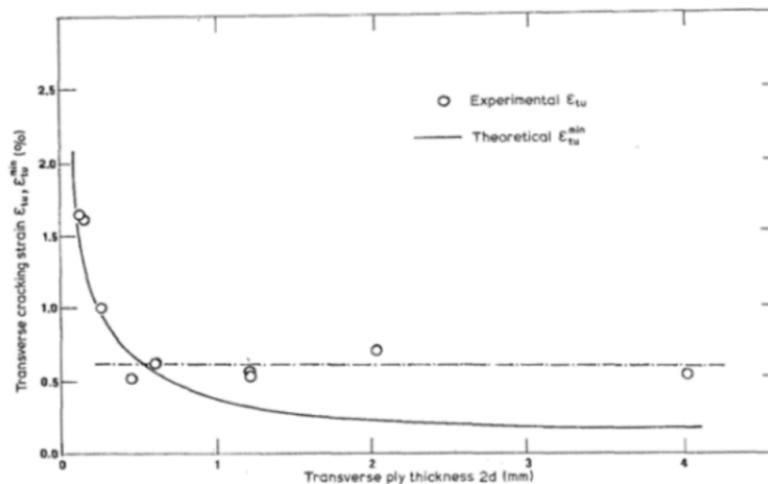


Figura 1.5. a) Incremento de la deformación hasta el fallo transversal en laminados *cross-ply* según el espesor de la lámina de  $90^\circ$  [7].

Además, otro de los motivos de la caracterización de este material es debido a los nuevos métodos de fabricación con los que se realizan las láminas ultradelgadas, ya que sería interesante corroborar que la distribución de fibra y resina no varía sustancialmente al disminuir el gramaje provocando un cambio en las propiedades finales del material. En alguna ocasión, se ha visto que el porcentaje de volumen de fibras ( $V_f$ ) en los *prepregs* de menor gramaje son generalmente inferiores [6], debido posiblemente al proceso de fabricación y al hecho de que existen mayor número de capas y por ende, de regiones interlaminares ricas en resina (figura 1.6.a) y 1.6.b)). Incluso, no se conoce el motivo, pero en ciertos estudios se ha observado formas irregulares de las fibras que difieren de la sección con geometría circular que normalmente presentan (figura 1.6.c)). Esto pone en duda si el proceso de manufactura puede condicionar las propiedades del material, y por ello que la alteración del espesor para un mismo material (igual fibra y matriz) pueda ser un condicionante; de ahí el interés de estudiar si el gramaje es un factor que afecte a las propiedades del material en estudio.

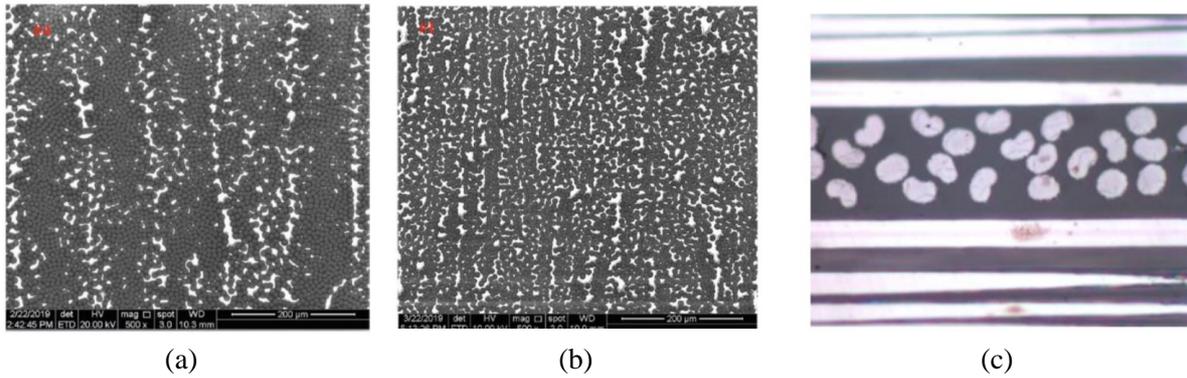


Figura 1.6. a) y b) Regiones ricas en resina en laminados fabricados con láminas convencionales y ultradelgadas respectivamente [6] c) Defectos en la geometría de las fibras [7].

Como último aspecto cabe destacar otro fenómeno el cual está siendo investigado en el seno del GERM, conocido en la literatura como “efecto borde”. Este fenómeno también observado principalmente en laminados *cross-ply* surgió al visualizar un daño en la lámina de  $90^\circ$  en dirección de la aplicación de la carga en las zonas cercanas al borde, cuando éstos eran sometidos a carga axial, de ahí su nombre. Lo sorprendente de este fenómeno es que a veces el simple proceso de curado ya podía inducir las suficientes tensiones de curado como para que aparezca este tipo de daño, es decir, sin siquiera llegar a aplicar carga. Se ha apreciado que su generación también varía con el espesor de la lámina de  $90^\circ$  y diversos estudios muestran que dicha relación es una función de la relación de espesores entre la lámina de  $90^\circ$  y las de  $0^\circ$ , siendo mayor el daño cuánto menor es el cociente entre el espesor de la lámina de  $90^\circ$  y la de  $0^\circ$  respectivamente [8]. La figura 1.7. muestra este fenómeno.

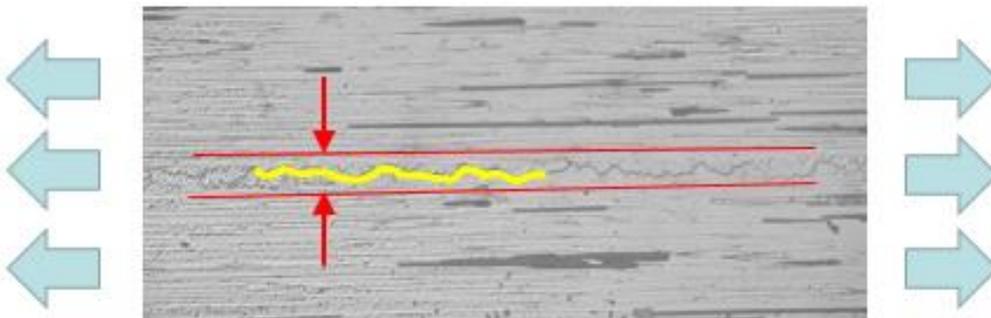


Figura 1.7. Daño producido en la lámina de  $90^\circ$  en dirección de la carga [8].

La explicación de esta tipología de daño puede ser debida a la heterogeneidad del material y a la necesidad de mantener la compatibilidad de deformaciones entre ambas capas del laminado. Si se aprecia un laminado *cross-ply* quedándose únicamente con una cuarta parte (laminado simétrico), se puede apreciar que al someter dicho laminado a una carga axial en dirección de las fibras de la lámina de  $0^\circ$ , debido a la ortotropía del material, las láminas sufrirán mayores deformaciones en la dirección transversal a la fibra, respecto a su dirección longitudinal, provocando que la lámina de  $0^\circ$  tienda a “tirar” de la lámina de  $90^\circ$  por compatibilidad en deformaciones. En la figura 1.8. se muestra un esquema de la configuración descrita anteriormente, así como las tensiones  $\sigma_y$  que se generan en las zonas cercanas al borde debido a este efecto.

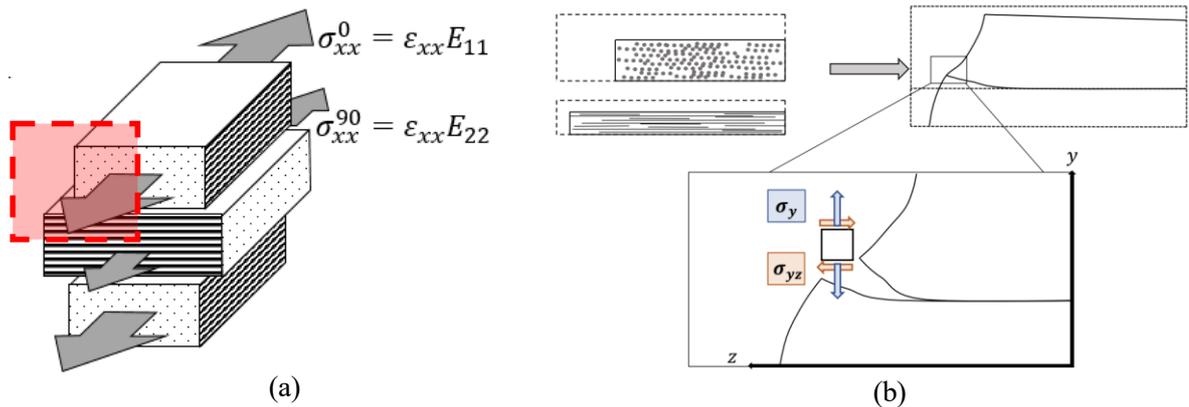


Figura 1.8. a) Configuración laminado *cross-ply* sometido a tracción [8], y b) Tensiones  $\sigma_y$ , originadas en los bordes debido a la diferencia de rigideces en dirección de la fibra y de la matriz [2].

Debido a esto, se generarán en los laminados tensiones que logren mantener dicha compatibilidad. Se aprecia que dichas tensiones cerca del borde generan tracciones debido a que la lámina de  $0^\circ$  al contraerse más en la dirección  $z$  (figura 1.8.) impide que la lámina de  $90^\circ$  se deforme de forma aislada. Estas tensiones, responsables de la generación de este tipo de fallo, se generan únicamente en el borde produciéndose en una profundidad aproximadamente del orden de 2-3 veces el espesor de la lámina de  $90^\circ$  [8], llegando a ser de valores del orden de hasta  $0.8\sigma_x$  en laminados ultradelgados, lo que puede claramente condicionar las propiedades y el resultado de ensayos con este tipo de materiales, al poder producirse la rotura del laminado de una forma diferente a la teóricamente esperada.

Por otro lado, no cabe olvidar la importancia de las tensiones de curado inducidas en este tipo de materiales debido a su proceso de fabricación, las cuáles contribuirán junto con las tensiones mecánicas a este tipo de daño. Durante el proceso de curado en este tipo de materiales, el material compuesto habitualmente se introduce en el autoclave en el cual se somete a presión y temperatura. La polimerización de la resina, la cual se produce a temperaturas superiores a los  $100^\circ\text{C}$ , al enfriarse, produce en los laminados contracciones y/o dilataciones que vuelven a exigir la compatibilidad de deformaciones entre las distintas láminas. En la figura 1.9. se muestra el problema comentado en un laminado *cross-ply*.

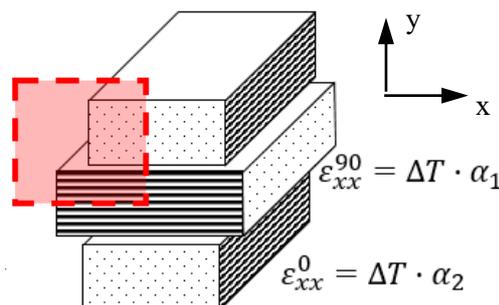


Figura 1.9. Efecto de las deformaciones debido al incremento de temperatura durante el proceso de curado y su dependencia con  $\alpha_i$  [8].

Debido a los distintos coeficientes de dilatación que presentan la fibra y la matriz, al igual que pasaba con las rigideces de éstas, tendrán un comportamiento diferente en función de la dirección que se esté tratando. Como se observa, la determinación de los coeficientes de dilatación ( $\alpha_i$ ) para evaluar estas deformaciones térmicas son necesarios para comprender correctamente este fenómeno y de ahí la

motivación de este trabajo por determinar dichos coeficientes. Estas tensiones al igual que las mecánicas, se ha mostrado en modelos numéricos realizados por el GERM que se encuentran entre  $0.4-0.9\sigma_x$ , lo cual suscita la posibilidad de que la suma de tensiones mecánicas y térmicas puedan originar incluso mayores tensiones que las propiamente generadas en la dirección de la carga, por ello el interés de este fenómeno.

Sin embargo, la experiencia muestra que las tensiones térmicas son una función del tiempo y por ello que su valor nominal depende de esta variable, ya que estas tensiones tienden a irse eliminando por propia relajación natural del material. La última parte de este trabajo se basa en determinar si la influencia de esta variable puede reducir el valor de estas tensiones notoriamente en un plazo de tiempo relativamente aceptable, ya que permitiría trabajar suponiendo un valor menor de estas tensiones o incluso descartarlas si llegasen a ser despreciables, simplificando en gran medida los cálculos. La última parte del trabajo basada en la utilización de laminados antisimétricos  $[0_4/90_4]$  toma como punto de partida este fenómeno (figura 1.10.), junto con el fundamento teórico de que las deformadas de los laminados deberían de inscribirse perfectamente en una circunferencia, por lo que cualquier laminado, para un instante de tiempo dado, su radio de curvatura debería de ser constante, resultado que permitiría nuevas simplificaciones a los cálculos, pero esta vez, de índole geométrica.

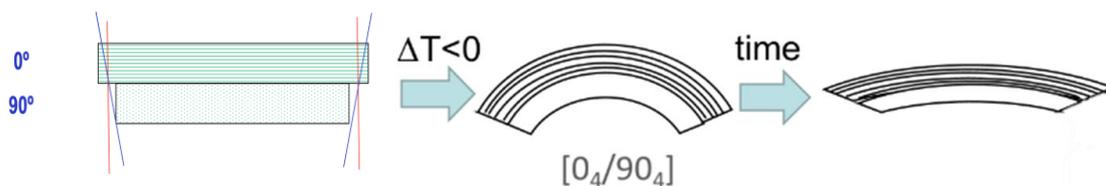


Figura 1.10. Efecto del curado debido al enfriamiento en laminados  $[0_4/90_4]$  tras el curado en autoclave [8].

### 1.4.2. Objetivos

Los objetivos del trabajo se recogen a continuación:

- Caracterizar el material NTPT THINPREG™ 402 mediante ensayos mecánicos y térmicos.
- Comprender la influencia del gramaje en las propiedades obtenidas durante el proceso de caracterización. Evaluar las diferencias entre los distintos gramajes y evaluar si es factible caracterizar con materiales convencionales este tipo de materiales ultradelgados.
- Comparar si los coeficientes de dilatación  $\alpha_2$  y  $\alpha_3$  difieren significativamente entre sí o por el contrario tienen valores similares.
- Evaluar la capacidad del material para relajar naturalmente las tensiones residuales tras el ciclo de curado. Estudiar la disminución de dichas tensiones relacionándolas con un porcentaje equivalente de la temperatura de enfriamiento real para cada instante.
- Corroborar que la deformada de los laminados  $[0_4/90_4]$  queda inscrita en una circunferencia, mostrando que el radio de curvatura  $R_c(t)$  es constante para cualquier punto del laminado, para un instante dado, pudiendo ofrecer simplificaciones en los cálculos y poder aplicar el Teoría General del Laminado (TGL) a cualquier punto de éste.

## 2 PROCESO DE FABRICACIÓN

En este capítulo se detallará todo el material y útiles necesarios para realizar las distintas partes del proceso de fabricación: desde el corte y apilado de las láminas de *prepreg*, hasta la introducción en autoclave de los laminados para obtener la configuración final del material a caracterizar. Para este trabajo concretamente se ha utilizado un CFRP con matriz epoxy. Esta etapa incluye todo el material empleado en el capítulo 4 para el estudio de las diferentes propiedades a evaluar: ensayo a tracción a  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , la determinación de los coeficientes de dilatación, y el estudio de las tensiones de curado de los laminados  $[0_4/90_4]$ . Para todo el proceso de caracterización se usará el material compuesto NTPT THINPREG™ 402 conformado por *prepregs*, con designación TP 402/T700SC 12K/Xgsm/35%, siendo X los distintos gramajes: 100, 50 y 30 g/m<sup>2</sup>.

### 2.1. Diseño

Las características geométricas de los distintos laminados para el proceso de caracterización se recogen a continuación; en total el proceso de fabricación ha consistido en la elaboración de 11 laminados independientes:

- Laminado de 100 g/m<sup>2</sup> para ensayo axial a  $0^\circ$ : 150x280 mm conformados por 8 láminas, del cual se extraerán un total de 5 probetas.
- Laminado de 100 g/m<sup>2</sup> para ensayo axial a  $90^\circ$ : 210x250 mm conformados por 17 láminas, del cual se extraerán un total de 5 probetas.
- Laminado de 50 g/m<sup>2</sup> para ensayo axial a  $0^\circ$ : 150x280 mm conformados por 18 láminas, del cual se extraerán un total de 5 probetas.
- Laminado de 50 g/m<sup>2</sup> para ensayo axial a  $90^\circ$ : 210x250 mm conformados por 37 láminas, del cual se extraerán un total de 5 probetas.
- Laminado de 30 g/m<sup>2</sup> para ensayo axial a  $0^\circ$ : 150x280 mm conformados por 25 láminas, del cual se extraerán un total de 5 probetas.
- Laminado de 30 g/m<sup>2</sup> para ensayo axial a  $90^\circ$ : 210x250 mm conformados por 51 láminas, del cual se extraerán un total de 5 probetas.
- Laminado de 100 g/m<sup>2</sup> para la determinación de  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  y  $\alpha_3$ : dimensiones de 50x50 respectivamente conformado por 90 láminas.
- Laminado de 50 g/m<sup>2</sup> para la determinación de  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$ : dimensiones de 50x50 respectivamente conformado por 25 láminas.
- Laminado de 100 g/m<sup>2</sup> para la determinación de  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$ : dimensiones de 50x50 respectivamente conformado por 18 láminas.
- Laminado de 100 g/m<sup>2</sup> con configuración  $[0_4/90_4]$ : dimensiones de 100x280 mm.
- Laminado de 30 g/m<sup>2</sup> con configuración  $[0_4/90_4]$ : dimensiones de 100x280 mm.

Las dimensiones de las probetas para el ensayo axial a  $0^\circ$  y  $90^\circ$  han sido establecidas siguiendo las recomendaciones indicadas en la norma ASTM-D3039/D3039M-14 [9], empleando probetas de ancho 15 mm para el ensayo a  $0^\circ$ , y de 25 mm para el ensayo a  $90^\circ$ .

### 2.2. Fabricación de los laminados

Los materiales compuestos fabricados con *prepregs* habitualmente siguen un proceso similar de fabricación que consta de una serie de etapas hasta alcanzar el material en su estado final o de uso. El presente trabajo de fabricación se ha realizado en la sala limpia que se encuentra en el Laboratorio de Elasticidad y Resistencia de Materiales (LERM) con el objetivo de reducir la exposición del material a suciedad y establecer unas condiciones ambientales de presión, temperatura y humedad constantes durante todo el proceso de fabricación. El orden de estas etapas se muestra a continuación de forma cronológica en el tiempo:

- Corte del material
- Apilado y pre-compactación
- Preparación de la bolsa de vacío
- Curado en autoclave

### 2.2.1. Corte del material

Debido a que los prepegs de material compuesto están conformados por una resina sin polimerizar, para evitar que este proceso de polimerización se acelere, es habitual que el material compuesto descansa en una cámara frigorífica a temperaturas en torno a los  $-20^{\circ}\text{C}$ . Por ello, es de vital importancia una vez sacado el rollo de material de la cámara, dejar que éste atempere durante aproximadamente 2-3 horas hasta alcanzar la temperatura ambiente, para poder proceder con la correcta manipulación.

Una vez atemperado, el corte del material se ha realizado empleando diferentes útiles mostrados en la figura 2.1. Debido a la geometría de las láminas a cortar, la disposición de corte sobre el rollo de material compuesto ha sido directa; comenzando con el corte de todas las láminas de  $0^{\circ}$ , y posteriormente, todas las de  $90^{\circ}$ . Al ser el rollo de ancho 300 mm, el material sobrante ha sido empleado para la elaboración de los laminados  $[0_4/90_4]$  y los utilizados para la determinación de los coeficientes de dilatación.

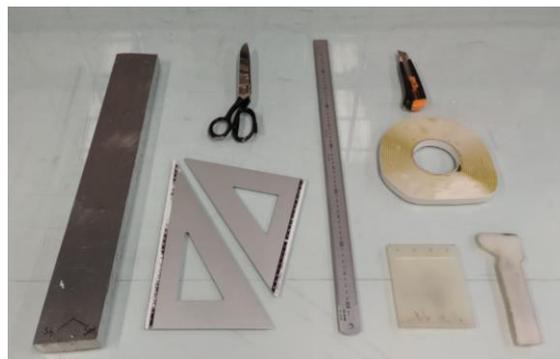


Figura 2.1. Herramientas empleadas en el proceso de fabricación.

### 2.2.2. Apilado y pre-compactación

Una vez cortado el material, el siguiente paso consiste en apilar dichas láminas en la orientación correcta con el objetivo de conformar los laminados. A pesar de que para el proceso de caracterización todos los laminados están compuestos por una única orientación, simplificando la dificultad de apilado, cabe destacar la importancia del alineamiento de las distintas capas para asegurar que existe el mínimo grado de desviación posible entre ellas. Para esta etapa, el procedimiento a seguir se ha basado en la alternancia del apilado de 4 láminas, retirando el papel protector de cada una de ellas, y posteriormente, procediendo a realizar una compactación de dichas capas en una bolsa de vacío durante 10 minutos para eliminar cualquier resto de aire atrapado y aumentar la adherencia entre capas. Este proceso se ha realizado reiteradas ocasiones cada 4 nuevas capas colocadas sobre el laminado. Además de la compactación, entre cada una de las capas se ha aplicado presión con una espátula (figura 2.1.) manualmente para promover la ausencia de imperfecciones.

### 2.2.3. Preparación de la bolsa de vacío

La preparación de la bolsa de vacío es una de las etapas más importantes en el proceso de fabricación debido a que una vez se introduzca en el autoclave, se obtendrá el laminado final de material compuesto. Por ello, es importante prestarle el máximo cuidado a cualquier factor que pueda dañar la integridad de la bolsa, ya que el resultado puede acarrear la pérdida de los laminados y con ello todo el trabajo anterior. El objetivo de la bolsa de vacío se centra en: asegurar una correcta extracción del aire

atrapado entre las distintas láminas, evitando así la formación de poros durante el proceso de polimerización; reducir la cantidad de polvo o suciedad presente en la atmósfera; y, por último, aunque no menos importante, evitar el “quemado” de la resina, lo que conllevaría la pérdida de los laminados.

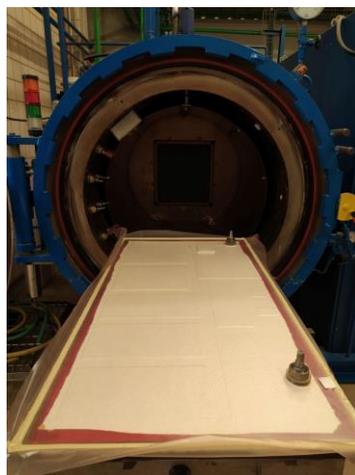
Para la preparación de la bolsa de vacío ha sido necesario el empleo de distintos materiales:

- Plancha metálica de acabado liso para asegurar la homogeneidad de espesores y ausencia de imperfecciones en los laminados durante el proceso de curado.
- Láminas de teflón necesarias para evitar la adherencia de la resina al resto de la bolsa y a la plancha metálica, de cara a la extracción sin dificultad los laminados curados.
- Airwave: tejido utilizado para obtener un vacío y compactación lo más homogénea posible durante todo el proceso de curado.
- Lámina de Nylon necesaria para el sellado posterior de la bolsa.
- Uso de cinta de cromato con el objetivo de obtener el sellado total de la bolsa, haciendo de nexo de unión entre la plancha y la lámina de Nylon.

La disposición de los laminados en la plancha metálica es de vital importancia para evitar defectos de fabricación, como puede ser que laminados muy juntos puedan unirse debido a la fluidez de la resina, o que, debido a la cercanía de éstos, no se permita la libre fluidez de ésta, acarreado posibles tensiones residuales adicionales. Para el curado del laminado de 1 cm de espesor se han empleado bandas de corcho alrededor del laminado para evitar que la resina fluya demasiado y éste perdiese el espesor deseado para el proceso de caracterización debido a que la galga extensométrica tiene una longitud mínima. En la figura 2.2. se muestra la disposición llevada a cabo, así como la bolsa de vacío completamente sellada y lista para el proceso de curado.



(a)



(b)

Figura 2.2. a) Disposición de los laminados en la bolsa de vacío y b) Introducción de la bolsa de vacío en el autoclave.

### 2.2.4. Curado en autoclave

Para la realización del ciclo de curado, el fabricante aporta diferentes opciones para realizar el curado de la resina. En este trabajo se ha empleado el ciclo de propiedades mejoradas. En la figura 2.3. se aprecia el ciclo de curado empleado, tomando como referencia el propuesto en la hoja de datos del fabricante [10]. Cabe añadir que previamente a la realización del curado, el material se dejó 24 horas precompactando en vacío ya que anteriores ciclos de curado realizados con este mismo material por el GERM, no habían mostrado buenos resultados, y este método, había conseguido solventarlo.

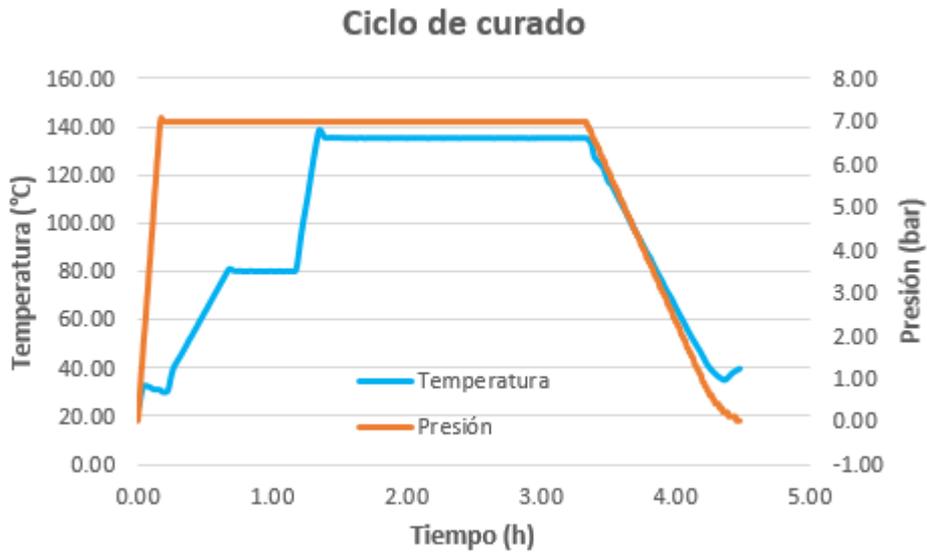


Figura 2.3. Ciclo de curado utilizado basado en el datasheet del fabricante.

## 3 PREPARACIÓN DE PROBETAS

Tras finalizar el proceso de curado y obtener el material en su estado final, para realizar las labores de caracterización pertinentes es necesario preparar los laminados de forma adecuada con el objetivo de obtener probetas con dimensiones similares que hagan que los ensayos sean lo más parecidos posibles, alcanzando pequeños valores de desviación en los resultados. Para ello, una vez ha sido sacado el material del autoclave, la preparación de las probetas consta de las siguientes etapas: un resanado inicial para eliminar los restos de resina; la preparación de los tacos de compuesto vidrio/epoxy para asegurar el correcto agarre de las mordazas sobre las probetas; y por último, asegurar el correcto pegado de las galgas extensométricas, para obtener una buena medición de los resultados obtenidos durante todo el proceso.

### 3.1. Resanado

Una vez finalizado el ciclo de curado, los laminados quedan con excedentes en los bordes debido a que la resina ha fluido. Para obtener un espesor uniforme de los laminados y obtener las dimensiones adecuadas del proceso de caracterización, es necesario cortar dichos excedentes. Para ello, se emplea una máquina de corte radial disponible en el LERM, mostrada en la figura 3.1., con agua como líquido refrigerante.



Figura 3.1. Máquina de corte radial utilizada en el proceso de fabricación.

La máquina se compone por un disco de diamante que corta por abrasión el material, una plataforma móvil, la cual junto con un pie de rey puede ajustarse para escoger la longitud de material a cortar; y, por otro lado, apoyos fijos que permiten tomar una esquina del laminado de referencia para asegurar en todo momento que el alineamiento de las fibras a lo largo del laminado se respete. Esta máquina también será empleada para el corte final de las probetas.

### 3.2. Preparación de los tacos de compuesto vidrio/epoxy

Esta etapa del proceso es la última antes de obtener finalmente las probetas que se van a caracterizar. El compuesto de vidrio/epoxy utilizado para la fabricación de los tacos ha sido obtenido de laminados  $[-45/+45]_n$  fabricados en el LERM previamente. El primer paso de esta etapa consiste en el lijado de las zonas tanto de fibra de vidrio como de los laminados en las zonas donde ambos materiales se van a unir mediante el adhesivo, con el objetivo de incrementar la superficie de contacto y que posteriormente durante el proceso de caracterización, dichas probetas no rompan en esta unión, falseando los resultados. En la figura 3.2.a) se muestra la superficie lijada de ambos materiales así como las bandas de adhesivo

listas para ser pegadas. La longitud de las zonas de tacos en los laminados ha sido de 60 mm en los laminados para el ensayo a  $0^\circ$ , y de 40 mm en los del ensayo de  $90^\circ$ . Esta diferencia respecto a lo recogido en la norma ASTM-D3039/D3039M-14 se debe principalmente a querer asegurar una mayor zona de agarre de la mordaza. Una vez lijadas dichas superficies, previamente a la colocación del adhesivo se limpia la superficie con iso-propanol, y a continuación, se colocan sobre los laminados en sus zonas correspondientes el adhesivo. En concreto para este trabajo se ha utilizado el adhesivo Z15429. Una vez colocado el adhesivo sobre los laminados, se procede a colocar los tacos de vidrio/epoxy, los cuáles han sido previamente cortados en la máquina de corte anteriormente citada para obtener sus dimensiones correspondientes. Para asegurar la correcta colocación de los tacos es de vital importancia alinear el borde del taco con el borde resanado de los laminados para evitar cambios de espesor en el conjunto laminado-tacos que pueda crear alguna distorsión tras el curado del mismo. Tras su colocación, se aplica una fuente de calor y presión manual mediante mordazas metálicas para mejorar la adherencia.

Como última etapa del proceso, una vez colocado el conjunto laminado-tacos (figura 3.2.b)), se procede a meter nuevamente los laminados en el autoclave con el fin de adherirlos aplicando el ciclo de curado del adhesivo usado. Para ello, los laminados son preparados de forma similar a la bolsa de vacío anterior, pero esta vez omitiendo la existencia de la plancha metálica (figura 3.2.c)), ya que ahora solo se quiere asegurar dicha unión. Además, en la zona de transición entre el taco y el laminado, se coloca una cinta con resistencia a altas temperaturas con el objetivo de que el adhesivo no fluya más allá de los límites geométricos donde van ubicados los tacos, y no avance hacia el centro de las futuras probetas. En la figura 3.2. se muestra los diferentes pasos a seguir hasta la fabricación del recubrimiento de teflón que irá dentro de la nueva bolsa de vacío. Tras el proceso de curado del adhesivo se obtienen los laminados listos para la obtención de las probetas. Debido a la fluidez del adhesivo es necesario un previo resanado de los bordes nuevamente. Tras la retirada de la cinta de alta, se comprueba el acabado del borde, y se procede al corte de las probetas.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.2. a) Tacos de vidrio/epoxy y laminados junto a las tiras de adhesivo, b) Laminados preparados tras aplicar presión y calor manual, y c) Recubrimiento de teflón previo a la preparación de la bolsa de vacío.

### 3.3. Colocación de las galgas extensométricas

Tras el proceso de fabricación y posterior corte para la obtención de las probetas, para una correcta caracterización y toma de datos del material es necesario conocer no solo la carga actuante sobre éste, sino también las deformaciones que sufre durante todo el ensayo con el objetivo de determinar sus propiedades. En el presente trabajo se ha optado por la utilización de galgas extensométricas para su determinación. En concreto, para los ensayos a  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  y la determinación de  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$ , se han empleado galgas 1-XY31-3/120 y 1-LY41-6/120 de HBK Company. Para la medición del coeficiente de dilatación  $\alpha_3$  se ha empleado una galga 1-LY41-3/120 del mismo fabricante.

El procedimiento a seguir para la colocación de las galgas ha sido el mismo para todas las probetas. Para ello han sido necesarios los siguientes materiales:

- Pinzas metálicas
- Destornillador de pala
- Papel de lija
- Iso-propanol
- Pie de rey
- Cinta adhesiva
- Gafas con aumento x4
- Catalizador
- Adhesivo Z-70
- Cables
- Pines para conexión a la máquina estática
- Pelacables
- Lápiz de fibra de vidrio
- Rollo de estaño
- Decapante
- Estación de soldadura Weller®

El procedimiento a seguir comienza con la preparación mediante pulido manual con lija y posterior aplicación de iso-propanol a la zona central de la probeta donde se va a colocar la galga extensométrica, con el objetivo de crear al igual que con los tacos, una buena región de adherencia galga-probeta. Para poder colocar la galga centrada respecto a las dimensiones de la probeta se utiliza un pie de rey para marcar el centro geométrico de ésta. Una vez marcado, se coge cuidadosamente la galga con las pinzas metálicas intentando evitar en todo momento el contacto de ésta con los pines y la superficie que estará en contacto con la probeta una vez pegada. Para el pegado es necesario disponer de un catalizador para acelerar el proceso de polimerización, y el adhesivo, aplicándolos en este orden y de forma consecutiva. Para una mayor precisión se ha utilizado una gafa de aumento para hacer coincidir la dirección de la medición y la de la orientación deseada. Tras el proceso de pegado es importante aplicar presión, en este caso con la propia mano durante al menos un minuto, y el empleo de algún material desmoldeante que evite que se quede pegada a la mesa o algún otro objeto. Por último, para conectar los pines de las galgas a la máquina de ensayos es necesario aportar estaño en los pines para soldar posteriormente los cables. Para facilitar la adherencia del estaño al pin, la superficie se lija con un lápiz de fibra de vidrio. Finalmente, para asegurar la correcta circulación de corriente se emplea un decapante en los extremos de los cables para eliminar cualquier existencia de óxido. Tras varios minutos, se envuelven los extremos con un pequeño recubrimiento de estaño y se une a los

cordones ejecutados sobre los pines. Sólo queda colocar los pines para la conexión a los terminales de la máquina estática utilizando un destornillador de pala. En la figura 3.3. se puede apreciar un ejemplo del resultado final de las probetas de los ensayos a  $90^\circ$ , en concreto de los laminados de  $100$  y  $50 \text{ g/m}^2$ , las cuales están completamente listas para ser ensayados.

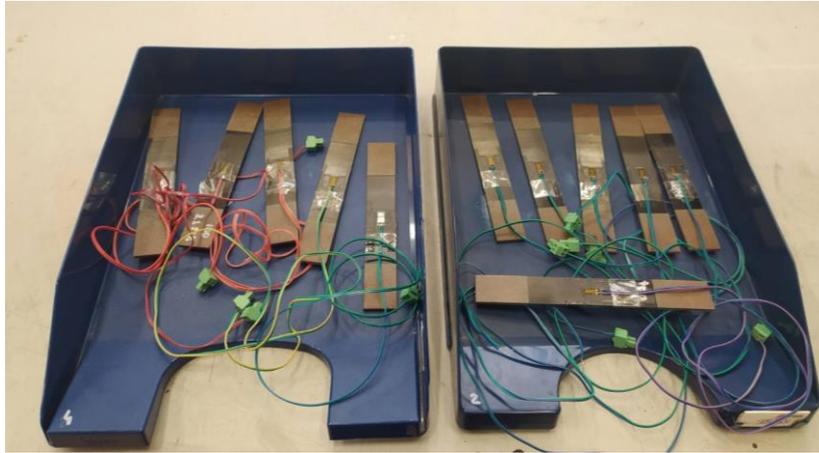


Figura 3.3. Probetas preparadas para el ensayo a tracción a  $90^\circ$ .

## 4 CARACTERIZACIÓN DEL MATERIAL

En el presente capítulo se mostrarán las diferentes pautas llevadas a cabo para el proceso de caracterización del material NTPT THINPREG™ 402. Como se mencionó anteriormente, este capítulo recoge diferentes estudios: la caracterización de probetas unidireccionales ensayadas a 0° y 90° para 100, 50 y 30 g/m<sup>2</sup> mediante ensayo axial en una máquina universal de ensayos; la medición de los coeficientes de dilatación  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$  y  $\alpha_3$  para 100 g/m<sup>2</sup> y los  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  de los laminados de 50 y 30 g/m<sup>2</sup>, mediante calentamiento en un horno eléctrico y el uso de un puente de Wheatstone; y por último, el estudio del efecto de la relajación de tensiones de curado, mediante la toma fotográfica de imágenes y el empleo de un modelo simplificado en Ansys. Las distintas conclusiones y consideraciones se presentan en el capítulo 5 de este trabajo.

### 4.1. Ensayos mecánicos

Con el objetivo de plasmar los datos obtenidos en este documento con claridad, se ha optado por nombrar los laminados con la nomenclatura UTPXXX-YY-PZ, siendo XXX el gramaje de las láminas del laminado, YY si corresponde al ensayo de 0° o 90° respectivamente, y Z, indicando el número asignado para las probetas de cada tipo.

#### 4.1.1. Equipo empleado

Los equipos empleados para la caracterización del material han sido dos máquinas universales de ensayos: Instron 4482 y 4483. Las células de carga empleadas durante el proceso han sido de  $\pm 100$  kN para el ensayo de 0° y de  $\pm 5$  kN para el ensayo de 90°. La figura 4.1. muestra una visión general de dichas máquinas. Para ambas máquinas se han utilizado mordazas con agarre plano para la realización de los ensayos.



(a)



(b)

Figura 4.1. a) Instron 4482, y b) Instron 4483 empleadas durante el proceso de caracterización.

#### 4.1.2. Ensayo de tracción a 0°

La caracterización de las probetas a 0° comienza con su correcta colocación en las mordazas de forma que se asegure el centrado de las galgas respecto al centro geométrico del conjunto de las mordazas, con el objetivo de que en dicha zona se genere un estado tensional uniforme, y por otro lado, asegurar que la probeta mantenga la perpendicularidad respecto a la superficie horizontal de la mordaza,

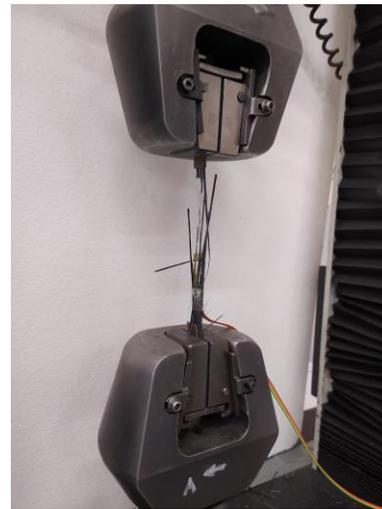
para corroborar que la carga está siendo aplicada en dirección de las fibras. En la figura 4.2. se muestra la configuración de este ensayo.

Es muy importante destacar que durante los ensayos a  $0^\circ$  con este material, la acumulación de energía es tan elevada en el material que cuando se alcanza la rotura, el material sufre una rotura explosiva, colapsando y desprendiendo a gran velocidad fragmentos (figura 4.2.), por ello, es crucial la utilización de mamparas de metacrilato para proteger al personal de laboratorio y a su vez, poder tener una correcta visualización del ensayo en todo momento. Entre cada uno de los ensayos la retirada del material sobrante es prioritario para asegurar el correcto funcionamiento de los equipos en cada uno de los ensayos.

Para la determinación de las propiedades de este material se han empleado 5 probetas por cada gramaje del material NTPT THINPREG™ 402. Las propiedades obtenidas durante los ensayos son:  $E_{11}$ ,  $\nu_{12}$  y  $X_t$ .



(a)



(b)

Figura 4.2. a) Disposición general del ensayo a  $0^\circ$ , y b) Rotura de las probetas ensayadas a  $0^\circ$ .

Para la realización de los cálculos se han empleado las ecuaciones 1-4 junto con la configuración mostrada en la figura 4.3.

$$A = w * t \quad (1)$$

$$\sigma_{11} = \frac{F}{A} \quad (2)$$

$$E_{11} = \frac{\Delta\sigma_{11}}{\Delta\varepsilon_{11}} \quad (3)$$

$$\nu_{12} = -\frac{\Delta\varepsilon_{22}}{\Delta\varepsilon_{11}} \quad (4)$$

- A: Sección de la probeta ensayada ( $\text{mm}^2$ )  
 w: Ancho de la probeta (mm)  
 t: Espesor de la probeta (mm)  
 F: Fuerza (N) ejercida en un determinado instante ( $\approx 1000$  y  $3000 \mu\epsilon$ )  
 $\sigma_{11}$ : Tensión soportada por la probeta en dirección de las fibras (MPa)  
 $E_{11}$ : Módulo de rigidez a tracción en dirección de la fibra (GPa)  
 $\epsilon_{11}$ : Deformación producida en dirección de la fibra  
 $\epsilon_{22}$ : Deformación producida en dirección transversal a la fibra  
 $\nu_{12}$ : Coeficiente de Poisson

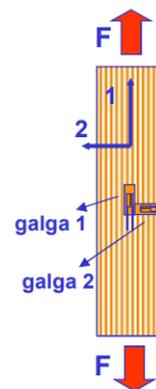


Figura 4.3. Esquema general empleado para el cálculo de propiedades de las probetas ensayadas a  $0^\circ$ .

#### 4.1.2.1. Probetas UTP30

Los resultados obtenidos tras el proceso de caracterización se recogen en la tabla 4.1. donde se muestran las dimensiones de todas las probetas ensayadas, así como la carga última que han soportado dichos laminados. Dividiendo la carga máxima de éstos entre su sección transversal, se obtiene el valor de  $X_t$  de cada probeta.

Tabla 4.1. Valores geométricos, carga y resistencias máximas a tracción de las probetas ensayadas a  $0^\circ$ .

Probeta	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Carga máxima (N)	$X_t$ (MPa)
UTP30-0-P1	15.429	0.876	25280.370	1871.183
UTP30-0-P2	15.229	0.884	27948.690	2076.788
UTP30-0-P3	15.194	0.869	26712.630	2022.359
UTP30-0-P4	15.421	0.880	26859.780	1979.237
UTP30-0-P5	15.470	0.893	25221.510	1825.660

Para la determinación de  $E_{11}$  y  $\nu_{12}$ , la norma ASTM-D3039/D3039M-14 establece que los puntos para evaluar dichas propiedades sean aquellos valores más cercanos a las  $1000$  y  $3000 \mu\epsilon$ , dado que estas probetas resisten hasta valores de deformación por encima de las  $6000 \mu\epsilon$ . En la tabla 4.2. se muestran los valores obtenidos tomando estos dos puntos de referencia en cada una de las probetas ensayadas.

Tabla 4.2. Propiedades obtenidas del proceso de caracterización a partir de los puntos más cercanos a los niveles de deformación exigidos por la norma.

Probeta	$\epsilon_{11}$ ( $\mu\epsilon$ )	F (N)	$\sigma_{11}$ (MPa)	$E_{11}$ (GPa)	$\epsilon_{22}$ ( $\mu\epsilon$ )	$\nu_{12}$
UTP30-0-P1	1017.184	1718.712	127.214	116.649	-334.751	0.351
	3004.748	4851.045	359.061		-1031.659	
UTP30-0-P2	1021.695	1528.398	113.571	105.216	-324.563	0.309
	3005.227	4337.001	322.270		-937.337	
UTP30-0-P3	1008.664	1497.006	113.335	114.907	-286.930	0.310
	3007.816	4531.239	343.051		-907.097	
UTP30-0-P4	1010.048	1418.526	104.528	107.052	-332.775	0.339
	3002.735	4313.457	317.849		-1008.983	
UTP30-0-P5	1004.225	1528.398	110.633	117.503	-339.987	0.364
	3004.532	4775.508	345.675		-1067.523	

En la figura 4.4. se muestra la evolución  $\sigma$ - $\epsilon$  durante los ensayos, tanto de las deformaciones sufridas por la galga 1 (valores positivos), como los de la galga 2 (valores negativos debido al acortamiento en dicha dirección).

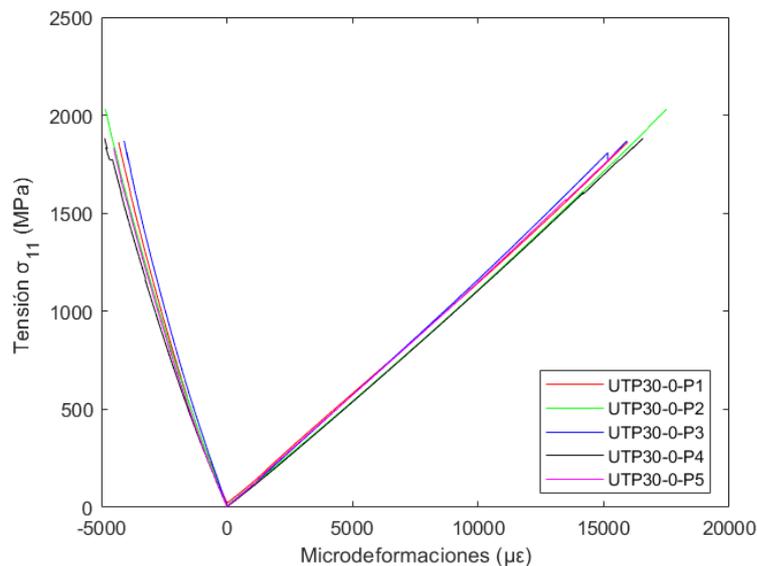


Figura 4.4. Representación tensión-deformación de las probetas UTP30

#### 4.1.2.2. Probetas UTP50

Para la obtención de los resultados del gramaje de  $50 \text{ g/m}^2$  se ha procedido de la misma forma que con las probetas UTP30. En la tabla 4.3. y 4.4. se recogen las dimensiones de las probetas y propiedades obtenidas, así como en la figura 4.5. se muestra la representación  $\sigma$ - $\epsilon$  de los 5 ensayos.

Tabla 4.3. Valores geométricos, carga y resistencia máximas de los ensayos del material de 50 g/m<sup>2</sup>.

Probeta	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Carga máxima (N)	X <sub>t</sub> (MPa)
UTP50-0-P1	15.396	0.994	30254.040	1976.877
UTP50-0-P2	15.156	1.024	34462.530	2220.512
UTP50-0-P3	15.121	1.026	34128.990	2199.100
UTP50-0-P4	15.426	1.021	32588.820	2068.508
UTP50-0-P5	15.502	1.021	31068.270	1963.566

Tabla 4.4. Propiedades obtenidas de los ensayos del material de 50 g/m<sup>2</sup>.

Probeta	$\epsilon_{11}$ ( $\mu\epsilon$ )	F (N)	$\sigma_{11}$ (MPa)	E <sub>11</sub> (GPa)	$\epsilon_{22}$ ( $\mu\epsilon$ )	$\nu_{12}$
UTP50-0-P1	1003.651	2208.231	144.292	128.097	-335.108	0.322
	3004.796	6131.250	400.632		-980.197	
UTP50-0-P2	1003.627	2054.214	132.358	121.071	-327.872	0.329
	3000.578	5806.539	374.131		-983.930	
UTP50-0-P3	1008.592	2093.454	134.892	120.320	-344.700	0.340
	3003.358	5818.311	374.903		-1023.126	
UTP50-0-P4	1002.363	1836.432	116.564	117.436	-369.310	0.353
	3014.023	5558.346	352.805		-1080.428	
UTP50-0-P5	1006.396	1738.332	109.865	115.827	-329.443	0.348
	3004.627	5400.405	341.314		-1025.051	

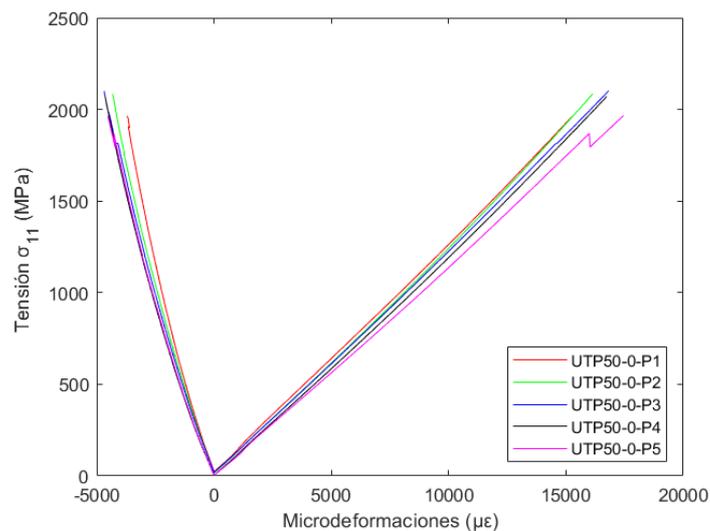


Figura 4.5. Representación tensión-deformación de las probetas UTP50.

### 4.1.2.3. Probetas UTP100

Para la finalización de la caracterización a 0° se muestra a continuación los resultados obtenidos gracias al ensayo de las probetas de gramaje 100 g/m<sup>2</sup>. En las tablas 4.5. y 4.6. se muestran las dimensiones y resultados obtenidos junto a la figura 4.6. donde se recoge el comportamiento de las probetas durante el ensayo.

Tabla 4.5. Valores geométricos, resistencia y carga máxima de las probetas de 100 g/m<sup>2</sup>.

Probeta	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Carga máxima (N)	X <sub>t</sub> (MPa)
UTP100-0-P1	15.161	0.865	29017.980	2212.655
UTP100-0-P2	15.097	0.853	28537.290	2215.151
UTP100-0-P3	15.244	0.856	29842.020	2286.004
UTP100-0-P4	15.120	0.864	28556.910	2185.134
UTP100-0-P5	15.272	0.869	29567.340	2228.711

Tabla 4.6. Propiedades obtenidas de las probetas UTP100 tras los ensayos.

Probeta	$\epsilon_{11}$ ( $\mu\epsilon$ )	F (N)	$\sigma_{11}$ (MPa)	E <sub>11</sub> (GPa)	$\epsilon_{22}$ ( $\mu\epsilon$ )	$\nu_{12}$
UTP100-0-P1	1008.639	1497.006	114.148	109.651	-320.136	0.288
	3014.262	4381.146	334.067		-898.586	
UTP100-0-P2	1001.289	1434.222	111.329	110.015	-248.912	0.241
	3010.643	4282.065	332.387		-733.157	
UTP100-0-P3	1018.927	1639.251	125.572	130.480	-314.019	0.323
	3015.700	5040.378	386.111		-959.707	
UTP100-0-P4	1025.730	1556.847	119.128	122.171	-355.434	0.351
	3009.709	4724.496	361.512		-1052.146	
UTP100-0-P5	1000.382	1564.695	117.943	119.944	-308.615	0.304
	3000.913	4748.040	357.895		-916.416	

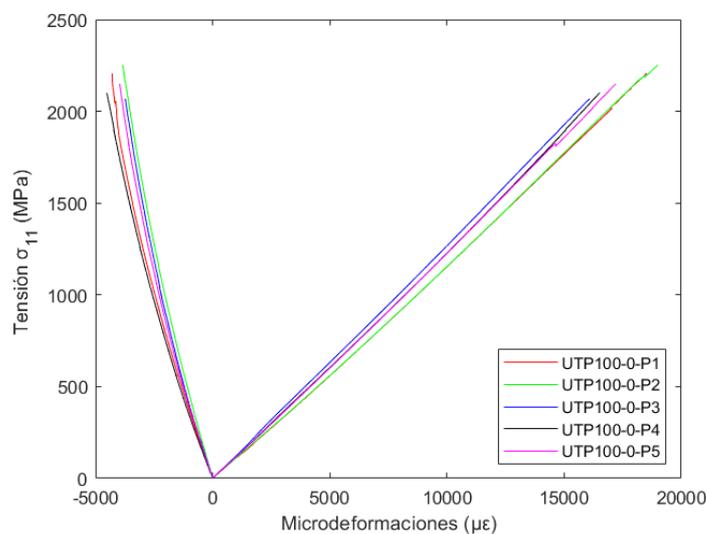


Figura 4.6. Representación tensión-deformación de las probetas UTP100.

### 4.1.3. Ensayo de tracción a 90°

La caracterización de las probetas de 90° comienza con el correcto alineamiento de las probetas al igual que se hizo en el ensayo a 0°. En este caso, la rotura de las probetas ocurre a un nivel inferior de carga y además por fallo de la matriz, a diferencia de lo ocurrido en las probetas de 0°, donde la fibra llegaba a romper, y por ello, el fallo tan abrupto que se originaba; aun así, el uso de mampara también es recomendable durante el ensayo. En la figura 4.7. se observa la configuración de las probetas momentos antes de su ensayo, así como la rotura originada, la cual consiste en la separación del laminado en 2 partes a partir de una grieta transversal a la carga.



Figura 4.7. a) Esquema general del ensayo a 90°, y b) Rotura originada por fallo en la matriz de probeta UTP30.

Para evaluar el módulo de rigidez  $E_{22}$  se ha empleado las ecuaciones 5 y 6 junto con el esquema mostrado en la figura 4.8.

$$\sigma_{22} = \frac{F}{A} \tag{5}$$

$$E_{22} = \frac{\Delta\sigma_{22}}{\Delta\varepsilon_{22}} \tag{6}$$

- A: Sección de la probeta ensayada (mm<sup>2</sup>)
- w: Ancho de la probeta (mm)
- t: Espesor de la probeta (mm)
- F: Fuerza (N) ejercida en un determinado instante (25 y 50% de la  $\varepsilon_{\max}$ )
- $\sigma_{22}$ : Tensión soportada por el material en dirección transversal a la fibra (MPa)
- $E_{22}$ : Módulo de rigidez en dirección transversal a la fibra (GPa)
- $\varepsilon_{22}$ : Deformación producida en dirección transversal a la fibra



Figura 4.8. Esquema general utilizado para el cálculo de las propiedades de las probetas.

#### 4.1.3.1. Probetas UTP30

En este ensayo las propiedades a evaluar serán dos:  $E_{22}$  y  $Y_t$ . En la tabla 4.7. se muestra la geometría de las probetas ensayadas, utilizando 5 probetas por cada tipo de gramaje al igual que en el anterior ensayo.

Tabla 4.7. Datos geométricos, carga y resistencia máximas obtenidas.

Probeta	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Carga máxima (N)	$Y_t$ (MPa)
UTP30-90-P1	24.940	1.580	1351.818	34.306
UTP30-90-P2	25.014	1.596	1428.336	35.785
UTP30-90-P3	25.030	1.582	1491.120	37.657
UTP30-90-P4	25.292	1.560	1678.491	42.541
UTP30-90-P5	25.079	1.595	1370.457	34.261

$Y_t$  se obtiene dividiendo la carga máxima que soporta la probeta por su sección. Debido a que el material en este ensayo falla para valores de deformación inferiores a  $6000 \mu\epsilon$ , la norma indica que los puntos utilizados para evaluar  $E_{22}$  sean aquellos que se encuentren entre el 25-50% de la deformación máxima producida durante el ensayo. En este trabajo los valores de referencia escogidos han sido aquellos más cercanos al 25% y el 50% de dicha deformación máxima. En la tabla 4.8. se recogen las variables necesarias para obtener los valores de  $E_{22}$ , así como los valores de deformación y carga para cada uno de los puntos de referencia escogidos.

Tabla 4.8. Propiedades obtenidas tras los ensayos de las probetas UTP30 tomando como referencia los puntos al 25 y 50% de la deformación máxima ( $\epsilon_{max}$ ).

Probeta	$\epsilon_{22}$ ( $\mu\epsilon$ )	F (N)	$\sigma_{22}$ (MPa)	$E_{22}$ (GPa)
UTP30-90-P1	1103.887	356.888	9.057	7.907
	2211.784	702.102	17.817	
UTP30-90-P2	1175.906	368.169	9.224	7.859
	2352.126	737.123	18.468	
UTP30-90-P3	1258.031	358.654	9.058	7.871
	2514.480	750.269	18.948	
UTP30-90-P4	1365.749	450.868	11.427	8.113
	2725.739	886.235	22.461	
UTP30-90-P5	1145.769	328.831	8.221	7.899
	2278.667	686.798	17.170	

Por último, en la figura 4.9., al igual que en el ensayo a  $0^\circ$ , se muestra la evolución  $\sigma$ - $\epsilon$  de las probetas UTP30. En este caso se muestra la evolución de las tensiones y deformaciones en la dirección 2 (figura 4.8).

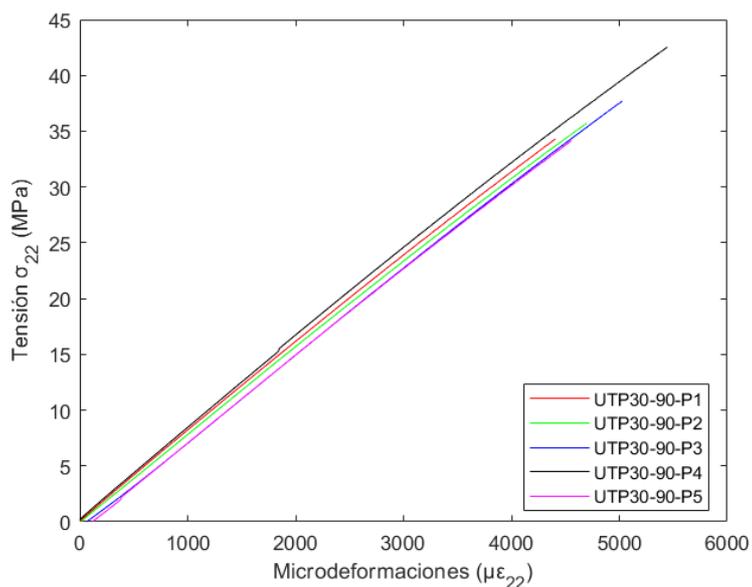


Figura 4.9. Representación tensión-deformación del ensayo a 90° de probetas UTP30.

#### 4.1.3.2. Probetas UTP50

Los resultados obtenidos del ensayo a 90° de las probetas del UTP50 se muestran a continuación en las tablas 4.9. y 4.10. Finalmente se muestra en la figura 4.10. la evolución  $\sigma$ - $\epsilon$  de las distintas probetas.

Tabla 4.9. Datos geométricos, carga y resistencia máxima de probetas UTP50 frente a ensayo a 90°.

Probeta	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Carga máxima (N)	$Y_t$ (MPa)
UTP50-90-P1	25.009	1.966	2123.865	43.196
UTP50-90-P2	25.059	1.984	2023.803	40.706
UTP50-90-P3	25.089	2.004	1893.330	37.657
UTP50-90-P4	25.062	1.999	2075.796	41.426
UTP50-90-P5	25.122	2.000	2115.036	42.095

Tabla 4.10. Valor de las propiedades obtenidas durante el ensayo a 90° de las probetas UTP50.

Probeta	$\varepsilon_{22}$ ( $\mu\varepsilon$ )	F (N)	$\sigma_{22}$ (MPa)	$E_{22}$ (GPa)
UTP50-90-P1	1478.156	558.287	11.355	7.694
	2940.482	1111.473	22.606	
UTP50-90-P2	1368.314	529.838	10.657	7.793
	2732.707	1058.499	21.290	
UTP50-90-P3	1314.288	473.529	9.418	7.511
	2630.314	970.503	19.303	
UTP50-90-P4	1435.685	531.212	10.601	7.591
	2868.407	1076.157	21.477	
UTP50-90-P5	1441.399	553.284	11.012	7.615
	2882.348	1104.606	21.985	

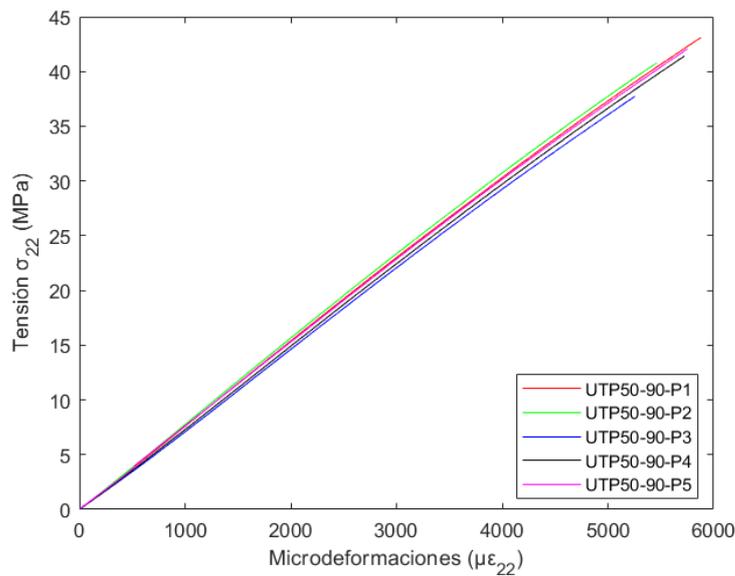


Figura 4.10. Representación gráfica de la evolución tensión-deformación de las probetas UTP50.

#### 4.3.1.3. Probetas UTP100

Como último apartado del proceso de caracterización frente a carga axial, se muestran los valores obtenidos durante los ensayos a 90° de los laminados de 100 g/m<sup>2</sup>. En las tablas 4.11. y 4.12. se muestran dichos resultados junto con la evolución  $\sigma$ - $\varepsilon$  (figura 4.11.).

Tabla 4.11. Valores geométricos, carga y resistencia máxima de las probetas UTP100 frente a ensayo de 90°.

Probeta	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Carga máxima (N)	$Y_t$ (MPa)
UTP100-90-P1	25.091	1.682	1781.496	42.221
UTP100-90-P2	25.063	1.711	1707.921	39.820
UTP100-90-P3	25.088	1.711	1770.705	41.251
UTP100-90-P4	25.050	1.712	1871.748	43.646
UTP100-90-P5	25.242	1.720	1903.140	43.843

Tabla 4.12. Valores obtenidos del ensayo a 90° de las probetas UTP100.

Probeta	$\epsilon_{22}$ ( $\mu\epsilon$ )	F (N)	$\sigma_{22}$ (MPa)	$E_{22}$ (GPa)
UTP100-90-P1	1444.291	457.146	10.834	7.712
	2888.291	927.045	21.971	
UTP100-90-P2	1388.204	447.728	10.439	7.485
	2774.662	892.808	20.816	
UTP100-90-P3	1432.583	454.301	10.584	7.582
	2860.805	919.099	21.412	
UTP100-90-P4	1549.322	480.101	11.195	7.475
	3097.537	976.389	22.768	
UTP100-90-P5	1572.673	478.532	11.024	7.419
	3148.254	985.905	22.713	

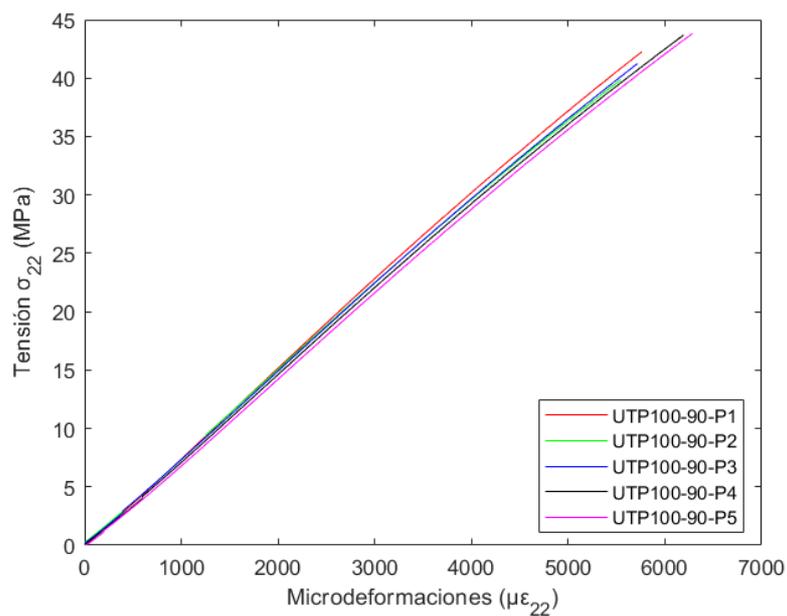


Figura 4.11. Representación tensión-deformación ensayo a 90° de las probetas UTP100.

## 4.2. Determinación de los coeficientes de dilatación

En esta segunda etapa de caracterización se pretende obtener los coeficientes de dilatación de los distintos gramajes del material NTPT THINPREG™ 402. Para ello, se medirán mediante galgas extensométricas las deformaciones sufridas para diferentes intervalos de temperatura siguiendo las pautas recogidas en la norma ASTM E831 – 19[11].

### 4.2.1. Equipo empleado

Para poder llevar a cabo el proceso de caracterización, el equipo empleado ha sido: un horno eléctrico; un termopar colocado lo más cerca posible de la galga para medir la temperatura de la muestra en todo momento; y, por último, un puente de Wheatstone para medir las deformaciones proporcionadas por las galgas en cada instante. En los laminados UTP30 y UTP50 se ha colocado una galga 1-XY31-3/120 en cada uno de ellos para poder medir las deformaciones en la dirección de la fibra y en su dirección transversal. En cuanto al laminado UTP100 se ha colocado una galga 1-XY31-3/120 al igual que en el resto de laminados, junto con una galga 1-LY41-3/120 en la dirección del espesor con el objetivo de medir  $\alpha_3$ . Los factores de galga empleados para el ensayo son de  $k=2.05\pm 10\%$  para todas ellas. En la figura 4.12. se muestra la disposición adoptada para el ensayo, así como la disposición de las galgas en el laminado UTP100.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.12. a) Disposición general del equipo de ensayo b) Colocación en el interior del horno eléctrico y c) Configuración de las galgas en el laminado UTP100.

Para la fijación de los laminados dentro del horno se ha utilizado cinta de alta para asegurar que tanto el termopar como el laminado no se muevan durante el proceso, ya que conllevaría el falseamiento de las mediciones. La configuración tomada para el puente de Wheatstone ha sido de  $\frac{1}{4}$  de puente para cada uno de los ensayos. Una vez introducidos los parámetros para cada canal de entrada, entre ellos los factores de galga anteriormente mencionados, se dispone a encender el horno hasta que éste alcance la primera temperatura de toma de valores. Este proceso es repetido 4 veces en total pasando por las distintas temperaturas: 50, 60, 70 y 80°C.

Para los cálculos utilizados para la obtención de los coeficientes de dilatación se han empleado las ecuaciones 7 y 8.

$$\varepsilon_T = \varepsilon_L + \varepsilon_S \quad (7)$$

$$\alpha_{ij} = \frac{\Delta\varepsilon_T}{\Delta T} \quad (8)$$

Siendo  $\alpha_i$  el coeficiente de dilatación en la dirección de medida,  $\varepsilon_T$  el valor de la deformación sufrida a una determinada temperatura,  $\varepsilon_L$  la deformación sufrida por el laminado a una determinada temperatura y  $T$  la temperatura de ensayo. Es importante añadir la deformación  $\varepsilon_S$  sufrida por la propia galga en sí, cuyo valor se obtiene de la propia hoja de datos del fabricante. Este valor será diferente en función de la temperatura en la cual se encuentre el ensayo.

#### 4.2.2. Laminado UTP30

Los resultados tomados del puente de Wheatstone para el laminado UTP30 se encuentran en la tabla 4.13. En la tabla 4.14. se muestran los valores de los coeficientes de dilatación para los distintos intervalos de temperatura.

Tabla 4.13. Valores medidos por el puente de Wheatstone en el laminado UTP30.

Material	Temperatura (°C)	$\mu\varepsilon_{T1}$	$\mu\varepsilon_{T2}$	$\mu\varepsilon_{S1}$	$\mu\varepsilon_{S2}$
UTP30	50	-165.800	433.200	-38.800	-38.800
	60	-303.594	534.406	-63.594	-63.594
	70	-442.892	741.108	-91.892	-91.892
	80	-563.218	890.782	-122.218	-122.218

Tabla 4.14. Valor de los coeficientes para distintos incrementos de temperatura ( $\Delta T$ ).

Material	$\Delta T$ (°C)	$\alpha_1$ (°C <sup>-1</sup> )	$\alpha_2$ (°C <sup>-1</sup> )
UTP30	$\Delta T_{50-60}$	-1.38E-05	1.01E-05
	$\Delta T_{60-70}$	-1.39E-05	2.07E-05
	$\Delta T_{70-80}$	-1.20E-05	1.50E-05

#### 4.2.3. Laminado UTP50

En las tablas 4.15 y 4.16. se muestran los valores obtenidos de las mediciones y el valor de los coeficientes de dilatación del gramaje de 50 g/m<sup>2</sup>.

Tabla 4.15. Valores de las deformaciones para distintas temperaturas en laminado UTP50.

Material	Temperatura (°C)	$\mu\epsilon_{T1}$	$\mu\epsilon_{T2}$	$\mu\epsilon_{S1}$	$\mu\epsilon_{S2}$
UTP50	50	-143.800	396.200	-38.800	-38.800
	60	-273.594	592.406	-63.594	-63.594
	70	-408.892	798.108	-91.892	-91.892
	80	-529.218	976.782	-122.218	-122.218

Tabla 4.16. Propiedades obtenidas en laminado UTP50.

Material	$\Delta T$ (°C)	$\alpha_1$ (°C <sup>-1</sup> )	$\alpha_2$ (°C <sup>-1</sup> )
UTP50	$\Delta T_{50-60}$	-1.30E-05	1.96E-05
	$\Delta T_{60-70}$	-1.35E-05	2.06E-05
	$\Delta T_{70-80}$	-1.20E-05	1.79E-05

#### 4.2.4. Laminado UTP100

Para finalizar el cálculo de los coeficientes de dilatación, en las tablas 4.17. y 4.18. se muestran los resultados obtenidos con el laminado UTP100, incluyendo el valor de  $\alpha_3$  (en dirección del espesor).

Tabla 4.17. Deformaciones obtenidas para distintas temperaturas en el laminado UTP100.

Material	Temperatura (°C)	$\mu\epsilon_{T1}$	$\mu\epsilon_{T2}$	$\mu\epsilon_{T3}$	$\mu\epsilon_{S1}$	$\mu\epsilon_{S2}$	$\mu\epsilon_{S3}$
UTP100	50	-325.800	397.200	449.440	-38.800	-38.800	-43.565
	60	-479.594	552.405	622.880	-63.594	-63.594	-70.124
	70	-625.892	692.108	780.753	-91.892	-91.892	-100.247
	80	-784.218	846.782	952.572	-122.218	-122.218	-132.428

Tabla 4.18. Valores obtenidos en laminado UTP100.

Material	$\Delta T$ (°C)	$\alpha_1$ (°C <sup>-1</sup> )	$\alpha_2$ (°C <sup>-1</sup> )	$\alpha_3$ (°C <sup>-1</sup> )
UTP100	$\Delta T_{50-60}$	-1.54E-05	1.55E-05	1.73E-05
	$\Delta T_{60-70}$	-1.46E-05	1.40E-05	1.58E-05
	$\Delta T_{70-80}$	-1.58E-05	1.55E-05	1.72E-05

### 4.3. Relajación de las tensiones residuales de curado

Como se citó en el capítulo introductorio, las tensiones de curado pueden llegar a tener un efecto notorio en el conocido fenómeno “efecto borde” en laminados que trabajan con láminas ultradelgadas. Para comprender si estas tensiones tienen la misma importancia en cualquier momento posterior al curado, se ha procedido a estudiar esta influencia mediante la evaluación de la curvatura y altura presentes en laminados [0<sub>4</sub>/90<sub>4</sub>], mediante la toma de fotografías en distintos instantes de tiempo. Por otro lado, con el objetivo de poder calcular las tensiones residuales en cualquier punto del laminado, se evaluará si la deformada del laminado queda inscrito completamente en una circunferencia, ya que, de ser así, significaría que su radio de curvatura  $R_c$  es constante para cualquier punto en un instante dado, permitiendo simplificar la geometría y cálculos del problema. Además, para poder observar numéricamente el comportamiento de estos laminados, se

ha elaborado un modelo en Ansys de cara a lograr una comparativa entre los resultados experimentales y numéricos.

#### 4.3.1. Equipo empleado

Las herramientas utilizadas (figura 4.13.a)) para llevar a cabo este estudio han sido: una cámara fotográfica con trípode, con el objetivo de tener una posición fija en todo momento, evitando que exista diferencia de posición entre las distintas fotografías que se han ido realizando a lo largo del tiempo; un flexo con el que conseguir una foto con suficiente nitidez; uso del programa Project\_Image y papel milimetrado, para conseguir tener una escala de referencia para la medición de los radios de curvatura, así como corroborar que la ubicación del laminado es la correcta y que la toma de las altura  $h(t)$  son respecto al punto de mayor altura; y por último, una regla metálica con la que poder tener una doble medición de dicha altura. En la parte numérica se ha utilizado Ansys Student como software de análisis que implementa el Método de los Elementos Finitos (MEF).

#### 4.3.2. Toma de fotografías

Las diferentes fotografías realizadas han permitido determinar in situ la altura (mm) de los laminados, ya que dicha longitud puede ser obtenida directamente gracias al papel milimetrado y la regla como se aprecia en la figura 4.13.b). La primera toma de fotografías de los laminados UTP30 y UTP100 se ha realizado justamente en el instante posterior tras el proceso de curado, sin haber resanado aún los laminados para poder ver con mayor nitidez el efecto de estas tensiones en los primeros minutos, con la mínima manipulación posible. Tras realizar dicha toma, los laminados son resanados y se realizan el resto de tomas.

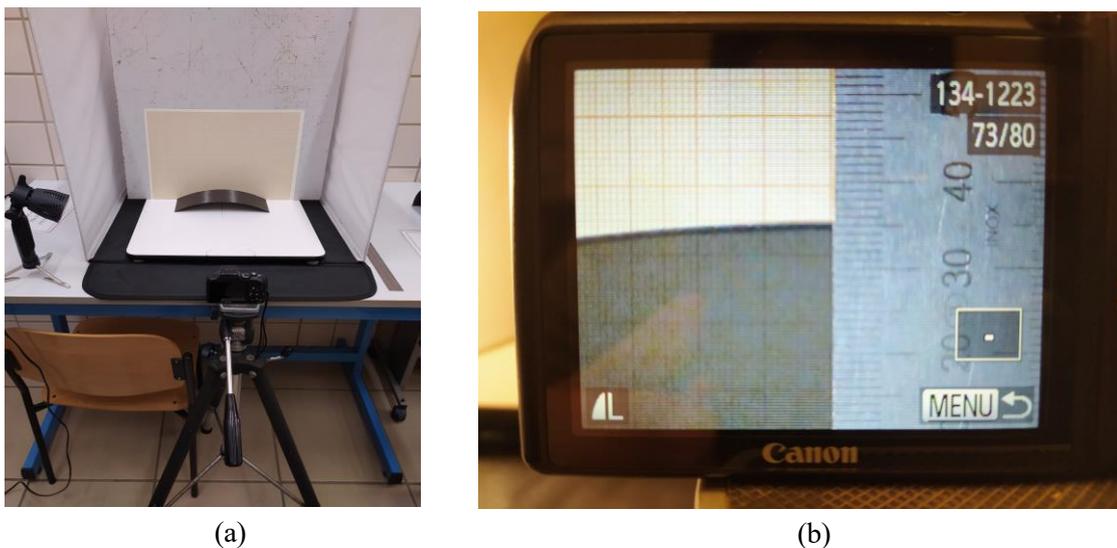
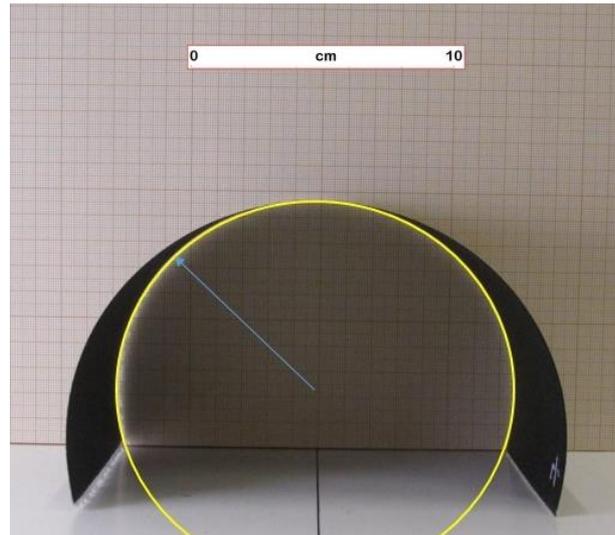


Figura 4.13. a) Zona fotográfica, y b) Toma de la altura  $h(t)$  mediante regla y papel milimetrado.

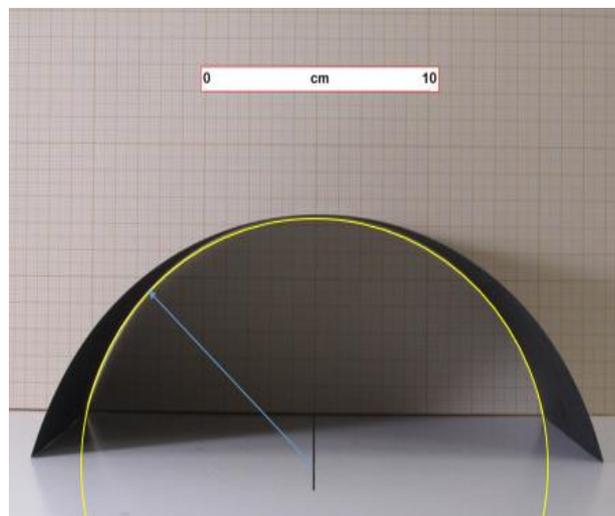
Para la obtención de los radios de curvatura, se ha utilizado el programa Project\_Image, en el cual a partir de las fotografías, se ha creado una escala de referencia utilizando el papel milimetrado, ya que este programa permite inscribir una circunferencia que se ajuste a tres puntos del borde del laminado (figuras 4.14 y 4.15.). La tabla 4.20. muestra los resultados obtenidos a lo largo de los casi 70 días de duración de este estudio, tanto de los radios de curvatura  $R_c(t)$  como de la altura  $h(t)$ .

Tabla 4.19. Valores de  $h(t)$  y  $R_c(t)$  de los laminados UTP30 y UTP100 para distintos instantes de tiempo.

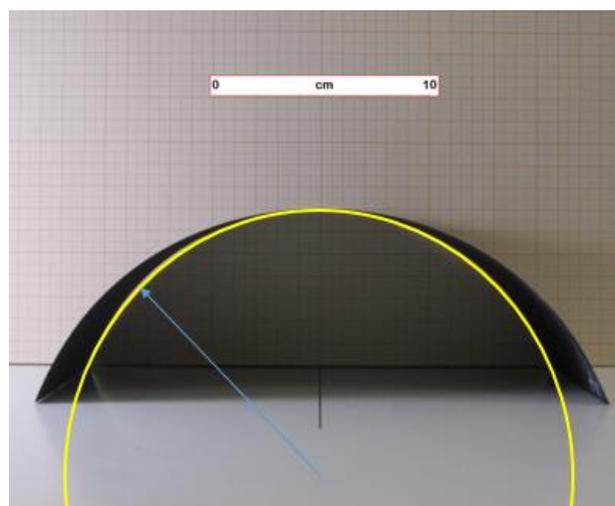
Tiempo (h)	UTP100		UTP30	
	$h(t)$ (mm)	$R_c(t)$ (cm)	$h(t)$ (mm)	$R_c(t)$ (cm)
0.00	38.50	27.40	97.50	9.04
0.50	35.75	26.65	89.75	9.32
1.00	35.50	26.76	89.50	9.29
1.50	35.00	27.30	88.00	9.65
2.00	35.00	27.38	87.25	9.66
3.00	35.00	27.67	86.75	9.67
4.00	34.75	27.57	85.75	10.40
5.00	34.75	27.62	85.00	10.29
17.00	34.25	-----	81.25	-----
21.50	34.25	-----	78.00	-----
24.00	34.00	28.81	79.00	11.83
29.00	33.75	-----	79.00	-----
41.00	33.75	-----	79.00	-----
45.50	33.75	-----	77.50	-----
48.50	33.50	-----	76.75	-----
71.50	33.50	29.68	78.00	12.66
92.50	33.00	-----	75.00	-----
108.00	32.50	-----	74.00	-----
116.00	32.00	30.68	72.50	13.07
119.00	31.50	-----	69.50	-----
132.50	31.00	-----	68.50	-----
157.50	30.75	-----	68.00	-----
184.50	30.50	32.26	68.25	13.775
230.00	29.75	-----	70.50	-----
275.50	29.00	-----	70.50	-----
285.50	28.50	-----	70.50	-----
309.50	28.00	34.65	67.50	13.60
355.50	27.50	-----	70.50	-----
377.00	28.00	-----	74.00	-----
453.00	29.00	-----	78.00	-----
499.00	28.25	35.45	73.50	13.81
547.00	27.75	-----	71.25	-----
663.75	26.50	37.19	67.00	13.95
813.25	26.25	-----	70.00	-----
833.50	27.25	-----	75.00	-----
957.25	26.00	-----	68.00	-----
981.25	26.00	37.41	68.00	14.30
1004.25	26.00	-----	68.00	-----
1029.00	25.75	-----	66.50	-----
1190.00	25.25	38.85	65.00	14.50
1547.00	24.75	-----	67.50	-----
1674.50	26.00	38.04	71.50	14.45



(a)

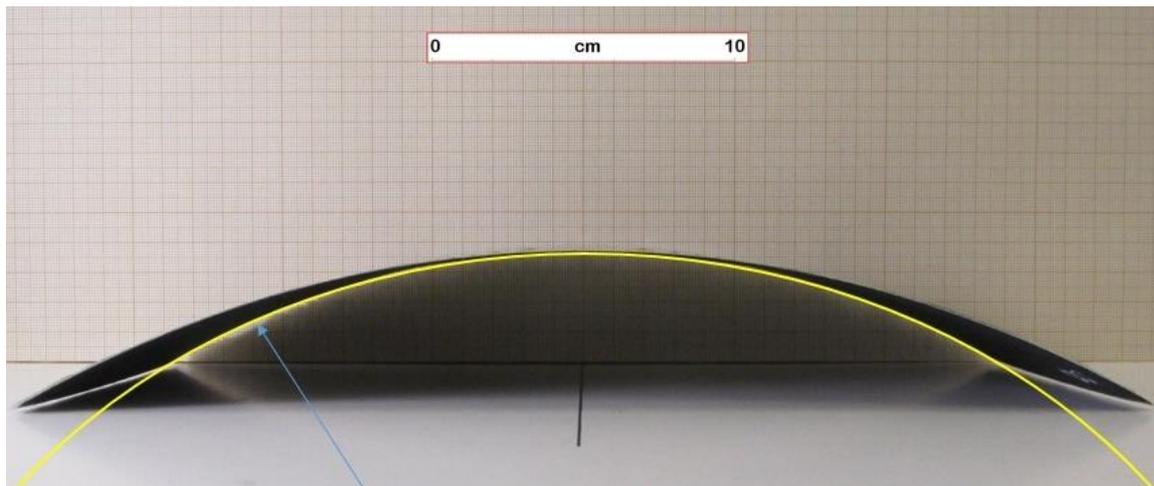


(b)

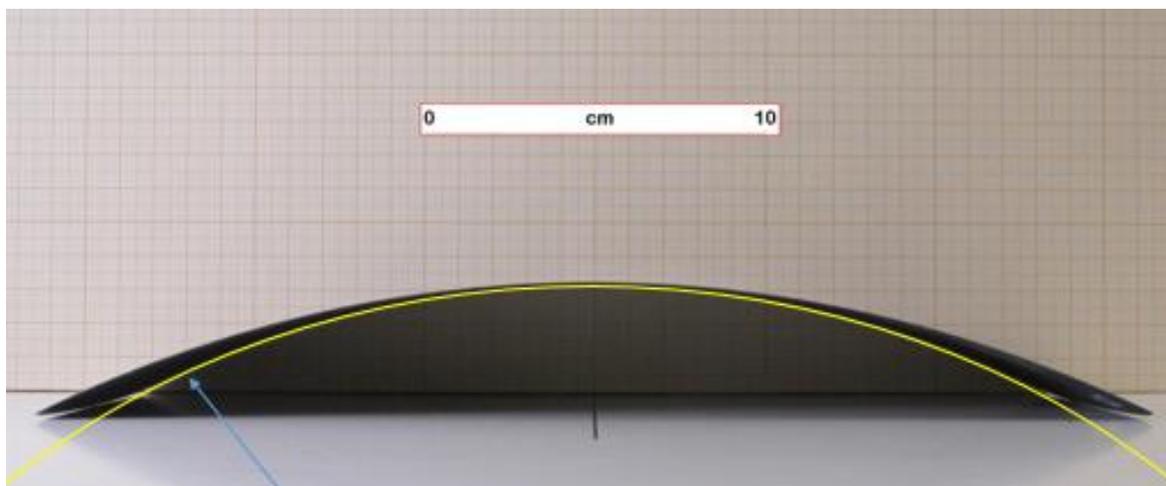


(c)

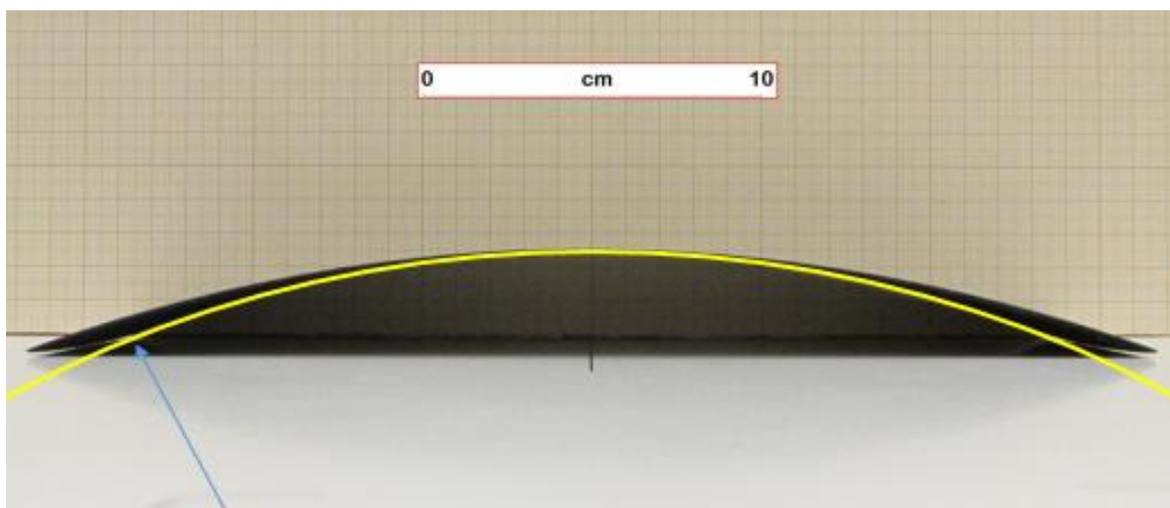
Figura 14.14. Laminado UTP30 en instantes: a)  $t=0.00$  h, b)  $t=92.50$  h, y c)  $t=1674.50$  h.



(a)



(b)



(c)

Figura 14.15. Laminado UTP100 en instantes: a)  $t=0.00$  h, b)  $t=92.50$  h, y c)  $t=1674.50$  h.

### 4.3.3. Modelo numérico en Ansys

Para obtener una comparativa respecto a los resultados obtenidos en el ensayo experimental y corroborar que para un instante de tiempo el radio de curvatura permanece constante para cualquier punto del laminado, es decir, este quede completamente inscrito en una circunferencia como se observó de manera experimental, se procede a realizar un modelo del problema en Ansys. El modelo consiste en dos materiales orientados en direcciones perpendiculares entre sí con el objetivo de simular los laminados  $[0_4/90_4]$ . Para mantener la compatibilidad de deformaciones de los nodos comunes entre ambos materiales se ha empleado el comando *aglu*. Además, se han impuesto condiciones de simetría (figura 4.16.a)) dado que al ser el problema simétrico únicamente se estudiará una de las dos ramas curvas del laminado, así como una restricción de desplazamiento en la dirección vertical del modelo para evitar su movimiento en dicha dirección. Las únicas cargas introducidas en el problema son de índole térmica. En la figura 4.16. se observa la configuración del problema.

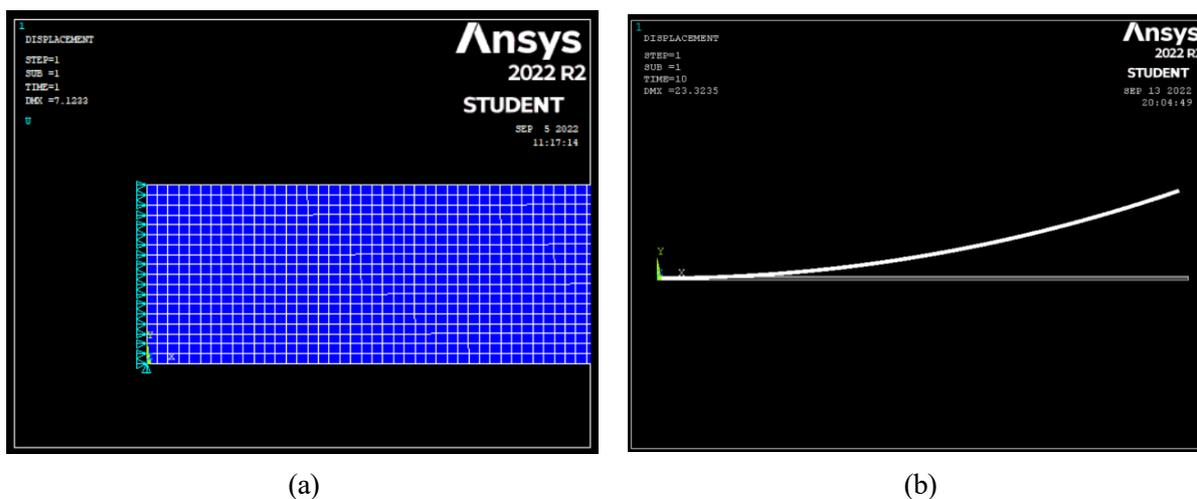


Figura 4.16. a) Condiciones de simetría impuestas en el modelo de Ansys, y b) Configuración deformada e indeformada de una de las dos ramas del laminado al aplicar un  $\Delta T$ .

Para la resolución del problema planteado se ha empleado como hipótesis de cálculo grandes desplazamientos y tensión plana para la resolución del modelo de Ansys. Los cálculos empleados para la determinación del radio de curvatura se presentan a continuación, tomando simetría, y utilizando la siguiente configuración (figura 4.17.) junto con las siguientes razones trigonométricas, donde  $y_o$  es el desplazamiento en dirección y debido al incremento de temperatura;  $x_o$  es la posición del punto inicial más el desplazamiento en dirección x debido al incremento de temperatura; y por último, el radio de curvatura  $R_c$ .

$$R_c^2 = (R_c - y_o)^2 + x_o^2 \quad (10)$$

$$R_c = \sqrt{(R_c - y_o)^2 + x_o^2} \quad (11)$$

$$R_c^2 + y_o - 2R_c y_o + x_o^2 = R_c^2 \quad (12)$$

$$R_c = \frac{y_o^2 + x_o^2}{2y_o} \quad (13)$$

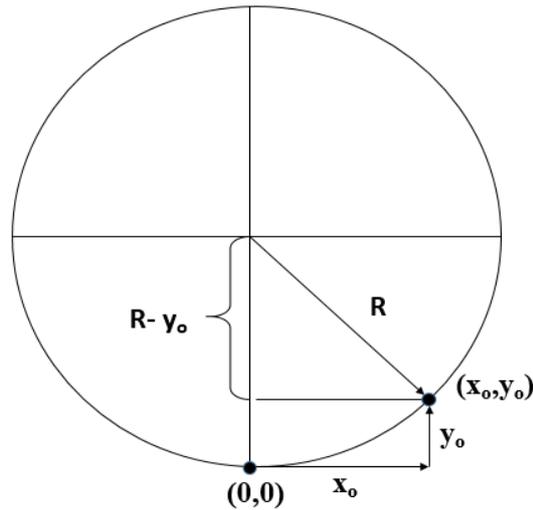


Figura 4.17. Geometría para un punto cualquiera del laminado.

Estos instantes de tiempo serán simulados en el programa empleando un enfriamiento ( $\Delta T$ ) inferior del real (instante inicial post-curado), siendo este  $\Delta T = T_{amb} - T_c$ , tomando  $T_{amb} = 25^\circ C$ , con el objetivo de relacionar los desplazamientos sufridos de dichos enfriamientos con la relajación natural sufrida por los laminados hasta el instante en cuestión. Para ello, se han empleado 3 enfriamientos diferentes: el real ( $\Delta T = -110^\circ C$ ), el 70% de esa temperatura ( $-77^\circ C$ ), y el 40% ( $-44^\circ C$ ). En la figura 4.18. se muestra el radio de curvatura obtenido tomando como referencia un punto del plano de simetría y cualquier otro punto (ambos en la superficie inferior del modelo) de los laminados de 30 y 100 g/m<sup>2</sup> (tomando por simetría la mitad del laminado).

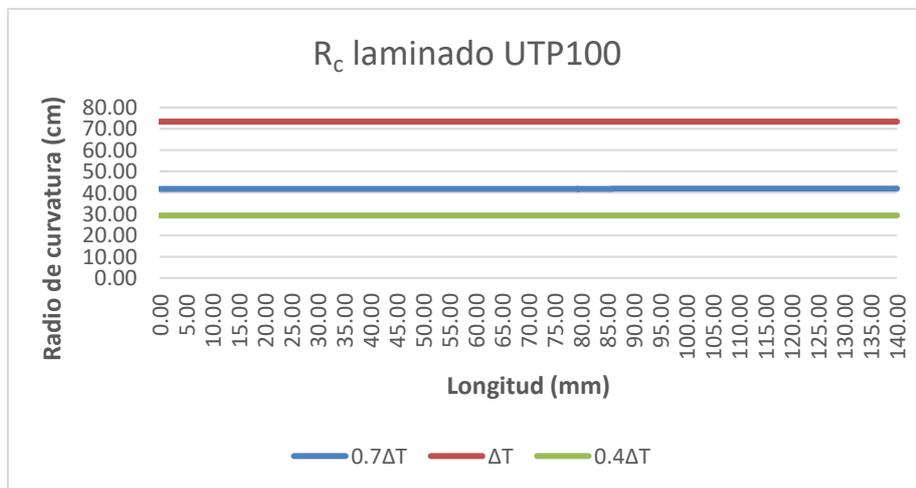


Figura 4.18. Resultados del radio de curvatura a lo largo de la longitud del laminado.

## 5 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se discutirán los resultados obtenidos en el capítulo 4 con el objetivo de sacar conclusiones que puedan ayudar al estudio de este tipo de materiales. Este capítulo consta de 3 partes centradas cada una de ellas en los bloques del capítulo anterior.

### 5.1. Ensayo a tracción 0° y 90°

Tras los resultados obtenidos en los ensayos de 0° y 90°, resulta de interés observar que no existen grandes desviaciones entre los diferentes ensayos de cada material. En la tabla 5.1. se muestra el promedio, desviación estándar y coeficiente de desviación de los distintos materiales para los ensayos de 0° y 90° respectivamente. Los coeficientes de desviación muestran que el proceso de fabricación ha sido elaborado con éxito debido a que presentan todos ellos un valor inferior al 15%, valores aceptables dentro de lo recogido en la norma. Además del bajo coeficiente de desviación, la rotura en los laminados a 90° ensayados se han localizado en su mayor medida en la zona regularizada de las probetas, lo cual es un condicionante acerca de la calidad del material fabricado. En la figura 5.1. puede observarse la rotura de las probetas de 90°, destacando que en la mayoría de las probetas la rotura se ha originado por la sección central, es decir, dentro de la zona regularizada, confirmando que los tacos de vidrio no han generado concentradores de tensiones en el laminado. A pesar de que la rotura se ha producido en algunos casos cerca de la zona de los tacos, los valores de tensiones son similares, por lo que, esto significa que se ha logrado una uniformidad de tensiones en las secciones de rotura. El primer número de la nomenclatura “XX” utilizada en la figura 5.1. indica el gramaje, siendo 2 el empleado para el UTP100, el 4 para el UTP50 y el 6 para el UTP30. El segundo número indica el nº de la probeta de cada conjunto de ensayos.

Tabla 5.1. Estadísticas de los ensayos a 0° y 90° de los tres gramajes.

Grupo de probetas	Propiedades	Valor promedio	Desviación típica	Coefficiente de variación (%)
UTP30	E <sub>11</sub> (GPa)	112.265	5.712	5.088
UTP50		120.550	4.724	3.919
UTP100		118.452	8.794	7.424
UTP30	ν <sub>12</sub>	0.335	0.024	7.292
UTP50		0.339	0.013	3.851
UTP100		0.302	0.041	13.655
UTP30	E <sub>22</sub> (GPa)	7.930	0.104	1.317
UTP50		7.641	0.107	1.406
UTP100		7.534	0.115	1.532
UTP30	X <sub>t</sub> (MPa)	1955.045	104.536	5.347
UTP50		2085.712	120.508	5.778
UTP100		2225.531	37.325	1.677
UTP30	Y <sub>t</sub> (MPa)	36.910	3.440	9.320
UTP50		41.016	2.089	5.094
UTP100		42.156	1.684	3.995

En cuanto a las dimensiones de las probetas ensayadas se ha observado que, durante el proceso de curado, las probetas de 30 y 100 g/m<sup>2</sup> han mostrado una notable disminución de su espesor, en torno al 15-25% respecto al valor esperado de 1 mm para los laminados del ensayo a 0°, y de 2mm en el de 90°. Sin embargo, las probetas de gramaje 50 g/m<sup>2</sup> no han mostrado ningún tipo de disminución a pesar de haberse realizado todos los laminados en el mismo ciclo de curado. Esto podría deberse a la distinta manipulación de la fibra y

matriz para conseguir los distintos gramajes de preregs, pudiendo existir una diferencia en el volumen de fibras final, aunque el fabricante aporte el mismo para los 3 gramajes y, por ende, que la resina haya logrado fluir más en los que menos volumen de fibra tengan.

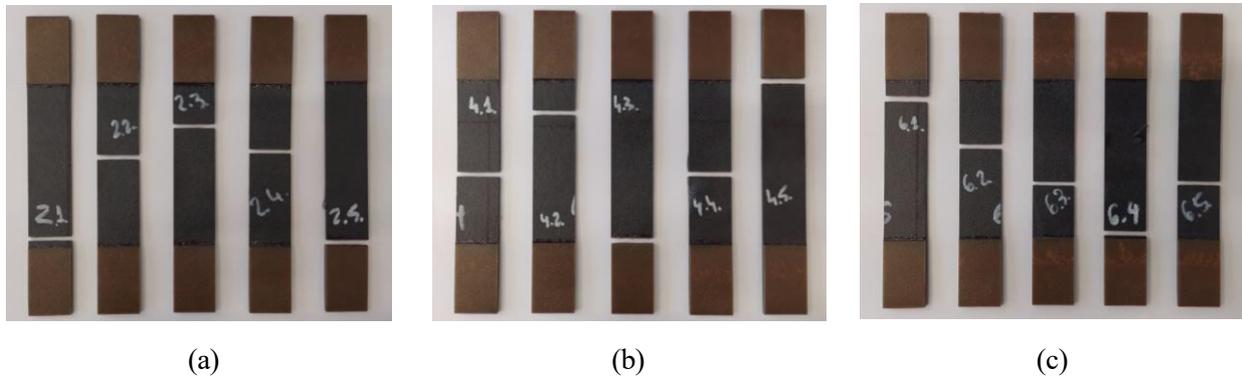


Figura 5.1. Roturas producidas en las probetas ensayadas a  $0^\circ$  a) UTP100, b) UTP50, y c) UTP30.

Por último, es importante resaltar que los valores de las propiedades no han sufrido grandes variaciones a pesar de emplear distintos gramajes para el proceso de caracterización, como puede observarse en la tabla anterior. Esto puede conllevar a que el gramaje del material tenga un efecto mínimo a la hora de caracterizar estos materiales, y, por tanto, poder utilizar gramajes superiores a la hora de caracterizar, logrando así un considerable ahorro en tiempo y personal, ya que el proceso de fabricación en los materiales ultradelgados suele ser el factor que más penaliza a estos materiales. En la tabla 5.2. puede observarse las propiedades finales una vez obtenidos los promedios de cada una de las propiedades, mostrando una desviación máxima que no supera el 7%.

Tabla 5.2. Valores finales promediados del valor promedio de cada conjunto de probetas.

	Valor promedio (GPa)	Desviación estándar (GPa)	Coficiente de desviación (%)
$E_{11}$	117.047	4.233	3.616
$E_{22}$	7.701	0.200	2.602
$\nu_{12}$	0.325	0.020	6.245
$X_t$	2088.763	135.269	6.476
$Y_t$	40.028	2.759	6.894

## 5.2. Coeficientes de dilatación

Después de los resultados obtenidos en los ensayos mecánicos del material NTPT THINPREG™ 402, cabría esperar que los valores de los coeficientes de dilatación tampoco sufriesen grandes variaciones para corroborar que los diferentes gramajes no afectan prácticamente al valor de éstos. En la tabla 5.3. se muestran los valores obtenidos para los 3 coeficientes bajo estudio, los cuales se han obtenido mediante los valores promedio de cada uno de los gramajes, siendo el promedio del gramaje de  $30 \text{ g/m}^2$  obtenido únicamente con 2 intervalos de temperatura dado que en la primera medida a  $50^\circ$  se obtuvo cierta discrepancia respecto al valor de  $\alpha_1$  en el resto de gramajes.

Tabla 5.3. Valor promedio del conjunto de los 3 gramajes diferentes.

	Valor promedio (GPa)	Desviación estándar (GPa)	Coefficiente de desviación (%)
$\alpha_1$	-1.380E-05	1.30E-06	9.46
$\alpha_2$	1.74E-05	2.22E-06	12.74
$\alpha_3$	1.80E-05	1.30E-06	7.22

Como puede observarse los valores experimentales mantienen un coeficiente de desviación por debajo del 13%, mostrando nuevamente que el uso de distintos gramajes no influye significativamente en su caracterización. El valor de  $\alpha_1$  en dirección de la fibra muestra un valor negativo, por lo que el laminado frente a incrementos negativos de temperatura se expande, al contrario que  $\alpha_2$  que muestra un valor positivo.

Por otro lado, si comparamos los valores de  $\alpha_2$  y  $\alpha_3$  puede observarse que los resultados de ambos coeficientes son prácticamente iguales, con una diferencia tan solo del 3.5%. En la comunidad científica se suele tomar estos 2 coeficientes de dilatación con el mismo valor, lo cual se ha corroborado con esta caracterización. Es importante destacar la cantidad de tiempo y material ahorrado una vez conocida esta similitud en valores, dado que no es igual el proceso de caracterización de  $\alpha_3$ , donde ha sido necesario el apilado de 90 láminas del material de 100 g/m<sup>2</sup>, que caracterizar el coeficiente  $\alpha_2$ , donde únicamente se han apilado en torno a 20 láminas para los otros 2 gramajes.

### 5.3. Tensiones residuales de curado

Desde el punto de vista de los resultados obtenidos en los laminados [0<sub>4</sub>/90<sub>4</sub>] cabe destacar la considerable disminución de la  $h(t)$  y/o el aumento del radio de curvatura  $R_c(t)$  durante los primeros días del proceso de curado. Esto implica directamente que la mayor relajación de tensiones por parte del material se ha producido en estos primeros instantes de tiempo. Como se introdujo en el capítulo 1, estas tensiones sumadas a las mecánicas son las máximas responsables del conocido “efecto borde” por lo que, si esta disminución es pronunciada y ocurre en un corto período de tiempo, puede considerarse un valor inferior de estas tensiones a la hora de realizar cálculos analíticos. En las figuras 5.2. y 5.3. se observa como en el instante inicial la altura  $h(t)$  sufre una pronunciada disminución hasta estabilizarse y permanecer prácticamente constante a partir de las 800 horas ( $\approx$  34 días). Un resultado similar ocurre con  $R_c(t)$ , el cual sufre un mayor incremento al comienzo.

Por otro lado, el modelo de Ansys simula esta variable tiempo introduciendo valores inferiores del  $\Delta T_c = -110^\circ\text{C}$ , considerando en el momento del cálculo, un incremento de la temperatura de curado ( $\Delta T_c$ ) inferior al incremento de temperatura real de  $-110^\circ\text{C}$ . En las figuras 5.2. y 5.3. se muestra también una comparativa entre los radios de curvatura y alturas obtenidas mediante el modelo numérico y el experimental de los laminados UTP30 y UTP100. Las líneas horizontales presentes en ambas figuras muestran la altura y radio de curvatura obtenidos en Ansys para un enfriamiento del 100%, es decir, el real, equivalente al instante 0, y, por otro lado, al 77% de dicho enfriamiento, simulando un momento posterior tras la relajación del material. Comparando los datos experimentales y numéricos, puede apreciarse en las figuras 5.2. y 5.3. que la relajación obtenida durante las casi 1700 horas de estudio, tanto para la altura  $h(t)$  como para el radio de curvatura  $R_c(t)$ , equivaldría a una temperatura entorno al 80-85% de la temperatura de enfriamiento real. Sin embargo, se pueden apreciar discrepancias entre los valores experimentales y numéricos debido a que se pueden observar valores de partida mayores en la altura y radio de curvatura de los resultados experimentales, por lo que el porcentaje equivalente del enfriamiento real, basándose únicamente en valores experimentales, es aproximadamente del 65% tanto para  $h(t)$  como  $R_c(t)$ .

Por otro lado, de cara a poder evaluar las tensiones existentes en cualquier punto del laminado, era necesario comprobar si la deformada de dichos laminados conseguía inscribirse en una circunferencia, dado que teóricamente esto debería de cumplirse. Gracias a la toma de imágenes puede observarse que los laminados se adecúan perfectamente a una circunferencia, mostrando de forma visual que el radio de curvatura para un instante dado es constante para cualquier punto del laminado. Para evaluar este fenómeno desde un punto de vista numérico, se realiza el modelo en Ansys, de cara a poder observar este fenómeno desde otro punto de vista, donde se llegó a la misma conclusión como se observó en la figura 4.23, para un  $\Delta T = -110^\circ\text{C}$ , de  $-70^\circ\text{C}$  y de  $-40^\circ\text{C}$ .

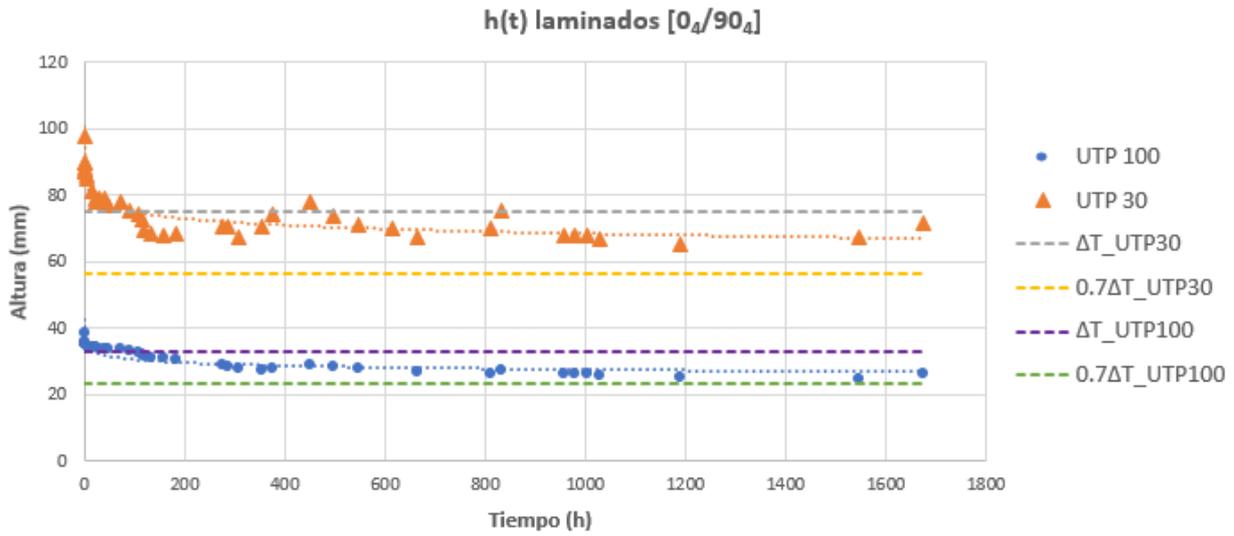


Figura 5.2. Comparativa entre la altura experimental y la altura numérica para distintos incrementos de temperatura.

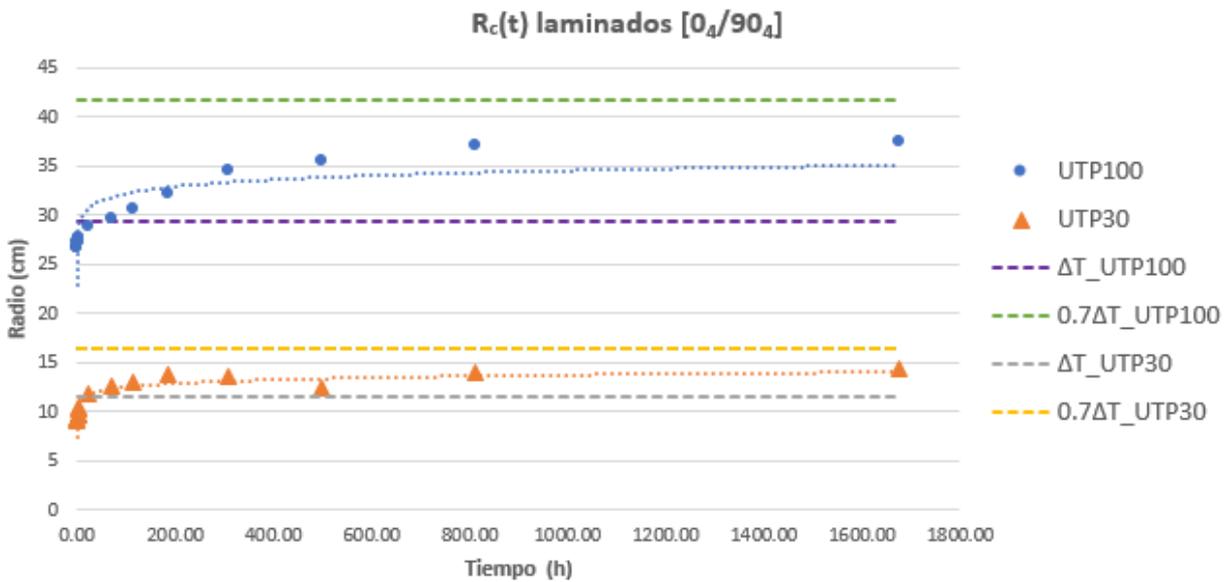


Figura 5.3. Comparativa entre los radios de curvatura experimentales, y los numéricos para distintos incrementos de temperatura.

## 6 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo final se muestran las conclusiones del presente trabajo, así como posibles trabajos futuros que podrían partir de las consideraciones obtenidas durante el capítulo 5.

### 6.1. Conclusiones

El proceso de caracterización del material NTPT THINPREG™ 402 ha mostrado grandes similitudes en sus propiedades a pesar del empleo de diferentes gramajes para su determinación. Los resultados obtenidos gracias a los ensayos mecánicos y térmicos realizados suscitan el empleo de materiales convencionales para la caracterización de estos materiales debido a la obtención de desviaciones mínimas entre cada uno de los distintos gramajes. Además, cabe destacar las diferencias obtenidas en los espesores de los laminados de 30 y 100 g/m<sup>2</sup> frente al de 50 g/m<sup>2</sup> los cuales posiblemente estén ligados a distinta fluencia de resina en el proceso de fabricación del prepreg, debido entre otros factores, a un inferior volumen de fibras respecto al aportado por el fabricante.

En relación a los coeficientes de dilatación  $\alpha_2$  y  $\alpha_3$  se ha mostrado que es posible utilizar el coeficiente  $\alpha_2$  como  $\alpha_3$  debido a que los valores obtenidos de los ensayos térmicos son prácticamente iguales, conllevando esta simplificación un gran ahorro material y temporal en el proceso de fabricación debido a no tener que determinar  $\alpha_3$  apilando una gran cantidad de láminas en el espesor.

En cuanto a las relajaciones sufridas por los laminados [0<sub>4</sub>/90<sub>4</sub>], estas muestran que las tensiones originadas por el ciclo de curado muestran una disminución considerable, lo cual influye favorablemente en el conocido fenómeno “efecto borde”. La obtención de las alturas  $h(t)$  y radios de curvatura  $R_c(t)$  han mostrado una variación importante en las primeras 24 horas tras el curado en autoclave, mostrando una disminución importante del 10%, y de hasta un 15-20% en la etapa final del estudio. Tanto el modelo numérico como los resultados experimentales muestran que el uso de un  $\Delta T$  inferior a la inicial podría utilizarse para evaluar las tensiones en instantes posteriores de tiempo, equivaliendo esto a la relajación natural conseguida por los laminados hasta dicho instante.

Por otro lado, el modelo numérico y experimental corroboran que la deformada sufrida por los laminados se inscribe perfectamente en una circunferencia, manteniéndose por tanto constante el radio de curvatura de cualquier punto del laminado para cada instante de tiempo. Estos resultados han permitido obtener para cualquier punto del laminado, una relación entre las tensiones residuales y el porcentaje de enfriamiento equivalente respecto al real, para cada instante.

### 6.2. Trabajos futuros

De cara a evaluar la no dependencia del gramaje en el proceso de caracterización, un estudio en mayor profundidad sería necesario para corroborar que además de las propiedades determinadas en este trabajo ( $E_{11}$ ,  $E_{22}$ ,  $\nu_{12}$ ,  $X_t$ ,  $Y_t$ ,  $\alpha_1$ ,  $\alpha_2$ ,  $\alpha_3$ ), las propiedades a compresión y cortadura también mantienen dicha similitud.

Por otro lado, para obtener la mayor cantidad de información posible sobre el material, un estudio más en profundidad acerca de las propiedades físicas y químicas de este material como puede ser el  $V_f$  de los distintos gramajes, tanto en fresco como en curado, podría ser objeto de estudio, de cara a identificar si hay diferencias entre los diferentes gramajes, comprobando si esta variable tiene relación con la reducción en el espesor de los laminados de 100 y 30 g/m<sup>2</sup>.

En relación al estudio de la relajación de tensiones, la realización de un modelo más complejo podría ser de interés de cara a introducir otros fenómenos no recogidos en el presente modelo como el peso propio del laminado o la curvatura en dirección transversal que sufren estos laminados debido a su configuración [0<sub>4</sub>/90<sub>4</sub>], ya que permitiría corroborar con mayor exactitud valores experimentales y numéricos ya que existen ciertas discrepancias en los valores de altura y radio de curvatura obtenidos para los instantes iniciales post-curado. Además, un estudio comparativo a lo largo del tiempo  $\sigma$ - $t$  aplicando el TGL podría ser de interés para visualizar de forma directa la evolución de las tensiones a lo largo del tiempo.

## 7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. Bachmann, C. Hidalgo, and S. Bricout, “Environmental analysis of innovative sustainable composites with potential use in aviation sector—A life cycle assessment review,” *Sci. China Technol. Sci.*, vol. 60, no. 9, pp. 1301–1317, 2017, doi: 10.1007/s11431-016-9094-y.
- [2] E. Culebras, A. Barroso y F. París, "Estudio de fallo no convencional en laminados  $[0_m, 90_n]$ s: caracterización del fallo a partir del efecto de borde" 2021.
- [3] B. E. Tawfik, H. Leheta, A. Elhewy, and T. Elsayed, “Weight reduction and strengthening of marine hatch covers by using composite materials,” *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, vol. 17, no. 2002, 2016, doi: 10.1016/j.ijnaoe.2016.09.005.
- [4] R. Prieto-García, E. Correa y S. Sánchez-Carmona, “Caracterización experimental y estudio a fatiga de la aparición de daño en laminado *cross-ply* con lámina ultradelgada de 30g/m<sup>2</sup> en la capa de 90°” 2021.
- [5] W. van den Brink, “Virtual manufacturing and testing for novel structures and materials,” Netherlands Aerospace Centre, May, 2016.
- [6] J. Galos, “Thin-ply composite laminates: a review,” *Compos. Struct.*, vol. 236, no. January, 2020, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.111920.
- [7] M.L. Velasco, “A fully physically based explanation of the scale effect in composites.” Ph.D Thesis, 2021.
- [8] A. Barroso, S. Sánchez-Carmona, E. Correa, V. Mantič, and F. París, “Efecto borde en laminados *cross-ply* con láminas ultradelgadas”, MATCOMP21, June, 2022, Seville.
- [9] ASTM, “Astm D3039/D3039M,” *Annu. B. ASTM Stand.*, pp. 1–13, 2014, doi: 10.1520/D3039.
- [10] “NTPT THINPREG™ 402 DATA SHEET,” North Thin Ply Technology, May, 2017.
- [11] A. S. E228-06, “Standard Test Method for Linear Thermal Expansion of Solid Materials,” *Annu. B. ASTM Stand.*, vol. i, no. C, pp. 1–9, 2011, doi: 10.1520/E0831-19.2.