Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Aeroespacial

Estudio experimental de la aparición del primer daño transversal en laminados $[0/90_n]_s$ sometidos a cargas de tracción uniaxial

Autor: F. Javier Castizo Valladolid

Tutores: Mª Luisa Velasco López
Serafín Sánchez Carmona
Elena Correa Montoto

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

Sevilla, 2023

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Aeroespacial

Estudio experimental de la aparición del primer daño transversal en laminados $[0/90_n]_s$ sometidos a cargas de tracción uniaxial

Autor:
F. Javier Castizo Valladolid

Tutores:
Mª Luisa Velasco López
Serafín Sánchez Carmona
Elena Correa Montoto

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

Sevilla, 2023

Trabajo Fin de Grado: Estudio experimental de la aparición del primer daño transversal en laminados $[0/90_n]_s$ sometidos a cargas de tracción uniaxial

Autor: F. Javier Castizo Valladolid
Tutores: Mª Luisa Velasco López
Serafín Sánchez Carmona
Elena Correa Montoto

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

Agradecimientos

Gracias a todas las personas que me han acompañado durante la elaboración de este trabajo. Gracias a mis tutores por su conocimiento, comprensión y paciencia; a todo el personal del laboratorio por su ayuda y generosidad; y a mi familia y amigos, por su apoyo incondicional.

Resumen

En el marco del estudio de los materiales compuestos, el presente trabajo supone un análisis acerca del efecto escala sobre la aparición del primer daño transversal en laminados $[0/90_n]_s$. Se pretende analizar si la fabricación de un mismo laminado usando distintos gramages, influye en la aparición del primer daño en ante carga estática a tracción.

Con el fin de alcanzar dicho objetivo, se han fabricado los laminados y, a partir de éstos, las probetas que han sido posteriormente caracterizadas y ensayadas a tracción con incrementos progresivos de carga hasta encontrar el primer daño transversal que aparecía. Para registrar el primer daño sin modificar la posición de la probeta ni descargarla completamente, se ha empleado un sistema de réplicas garantizando que dicha técnica es capaz de registrar los daños sin pérdida de información respecto al visionado de la probeta directamente en el microscopio.

Finalmente, tras un análisis de los resultados hallados, se muestran las debidas conclusiones que han satisfecho el objetivo del proyecto.

Índice

Resumen III
Notación VII

1 Introducción **1**
1.1 Material compuesto en la industria aeronáutica 1
1.2 Motivación 2
1.3 Objetivos 2
1.4 Metodología 2

2 Fabricación del material **3**
2.1 Fabricación de los paneles de material 3
2.1.1 Acopio y dimensionado del material 3
2.1.2 Corte de las láminas 6
2.1.3 Apilado de las láminas 10
2.1.4 Curado de los paneles 12
2.2 Fabricación de las probetas 15
2.2.1 Preparación de los tacos de vidrio 15
2.2.2 Adhesión de los tacos de vidrio 18
2.2.3 Obtención de las probetas 20

3 Caracterización de los laminados **23**
3.1 Adhesión y preparación de la galga extensiométrica 23
3.2 Preparación del ensayo 25
3.3 Ensayo de la probeta 27
3.4 Análisis de resultados 28
3.4.1 Laminado CP-0_4-90-50 29
3.4.2 Laminado CP-0_4-90-100 29
3.4.3 Laminado CP-0_{12}-90-50 30
3.4.4 Laminado CP-0_{12}-90_2-50 30
3.4.5 Resumen de resultados 31

4 Estudio de la aparición del primer daño **35**
4.1 Metodología 35
4.1.1 Ensayos de las probetas 35
4.1.2 Realización de las réplicas 37
4.2 Clasificación de los daños 38

4.3 Aplicación de la metodología 39
4.3.1 Probeta CP-0_4-90-50 40
4.3.2 Probeta CP-0_4-90-100 41
4.3.3 Probeta CP-0_{12}-90-50 43
4.3.4 Probeta CP-0_{12}-90_2-50 45

5 Análisis de resultados y discusión 47
5.1 Análisis de los resultados 47
5.1.1 Probeta CP-0_4-90-50 47
5.1.2 Probeta CP-0_4-90-100 49
5.1.3 Probeta CP-0_{12}-90-50 51
5.1.4 Probeta CP-0_{12}-90_2-50 53
5.2 Discusión de los resultados 55

6 Conclusiones 61

7 Líneas futuras 63

Índice de Figuras 65
Índice de Tablas 69
Bibliografía 71

Notación

σ	Tensión aplicada
ε	Deformación
σ_R	Tensión de rotura
E	Módulo de Elasticidad
F	Fuerza aplicada

1 Introducción

1.1 Material compuesto en la industria aeronáutica

La industria aeroespacial se ha caracterizado siempre por la innovación en el diseño y el constante intento de aumentar las capacidades de las aeronaves. Ello ha contribuido enormemente al continuo desarrollo de nuevos materiales, con cada vez mejores propiedades, que se adecuan a las nuevas necesidades que surgen en el seno de la industria. En este sentido, la aplicación de los materiales compuestos en la fabricación de aeronaves, tanto militares como civiles, ha supuesto una auténtica revolución debido a las excelentes propiedades que se manifiestan en ellos.

Resulta conveniente definir qué es un material compuesto para posteriormente concretar en aquel tipo al que el presente trabajo está enfocado. El material compuesto puede ser definido como la combinación, para obtener un nuevo material, de dos o más materiales separados por sus correspondientes interfases. Además, la fabricación de un material compuesto tiene el objetivo último de mejorar las propiedades de sus constituyentes por separado de forma que, o bien su actuación conjunta suponga la obtención de propiedades que ninguno de ellos presenta de manera aislada, o que signifique la unión de sus propiedades [3].

La clasificación que se puede aplicar a los materiales compuestos es vasta, a modo simplemente enunciativo se podría establecer una primera dicotomía entre los materiales compuestos de origen natural o naturales y aquellos fabricados. El presente trabajo se centra en los últimos, pero resulta instructivo, para comprender el comportamiento de estos materiales, conocer por ejemplo que el hueso es un material compuesto, por colágeno y por apatito, así como la madera, formada por fibras de celulosa embebidas en lignina. Nótese que, en ambos casos, el hueso y la madera, los constituyentes que forman el material consisten en fibras, a modo de refuerzo, embebidas en una matriz que le da la consistencia. La fabricación de materiales compuestos es análoga al proceso que lleva a cabo la naturaleza, se emplean fibras que aportan al material las propiedades requeridas y se embeben en una matriz que permite la unión de todas ellas en un único material.

De este modo, el tipo de material que el presente trabajo pretende estudiar es aquel conocido como laminado multicapa reforzado con fibras largas. Este es un tipo de material compuesto fabricado mediante el apilado de láminas, unidas entre sí a través de una capa adhesiva inherente a ellas.

1.2 Motivación

El presente proyecto se enmarca dentro de las investigaciones sobre materiales compuestos que desarrolla el Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales (GERM) de la Universidad de Sevilla. Dentro de todos los enfoques posibles, este trabajo se centra en el estudio del efecto escala sobre la aparición del primer daño transversal en laminados $[0/90_n]_s$. A medida que disminuye el espesor de la capa de 90, se puede apreciar el denominado efecto escala, el cual consiste en un retraso en la aparición del daño transversal.

1.3 Objetivos

Este proyecto tiene como objetivo analizar si la fabricación de un mismo laminado usando distintos gramages en sus láminas influye en la aparición del primer daño, identificando la carga y calculando la tensión a la que aparecen y la tipología de éstos. En este sentido, se han empleado las conocidas como láminas ultradelgadas de pre-impregnados que, para el presente trabajo, tienen hasta tres veces menos espesor que las más gruesas. En concreto, los laminados que este trabajo abarca son los que se presentan en la Tabla 1.1, diferenciados en dos grupos según el gramage de sus láminas.

Tabla 1.1 Laminados fabricados.

Id	Laminado	Gramage 90° (gsm)	Gramage 0° (gsm)	Capas de 90°	Capas de 0°
CP-0_4-90-50	$0_4/90/0_4$	50	150	1	4
CP-0_4-90-100		100			
CP-0_{12}-90-50	$0_{12}/90_n/0_{12}$	50	50	1	12
CP-0_{12}-90_2-50				2	

De la Tabla 1.1, puede extraerse que los laminados comparten el mismo espesor dos a dos, siendo la diferencia en su fabricación al usar distintos gramages la base del presente estudio.

1.4 Metodología

Con el objetivo de obtener resultados fehacientes que permitan entender el comportamiento de estos materiales se ha procedido, en primer lugar, a su fabricación. Para obtener los paneles de material de los que posteriormente se extraerán las probetas se ha seguido el proceso descrito con detalle en el Capítulo 2. Una vez obtenidos los paneles y extraídas las probetas, éstas han sido preparadas para su caracterización (Capítulo 3). A continuación, se han sometido las probetas a ensayos de tracción, de tal forma que se ha registrado la aparición del primer daño transversal (Capítulo 4). Finalmente, los resultados obtenidos han sido analizados (Capítulo 5) y se han extraído las conclusiones pertinentes (Capítulo 6).

2 Fabricación del material

El propósito último de este punto es la obtención de las probetas para su ulterior ensayo y caracterización del material. Para ello se han seguido pasos análogos a los efectuados en [4]. A modo de resumen, se han fabricado en primer lugar los paneles de material compuesto (Sección 2.1), a éstos se les han añadido unos tacos de vidrio para su ensayo y por último se han cortado las probetas según las medidas apropiadas (Sección 2.2).

2.1 Fabricación de los paneles de material

El proceso de fabricación de dichas paneles se describe sucintamente a continuación.

1. Acopio y dimensionado del material.
2. Corte de las láminas.
3. Apilado de las láminas.
4. Curado de los paneles.

2.1.1 Acopio y dimensionado del material

El material que se ha utilizado es un tipo de material compuesto conocido como *pre-impregnado* o *pre-preg*, el cual consiste en una lámina continua de fibras de carbono embebidas en una matriz polimérica.

Para el presente estudio ha sido necesario el empleo de tres rollos de *pre-preg* de 50, 100 y 150 gsm respectivamente.

De forma que se cumplan los requisitos que se establecen en [1], la geometría de las probetas a fabricar son las descritas en la Figura 2.1. Téngase en cuenta que la zona más oscura se corresponde con los paneles de vidrio que se colocan a posteriori para poder ensayarlas.

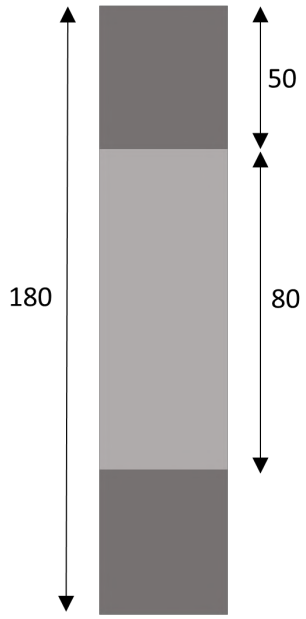


Figura 2.1 Dimensiones de las probetas. Cotas en mm.

De acuerdo a lo descrito en la Figura 2.1, se ha procedido al dimensionado de las láminas y, por extensión, de los paneles de los que las probetas serán extraídas. Las láminas que se han utilizado para el conformado de los laminados tienen las medidas descritas en la Figura 2.2.

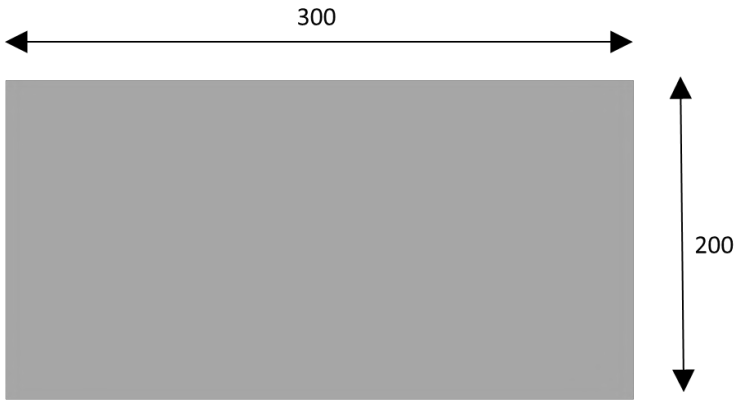


Figura 2.2 Dimensiones de las láminas. Cotas en mm.

Conviene apreciar la diferencia en la medida de las cotas de las probetas y los paneles, esto es fruto de la necesidad de establecer un sobredimensionado que finalmente se eliminará para la fabricación de las probetas a fin de evitar posibles imperfecciones que puedan darse en los bordes tanto de las láminas como de los paneles.

Una vez conocidas las medidas de las láminas a emplear en este proceso de fabricación, es conveniente atender a la disposición de los rollos de material. De este modo, se asegura el mejor aprovechamiento posible de los mismos. Los tres rollos que han sido utilizados en este trabajo, presentan la misma disposición, que se ha esquematizado en la Figura 2.3 donde la flecha indica la urdimbre.

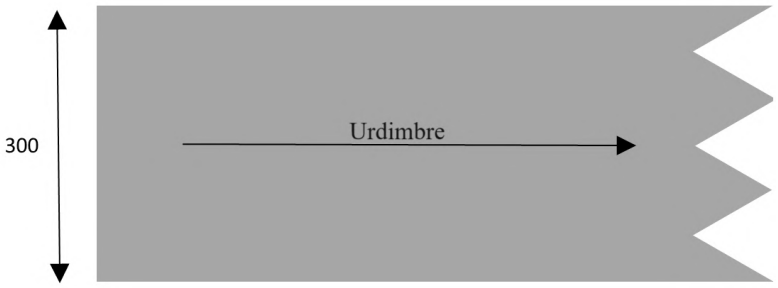


Figura 2.3 Disposición de los rollos. Cotas en mm.

En este sentido, se ha planificado el corte de las láminas según se indica en las Figuras 2.4 y 2.5. Atendiendo a estos esquemas y al número de capas necesarias según la Tabla 1.1, se ha calculado la cantidad de material que es necesario extraer de los rollos de *pre-preg*, véase Tabla 2.1.

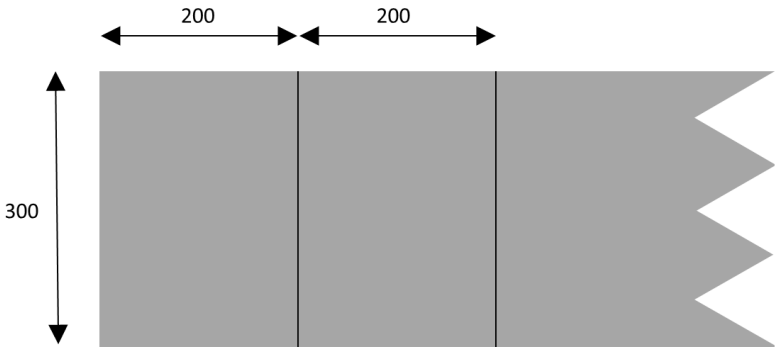


Figura 2.4 Disposición de las láminas de 0°. Cotas en mm.

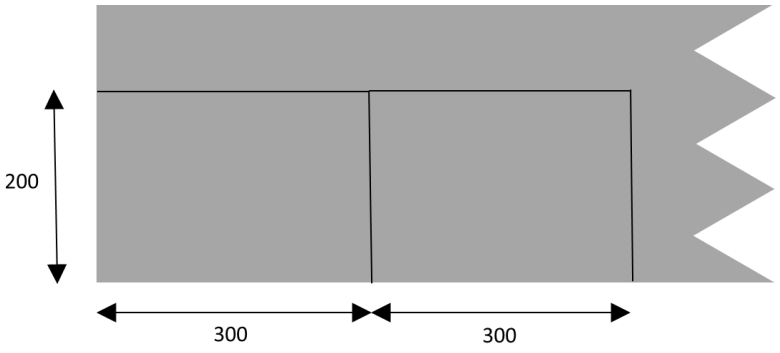


Figura 2.5 Disposición de las láminas de 90°. Cotas en mm.

Tabla 2.1 Cantidad de material a cortar.

	0° (*150 gsm*)	0° (*50 gsm*)	90° (*50 gsm*)	90° (*150 gsm*)
Número de capas	16	48	4	1
Longitud (*mm*)	3200	9600	1200	300

2.1.2 Corte de las láminas

Una vez dimensionado y calculado el material necesario para iniciar el proceso de fabricación, se ha procedido al corte de las láminas que posteriormente se han apilado.

Conviene saber que los rollos de *pre-preg* se encuentran guardados en bolsas termoselladas dentro de una cámara frigorífica (Figura 2.6), de manera que se conserven adecuadamente para que no se degraden. El primer paso para el corte del material ha sido la extracción de los rollos del citado congelador habiéndose tenido la precaución de dejarlos atemperar durante aproximadamente 2 horas al ser rollos de pequeño tamaño. De esta forma se evita que la humedad degrade los rollos, y pueda provocar defectos en las láminas cortadas y, por ende, en los laminados finales.

Figura 2.6 Cámara frigorrífica donde se encuentran los rollos de material.

Cuando se ha considerado que los rollos estaban a temperatura ambiente, se han introducido en la *sala limpia*. Esto es, una sala cuyas condiciones de temperatura y humedad están controladas y mantenidas entre 18 a 21 grados y 50 %, respectivamente. Además, se garantiza que haya un gradiente positivo de presión entre el interior y el exterior de esta sala, de manera que se impida el paso de partículas en suspensión y demás impurezas.

El material auxiliar para el corte de las láminas que se ha utilizado es el siguiente (véase la Figura 2.7):

- Regla graduada.
- Escuadra.
- Cartabón.
- Cúter.
- Lápiz.

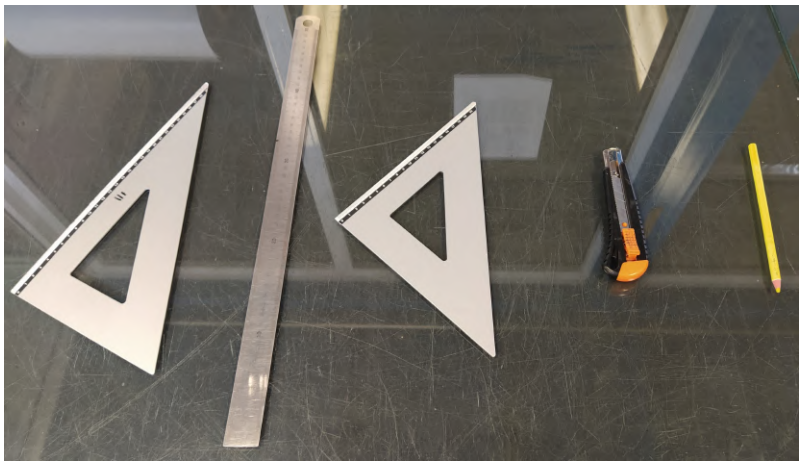


Figura 2.7 Material auxiliar para el corte.

La secuencia de operaciones a realizar para el corte de las láminas es similar para todas ellas, tómese el proceso de las láminas de 0° de referencia.

Una vez dispuesto el rollo de material en la sala limpia como se muestra en la Figura 2.8, se realiza una medición con la ayuda de la regla graduada según interese, marcando el punto en el que se quiera trazar la vertical para el corte, ver Figuras 2.4 y 2.9. Utilizando la escuadra y el cartabón se traza la vertical, y finalmente se realiza el corte sirviéndose del cúter (Figura 2.10).

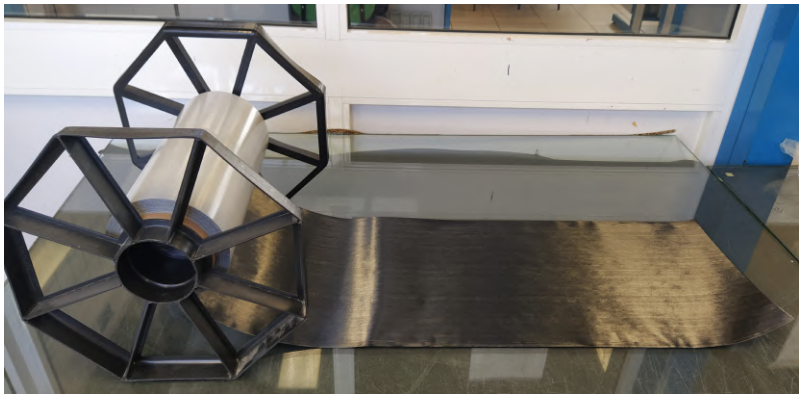


Figura 2.8 Disposición del rollo de material en la sala limpia.

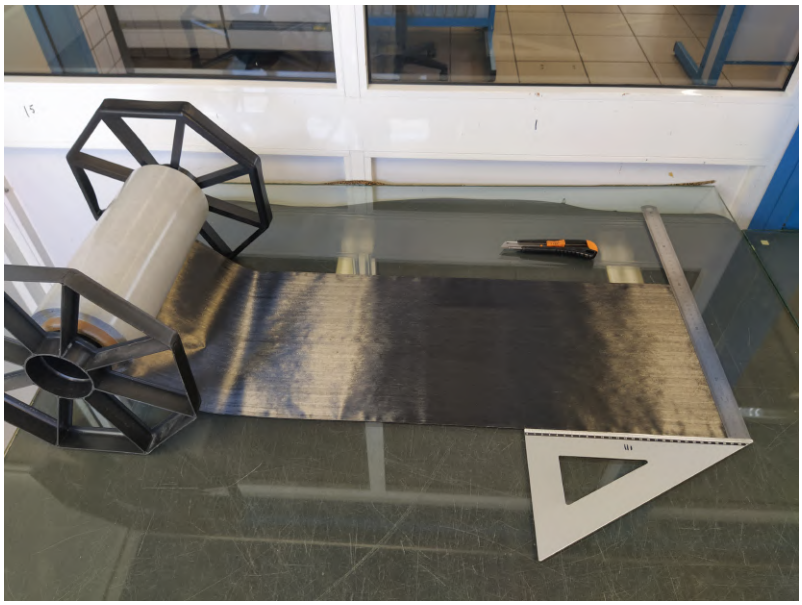


Figura 2.9 Medición de las láminas de 0°.

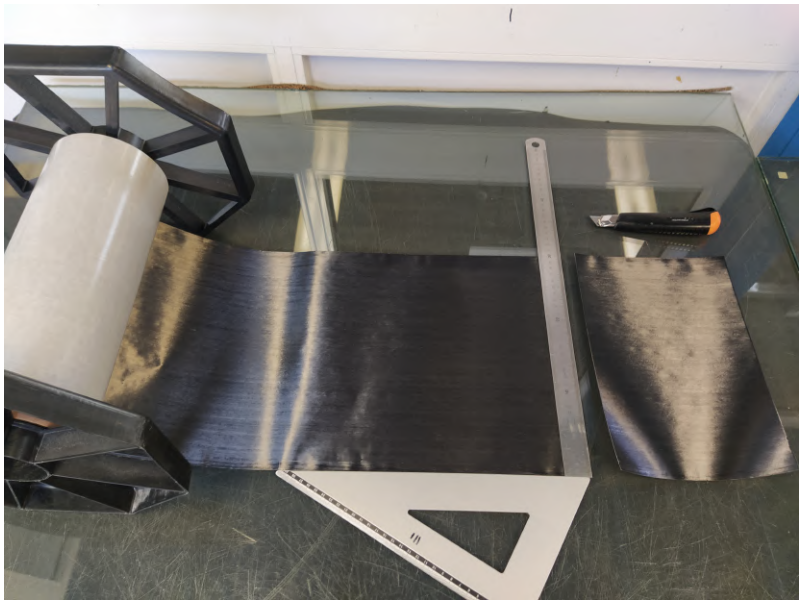


Figura 2.10 Corte de una lámina de 0°.

El proceso descrito se ha repetido para las 16 láminas de 0_{150gsm}; 48 de 0_{50gsm}; 4 de 90_{50gsm} y 1 de 90_{100gsm}, según la Tabla 2.1. Así,se han obtenido las láminas que aparecen en la Figura 2.11. Puesto que el apilado del material (Sección 2.1.3) no se ha realizado el mismo día que el corte, se ha procedido a introducir las láminas cortadas en sus respectivas bolsas que se han guardado, a su vez, en el congelador ubicado en la misma sala limpia, véanse las Figuras 2.12, 2.13 y 2.14. Finalmente, los rollos de material empleados se han introducido de nuevo en sus bolsas termoselladas (Figura 2.15) y, a continuación, en la cámara frigorífica de la que habían sido extraídos

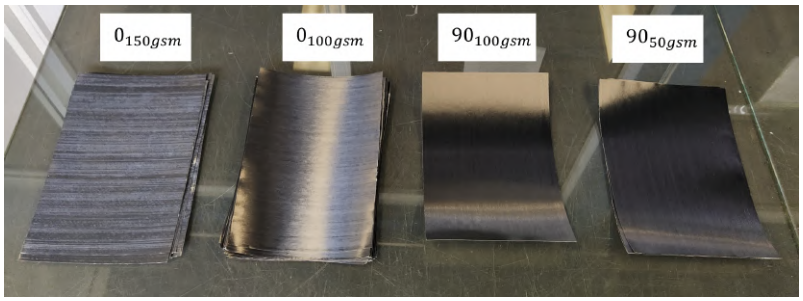


Figura 2.11 Todas las láminas cortadas.

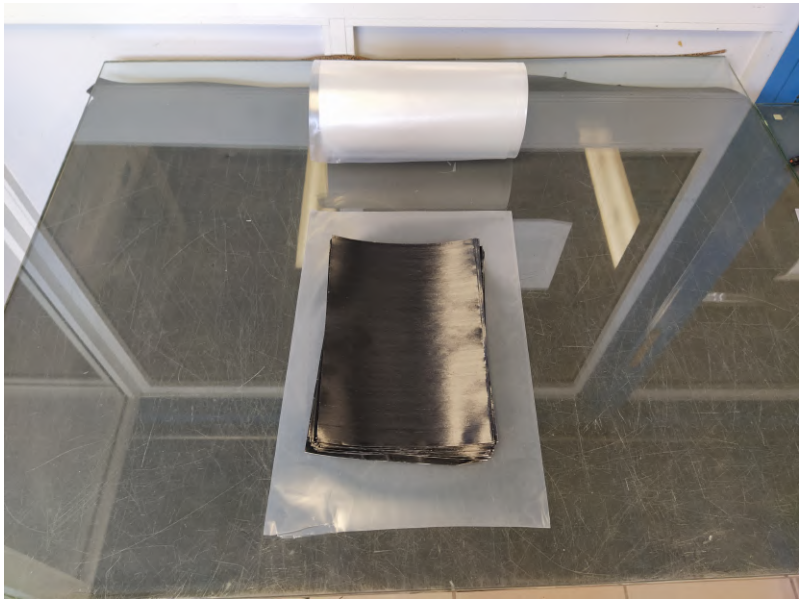


Figura 2.12 Fabricación de las bolsas para las láminas.

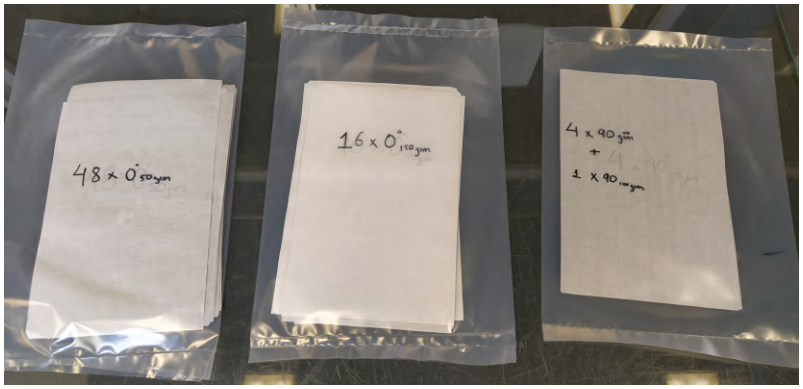


Figura 2.13 Todas las láminas en sus respectivas bolsas.

Figura 2.14 Bolsas de las láminas en el congelador.

Figura 2.15 Rollo de material en su bolsa.

2.1.3 Apilado de las láminas

Obtenidas las láminas que conforman los paneles, se ha procedido a su apilado. El proceso consiste en apilar las láminas ya cortadas y ejercer presión mediante una espátula de plástico, siguiendo para cada laminado la secuencia correspondiente. Se debe prestar especial cuidado en el tratamiento de las láminas ultradelgadas por la delicadeza de éstas a la hora de quitar la capa protectora que las recubre. Además, ha de considerarse que no se pueden apilar más de 4 o 5 láminas seguidas sin haber precompactado antes el material con la ayuda de una bolsa de vacío.

Se han utilizado bolsas de vacío tanto para precompactar el material ya que ayudan a extraer el aire entre las láminas, lo que facilita su unión. De forma esquemática, la secuencia que se ha seguido en el apilado de las láminas ha sido la siguiente:

1. Se dispone la lámina de tal forma que quede correctamente alineada con algún eje de referencia, véase la Figura 2.16.
2. Se enfrenta con la siguiente lámina a apilar, véase la Figura 2.17.
3. Se aplica presión con la ayuda de una espátula, siguiendo la dirección de la fibra de la lámina que se esté apilando.
4. Se repiten los pasos anteriores hasta haber apilado entre 4 y 5 láminas.
5. Se precompacta el material, sirviéndose de una bolsa de vacío, véase la Figura 2.18.
6. Se repiten los pasos anteriores hasta terminar la secuencia correspondiente.

La secuencia de apilado que se ha seguido para cada laminado es la que se presenta en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Secuencia de apilado según el laminado.

Secuencia de apilado			
CP-0_4-90-50	CP-0_4-90-100	CP-0_{12}-90-50	CP-0_{12}-90_2-50
4 x 0_{150gsm}	4 x 0_{150gsm}	4 x 0_{50gsm}	4 x 0_{50gsm}
Precompactación	*Precompactación*	*Precompactación*	*Precompactación*
1 x 90_{50gsm}	1 x 90_{100gsm}	4 x 0_{50gsm}	4 x 0_{50gsm}
4 x 0_{150gsm}	4 x 0_{150gsm}	*Precompactación*	*Precompactación*
Precompactación	*Precompactación*	4 x 0_{50gsm}	4 x 0_{50gsm}
		Precompactación	*Precompactación*
		1 x 90_{50gsm}	2 x 90_{50gsm}
		4 x 0_{50gsm}	4 x 0_{50gsm}
		Precompactación	*Precompactación*
		4 x 0_{50gsm}	4 x 0_{50gsm}
		Precompactación	*Precompactación*
		4 x 0_{50gsm}	4 x 0_{50gsm}
		Precompactación	*Precompactación*

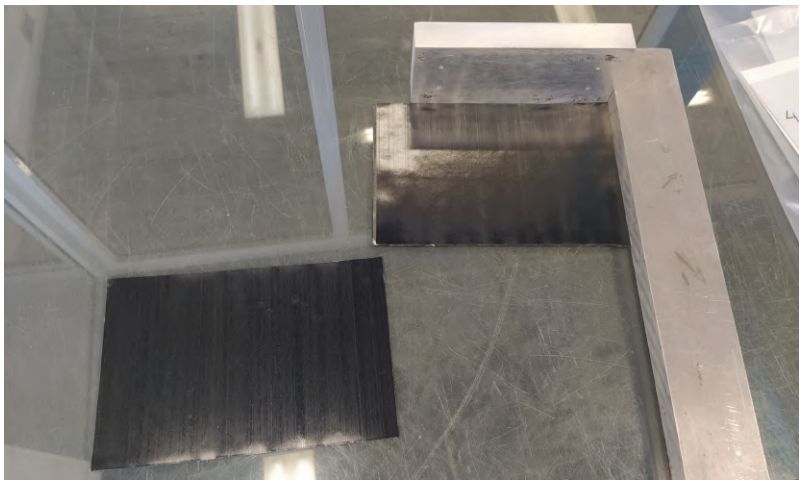


Figura 2.16 Disposición de la lámina.

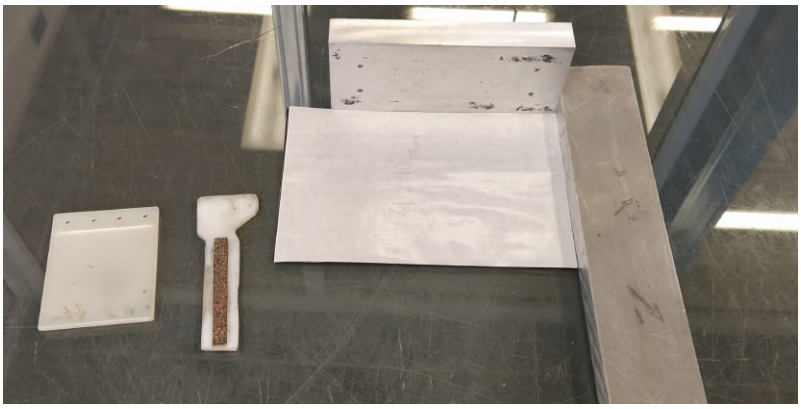


Figura 2.17 Lámina frente a lámina presionada con la espátula.

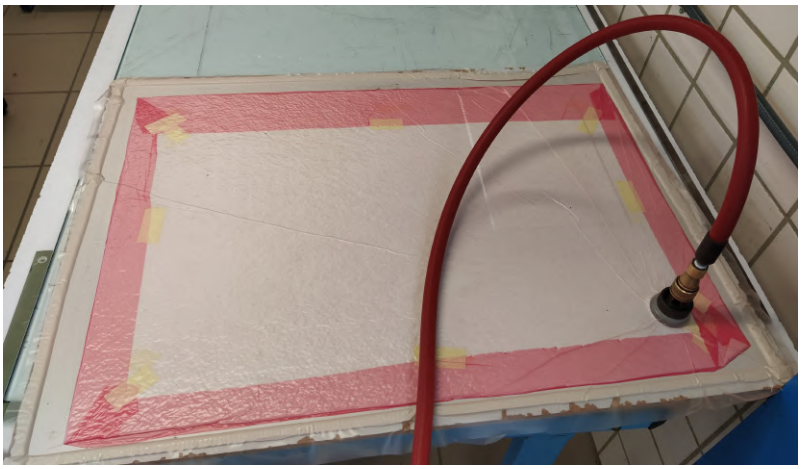


Figura 2.18 Precompactación con bolsa de vacío.

2.1.4 Curado de los paneles

El curado de los paneles de material compuesto es el proceso mediante el cual la matriz polimérica de las láminas que lo conforman fluye y se endurece de manera que aporte rigidez y resistencia al material, esto es, activa la reacción química conocida como polimerización. El curado de los laminados del presente trabajo ha consistido en la aplicación simultánea de temperatura y presión en el autoclave del que dispone el laboratorio.

Para impedir que puedan introducirse impurezas en los laminados así como permitir mantener la forma requerida de los mismos además de evitar el quemado de la resina durante el curado en el autoclave, se ha fabricado una bolsa de curado en la que se han introducido los laminados. Los pasos que se han seguido para la confección de las estas bolsas de curado se listan e ilustran a continuación:

1. Sobre una plancha de acero se ha colocado una lámina de teflón, cortada a la medida adecuada para evitar que se adhieran a la plancha los paneles de material. Se han colocado los paneles y sobre éstos otra lámina de teflón, véase las Figura 2.19. Nótese que se ha dejado suficiente espacio en la parte inferior para la posterior colocación de las tomas de vacío.
2. Se ha colocado una cinta de cromato de alta temperatura rodeando la plancha de acero y las láminas de teflón previamente colocadas (Figura 2.20).

3. Se ha añadido una capa de *airwave* cubriendo todo el conjunto. Este tejido permite que el vacío se aplique uniformemente sobre todos los paneles. Véase la figura 2.21.
4. Se han añadido dos tomas de vacío y se ha recubierto todo el conjunto con la última capa de la bolsa, prestando cuidadosa atención a la unión entre ésta y la cinta de cromato para evitar posibles fugas. Véase la figura 2.22.
5. Se ha aplicado vacío a la bolsa y se ha comprobado que esté correctamente fabricada, véase la Figura 2.23.

El resto del proceso de curado ha sido llevado a cabo por el personal del laboratorio.

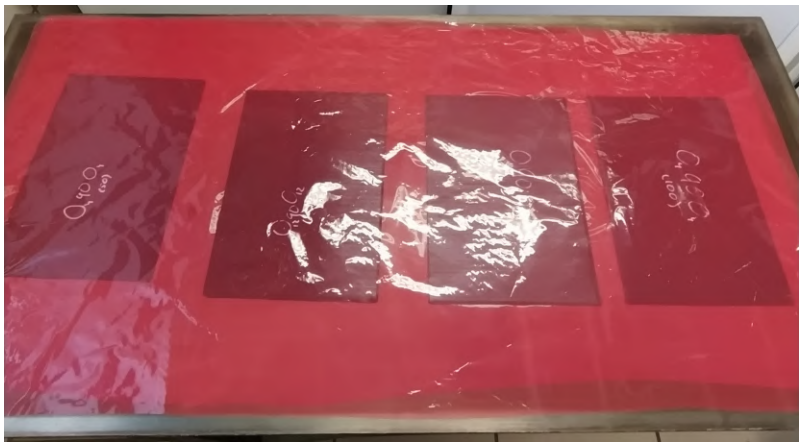


Figura 2.19 Paneles y láminas de teflón sobre la plancha de acero.

Figura 2.20 Cinta de cromato.

Figura 2.21 Tejido *airwave*.

Figura 2.22 Bolsa de vacío. Antes del vacío.

Figura 2.23 Bolsa de vacío. Después del vacío.

2.2 Fabricación de las probetas

Una vez se han obtenido los laminados, se han fabricado las probetas a partir de éstos. En el presente trabajo las probetas que se han utilizado consisten en la división de los laminados previamente obtenidos a las que se han adherido tacos de vidrio de forma que permitan ser agarradas en la máquina de ensayo a tracción. El proceso de fabricación ha consistido, esencialmente, en los siguientes pasos:

1. Preparación de los tacos de vidrio.
2. Adhesión de los tacos de vidrio.
3. Obtención de las probetas.

2.2.1 Preparación de los tacos de vidrio

Un taco de vidrio es un laminado de material compuesto a partir de fibra de vidrio que, adherida a la probeta, permite y facilita el agarre de ésta durante su ensayo a tracción. En este sentido, se ha partido de paneles de fibra de vidrio ya fabricados y proporcionados por el personal del laboratorio. Para poder adherir los tacos de vidrio a los laminados que han sido fabricados, se ha lijado un haz de cada taco y se han cortado siguiendo las medidas correspondientes.

Para poder dimensionar la cantidad de material que ha sido necesario, se han tomado como referencia las medidas de los tacos de vidrio que se presentan en la Figura 2.24. Por otro lado, por cada laminado se necesitan 4 tacos, debiendo ser todos ellos sacados del mismo panel original. Esto hace que hayan sido utilizados 2 paneles de fibra de vidrio, del primero (Figura 2.25) se han sacado 12 tacos, mientras que del segundo (Figura 2.26) se han sacado 4, haciendo un total de 16 tacos de vidrio.

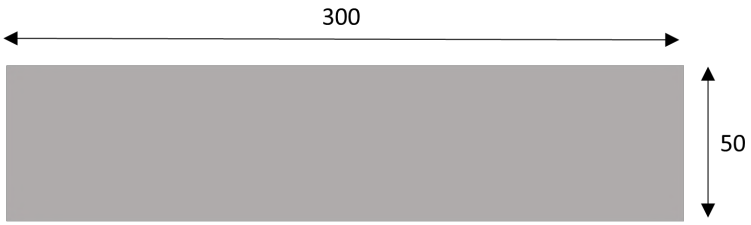


Figura 2.24 Dimensiones de los tacos de vidrios. Cotas en mm.

Figura 2.25 Panel de fibra de vidrio 1.

Figura 2.26 Panel de fibra de vidrio 2.

Se ha tomado el *panel 2* como ejemplo ilustrativo de todo el proceso que sigue, puesto que es análogo al que se ha realizado en el *panel 1*. Una vez se han marcado las dimensiones de los tacos en los paneles, se han lijado las áreas que éstos encierran por un haz, véase la Figura 2.26, con la ayuda de un taladro al que se le ha añadido una lija. Acto seguido, se ha procedido a cortar los tacos en la máquina de corte (Figura 2.27). Puede verse, además, que ha sido necesaria la aplicación de agua durante el proceso de corte, siendo éste por abrasión. Finalmente se han cortado los tacos de vidrio con las dimensiones apropiadas y se ha comprobado que éstas fueran correctas, véanse las Figuras 2.28, 2.29, 2.30 y 2.31. Todos los tacos de vidrio cortados pueden verse en la Figura 2.32.

Figura 2.27 Máquina de corte.

Figura 2.28 Corte de los tacos de vidrio del panel 2.

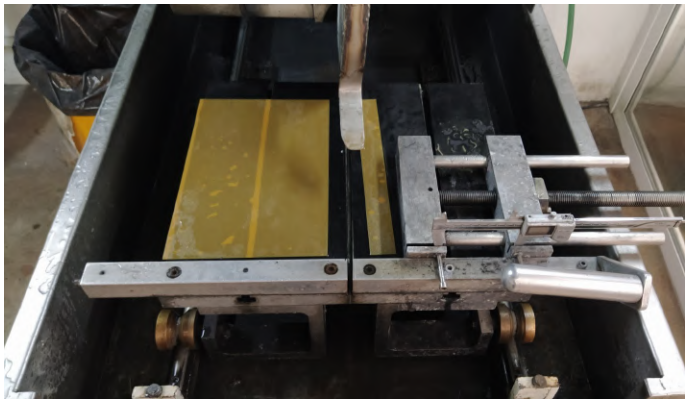


Figura 2.29 Corte de los tacos de vidrio del panel 2.

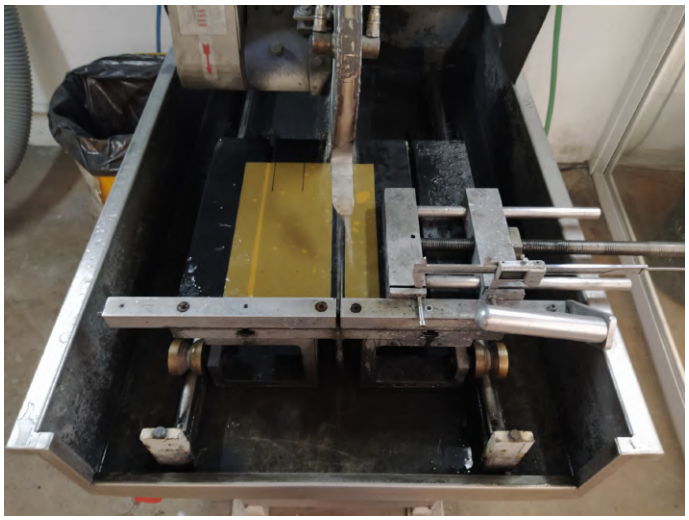


Figura 2.30 Corte de los tacos de vidrio del panel 2.

Figura 2.31 Comprobación de las medidas de los tacos de vidrio.

Figura 2.32 Todos los tacos de vidrio cortados.

2.2.2 Adhesión de los tacos de vidrio

Una vez han sido cortados los 16 tacos de vidrio, se han adherido a sus correspondientes paneles. Con este objetivo se ha procedido, en primer lugar, a limpiar tanto los tacos como los paneles con ISOPROPIL (Figuras 2.33 y 2.34). A continuación, se ha hecho uso del adhesivo rosa Z-15429 (Figura 2.35) , del que se han cortado los trozos necesarios para cada taco. Estos trozos han sido pegados primero en los tacos de vidrio (Figura 2.36), habiéndose aplicado calor con la ayuda de un secador. De esta misma forma, han sido a su vez colocados sobre a los paneles (Figura 2.37). Además, se han usado pinzas para aplicar presión y se queden bien colocadas hasta su curado en el autoclave. Finalmente, ha sido el personal del laboratorio el que ha realizado su curado en el autoclave.

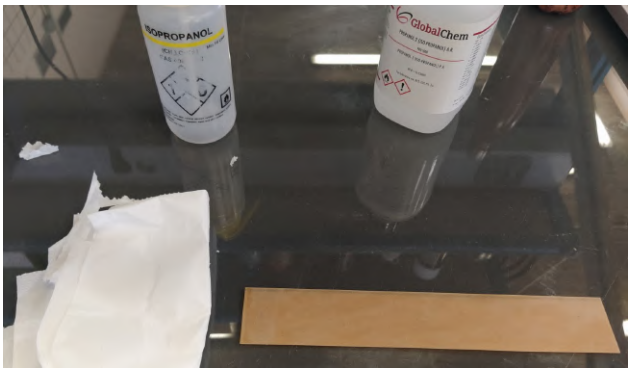


Figura 2.33 Limpieza de un taco de vidrio.

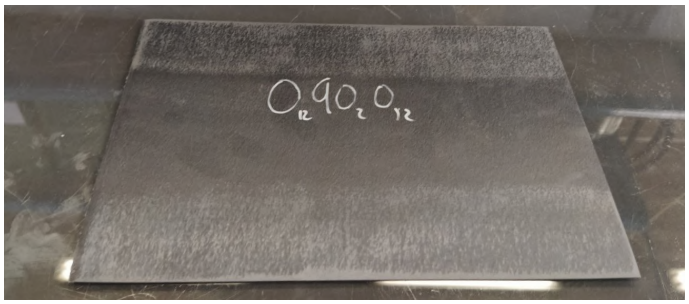


Figura 2.34 Limpieza de un panel.

Figura 2.35 Adhesivo Z-15429.

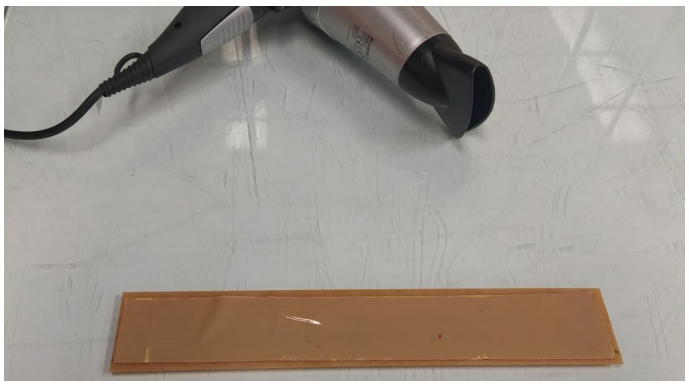


Figura 2.36 Adhesivo pegado a un taco de vidrio.

Figura 2.37 Tacos de vidrio adheridos.

2.2.3 Obtención de las probetas

El paso último en el proceso de fabricación de las probetas necesarias para el presente estudio ha sido la extracción de las mismas que posteriormente han sido ensayadas. Se ha partido de los cuatro laminados, con sus respectivos tacos de vidrio adheridos (Figura 2.38) a los que se les han resanado tres de sus cuatro lados en la máquina de lijar de forma que han quedado perfectamente horizontales y verticales según sea el lado y han servido de referencia para el corte, véanse las Figuras 2.39, 2.40 y 2.41.

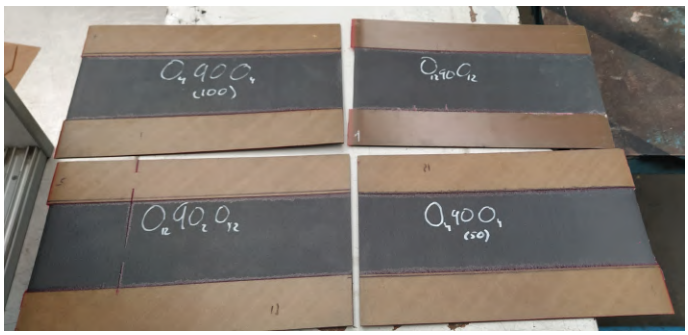


Figura 2.38 Laminados resanados.

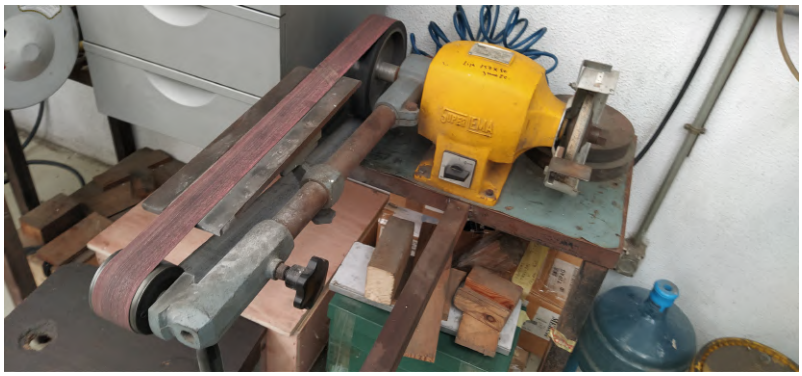


Figura 2.39 Máquina de lijar.

Figura 2.40 Resanado de un lado del laminado.

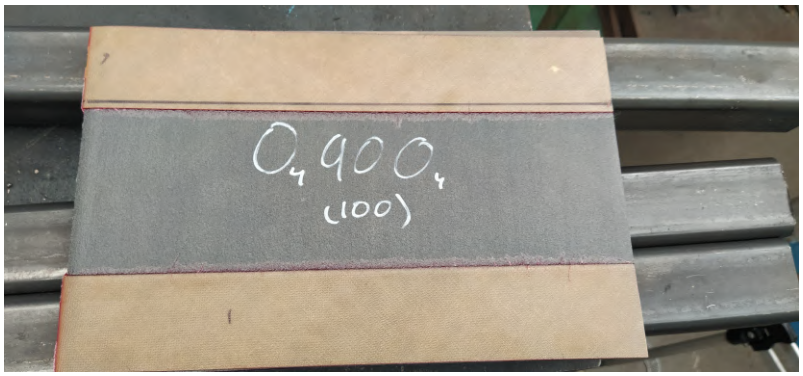


Figura 2.41 Laminados resanado.

Para el corte de las probetas, se han seguido las dimensiones descritas en la Figura 2.1. A partir de este esquema y haciendo uso nuevamente de la máquina de corte de la que dispone el laboratorio (Figura 2.27) se ha tomado material sobrante auxiliar para asegurar que el corte sigue las medidas apropiadas, véanse las Figuras 2.42 y 2.43.

Figura 2.42 Calibrado de la máquina de corte.

Figura 2.43 Comprobación medida de corte de material auxiliar.

Una vez se ha comprobado que las medidas de corte son correctas, se ha procedido al corte de las probetas de los laminados. Para ello se han seguido los mismos pasos que en 2.2.1 con la precaución adicional de identificar correctamente cada una de las probetas que han sido extraídas. Véanse las Figuras 2.44 y 2.45. Finalmente se han obtenido diez probetas de cada laminado.

Figura 2.44 Corte de las probetas de un laminado.

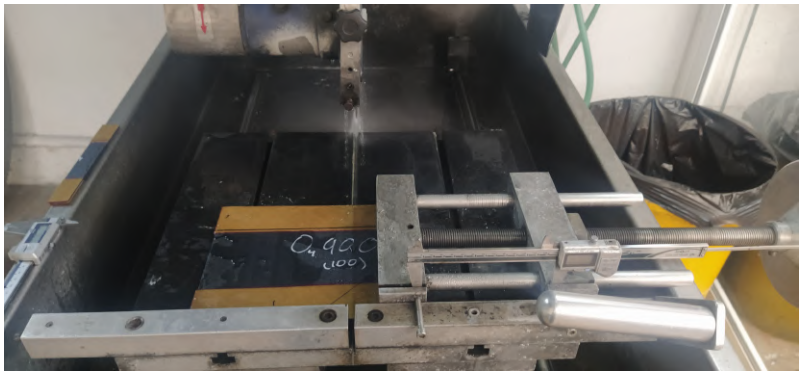


Figura 2.45 Corte de las probetas de un laminado.

3 Caracterización de los laminados

Con el objetivo de caracterizar las propiedades de resistencia y rigidez de los laminados fabricados, se han sometido tres probetas de cada uno de ellos al ensayo de tracción uniaxial. Para obtener las medidas de las deformaciones en las probetas se han utilizado galgas extensiométricas que han sido adheridas a ellas previamente a ser ensayadas. A partir de las gráficas *Carga - Deformación* y de las medidas de las probetas, se han obtenido la tensión de rotura, que se corresponde con la resistencia a tracción de los laminados ensayados, y el Módulo de Young, que se corresponde con la rigidez de los mismos. El procedimiento que se ha seguido para cada ensayo ha sido el siguiente:

1. Adhesión y preparación de la galga extensiométrica (Sección 3.1).
2. Preparación del ensayo (Sección 3.2).
3. Ensayo de la probeta (Sección 3.3).
4. Registro y tratamiento de los resultados (Sección 3.4.5).

3.1 Adhesión y preparación de la galga extensiométrica

Una galga extensiométrica es un instrumento de medición que se utiliza para determinar la deformación en un sólido deformable, en este caso probetas compuestas por laminados de material compuesto. En este trabajo se han usado galgas eléctricas que consisten en una resistencia eléctrica formada por hilos de material conductor sobre una lámina que se adhiere a la probeta. Al someterla a carga se deforma y, con ella, la galga que lleva adherida, de modo que cambia el valor de su resistencia eléctrica. A través de estos cambios resistivos, se obtiene matemáticamente la deformación que experimenta el sólido deformable.

Su colocación en las probetas ha sido como se detalla a continuación. En primer lugar, se ha limpiado y lijado levemente la zona central de la probeta por su cara lisa (Figura 3.1). Acto seguido se han trazado los ejes vertical y horizontal con la ayuda del calibre de altura (Figura 3.2) y se ha limpiado nuevamente la cara lisa de la probeta con ISOPROPIL.

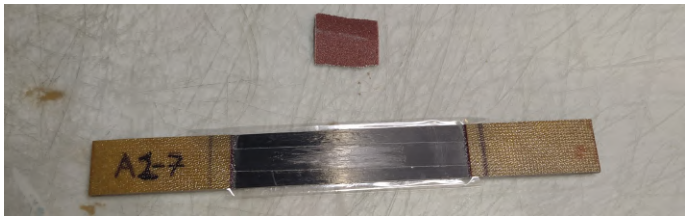


Figura 3.1 Lijado de una probeta para la adhesión de una galga extensiométrica.

Figura 3.2 Calibre de altura para el trazado de los ejes.

Una vez se ha preparada la probeta, se ha hecho acopio de la galga extensiométrica así como del material que ha sido necesario para su adhesión, es decir: pinzas, cinta adhesiva, catalizador, teflón y adhesivo. Se ha tomado la galga con cinta adhesiva y se ha cuadrado según sus marcas en los ejes que han sido trazados en la probeta. A continuación, se ha aplicado catalizador y adhesivo sobre la galga y, sirviéndose de un trozo de teflón, se ha aplicado presión con el dedo durante un minuto.

Adherida la galga, se ha procedido a soldar una pareja de cables en sus bornes. Para ello, en primer lugar, se han estañeado las puntas de los cables en cuestión (Figura 3.3) y, tras haber repasado los bornes de las galgas con un lápiz de fibra de vidrio (Figura 3.4), se han soldado las puntas de los cables a la galga (Figura 3.5). Por último, se ha pegado un trozo de cinta adhesiva para proteger la unión y se ha añadido a los cables una ficha de conexión para la toma de datos a través del equipo de ensayo (Figura 3.6).

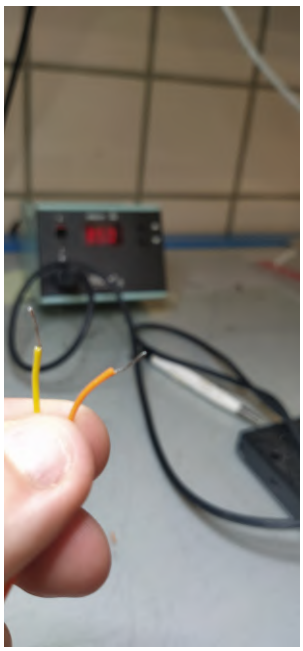


Figura 3.3 Cables estañeados.

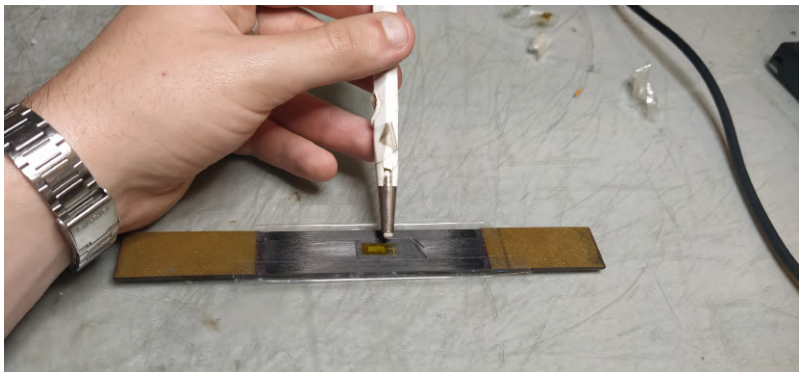


Figura 3.4 Lápiz de fibra de vidrio sobre los bornes de una galga extensiométrica.

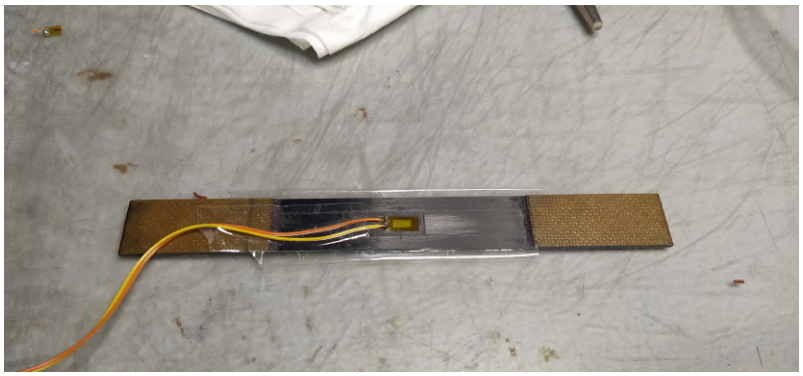


Figura 3.5 Cables soldados a una galga extensiométrica.

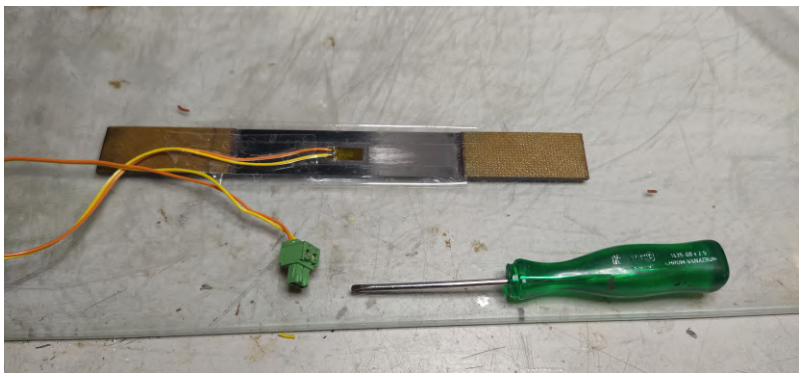


Figura 3.6 Ficha de conexión.

3.2 Preparación del ensayo

Para el ensayo de las probetas se ha hecho uso de la máquina *INSTRON 4482* de la que dispone el laboratorio (Figura 3.7). La célula de carga que se ha empleado ha sido la de 100 *kN*. Se han montado las mordazas correspondientes en la máquina y se ha procedido a colocar las probetas en ellas para cada ensayo. Con el objetivo de evitar que pueda resbalar, se han añadido pequeños trozos de lija para mejorar el agarre en las mordazas.

Resulta crucial la correcta colocación de la probeta en la máquina durante su ensayo, para ello se ha

empleado una escuadra y se ha asegurado que estuviera perfectamente alineada con la aplicación de la carga y centrada al apretar las mordazas.

Una vez se ha colocado la probeta, se ha conectado la galga extensiométrica al conector de la máquina de ensayo.

Figura 3.7 Máquina de ensayo *INSTRON 4482*.

3.3 Ensayo de la probeta

El ensayo ha consistido en someter a tracción uniaxial cada probeta hasta la rotura con el objetivo de obtener la gráfica *Carga - Deformación* cada probeta ensayada y caracterizar todos los laminados. Se ha tomado especial atención a la captación de sonidos que pudieran producirse por la rotura de las fibras durante el ensayo.

Las Figuras 3.8, 3.9, 3.10 y 3.11 se corresponden con los diagramas *Carga - Deformación* de las probetas C1, C2 y C3 del laminado CP-0_4-90-50; C1, C2 y C3 del laminado CP-0_4-90-100; C1, C2 y C3 del laminado CP-0_{12}-90-50 y C1, C2 y C3 del laminado CP-0_{12}-90_2-50, respectivamente.

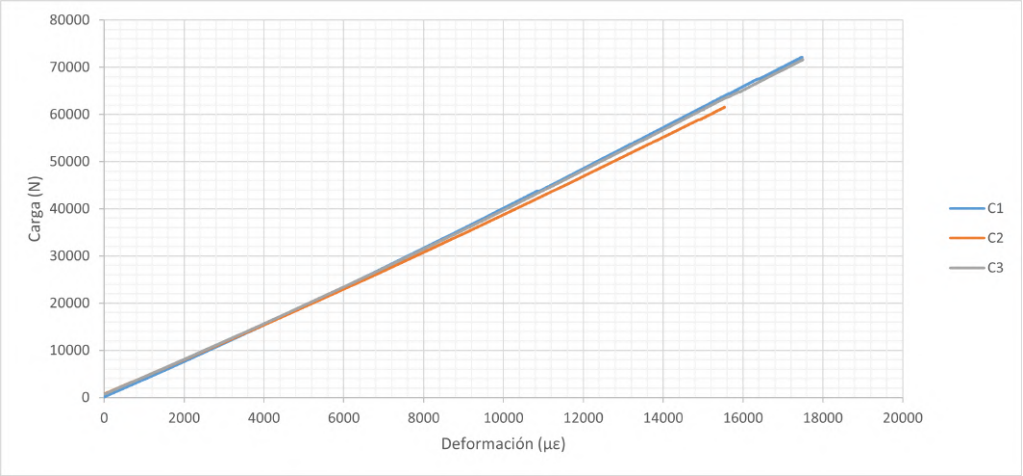


Figura 3.8 Diagrama *Carga - Deformación*. Laminado CP-0_4-90-50.

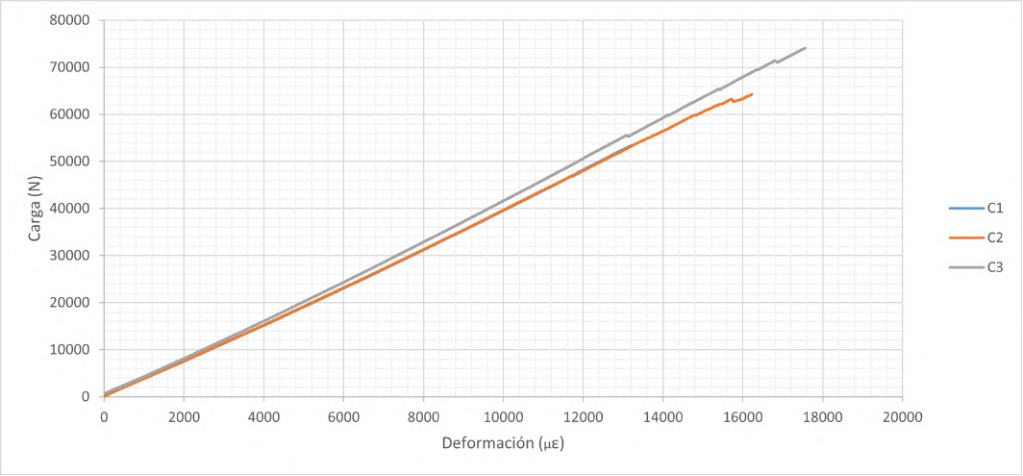


Figura 3.9 Diagrama *Carga - Deformación*. Laminado CP-0_4-90-100.

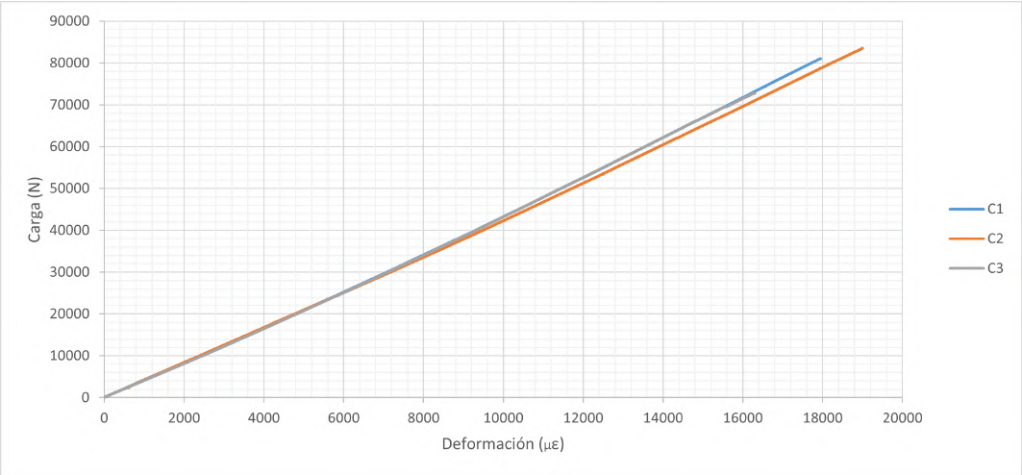


Figura 3.10 Diagrama *Carga - Deformación*. Laminado CP-0_{12}-90-50.

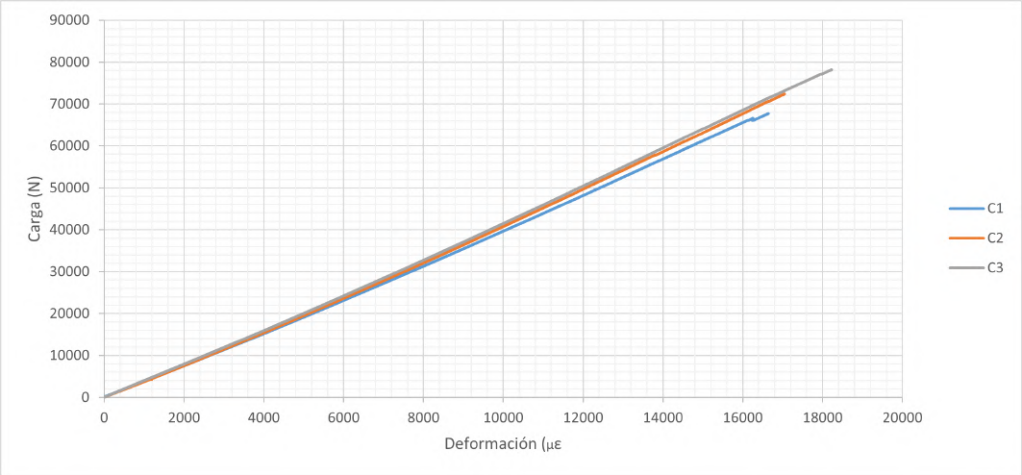


Figura 3.11 Diagrama *Carga - Deformación*. Laminado CP-0_{12}-90_2-50.

3.4 Análisis de resultados

A partir de los ensayos efectuados en 3.3 se han obtenido los valores de la tensión de rotura y el Módulo de Young de cada probeta.

La tensión de rotura resulta de la relación *Carga - Área* según la fórmula 3.1, donde R indica el momento de la rotura, F es la carga aplicada y A el área.

$$\sigma_R = \frac{F_R}{A} \tag{3.1}$$

Por otro lado, el Módulo de Young o Módulo de Elasticidad de un material con comportamiento elástico como los laminados del presente estudio, se calcula como la pendiente de la curva *Tensión - Deformación*. Esto es,

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \tag{3.2}$$

Se han obtenido, por tanto, la tensión de rotura y el Módulo de Elasticidad de tres probetas por cada laminado , calculando, además, sus valores medios (3.3), desviaciones típicas (3.4) y coeficientes de variación(3.5).

$$\overline{X} = \frac{\Sigma_{i=1}^{n} X_i}{n} \tag{3.3}$$

$$\sigma = \frac{\sqrt{\Sigma_{i=1}^{n} (X_i - \overline{X})^2}}{n-1} \tag{3.4}$$

$$CV = \frac{\sigma}{\overline{X}} \cdot 100 \tag{3.5}$$

3.4.1 Laminado CP-0_4-90-50

Se han tomado las medidas de ancho y espesor de las probetas que han sido ensayadas y se ha calculado el área correspondiente, según se muestra en la Tabla 3.1. Con ello, se han hallado los valores mencionados con anterioridad, que se muestran en la Tabla 3.2.

En promedio, la carga de rotura del laminado, F_R, ha sido 68437.83 N y la tensión de rotura, σ_R, 2040.23 MPa. Por otro lado, el Módulo de Elasticidad, E, ha resultado 120.20 GPa. Obsérvese que los coeficientes de variación obtenidos son aceptables.

Tabla 3.1 Dimensiones de las probetas. Laminado CP-0_4-90-50.

Probeta	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm^2)
C1	24.848	1.35	33.544
C2	24.847	1.35	33.543
C3	24.848	1.35	33.544

Tabla 3.2 Caracterización del laminado CP-0_4-90-50.

Probeta	F_R (N)	σ_R (MPa)	E (GPa)
C1	72162.36	2151.22	123.26
C2	61518.51	1833.99	116.42
C3	71632.62	2135.47	120.91
Media	68437.83	2040.23	120.20
Desviación típica	4897.48	145.97	2.84
CV	7.16	7.15	2.36

3.4.2 Laminado CP-0_4-90-100

Se ha procedido de forma análoga al laminado A1, las dimensiones de las probetas se muestran en la Tabla 3.3. Los resultados obtenidos para este laminado se muestran en la Tabla 3.4.

Para este laminado, el valor medio de la carga de rotura ha sido 67672.65 N; el de la tensión

de rotura, 1928.04 *MPa* y el de el Módulo de Elasticidad, 114.73 *GPa*. De nuevo, los coeficientes de variación de las magnitudes estudiadas han sido aceptables.

Tabla 3.3 Dimensiones de las probetas. Laminado CP-0_4-90-100.

Probeta	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm^2)
C1	25.017	1.4	35.024
C2	25.125	1.4	35.175
C3	25.071	1.4	35.099

Tabla 3.4 Caracterización del laminado CP-0_4-90-100.

Probeta	F_R (N)	σ_R (MPa)	E (GPa)
C1	64677.33	1846.67	114.97
C2	64235.88	1826.18	114.48
C3	74104.74	2111.28	114.72
Media	67672.65	1928.04	114.73
Desviación típica	4551.74	129.84	0.20
CV	6.73	6.73	0.18

3.4.3 Laminado CP-0_{12}-90-50

En las Tablas 3.5 y 3.6 se muestran las dimensiones de las probetas ensayadas y los resultados obtenidos respectivamente.

La media de la carga de rotura, en este caso ha sido 77136.03 *N*; el de la tensión de rotura, 2292.33 *MPa* y el de el Módulo de Elasticidad, 133.32 *GPa*. Se pueden tomar estos valores como aceptables.

Tabla 3.5 Dimensiones de las probetas. Laminado CP-0_{12}-90-50.

Probeta	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm^2)
C1	24.901	1.35	33.616
C2	24.951	1.35	33.684
C3	24.926	1.35	33.650

Tabla 3.6 Caracterización del laminado CP-0_{12}-90-50.

Probeta	F_R (N)	σ_R (MPa)	E (GPa)
C1	81089.46	2412.20	133.47
C2	77528.43	2301.65	129.99
C3	72790.20	2163.15	133.34
Media	77136.03	2292.33	132.26
Desviación típica	3399.50	101.89	1.61
CV	4.41	4.44	1.22

3.4.4 Laminado CP-0_{12}-90_2-50

Finalmente, de igual forma que en los laminados anteriores, se han tomado las medidas de las probetas ensayadas, que se muestran en la Tabla 3.7. Los resultados de los ensayos practicados se muestran en la Tabla 3.8.

El valor medio de la carga de rotura para el presente laminado ha sido 72780.39 N; el de la tensión de rotura, 2081.50 MPa y el del Módulo de Elasticidad, 120.55 GPa. Estos valores resultan igualmente aceptables.

Tabla 3.7 Dimensiones de las probetas. Laminado CP-0_{12}-90_2-50.

Probeta	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm^2)
C1	24.963	1.4	34.948
C2	24.987	1.4	34.982
C3	24.975	1.4	34.965

Tabla 3.8 Caracterización del laminado CP-0_{12}-90_2-50.

Probeta	F_R (N)	σ_R (MPa)	E (GPa)
C1	67757.67	1938.80	117.29
C2	72397.80	2069.58	121.35
C3	78185.70	2236.11	123.00
Media	72780.39	2081.50	120.55
Desviación típica	4265.81	121.67	2.4
CV	5.86	5.85	1.99

3.4.5 Resumen de resultados

Los resultados que se han obtenido han quedado resumidos en las Figuras 3.12, 3.13 y 3.14. En ellas se ilustran los valores de la carga y tensión de rotura alcanzados así como el Módulo de Elasticidad de cada laminado, respectivamente. Nótese que las Figuras 3.13 y 3.14 se han dividido en dos secciones con una línea de puntos en el medio. El motivo de esta distinción entre los laminados radica en los distintos espesores que tienen, y que comparten dos a dos. Únicamente pueden compararse los valores de tensión y Módulo de Elasticidad entre los laminados que comparten el mismo espesor.

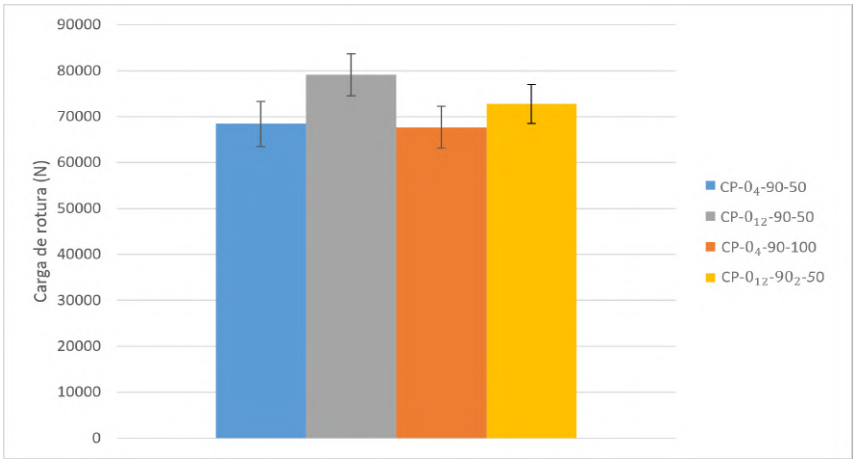


Figura 3.12 Carga de rotura (N) de cada laminado .

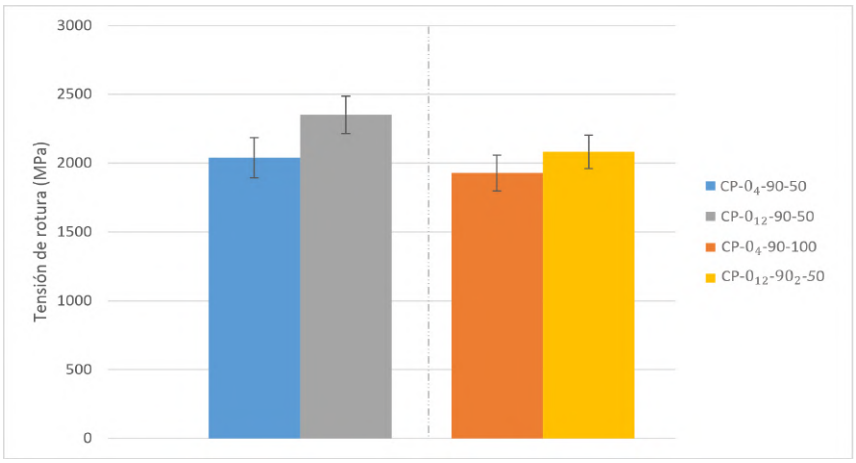


Figura 3.13 Tensión de rotura (MPa) de cada laminado.

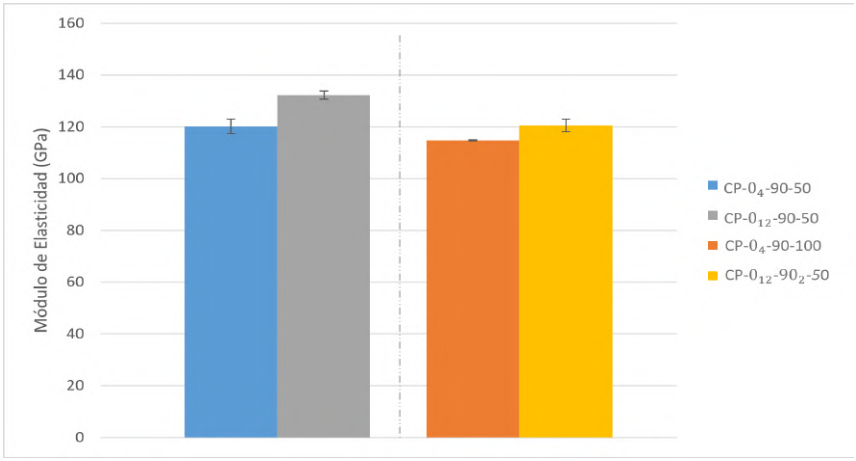


Figura 3.14 Módulo de Elasticidad (GPa) de cada laminado.

Atendiendo a estos resultados puede hacerse la comparativa que se ilustra en las Figuras 3.15 y 3.16. Para un mismo espesor de la capa de 90°, los laminados que han sido fabricados al completo con láminas ultradelgadas de 50*gsm*, CP-0$_{12}$-90-50 y CP-0$_{12}$-90$_2$-50, presentan ligeramente una mayor tensión de rotura así como un Módulo de Elasticidad más elevado en comparación con los laminados conformados por láminas de distintos gramages (50,100 y 150*gsm*) CP-0$_4$-90-50 y CP-0$_4$-90-100 respectivamente.

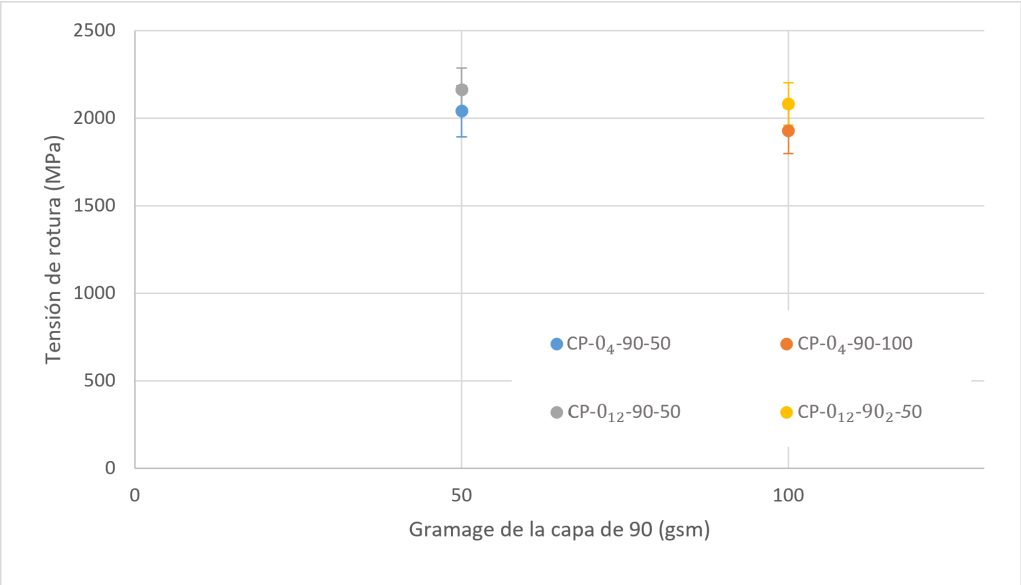


Figura 3.15 Tensión de rotura de cada laminado según el gramage de la capa de 90°.

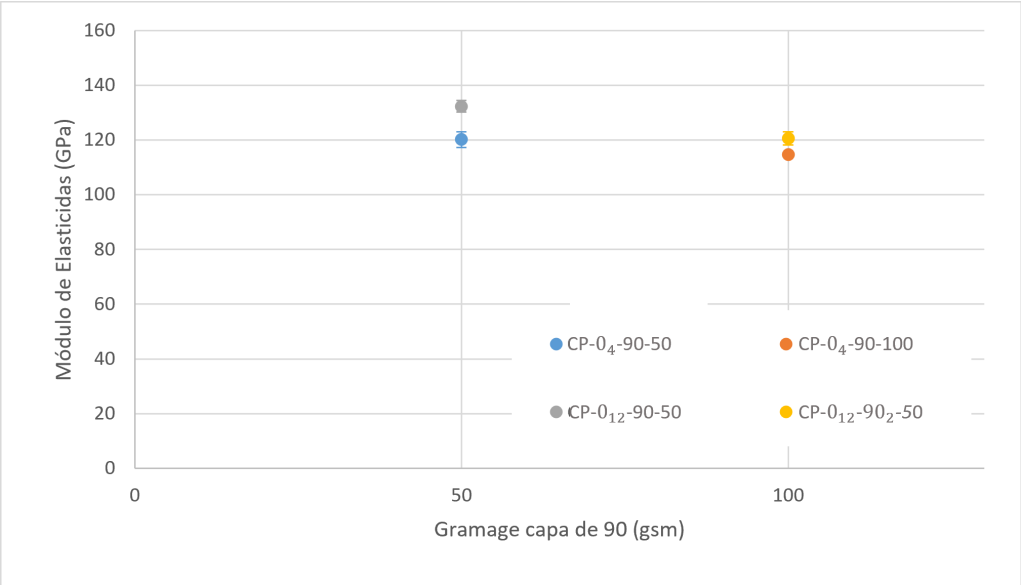


Figura 3.16 Módulo de Elasticidad de cada laminado según el gramage de la capa de 90°.

4 Estudio de la aparición del primer daño

Un daño consiste, para el presente estudio, en un despegue entre la fibra y la matriz. El primer daño es, por tanto, el primero de éstos que haya podido detectarse en la probeta habiéndose sometido ésta a carga. El método empleado para su detección ha consistido en someter cada probeta a tracción uniaxial, con incrementos graduales de carga, de forma que pueda hallarse el mínimo intervalo para el cual se produce el primer daño.

Para poder detectar el daño ha sido necesario que las probetas estén superficialmente preparadas para ello, para lo cual se han lijado y pulido sus cantos de tal forma que se ha podido utilizar un sistema de réplicas. Así, para cada incremento de carga, se ha hecho una réplica de cada borde de la probeta y se ha seguido cargando sin necesidad de descargarla. Estas réplicas han sido revisadas en el microscopio con el objetivo de hallar el mencionado primer daño y su respectivo intervalo de carga para el cual se ha producido.

4.1 Metodología

Se ha sometido cada probeta al ensayo de tracción uniaxial, sometiéndolas a incrementos graduales de carga entre los cuales se han registrado los daños de sus dos bordes. De este modo, se ha comenzado con carga nula; seguidamente se ha incrementado la carga hasta 5000 *N* y se ha aumentado la carga en intervalos de 1000 *N* hasta 9000 *N*, registrándose los respectivos daños para cada incremento.

Una vez se han obtenido todas las réplicas para cada probeta, cara, e incremento de carga, se han analizado en el microscopio y se ha seguido el flujo de trabajo ilustrado en la Figura 4.1 para detectar el primer daño en cada probeta.

4.1.1 Ensayos de las probetas

De forma que se puedan registrar los datos correspondientes a la gráfica *Carga - Deformación* de los ensayos efectuados a las probetas, éstas deben tener adheridas galgas extensiométricas. En este sentido se ha seguido el proceso descrito en la Sección 3.1. Como ya se ha mencionado, con el objetivo de poder realizar las réplicas sobre las probetas y observarlas al microscopio se han lijado y pulido los bordes de las probetas y posteriormente se han adherido las galgas.

El tratamiento superficial ha consistido en una primera fase de desbaste, o lijado, y una segunda de pulido. Para ello, se ha empleado en un primer momento la máquina pulidora *Struers* de la que dispone el laboratorio, en la que se realiza de forma manual todo el tratamiento. No obstante, a mitad de proceso se ha empleado una nueva máquina automática, con la que se han obtenido

mejores resultados , al quedar la superficie más especular, además de haberse realizado el proceso de manera mucho más productiva. Para ambas máquinas, sin embargo, la secuencia de trabajo ha sido similar, véase la Tabla 4.1. Igualmente, los discos de lijado y pulido empleados han sido los mismos, véase la Figura 4.2.
Para preparar el ensayo, se ha procedido de forma similar a 3.2 puesto que se trata del mismo ensayo de tracción uniaxial, en la misma máquina y con los mismos útiles.

Una vez la probetas han sido debidamente preparadas, se ha procedido a sus ensayos. La secuencia que se ha seguido es la que se ha especificado al comienzo de esta sección.

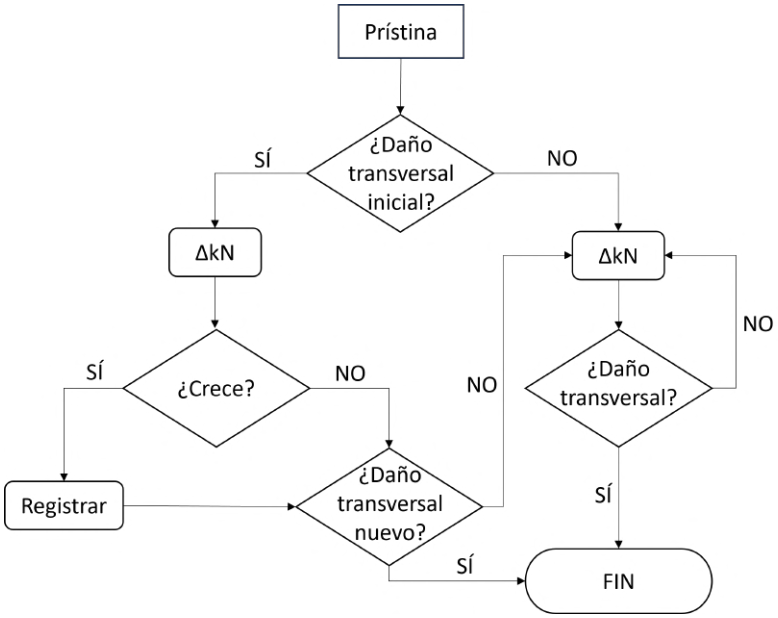


Figura 4.1 Diagrama de flujo para el análisis de las réplicas.

Tabla 4.1 Lijado y pulido. Secuencia de trabajo.

Paso	Disco	Líquido	Tiempo (min)	Velocidad (rpm)
1	Lija de 320	Agua	5	300
2	Lija de 500	Agua	3	300
3	Lija de 800	Agua	3	300
4	Lija de 1200	Agua	5	300
5	Paño MD-Largo	DiaPro Allegro/Largo 9 μm	6	150
6	Paño MD-Dac	DiaPro Dac 3 μm	5	150
7	Paño MD-Nap	DiaPro Nap 1 μm	5	150

Figura 4.2 Discos de lijado y pulido. En sentido horario:lija de 320; lija de 500; lija de 800; lija de 1200; Paño MD-Nap; Paño MD-Largo; Paño MD-Dac; disco metálico para pegado de lijas.

4.1.2 Realización de las réplicas

Una réplica es una copia de una superficie sólida, cuyo relieve se transfiere a ésta, de tal modo que pueda examinarse en el microscopio de forma precisa. En el presente trabajo se ha empleado el *RepliSet-T3* de la marca *Struers*. Las réplicas se han realizado con goma de silicona de curado rápido de dos partes, aplicada con una pistola manual y boquillas de mezcla estática a las que se les han unido unas puntas planas, véase la Figura 4.3.

Figura 4.3 Material empleado en la realización de una réplica.

El proceso de realización de una réplica consiste, en primer lugar, en la aplicación de la goma de silicona sobre el papel que incluye el *RepliSet-T3*, de forma continua y uniforme, apoyando en todo momento la punta de la boquilla sobre el papel. Una vez se ha aplicado la goma, se debe introducir la boquilla en un congelador para evitar que se endurezca dentro de ella y pueda reutilizarse.

Tras aproximadamente 1 minuto, debe pegarse el papel con la goma sobre el canto de la probeta que se encuentra en la máquina de ensayo. Es necesario aplicar la suficiente presión, de manera uniforme, para que la goma rebose levemente los bordes inferior y superior del papel, véase la Figura 4.4.

Figura 4.4 Colocación de la réplica sobre la probeta.

Pasados 10 *min* se retira la réplica y puede observarse en el microscopio, pegándola sobre una superficie lisa y cerciorándose de que el papel quede completamente apoyado en la superficie, véase la Figura 4.5.

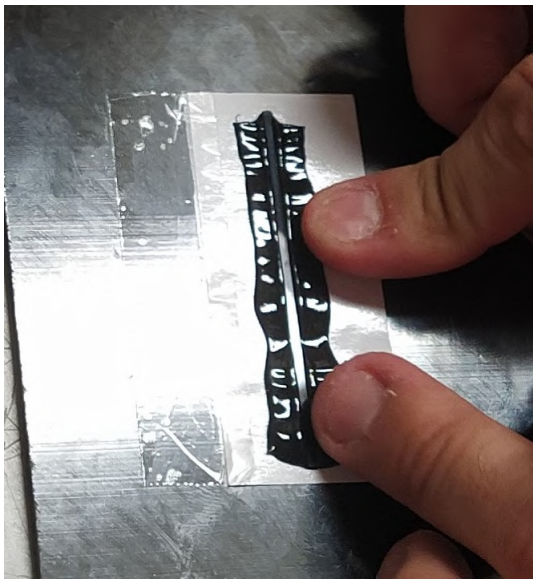


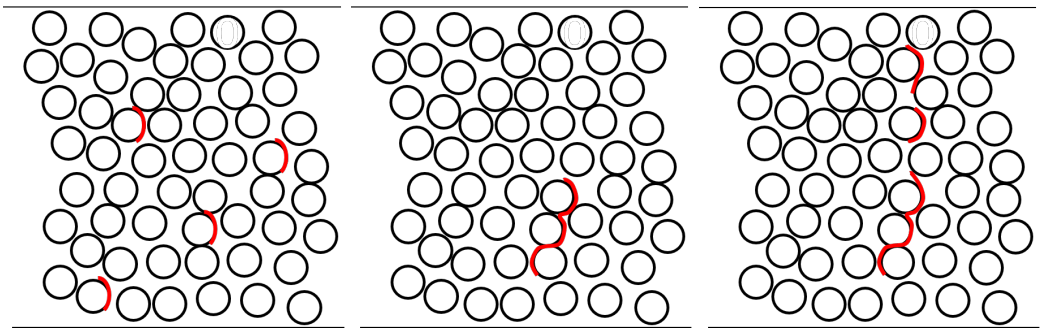
Figura 4.5 Preparación de una réplica examinarla en el microscopio.

4.2 Clasificación de los daños

La tipología de los daños transversales que se han encontrado en las probetas, y que se mostrarán en las siguientes secciones, se resume fundamentalmente en tres tipos. Puede hacerse una clasificación más amplia [8], si bien para el presente trabajo la que se detalla a continuación es suficiente.

El primer tipo de daño transversal encontrado (Figura 4.6 (a)) se trata de despegues aislados entre las fibras y la matriz que no crean un camino de despegues entre interfases 0°/90°. En segundo lugar, también se han encontrado despegues conectados (Figura 4.6 (b)) los cuales forman un

daño continuo que, si bien es un tipo de daño más avanzado que el anterior, no recorre el espesor completo de la capa de 90°, es decir, no atraviesa de interfase 0°/90° a la otra. El tercer tipo de daño detectado en este trabajo es el daño transversal generalizado (Figura 4.6 (c)), que implica un número significativo de despegues aislados y conectados pero que no forman una grieta transversal completa (ya que no se extienden a lo largo de todo el espesor de la capa a 90°) [8].



(a) Despegues aislados (b) Despegues continuos (c) Daño transversal generalizado

Figura 4.6 Tipos de daños transversales hallados en las probetas.

Por otro lado, como se mostrará en las siguientes secciones, se han encontrado igualmente daños longitudinales en las probetas analizadas. Estos daños se producen, a diferencia de los transversales, en la dirección de la aplicación de la carga. Los tipos de daños longitudinales que se han encontrado en las probetas son análogos a los que se han explicado para los daños transversales y varían desde pequeños despegues aislados hasta importantes caminos de despegues en la capa de 90°.

4.3 Aplicación de la metodología

Se ha aplicado el procedimiento descrito en la Sección 4.1 a la probeta ensayada de cada laminado. Los resultados de los ensayos efectuados sobre éstas son los que se ilustran en la Figura 4.7.

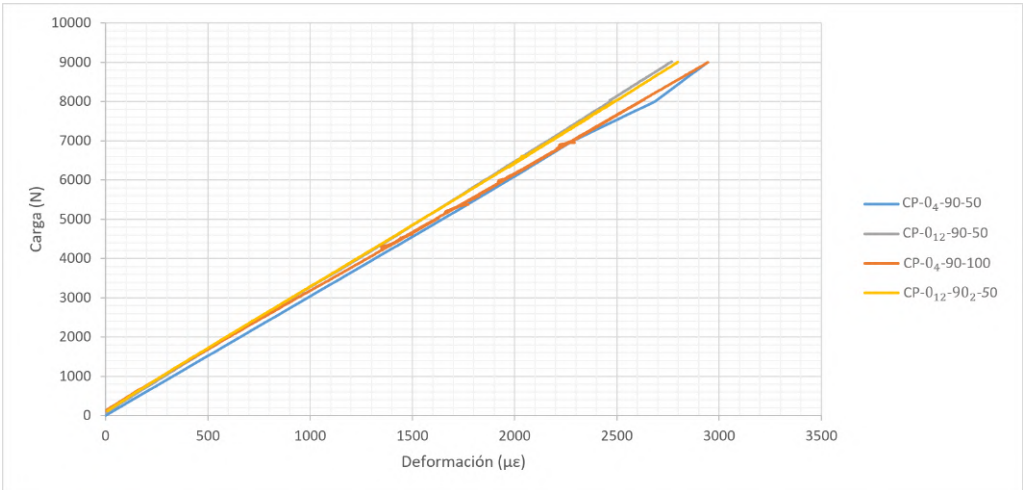


Figura 4.7 Diagramas *Carga - Deformación*. Probeta de cada laminado: CP-0_4-90-50, CP-0_4-90-100, CP-0_{12}-90-50 y CP-0_{12}-90_2-50.

Nótese la diferencia en la curva correspondiente a la probeta CP-0_4-90-50, en este caso se ha utilizado un puente de Wheatstone para obtener los valores de la deformación. Se ha realizado de este modo debido a que, al momento de utilizar la máquina del laboratorio, no funcionaban las conexiones con las galgas extensiométricas.

En las siguientes secciones se han incluido micrografías de las probetas. Cada micrografía se mostrará duplicada, la primera será la original mientras que en la segunda se marcarán los daños en rojo. La nomenclatura que se ha tomado para identificar a los daños en la probeta sigue la estructura: *LAMINADO-DXY*. Donde *LAMINADO* se refiere al laminado de la probeta en la que se ha encontrado el daño; *D* significa daño; *X* hace referencia a la cara de la probeta donde se ha detectado el daño, las cuales se han identificado una como *A* y la otra como *B*; e *Y* indica si se ha encontrado daño en estado prístino (0), o cuántos primeros daños existen ante carga mecánica (1,2,3...).

4.3.1 Probeta CP-0_4-90-50

Se ha seguido la metodología explicada con anterioridad y se ha observado que la probeta presenta daños en ambas caras sin haber sido sometida a carga alguna. La distribución de los daños, transversales y longitudinales, que se han hallado en ausencia de carga, se muestra en la representación de la Figura 4.8. Las líneas de esta gráfica representan la probeta, dividida en 18 secciones de forma que los daños hallados en cada cara se distribuyen a lo largo de ellas.

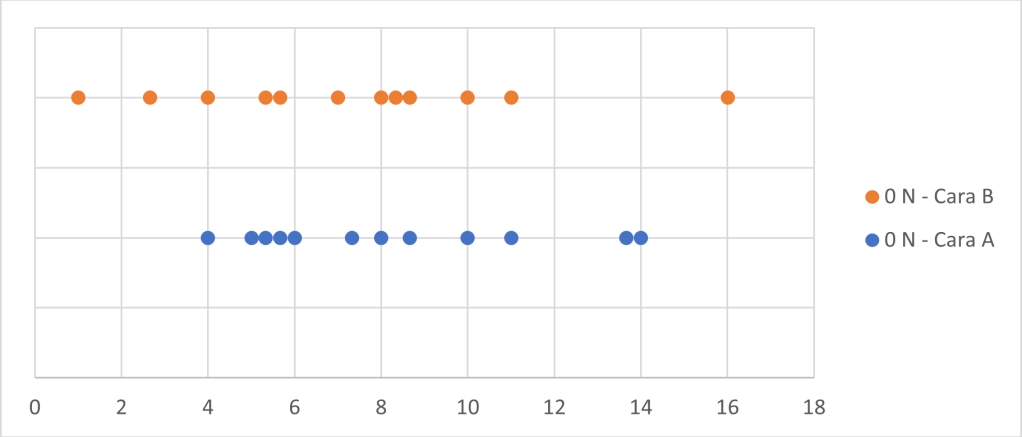
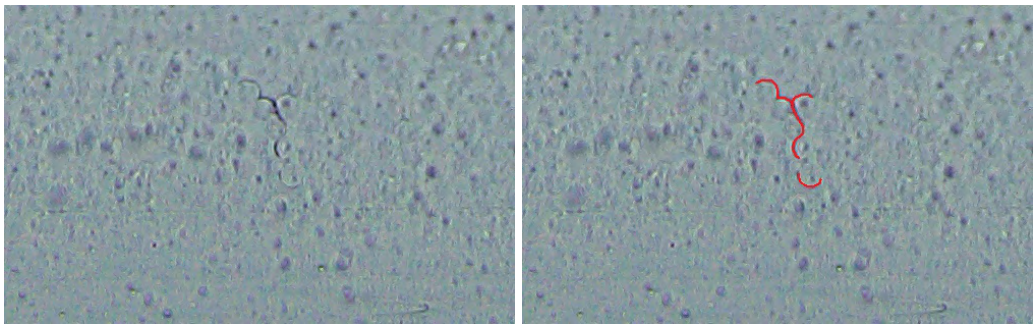
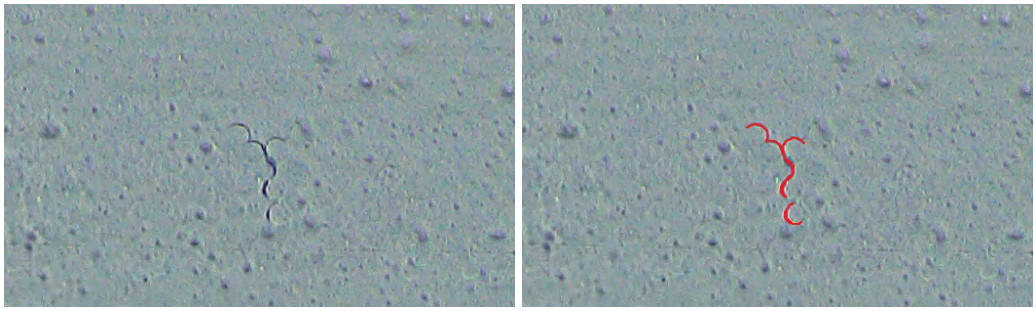


Figura 4.8 Distribución de los daños a lo largo de la probeta CP-0_4-90-50 a 0*N*.

Ninguno de los daños transversales encontrados a 0*N* recorre de extremo a extremo la capa de 90°, de hecho son relativamente pequeños respecto de ésta. Son, más bien, despegues aislados, por lo general situados en los extremos de la capa de 90°. Considérese el daño CP-0_4-90-50-DA0 de la cara *A* ilustrado en la Figura 4.9 (a,b) como ejemplo. Este es el único daño transversal generalizado de la probeta, el resto se tratan de de despegues aislados. Por otro lado, también se han hallado daños longitudinales en la probeta, tratándose de despegues continuos relativamente pequeños.



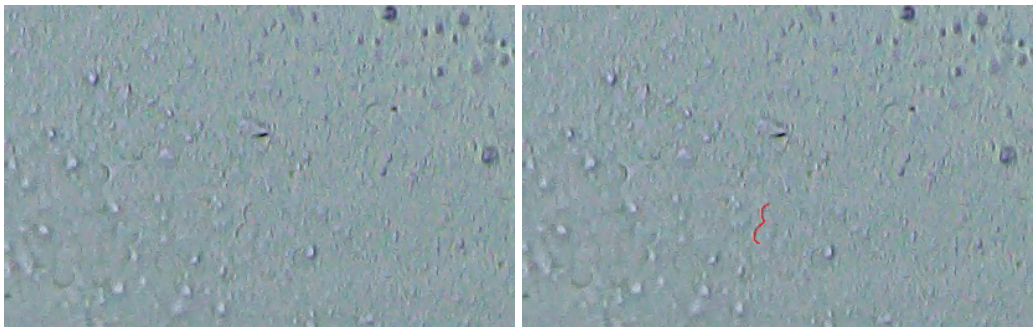
(a) Daño CP-0_4-90-50-DA0 a $0N$ (b) Daño CP-0_4-90-50-DA0 a $0N$. Marcado en rojo



(c) Daño CP-0_4-90-50-DA0 a $5000N$ (d) Daño CP-0_4-90-50-DA0 a $5000N$. Marcado en rojo

Figura 4.9 Daño CP-0_4-90-50-DA0 a $0N$ y $5000N$.

Se han analizado las réplicas correspondientes a la carga de $5000N$ y, si bien no se han producido nuevos daños transversales aislados, algunos de los existentes han crecido ligeramente, véase de nuevo la Figura 4.9 (c,d) en la que puede observarse este ligero crecimiento del daño que ya existía. En el intervalo entre $5000N$ y $6000N$ no se ha producido ningún nuevo daño. Se ha detectado el primer daño en el siguiente incremento de carga, esto es, entre $6000N$ y $7000N$. Este primer daño se ha encontrado en la cara A de la probeta y se ha identificado como CP-0_4-90-50-DA1 (Figura 4.10 (a, b)).



(a) Daño CP-0_4-90-50-DA1 a $7000N$ (b) Daño CP-0_4-90-50-DA a $7000N$. Marcado en rojo

Figura 4.10 Daño CP-0_4-90-50-DA1 a $7000N$.

4.3.2 Probeta CP-0_4-90-100

Se ha procedido de forma similar a lo realizado para la probeta anterior. La probeta prístina presenta daños tanto transversales como longitudinales a lo largo de toda ella. Se tratan tanto de despegues aislados y continuos como de daños generalizados.

En la Figura 4.11 se muestra la distribución de los daños transversales y longitudinales correspondientes a esta probeta que han sido hallados antes de ser traccionada, para sus dos caras.

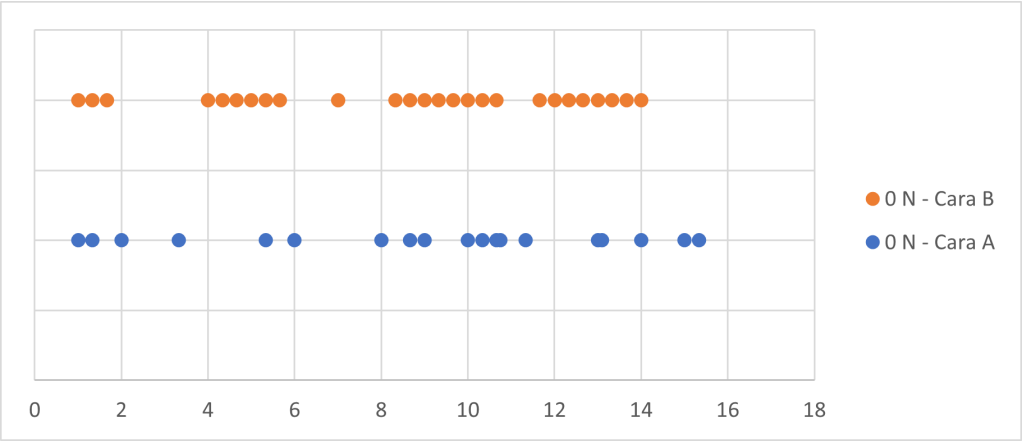
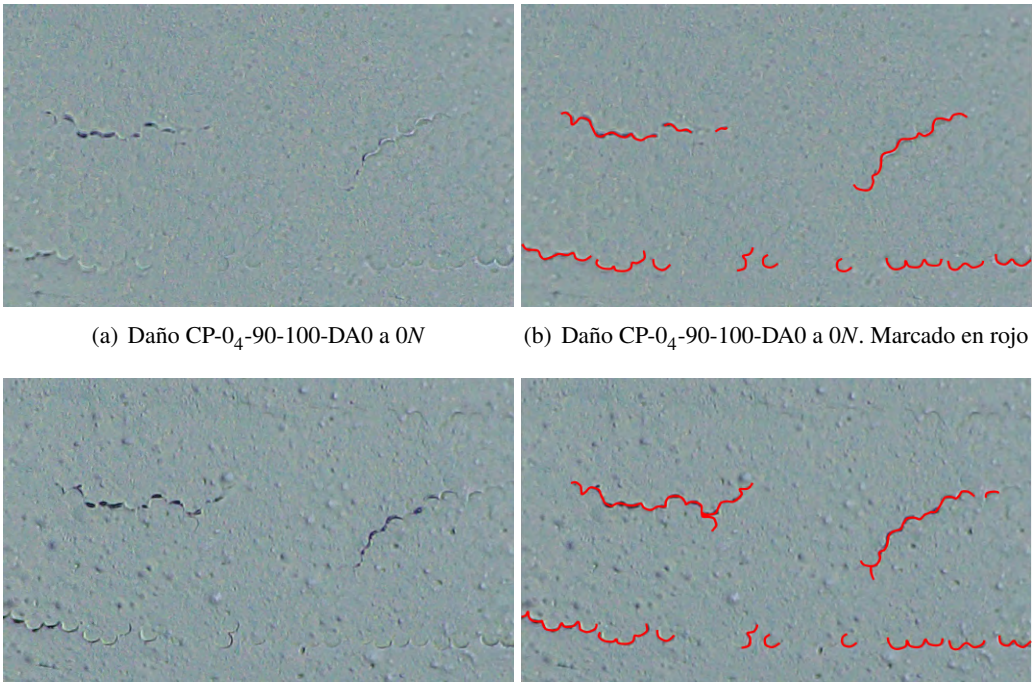


Figura 4.11 Distribución de los daños a lo largo de la probeta CP-0_4-90-100 a $0N$.

En estado prístino, se han detectado despegues aislados y otros continuos relativamente grandes. Se caracterizan por ser, en general, despegues conectados con un número significativo de ellos unidos a despegues longitudinales. Véase la Figura 4.12 (a, b), que ilustra el daño CP-0_4-90-100-DA0, en la que se muestra un daño longitudinal y uno transversal generalizado y despegues aislados y continuos.



(a) Daño CP-0_4-90-100-DA0 a $0N$

(b) Daño CP-0_4-90-100-DA0 a $0N$. Marcado en rojo

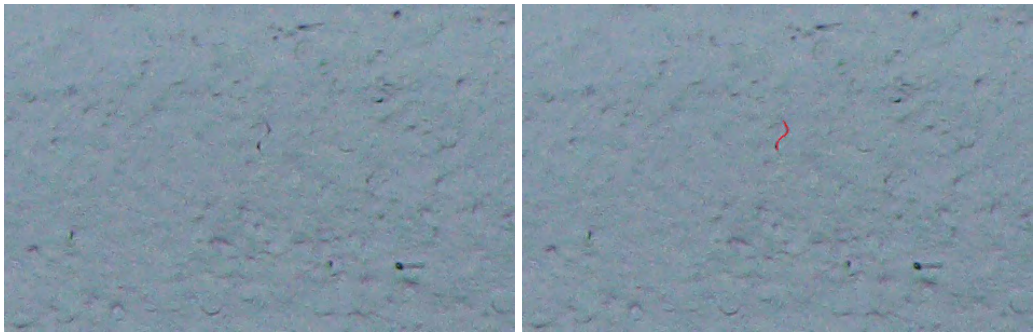
(c) Daño CP-0_4-90-100-DA0 a $5000N$

(d) Daño CP-0_4-90-50-DA0 a $5000N$. Marcado en rojo

Figura 4.12 Daño CP-0_4-90-100-DA0 a $0N$ y $5000N$.

Una vez se han identificado todos los daños existentes en la probeta. Se ha incrementado la carga

hasta 5000N. En las réplicas correspondientes a este nivel de carga no se han detectado nuevos daños, si bien se ha registrado el crecimiento de otros ya presentes, véase la Figura 4.12 (c, d) del daño CP-0_4-90-100-DA0 como ejemplo. El primer daño en esta probeta se ha registrado en la cara A, en el siguiente intervalo de carga, esto es, entre 5000N y 6000N. Se ha identificado como CP-0_4-90-100-DA1 (Figura 4.13). Se trata de despegues continuos en la dirección transversal a la de aplicación de la carga.



(a) Daño CP-0_4-90-100-DA1 a 6000N

(b) Daño CP-0_4-90-100-DA1 a 6000N. Marcado en rojo

Figura 4.13 Daño CP-0_4-90-100-DA1 a 6000N.

4.3.3 Probeta CP-0_{12}-90-50

De forma análoga a lo ya expuesto, se han analizado las réplicas correspondientes a la probeta prístina, de ellas se ha extraído que existen tanto daños longitudinales como transversales a lo largo de toda la probeta. Se han identificado todos ellos con sus correspondientes posiciones en sendas caras.

La distribución de los daños transversales y longitudinales correspondientes a esta probeta que se han detectado con carga nula, para sus dos caras, es la que se muestra en la Figura 4.14.

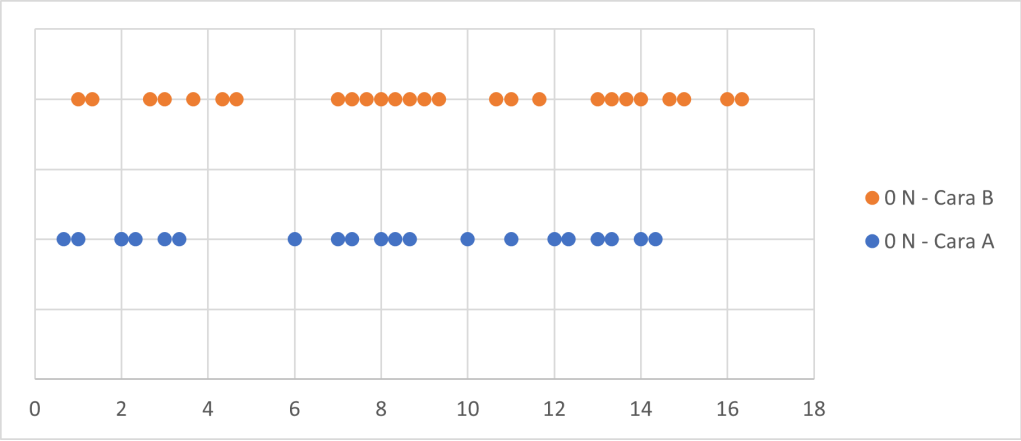
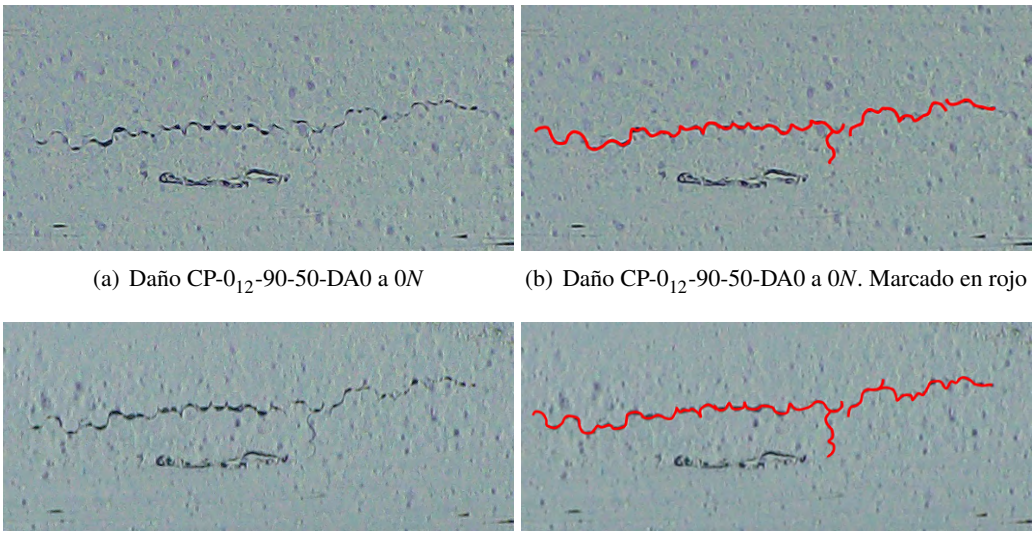


Figura 4.14 Distribución de los daños a lo largo de la probeta CP-0_{12}-90-50 a 0N.

En estado prístino, han sido hallados tanto daños longitudinales como transversales. Ninguno de los daños transversales recorre al completo el espesor de la capa de 90°, caracterizándose por ser relativamente pequeños, en general conectados y con una pequeña proporción unidos a despegues

longitudinales, véase el ejemplo de la la Figura 4.15 (a, b) que ilustra el daño CP-0_{12}-90-50-DA0, el cual se trata de un despegue transversal continuo unido a un daño longitudinal que se ha detectado en la cara *A* de la probeta. Los daños longitudinales encontrados en esta probeta varían desde pequeños daños continuos hasta daños generalizados en la dirección de la carga, como el caso de la Figura 4.15 (a, b).



(a) Daño CP-0_{12}-90-50-DA0 a 0*N*

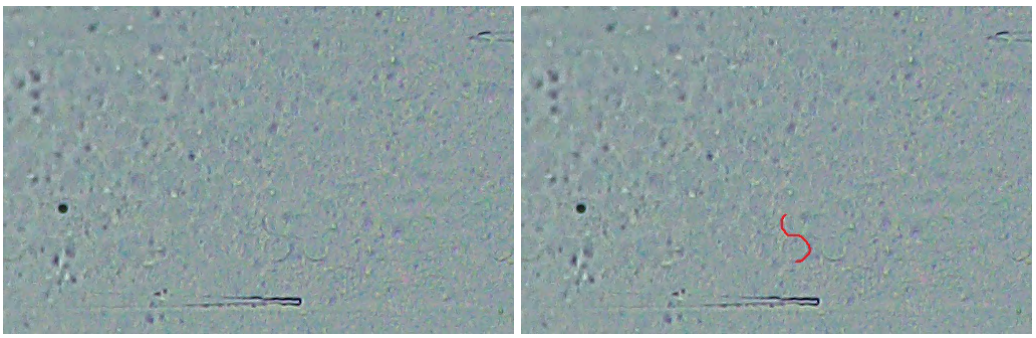
(b) Daño CP-0_{12}-90-50-DA0 a 0*N*. Marcado en rojo

(c) Daño CP-0_{12}-90-50-DA0 a 5000*N*

(d) Daño CP-0_{12}-90-50-DA0 a 5000*N*. Marcado en rojo

Figura 4.15 Daño CP-0_{12}-90-50-DA0 a 0*N* y 5000*N*.

Se ha incrementado la carga hasta 5000*N*, las réplicas respectivas a este nivel de carga muestran crecimientos de los daños presentes en la probeta en la dirección opuesta a la de aplicación de la carga (véase de nuevo la Figura 4.15 (c, d)), así como la aparición de un primer daño en la cara *B*, que se ha identificado como CP-0_{12}-90-50-DB1 (Figura 4.16). Por tanto, el primer daño transversal en la probeta se ha producido en el intervalo de carga entre 0*N* y 5000*N*. En concreto, se trata de un despegue continuo, en la dirección opuesta a la de la aplicación de la carga.



(a) Daño CP-0_{12}-90-50-DB1 a 5000*N*

(b) Daño CP-0_{12}-90-50-DB1 a 5000*N*. Marcado en rojo

Figura 4.16 Daño CP-0_{12}-90-50-DB1 a 5000*N*.

4.3.4 Probeta CP-0_{12}-90_2-50

Finalmente, se ha seguido la misma metodología para la presente probeta. Después del lijado y el pulido, la probeta presenta daños transversales y longitudinales a lo largo de la probeta pero que tampoco recorren todo su espesor. Todos ellos han sido debidamente registrados. La distribución de los daños transversales y longitudinales que han sido encontrados en esta probeta antes de ser cargada se representa en la Figura 4.17, del mismo modo que en los casos anteriores se han ilustrado sendas caras de la probeta.

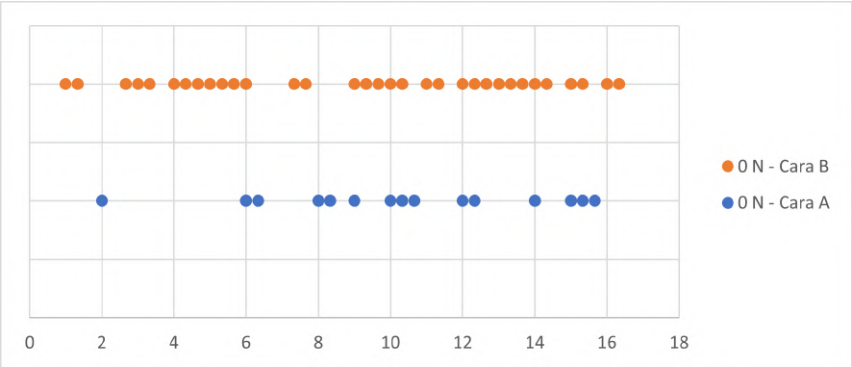
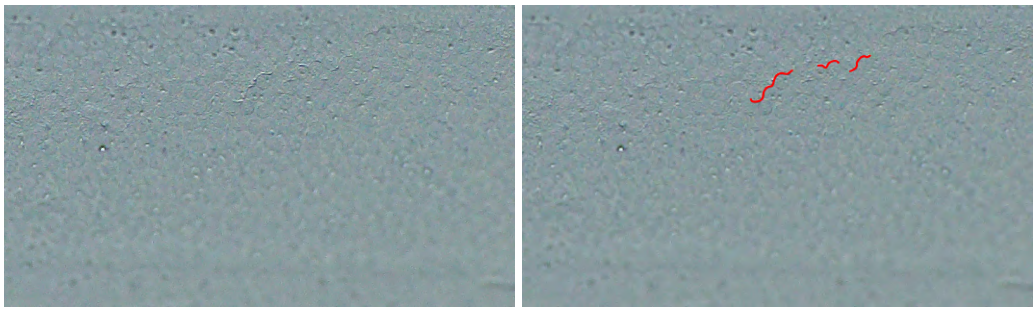


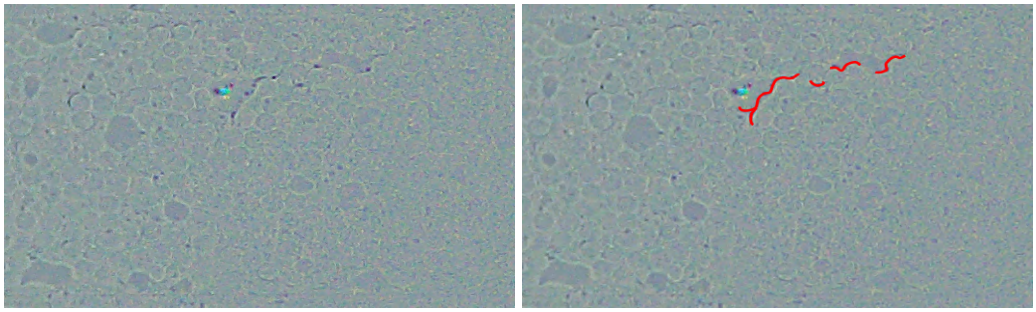
Figura 4.17 Distribución de los daños a lo largo de la probeta CP-0_{12}-90_2-50 a 0N.

En estado prístino, han podido hallarse daños en ambas caras, se tratan de caminos de despegues relativamente grandes, en general continuos y con un número significativo de ellos conectados a despegues longitudinales, véase el ejemplo de la Figura 4.18 (a, b) que ilustra el daño CP-0_{12}-90_2-50-DB0. Se trata de un daño longitudinal continuo.



(a) Daño CP-0_{12}-90_2-50-DB0 a 0N

(b) Daño CP-0_{12}-90_2-50-DB0 a 0N. Marcado en rojo

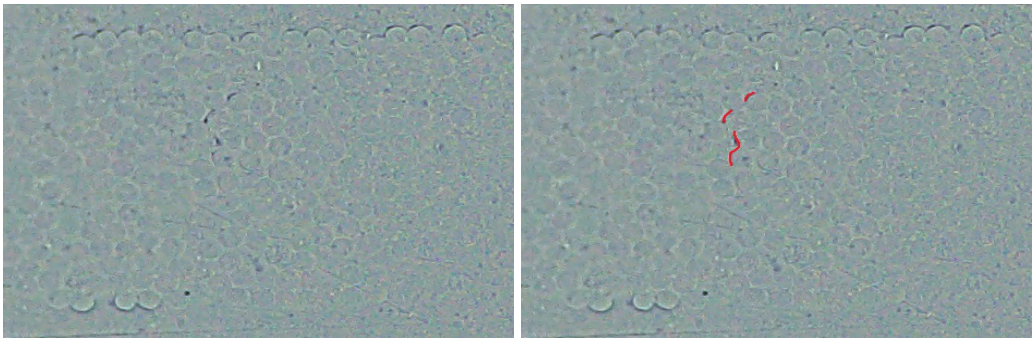


(c) Daño CP-0_{12}-90_2-50-DB0 a 5000N

(d) Daño CP-0_{12}-90_2-50-DB0 a 5000N. Marcado en rojo

Figura 4.18 Daño CP-0_{12}-90_2-50-DB0 a 0N y 5000N.

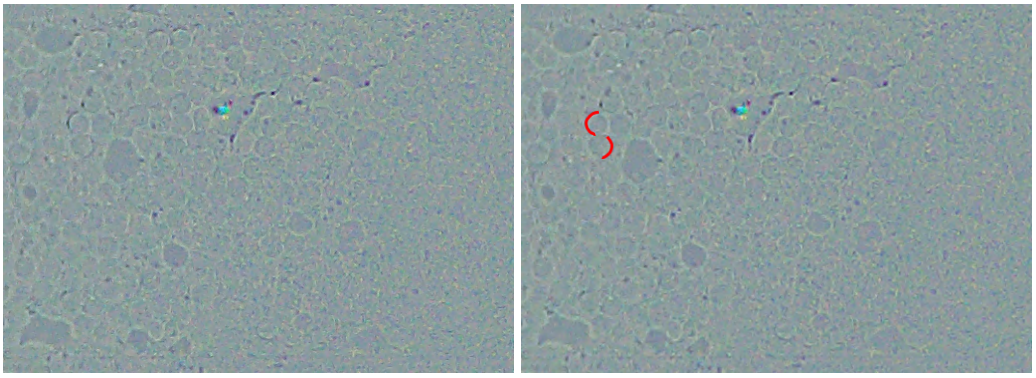
Posteriormente, la probeta se ha sometido a una carga de 5000N y se le han realizado las correspondientes réplicas de ambas caras. Se han registrado ligeros crecimientos de los daños previamente identificados en la probeta, tómese como ejemplo el daño CP-0_{12}-90_2-50-DB0 (Figura 4.18 (c, d). Estas réplicas reflejan, además, que se ha producido un primer daño aislado en la cara B, se ha identificado como CP-0_{12}-90_2-50-DB1 y es el que se ilustra en la Figura 4.19. Se ha detectado, además, otro primer daño cercano al daño longitudinal que se había registrado previamente (Figura 4.18), este daño se ha identificado como CP-0_{12}-90_2-50-DB2 (Figura 4.20). Ambos daños han aparecido en esta probeta en el intervalo de carga de 0N a 5000N y se tratan de un despegues continuos y aislados.



(a) Daño CP-0_{12}-90_2-50-DB1 a 5000N

(b) Daño CP-0_{12}-90_2-50-DB1 a 5000N. Marcado en rojo

Figura 4.19 Daño CP-0_{12}-90_2-50-DB1 a 5000N.



(a) Daño CP-0_{12}-90_2-50-DB2 a 5000N

(b) Daño CP-0_{12}-90_2-50-DB2 a 5000N. Marcado en rojo

Figura 4.20 Daño CP-0_{12}-90_2-50-DB2 a 5000N.

5 Análisis de resultados y discusión

Resulta conveniente recopilar y analizar los datos obtenidos de forma que puedan extraerse las conclusiones oportunas. Una vez se han ensayado y analizado todas las probetas, los resultados hallados han sido sometidos a reflexión de forma que se ha podido dilucidar las distinciones que los definen. Para ello se ha realizado un análisis concreto de cada probeta por separado, para luego tratar los datos en su conjunto comparándolos entre sí.

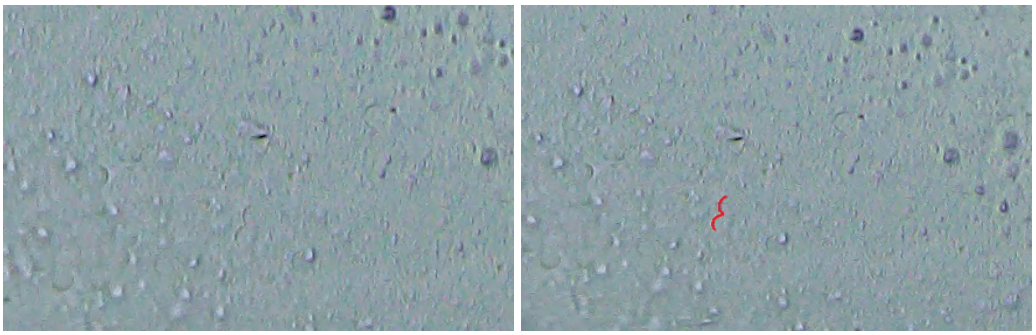
5.1 Análisis de los resultados

Como se ha mencionado, se han analizado los resultados obtenidos para cada probeta, se han proporcionado gráficas que los ilustren así como datos relativos a sus ensayos.

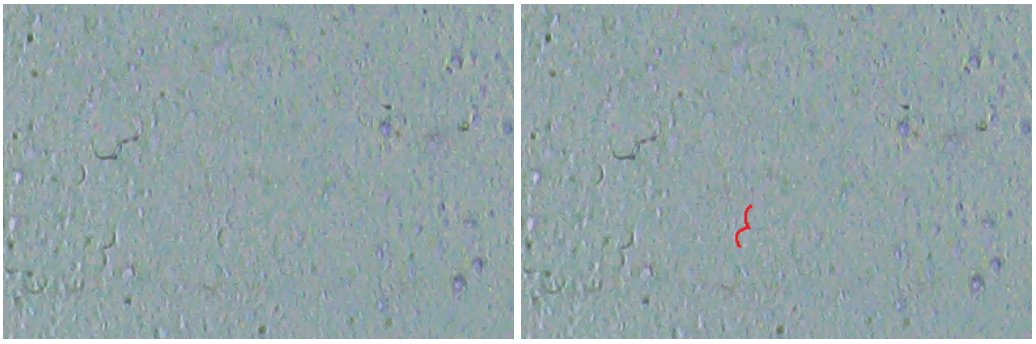
5.1.1 Probeta CP-0_4-90-50

En el intervalo de carga entre $0N$ y $6000N$, algunos de los daños que estaban presentes en la probeta han crecido en la dirección perpendicular a la de aplicación de la carga como ha quedado evidenciado con el ejemplo de CP-0_4-90-50-DA0. Según lo expuesto en 4.3.1, el primer daño en esta probeta se ha producido en el intervalo de carga que comprende desde $6000N$ hasta $7000N$. Para dicho nivel de carga, la probeta ha experimentado una tensión de $208.56MPa$ y una deformación de $2286\mu\varepsilon$. La evolución que ha sufrido este primer daño CP-0_4-90-50-DA con cada incremento de carga hasta $9000N$ es la que se muestra en la Figura 5.1. Puede observarse que el daño no ha crecido con los incrementos de carga a los que ha sido sometido.

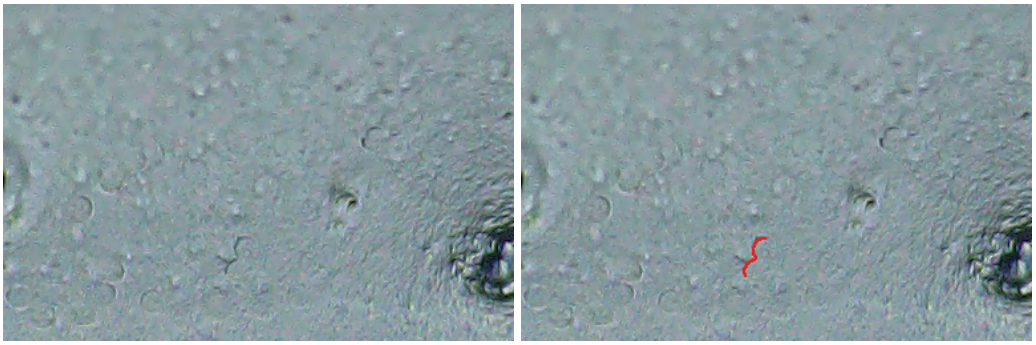
Por otro lado, con el objetivo de detectar si el primer daño encontrado ha recorrido todo el ancho de la probeta, se ha observado al microscopio la probeta directamente. De este modo, se ha registrado la imagen del daño CP-0_4-90-50-DA (Figura 5.2) y se ha trazado la vertical a lo ancho de la probeta hasta la cara *B*. Se ha observado la zona marcada al microscopio, con un margen a izquierda y derecha del orden del ancho de la capa de 90°, esto es $120\mu m$. Al realizar este proceso no se ha hallado el daño en la cara *B*, es decir, el daño parece que no ha recorrido el ancho de la probeta estando cargada a $9000N$.



(a) Daño CP-0_4-90-50-DA a 7000N (b) Daño CP-0_4-90-50-DA a 7000N. Marcado en rojo

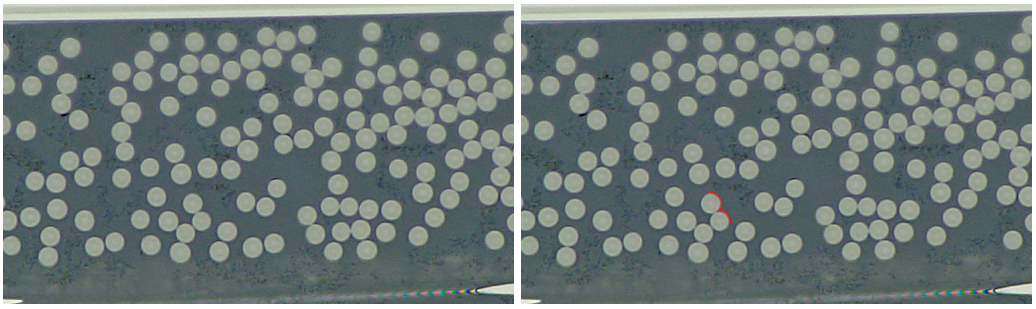


(c) Daño CP-0_4-90-50-DA a 8000N (d) Daño CP-0_4-90-50-DA a 8000N. Marcado en rojo



(e) Daño CP-0_4-90-50-DA a 9000N (f) Daño CP-0_4-90-50-DA a 9000N. Marcado en rojo

Figura 5.1 Evolución del daño CP-0_4-90-50-DA de 7000N a 9000N.



(a) Daño CP-0_4-90-50-DA a 9000N (b) Daño CP-0_4-90-50-DA a 9000N. Marcado en rojo

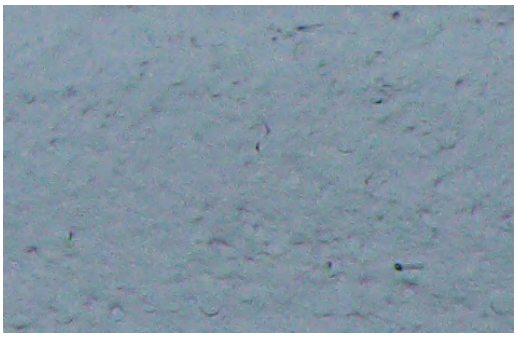
Figura 5.2 Daño CP-0_4-90-50-DA a 9000N. Observado directamente en el microscopio.

5.1.2 Probeta CP-0_4-90-100

El primer daño de la probeta, el daño CP-0_4-90-100-DA1, se ha producido en el intervalo de carga entre 5000N y 6000N. En concreto, la probeta ha sido sometida a una fuerza de 6046.88N y una tensión de 172.13MPa y ha sufrido una deformación de 1963.56$\mu\varepsilon$.

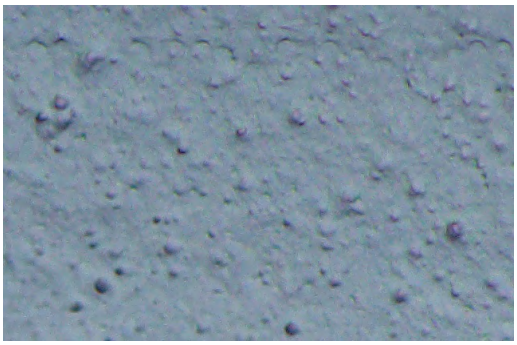
La evolución de este daño con cada incremento de carga hasta 9000N es la que se muestra en la Figura 5.3. Puede observarse que el daño ha aparecido como un pequeño despegue continuo y, si bien ha crecido al incrementar la carga, no ha aumentado tanto como para convertirse en un daño transversal generalizado. Obsérvese en la Figura 5.3 que la réplica que se ha efectuado sobre la probeta a 7000N no permite visualizar correctamente el daño, no obstante variando el enfoque del microscopio se ha podido verificar su presencia.

Con el fin de averiguar si el daño CP-0_4-90-100-DA1 ha recorrido todo el ancho de la probeta, se ha realizado un proceso similar al descrito en 5.1.1. Se ha registrado el daño en la cara A de la probeta directamente en el microscopio (Figura 5.4) y se ha analizado del mismo modo la cara opuesta. Tras observar la zona marcada en el microscopio, no se ha encontrado el daño en la cara B, es decir, el daño parece que no ha recorrido el ancho de la probeta estando cargada a 9000N.



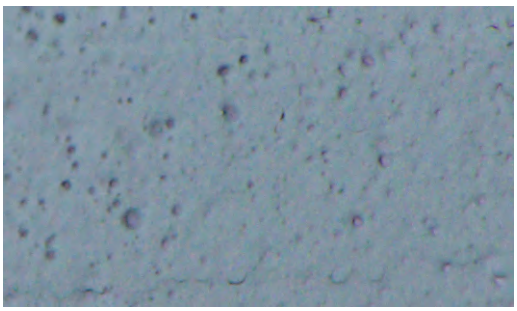
(a) Daño CP-0_4-90-100-DA1 a 6000N

(b) Daño CP-0_4-90-100-DA1 a 6000N. Marcado en rojo

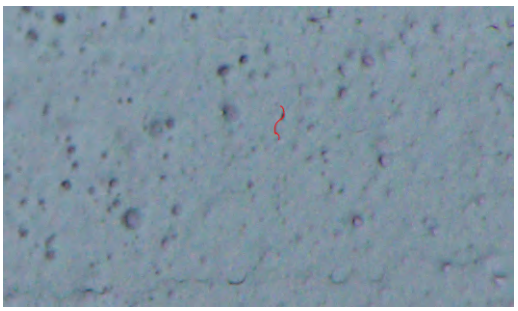


(c) Daño CP-0_4-90-100-DA1 a 7000N

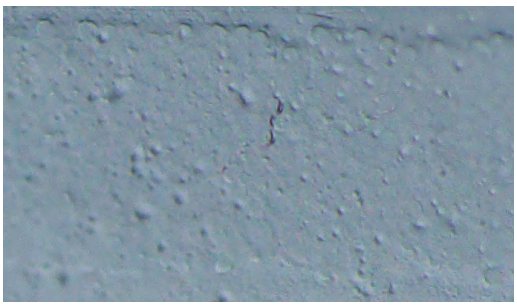
(d) Daño CP-0_4-90-100-DA1 a 7000N. Marcado en rojo



(e) Daño CP-0_4-90-100-DA1 a 8000N



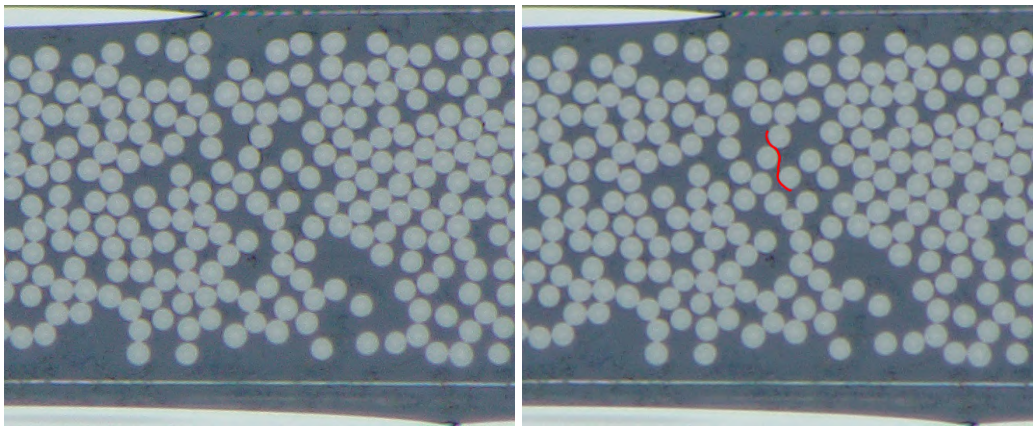
(f) Daño CP-0_4-90-100-DA1 a 8000N. Marcado en rojo



(g) Daño CP-0_4-90-100-DA1 a 9000N

(h) Daño CP-0_4-90-100-DA1 a 9000N. Marcado en rojo

Figura 5.3 Evolución del daño CP-0_4-90-100-DA1 de 6000N a 9000N.



(a) Daño CP-0_4-90-100-DA1 a 9000N

(b) Daño CP-0_4-90-100-DA1 a 9000N. Marcado en rojo

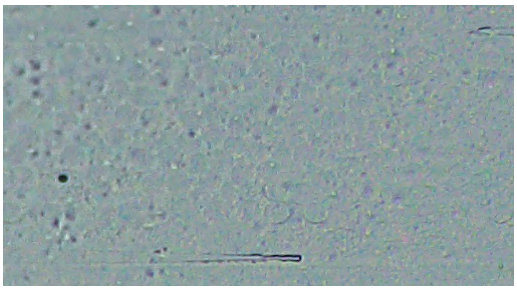
Figura 5.4 Daño CP-0_4-90-100-DA1 a 9000N. Observado directamente en el microscopio.

5.1.3 Probeta CP-0_{12}-90-50

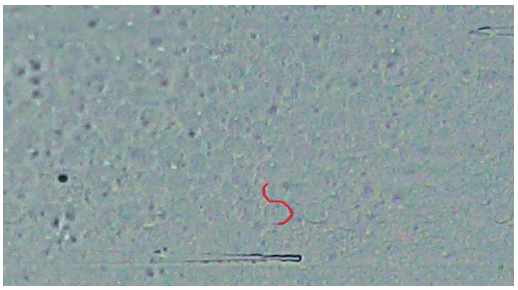
Teniendo en cuenta lo referido en 4.3.3 el primer daño en la probeta, el daño CP-0_{12}-90-50-DB1, se ha hallado en el intervalo de carga entre $0N$ y $5000N$. En concreto, se ha sometido a una fuerza de $5006.04N$, y ha experimentado una tensión de $148.78MPa$ y una deformación de $1550.88\mu\varepsilon$.

Por otro lado, la morfología del primer daño, CP-0_{12}-90-50-DB1 (Figura 4.16), encontrado a $5000N$ se caracteriza por ser un despegue continuo, relativamente cercano al extremo del espesor de la capa de 90°. La evolución del daño CP-0_{12}-90-50-DB en cada incremento de carga desde $5000N$ hasta $9000N$ se muestra en la Figura 5.5. El daño ha crecido desde un despegue continuo hasta convertirse en un daño transversal generalizado.

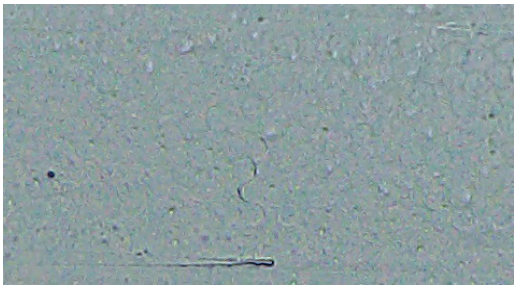
Para hallar si el primer daño ha recorrido todo el ancho de la probeta, se ha realizado el mismo proceso que en las secciones anteriores. Se ha registrado el daño CP-0_{12}-90-50-DB1 directamente en la probeta 5.6 en la cara donde se ha detectado, a continuación se ha analizado la zona en la cara A y no se ha encontrado el daño. Por tanto, el daño parece que no ha recorrido el ancho de la probeta.



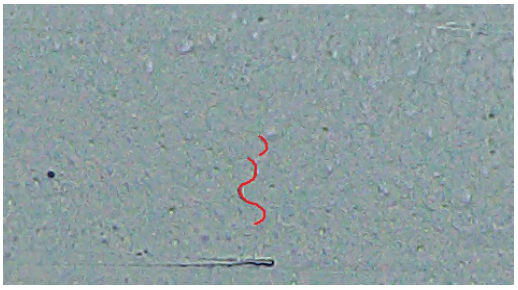
(a) Daño CP-0_{12}-90-50-DB1 a 5000N



(b) Daño CP-0_{12}-90-50-DB1 a 5000N. Marcado en rojo

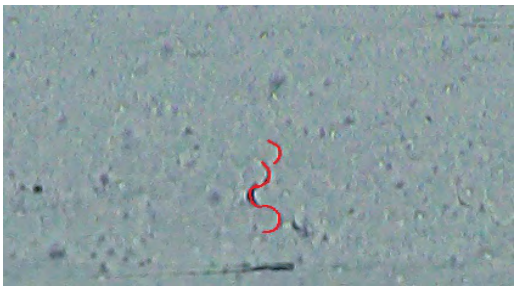


(c) Daño CP-0_{12}-90-50-DB1 a 6000N

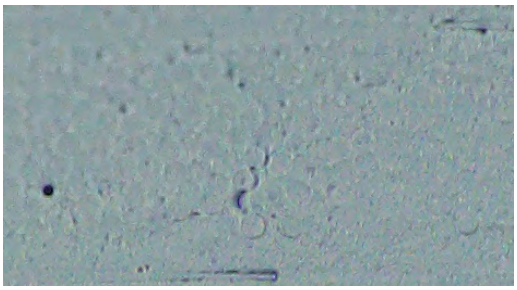


(d) Daño CP-0_{12}-90-50-DB1 a 6000N. Marcado en rojo

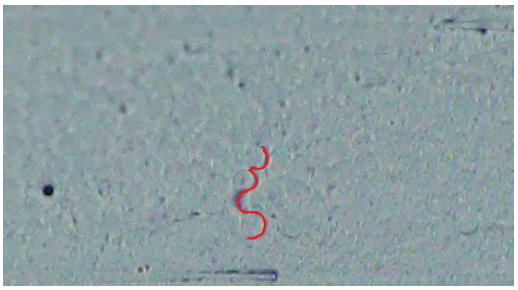
(e) Daño CP-0_{12}-90-50-DB1 a 7000N



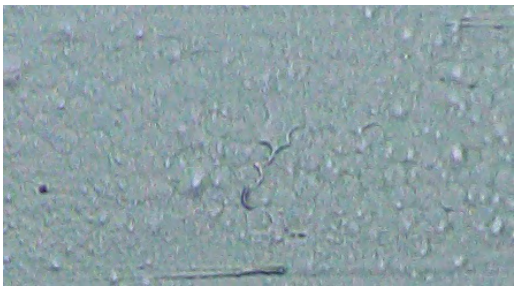
(f) Daño CP-0_{12}-90-50-DB1 a 7000N. Marcado en rojo



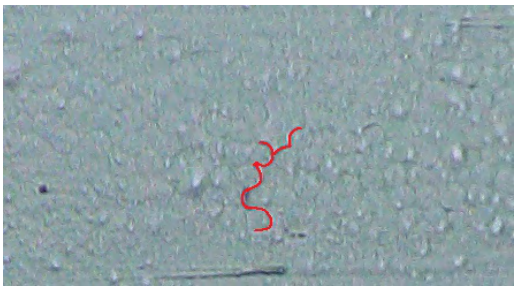
(g) Daño CP-0_{12}-90-50-DB1 a 8000N



(h) Daño CP-0_{12}-90-50-DB1 a 8000N. Marcado en rojo

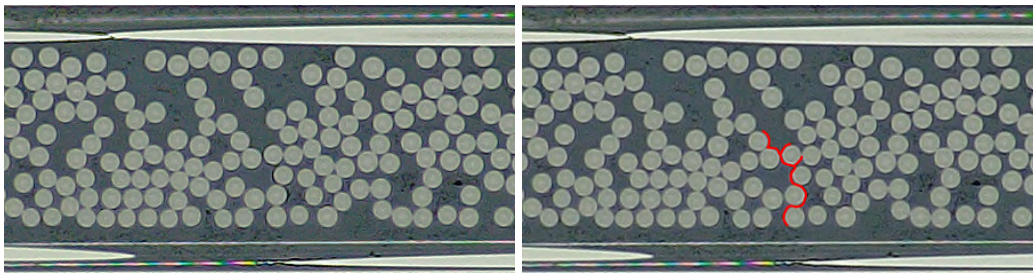


(i) Daño CP-0_{12}-90-50-DB1 a 9000N



(j) Daño CP-0_{12}-90-50-DB1 a 9000N. Marcado en rojo

Figura 5.5 Evolución del daño CP-0_{12}-90-50-DB1 de 5000N a 9000N.



(a) Daño CP-0_{12}-90-50-DB1 a 9000N

(b) Daño CP-0_{12}-90-50-DB1 a 9000N. Marcado en rojo

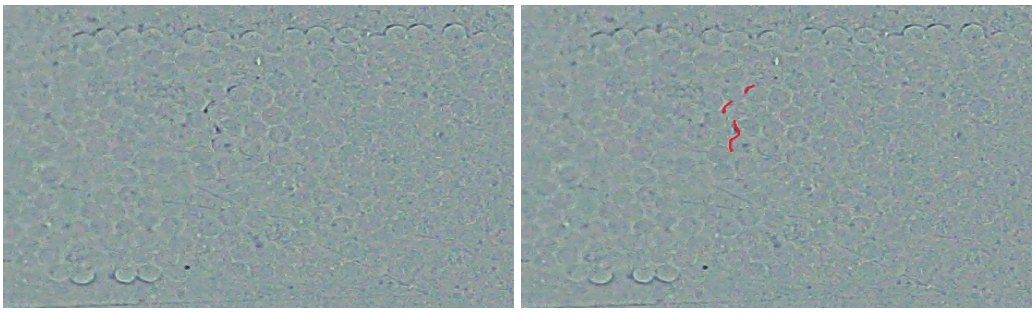
Figura 5.6 Daño CP-0_{12}-90-50-DB1 a 9000N. Observado directamente en el microscopio.

5.1.4 Probeta CP-0_{12}-90_2-50

Por último, atendiendo a 4.3.4, el primer daño transversal en esta probeta se ha producido en el intervalo de carga entre 0N y 5000N. Concretamente, se ha cargado la probeta hasta el valor de 5019.67N, produciéndose una tensión de 143.67MPa y una deformación en ella de 1553.89$\mu\varepsilon$.

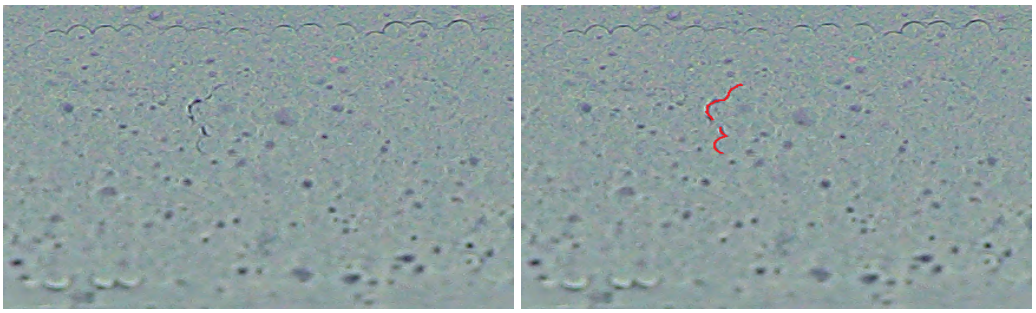
Por otro lado, primer daño aislado que se ha detectado en la probeta a 5000N, el daño CP-0_{12}-90_2-50-DB1, se trata de dos despegues continuos junto con dos despegues aislados. La evolución de este daño a lo largo de los incrementos de carga a los que ha sido sometida la probeta desde 5000N hasta 9000N es la que se muestra en la Figura 5.7. Puede observarse como los despegues aislados se han unido a los continuos de forma que han formado dos caminos de despegues continuos. El daño CP-0_{12}-90_2-50-DB2 se trata, sin embargo, de un despegue aislado, detectado próximo a un daño longitudinal, y cuya evolución es la que se muestra en la Figura 5.8. El daño ha evolucionado de un despegue aislado a 5000N a uno continuo a 9000N. Únicamente se han incluido las imágenes a 5000N y 9000N, debido a que no se ha conseguido una calidad adecuada de las réplicas para los demás incrementos de carga.

Finalmente, se han registrado ambos daños CP-0_{12}-90_2-50-DB1 y CP-0_{12}-90_2-50-DB2 directamente en la probeta (Figuras 5.9 y 5.10). Se han analizado las zonas correspondientes en la cara A y no se han encontrado ninguno de los daños. Se ha concluido, por tanto, que los daños parece que no han recorrido el ancho de la probeta.



(a) Daño CP-0_{12}-90_2-50-DB1 a 5000N

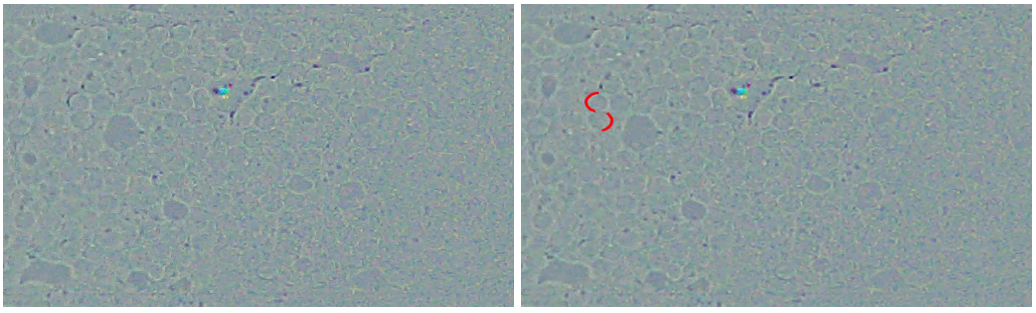
(b) Daño CP-0_{12}-90_2-50-DB1 a 5000N. Marcado en rojo



(c) Daño CP-0_{12}-90_2-50-DB1 a 9000N

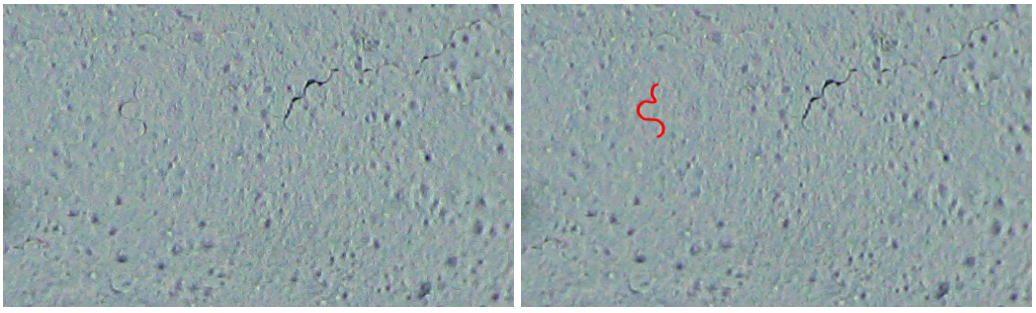
(d) Daño CP-0_{12}-90_2-50-DB1 a 9000N. Marcado en rojo

Figura 5.7 Evolución del daño CP-0_{12}-90_2-50-DB1 de 5000N a 9000N.



(a) Daño CP-0_{12}-90_2-50-DB2 a 5000N

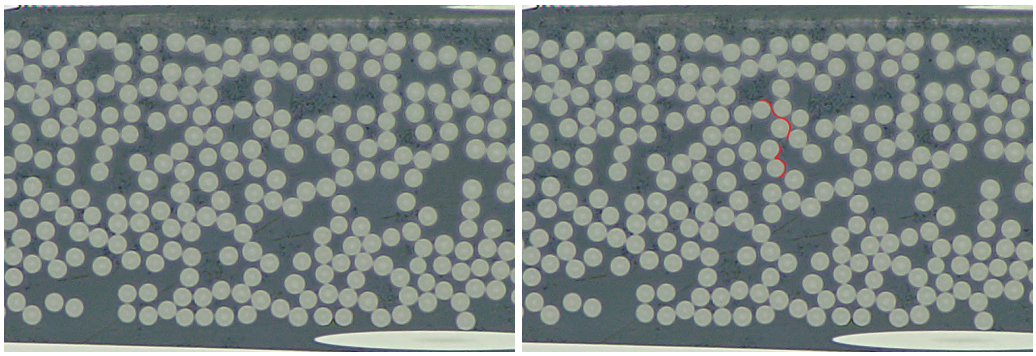
(b) Daño CP-0_{12}-90_2-50-DB2 a 5000N. Marcado en rojo



(c) Daño CP-0_{12}-90_2-50-DB2 a 9000N

(d) Daño CP-0_{12}-90_2-50-DB2 a 9000N. Marcado en rojo

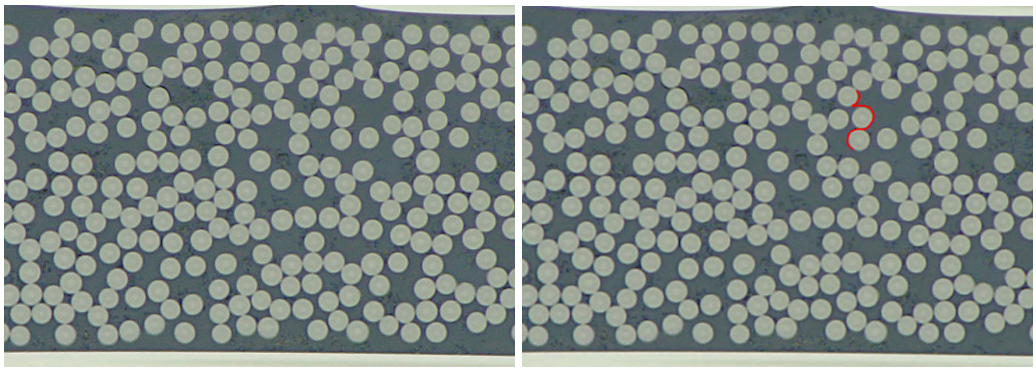
Figura 5.8 Evolución del daño CP-0_{12}-90_2-50-DB2 de 5000N a 9000N.



(a) Daño CP-0_{12}-90_2-50-DB1 a 9000N

(b) Daño CP-0_{12}-90_2-50-DB1 a 9000N. Marcado en rojo

Figura 5.9 Daño CP-0_{12}-90_2-50-DB1 a 9000N. Observado directamente en el microscopio.



(a) Daño CP-0_{12}-90_2-50-DB2 a 9000N

(b) Daño CP-0_{12}-90_2-50-DB2 a 9000N. Marcado en rojo

Figura 5.10 Daño CP-0_{12}-90_2-50-DB2 a 9000N. Observado directamente en el microscopio.

5.2 Discusión de los resultados

Una vez se han analizado los resultados obtenidos para cada probeta, se han tratado en su conjunto de forma que puedan extraerse las conclusiones oportunas. Para ello, se ha tomado en consideración las distintas configuraciones de material que se han ensayado (Tabla 1.1), así como la carga alcanzada, la deformación sufrida y la morfología de los daños en cada probeta.

En primer lugar, todas las probetas analizadas han presentado daños transversales previas a ser cargadas si bien la morfología de éstos ha resultado ser relativamente diferentes entre sí. En aquellas probetas cuyo espesor de la capa de 90° es menor, CP-0_4-90-50 y CP-0_{12}-90-50, se ha detectado, generalizando, una configuración típica de los daños transversales que se corresponde con despegues, bien aislados o bien conectados pero relativamente pequeños. Por otro lado, en las probetas con mayor espesor de la capa de 90°, CP-0_4-100-E y CP-0_{12}-90_2-50, la morfología típica de los daños se caracteriza por ser más grande y conectados en una proporción importante con despegues longitudinales.

Respecto a los primeros daños hallados en las probetas, pueden establecerse relaciones y comparativas que reflejan cuándo y cómo aparecen o su morfología y evolución, entre otros.

Para un mismo espesor de la capa de 90°, el primer daño se ha detectado antes en aquellas probetas fabricadas con todas las láminas de 50*gsm* (Figuras 5.11 y 5.12). Esto es, el primer daño ha aparecido a una carga y tensión menores en las probetas CP-0_{12}-90-50 y CP-0_{12}-90_2-50 que en CP-0_4-90-50 y CP-0_4-90-100, respectivamente.

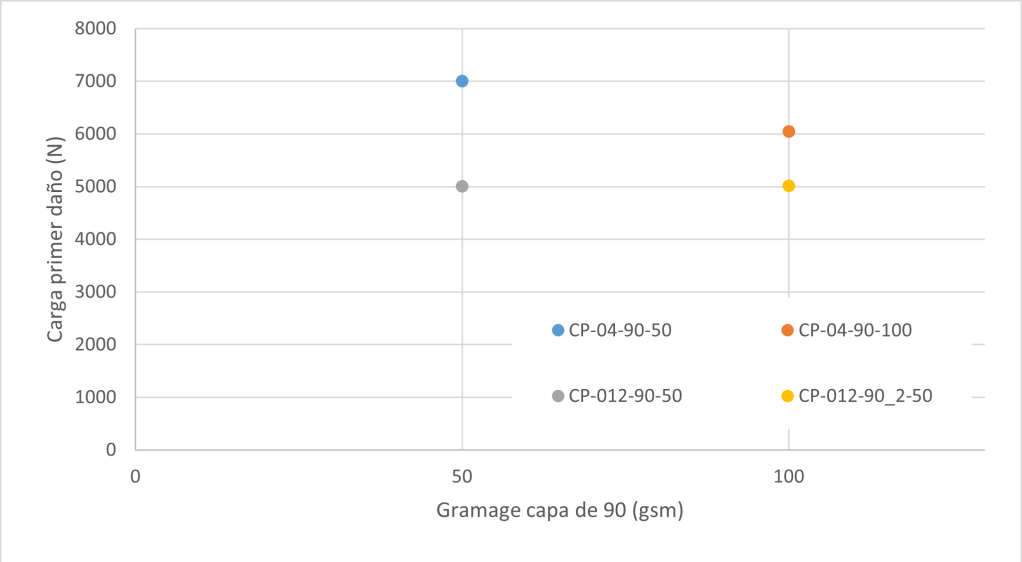


Figura 5.11 Carga a la que aparece el primer daño en cada probeta según el espesor de la capa de 90°.

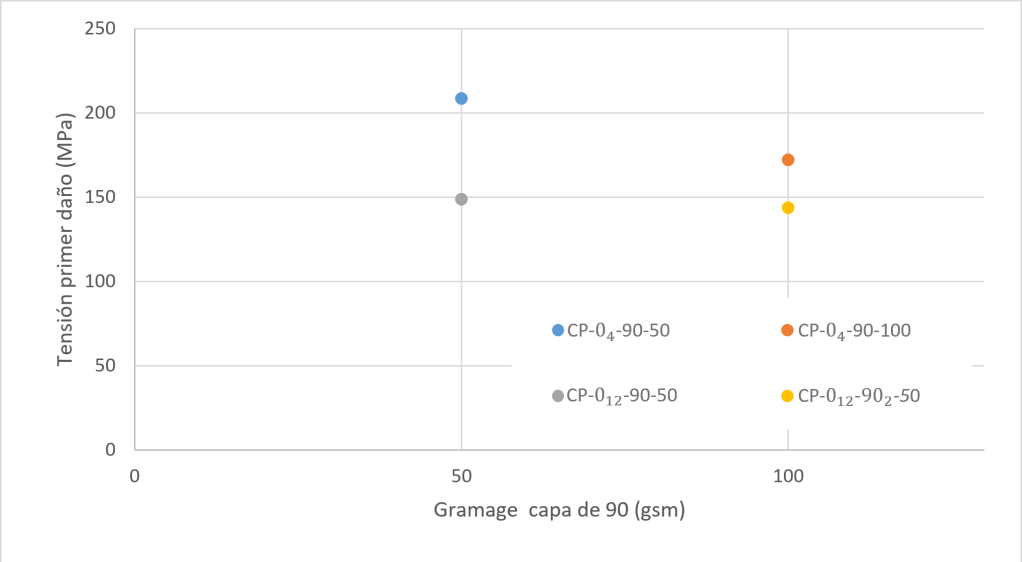


Figura 5.12 Tensión a la que aparece el primer daño en cada probeta según el gramage de la capa de 90°.

Del mismo modo, se pueden establecer relaciones similares sobre la deformación que han sufrido las probetas en el momento de la aparición del primer daño (Figura 5.13). Para un mismo espesor de la capa de 90°, las probetas fabricadas con todas láminas de 50*gsm* han sufrido una menor deformación que sus homólogas fabricadas con láminas de mayor gramage para 0° y ultradelgadas

para 90°.

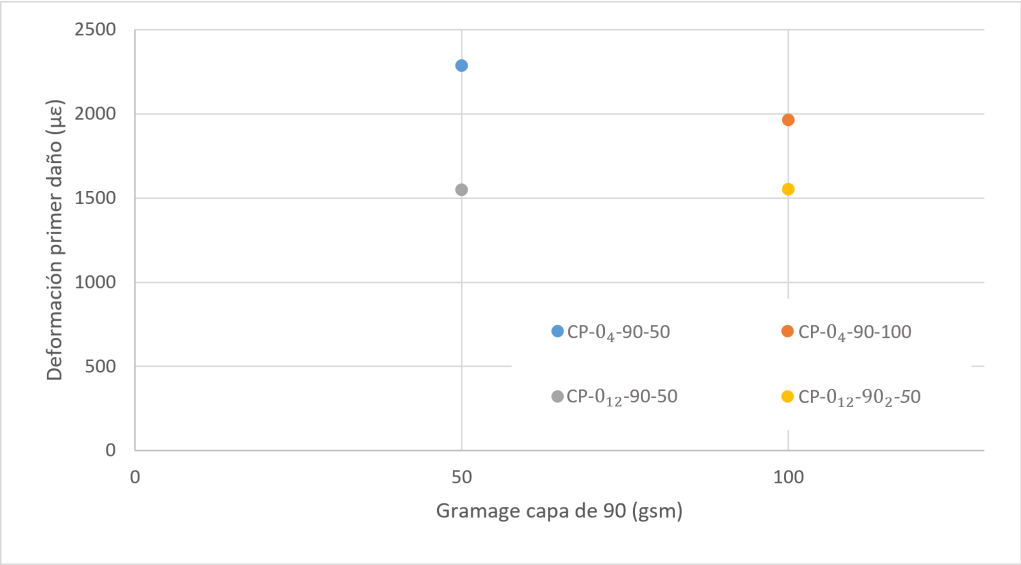


Figura 5.13 Deformación a la que aparece el primer daño en cada probeta según el gramage de la capa de 90°.

Por otro lado, para un mismo gramage de las láminas con las que han sido fabricadas (Figuras 5.14 y 5.15). En las probetas fabricadas con todas las láminas ultradelgadas de 50*gsm*, el primer daño se ha detectado indistintamente para los dos gramages de la capa de 90° en el primer incremento de carga, mientras que en las probetas fabricadas con láminas de 150*gsm* el primer daño se ha hallado antes en la de mayor espesor. Esto es, se ha sometido a CP-0_4-90-50 a una carga mayor que a CP-0_4-90-100 para hallar el primer daño.

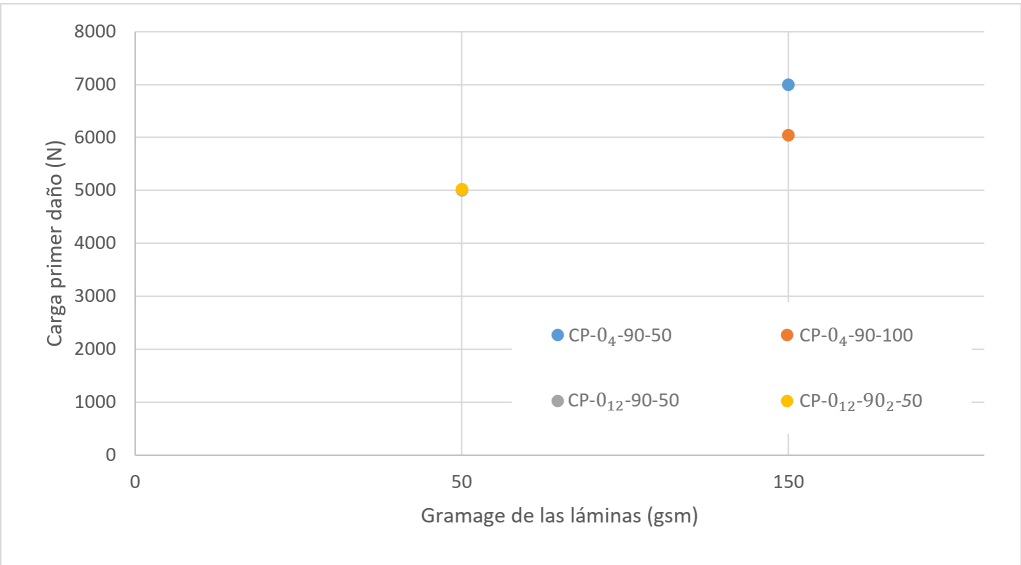


Figura 5.14 Carga a la que aparece el primer daño en cada probeta según el gramage de sus láminas.

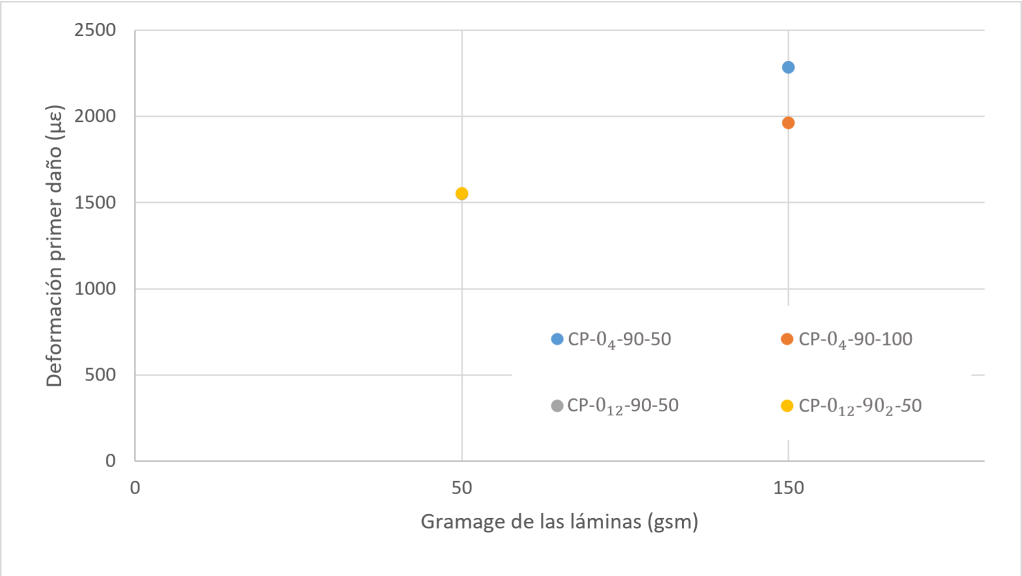
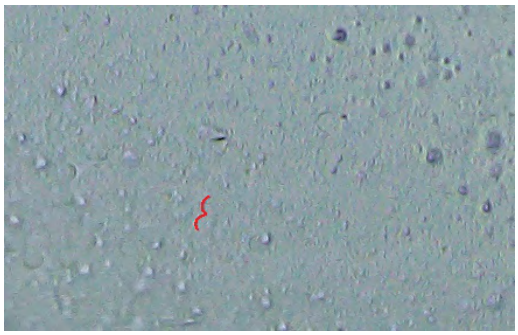


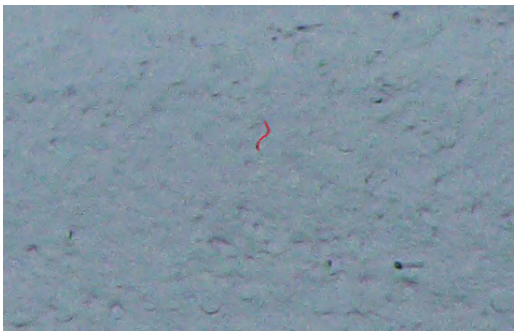
Figura 5.15 Deformación a la que aparece el primer daño en cada probeta según el gramage de sus láminas.

Puede establecerse, también, una comparativa entre las distintas morfologías de los primeros daños que se han hallado en cada probeta, así como de su evolución con los incrementos de carga a los que han sido sometidos. En la Figura 5.16 puede observarse que los primeros daños que han sido posible detectar en las cuatro probetas son todos despegues aislados o continuos, relativamente pequeños. Del mismo modo, la Figura 5.17 ilustra los daños sometidos a 9000N y, aunque todos han aumentado su tamaño, los daños de las probetas fabricadas con todas las láminas de 50gsm lo han hecho en mayor medida.

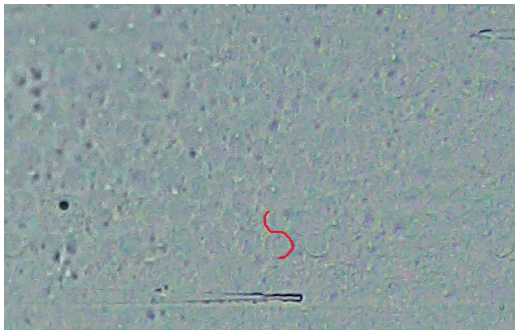
Por último, atendiendo a lo expuesto en la sección 5.1, ninguno de los primeros daños que se han detectado y analizado en cada una de las probetas, parece que han recorrido todo su ancho al ser cargadas hasta 9000N.



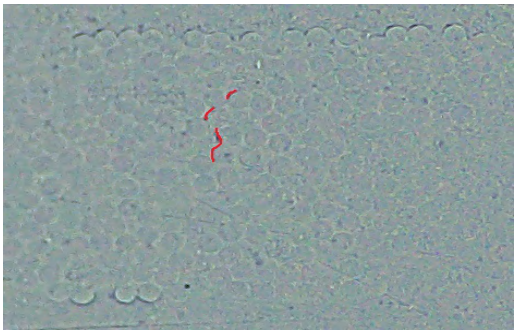
(a) Primer daño CP-0_4-90-50-DA1.



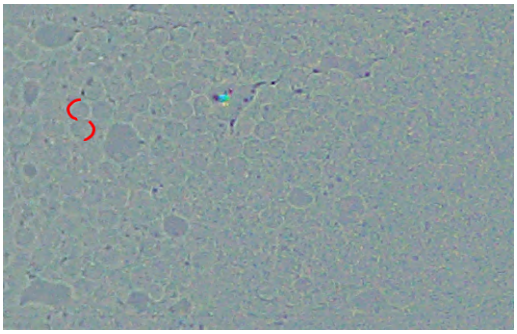
(b) Primer daño CP-0_4-90-100-DA1.



(c) Primer daño CP-0_{12}-90-50-DB1.

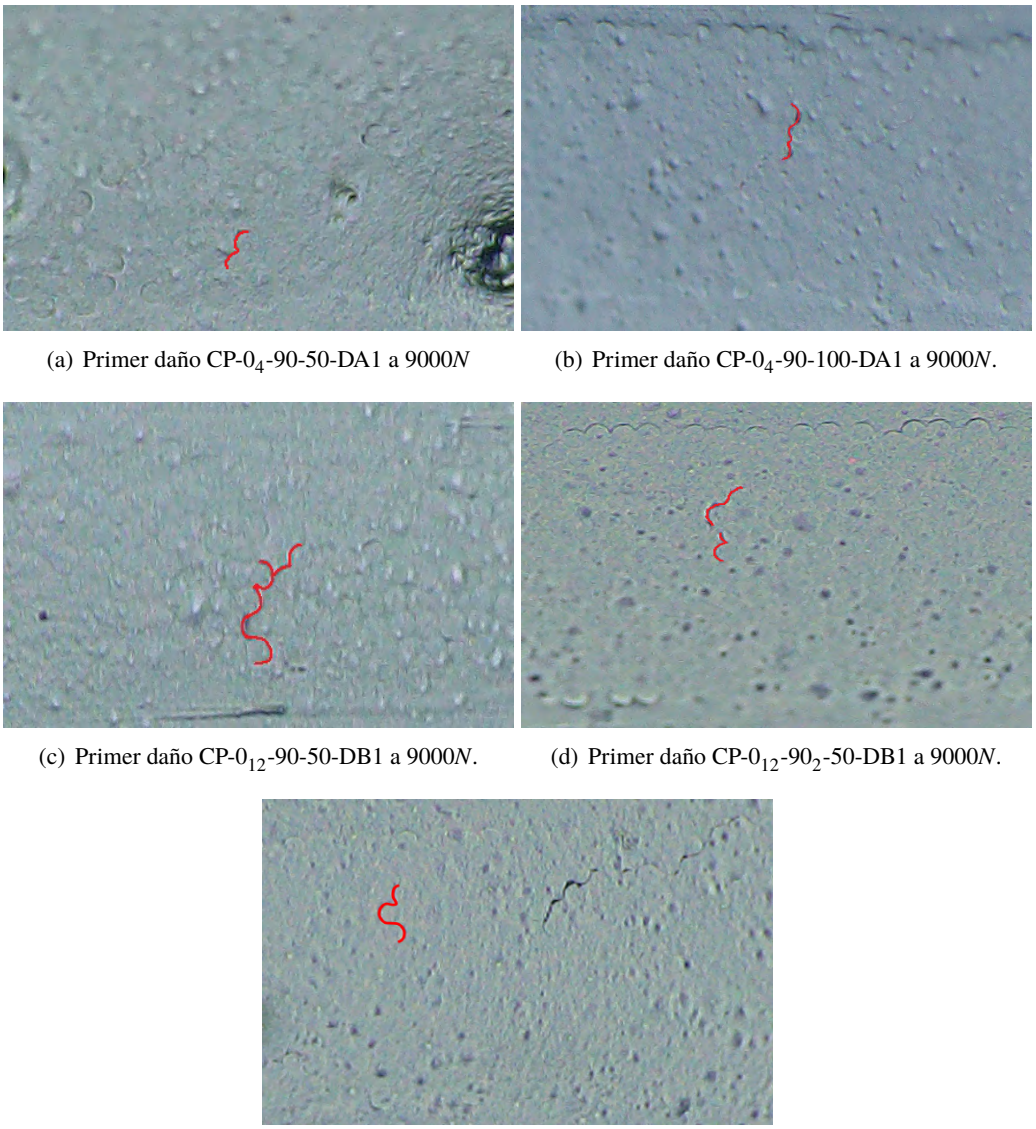


(d) Primer daño CP-0_{12}-90_2-50-DB1.



(e) Primer daño CP-0_{12}-90_2-50-DB2.

Figura 5.16 Primer daño de cada probeta. Marcado en rojo.



(a) Primer daño CP-0_4-90-50-DA1 a 9000N

(b) Primer daño CP-0_4-90-100-DA1 a 9000N.

(c) Primer daño CP-0_{12}-90-50-DB1 a 9000N.

(d) Primer daño CP-0_{12}-90_2-50-DB1 a 9000N.

(e) Primer daño CP-0_{12}-90_2-50-DB2 a 9000N.

Figura 5.17 Primer daño de cada probeta a 9000N. Marcado en rojo.

6 Conclusiones

Con el fin de alcanzar el objetivo del presente trabajo, se han fabricado los laminados y probetas que han sido ensayadas. Se ha caracterizado el material y se ha sometido una probeta de cada laminado al ensayo de tracción con incrementos graduales de carga. Empleando un sistema de réplicas se han registrado los daños que pudieran tener con carga nula así como el primer daño detectado en cada una de ellas. Se han analizado estos daños y su evolución con cada incremento de carga. Después de analizar todos los resultados en su conjunto, se han llegado a las conclusiones que se listan a continuación:

- Se ha demostrado que la fabricación de un mismo laminado empleando distintos gramages en sus láminas sí influye en la aparición del primer daño.
- Todos los laminados presentan daños longitudinales y transversales antes de ser sometidos a tracción.
- La mayoría de los daños encontrados en los laminados antes de ser ensayados, son principalmente daños longitudinales que pueden estar originados debido a la presencia de tensiones de curado unido a la influencia del efecto borde.
- Considerando que se ha evaluado la aparición del primer daño únicamente con una probeta de cada laminado, observándose los dos bordes libres de cada probeta, puede concluirse de forma preliminar:
  - El primer daño aparece a una carga y deformación menores en los laminados fabricados con todas las láminas ultradelgadas de $50 gsm$ en comparación a los laminados que han sido fabricados con láminas de $150 gsm$.
  - El primer daño en los laminados fabricados con todas las láminas ultradelgadas de $50 gsm$ crece en mayor medida que en los laminados fabricados con láminas de mayor gramage.
- Los primeros daños que se han hallado en las probetas son despegues aislados o conectados, relativamente pequeños.

7 Líneas futuras

De forma que el presente trabajo sirva de apoyo en la realización de otros futuros trabajos relacionados con el mismo tema, se han recopilado algunas claves que ayuden a agilizar todo el proceso y mejorar los resultados obtenidos. Estas pautas se han listado a continuación:

- Como se ha mencionado en la sección 4.1, el lijado y pulido de la superficie de las probetas se ha realizado, en un primer momento, de forma manual para luego haberse utilizado una máquina automática. Los resultados obtenidos con esta segunda máquina son muy superiores en calidad y el tiempo invertido es mucho más eficiente. Estas mejoras han supuesto un gran avance para el presente trabajo y lo supondrán en los futuros.
- Puesto que la utilización de las réplicas ha sido novedosa en su uso en ensayos de tracción estática, se han planteado varias claves alrededor de este punto:
  - Se ha indicado en este trabajo que la realización de una réplica es especialmente sensible en sus extremos. Se tiene, además, que la zona estudiada mide 60*mm* coincidiendo con el largo de las réplicas. Un aumento del tamaño de los papeles que se emplean para su realización permitiría, por tanto, mayor precisión en los extremos de la muestra.
  - La realización de una réplica por cada cara de la probeta ha resultado ser una buena forma de asegurar la obtención de resultados fehacientes sobre la aparición del primer daño. Esto es, para un nivel de carga puede haberse producido un primer daño que sea visible en una sola cara y no en la contraria por lo que si no se realiza una réplica por cada una de ellas podría haber pérdida de información.
  - La determinación de la ubicación de un daño sobre la réplica ha resultado ser compleja, esto ha sido debido a la posición en la que tiene que ser colocada sobre el microscopio. Con el objetivo de agilizar el proceso, se recomienda idear un sistema preciso sobre el microscopio que permita ubicar un daño cuando sea encontrado.
- Con el objetivo de que pueda establecerse un nivel de carga más acotado para el que se produce el primer daño en el material, se propone comenzar en un nivel de carga más bajo y avanzar, no obstante, del mismo modo que se ha realizado en este trabajo.

Índice de Figuras

2.1	Dimensiones de las probetas. Cotas en mm	4
2.2	Dimensiones de las láminas. Cotas en mm	4
2.3	Disposición de los rollos. Cotas en mm	5
2.4	Disposición de las láminas de 0°. Cotas en mm	5
2.5	Disposición de las láminas de 90°. Cotas en mm	5
2.6	Cámara frigorrífica donde se encuentran los rollos de material	6
2.7	Material auxiliar para el corte	7
2.8	Disposición del rollo de material en la sala limpia	7
2.9	Medición de las láminas de 0°	8
2.10	Corte de una lámina de 0°	8
2.11	Todas las láminas cortadas	9
2.12	Fabricación de las bolsas para las láminas	9
2.13	Todas las láminas en sus respectivas bolsas	9
2.14	Bolsas de las láminas en el congelador	10
2.15	Rollo de material en su bolsa	10
2.16	Disposición de la lámina	11
2.17	Lámina frente a lámina presionada con la espátula	12
2.18	Precompactación con bolsa de vacío	12
2.19	Paneles y láminas de teflón sobre la plancha de acero	13
2.20	Cinta de cromato	13
2.21	Tejido *airwave*	14
2.22	Bolsa de vacío. Antes del vacío	14
2.23	Bolsa de vacío. Después del vacío	14
2.24	Dimensiones de los tacos de vidrios. Cotas en mm	15
2.25	Panel de fibra de vidrio 1	15
2.26	Panel de fibra de vidrio 2	16
2.27	Máquina de corte	16
2.28	Corte de los tacos de vidrio del panel 2	17
2.29	Corte de los tacos de vidrio del panel 2	17
2.30	Corte de los tacos de vidrio del panel 2	17
2.31	Comprobación de las medidas de los tacos de vidrio	18
2.32	Todos los tacos de vidrio cortados	18
2.33	Limpieza de un taco de vidrio	18
2.34	Limpieza de un panel	19
2.35	Adhesivo Z-15429	19
2.36	Adhesivo pegado a un taco de vidrio	19

2.37	Tacos de vidrio adheridos	20
2.38	Laminados resanados	20
2.39	Máquina de lijar	20
2.40	Resanado de un lado del laminado	21
2.41	Laminados resanado	21
2.42	Calibrado de la máquina de corte	21
2.43	Comprobación medida de corte de material auxiliar	22
2.44	Corte de las probetas de un laminado	22
2.45	Corte de las probetas de un laminado	22
3.1	Lijado de una probeta para la adhesión de una galga extensiométrica	23
3.2	Calibre de altura para el trazado de los ejes	24
3.3	Cables estañeados	24
3.4	Lápiz de fibra de vidrio sobre los bornes de una galga extensiométrica	25
3.5	Cables soldados a una galga extensiométrica	25
3.6	Ficha de conexión	25
3.7	Máquina de ensayo *INSTRON 4482*	26
3.8	Diagrama *Carga - Deformación*. Laminado CP-0_4-90-50	27
3.9	Diagrama *Carga - Deformación*. Laminado CP-0_4-90-100	27
3.10	Diagrama *Carga - Deformación*. Laminado CP-0_{12}-90-50	28
3.11	Diagrama *Carga - Deformación*. Laminado CP-0_{12}-90_2-50	28
3.12	Carga de rotura (N) de cada laminado	31
3.13	Tensión de rotura (MPa) de cada laminado	32
3.14	Módulo de Elasticidad (GPa) de cada laminado	32
3.15	Tensión de rotura de cada laminado según el gramage de la capa de 90°	33
3.16	Módulo de Elasticidad de cada laminado según el gramage de la capa de 90°	33
4.1	Diagrama de flujo para el análisis de las réplicas	36
4.2	Discos de lijado y pulido. En sentido horario:lija de 320; lija de 500; lija de 800; lija de 1200; Paño MD-Nap; Paño MD-Largo; Paño MD-Dac; disco metálico para pegado de lijas	37
4.3	Material empleado en la realización de una réplica	37
4.4	Colocación de la réplica sobre la probeta	38
4.5	Preparación de una réplica examinarla en el microscopio	38
4.6	Tipos de daños transversales hallados en las probetas	39
4.7	Diagramas *Carga - Deformación*. Probeta de cada laminado: CP-0_4-90-50, CP-0_4-90-100, CP-0_{12}-90-50 y CP-0_{12}-90_2-50	39
4.8	Distribución de los daños a lo largo de la probeta CP-0_4-90-50 a $0N$	40
4.9	Daño CP-0_4-90-50-DA0 a $0N$ y $5000N$	41
4.10	Daño CP-0_4-90-50-DA1 a $7000N$	41
4.11	Distribución de los daños a lo largo de la probeta CP-0_4-90-100 a $0N$	42
4.12	Daño CP-0_4-90-100-DA0 a $0N$ y $5000N$	42
4.13	Daño CP-0_4-90-100-DA1 a $6000N$	43
4.14	Distribución de los daños a lo largo de la probeta CP-0_{12}-90-50 a $0N$	43
4.15	Daño CP-0_{12}-90-50-DA0 a $0N$ y $5000N$	44
4.16	Daño CP-0_{12}-90-50-DB1 a $5000N$	44
4.17	Distribución de los daños a lo largo de la probeta CP-0_{12}-90_2-50 a $0N$	45
4.18	Daño CP-0_{12}-90_2-50-DB0 a $0N$ y $5000N$	45
4.19	Daño CP-0_{12}-90_2-50-DB1 a $5000N$	46
4.20	Daño CP-0_{12}-90_2-50-DB2 a $5000N$	46
5.1	Evolución del daño CP-0_4-90-50-DA de $7000N$ a $9000N$	48

5.2 Daño CP-0_4-90-50-DA a $9000N$. Observado directamente en el microscopio 48
5.3 Evolución del daño CP-0_4-90-100-DA1 de $6000N$ a $9000N$ 50
5.4 Daño CP-0_4-90-100-DA1 a $9000N$. Observado directamente en el microscopio 51
5.5 Evolución del daño CP-0_{12}-90-50-DB1 de $5000N$ a $9000N$ 52
5.6 Daño CP-0_{12}-90-50-DB1 a $9000N$. Observado directamente en el microscopio 53
5.7 Evolución del daño CP-0_{12}-90_2-50-DB1 de $5000N$ a $9000N$ 54
5.8 Evolución del daño CP-0_{12}-90_2-50-DB2 de $5000N$ a $9000N$ 54
5.9 Daño CP-0_{12}-90_2-50-DB1 a $9000N$. Observado directamente en el microscopio 55
5.10 Daño CP-0_{12}-90_2-50-DB2 a $9000N$. Observado directamente en el microscopio 55
5.11 Carga a la que aparece el primer daño en cada probeta según el espesor de la capa de 90° 56
5.12 Tensión a la que aparece el primer daño en cada probeta según el gramage de la capa de 90° 56
5.13 Deformación a la que aparece el primer daño en cada probeta según el gramage de la capa de 90° 57
5.14 Carga a la que aparece el primer daño en cada probeta según el gramage de sus láminas 57
5.15 Deformación a la que aparece el primer daño en cada probeta según el gramage de sus láminas 58
5.16 Primer daño de cada probeta. Marcado en rojo 59
5.17 Primer daño de cada probeta a $9000N$. Marcado en rojo 60

Índice de Tablas

1.1	Laminados fabricados	2
2.1	Cantidad de material a cortar	6
2.2	Secuencia de apilado según el laminado	11
3.1	Dimensiones de las probetas. Laminado CP-0_4-90-50	29
3.2	Caracterización del laminado CP-0_4-90-50	29
3.3	Dimensiones de las probetas. Laminado CP-0_4-90-100	30
3.4	Caracterización del laminado CP-0_4-90-100	30
3.5	Dimensiones de las probetas. Laminado CP-0_{12}-90-50	30
3.6	Caracterización del laminado CP-0_{12}-90-50	30
3.7	Dimensiones de las probetas. Laminado CP-0_{12}-90_2-50	31
3.8	Caracterización del laminado CP-0_{12}-90_2-50	31
4.1	Lijado y pulido. Secuencia de trabajo	36

Bibliografía

[1] ASTM D3039/D3039M, *Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials d3039*, ASTM Standards **15** (2014), 1–13.

[2] F. París E. Correa, M.I. Valverde, *Estudio experimental de la aparición del daño en laminados de material compuesto*, Aemac **2** (2017), 1–4.

[3] J.C. Marín A. Barroso. F. Paris, J. Cañas, *Introducción al análisis y diseño con materiales compuestos*, Universidad de Sevilla, Escuela Técnica Superior de Ingenieros, 2009.

[4] V.G. Navarrete Larive, *Efecto escala en materiales compuestos: estudio del fallo a primera lámina en laminados [04/90n]s. (trabajo fin de grado inédito)*, 2019.

[5] J. Navarro Hinojosa, *Estudio experimental de la aparición de daño transversal en laminados [012/90n]s en función del espesor de la lámina de 90° usando láminas ultradelgadas. (trabajo fin de grado inédito)*, 2020.

[6] F. París, M.L. Velasco, and E. Correa, *The scale effect in composites: An explanation physically based on the different mechanisms of damage involved in failure*, Composite Structures **257** (2021), 113089.

[7] M.J. Peña Manrique, *Efecto a escala en materiales compuestos: estudio del fallo a primera lámina en laminados [0,90n]s. (trabajo fin de máster inédito)*, 2019.

[8] M.L. Velasco, E. Correa, S. Sánchez-Carmona, and F. París, *Evolution of the damage onset and morphology in [0/90n/0] laminates when increasing the ply thickness*, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing **170** (2023), 107542.