

Trabajo Fin de Máster

Universitario en Ingeniería Aeronáutica

Efecto a escala en materiales compuestos: estudio del fallo a primera lámina en laminados $[0,90_n]_s$

Autor: María José Peña Manrique

Tutor: María Luisa Velasco López

Elena Correa Montoto

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

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Máster
Universitario en Ingeniería Aeroespacial

Efecto a escala en materiales compuestos: estudio del fallo a primera lámina en laminados [0,90n]s

Autor:

María José Peña Manrique

Tutor:

María Luisa Velasco López

Elena Correa Montoto

Dpto. de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019

Trabajo Fin de Máster Efecto a escala en materiales compuestos: estudio del fallo a primera lámina en laminados [0,90n]s

Autor: María José Peña Manrique

Tutor: María Luisa Velasco López
Elena Correa Montoto

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis amigos

Agradecimientos

La realización de este proyecto supone el fin a una de las etapas más intensas e importantes de mi vida: mi etapa universitaria. A pesar del esfuerzo necesario por mi parte para llegar a este punto y lo duro del camino, al mirar atrás solo puedo recordar el apoyo incondicional que he recibido y todo lo que me ha aportado esta etapa.

Nada de esto habría sido posible sin mi familia y amigos.

En primer lugar, agradecer a mis padres, base fundamental y gracias a quienes soy quien soy, por brindarme siempre en el momento justo el empuje necesario y darme siempre todo, incluso más allá de sus posibilidades.

A mi hermana, por su cariño incondicional y aguantar lo que nadie más aguanta.

Gracias por vuestro cariño, paciencia y por no dejarme desistir nunca, el camino recorrido no es solo mío, si no de los cuatro.

A mis sobrinas, que incluso en los momentos de mayor agobio son capaces de sacarme una sonrisa y hacer que vea las cosas a través de sus ojos alegres.

A mis amigos, tanto a los que se han mantenido apoyándome en la distancia como a los que he ido conociendo a lo largo de estos años y se han quedado. Gracias, habéis definido esta etapa.

Mención aparte merecen mis profesores, que me han dado la oportunidad de finalizar mis estudios con este proyecto.

A Maria Luisa, gracias por tu acompañamiento, energía y apoyo durante la realización el trabajo.

A Federico, gracias por su guía y por impulsarme siempre a analizar e ir un paso más allá sacando mis propias conclusiones.

A Elena, muchas gracias por darme la oportunidad de repetir experiencia realizando un trabajo fin de máster dentro del laboratorio.

Al equipo del LERM por acorgeme en la familia que conforman y hacerme formar parte de ella.

En particular, gracias a Miguel, Patricia, Lorenzo, José Ramón y Antonio por estar siempre disponibles para ayudar ante cualquier problema.

A todos ellos, gracias.

Resumen

El objetivo del presente trabajo es avanzar en el estudio de lo que se conoce como efecto escala, es decir, el efecto que consiste en un retraso en la aparición del primer daño a medida que se reduce el espesor de las láminas. En este trabajo se pretende estudiar este efecto desde el punto de vista de la rotura a tracción transversal, analizando el fallo que se produce en las láminas situadas a 90 grados en laminados *cross-ply*.

Para ello se han sometido a distintas metodologías de ensayo a tracción una serie de laminados *cross-ply* simétricos carbono-epoxy en los que se ha variado el espesor de las láminas a 90 y a 0 grados respectivamente, para ver en qué afecta el espesor de cada una de las capas a la aparición del primer daño.

Para analizar el efecto que tiene variar el espesor de la capa a 90 grados se han rescatado una serie de probetas de un proyecto anterior [1] de secuencias de apilado $[0_4, 90_N, 0_4]$ con $N=1, 2, 4$ y 8 .

Con el objetivo de abarcar el mayor número de comparaciones posibles se decidió aprovechar algunos de los laminados que ya se tenían fabricados para el estudio del efecto que pueda tener variar el espesor de las capas a 0 grados en la manera en que aparece y se desarrolla el daño en la capa a 90 grados. Por ello se tomaron los casos $N=1$ y $N=4$ y se varió el número de láminas a 0 grados. Se han obtenido así otros dos grupos de laminados entre los que comparar resultados que se corresponden a secuencias de apilado $[0_Q, 90, 0_Q]$ con $Q=1, 2$ y 4 y $[0_P, 90_4, 0_P]$ con $P=1, 2$ y 4 .

Los laminados $[0, 90, 0]$, $[0_2, 90, 0_2]$, $[0, 90_4, 0]$ y $[0_2, 90_4, 0_2]$ han sido fabricados durante la realización de este proyecto.

Una vez que se contaba con todas las probetas fabricadas, cortadas y listas para ensayar se ha procedido a la preparación de las mismas para la inspección del daño mediante el microscopio óptico tras ser ensayadas. Para ello se han sometido un procedimiento de lijado y pulido que ha dejado a las probetas con una de las caras en las que se puede visualizar la sección de láminas a 90 grados lisa y con efecto espejo, permitiendo la observación microscópica.

Para llegar a la secuencia de lijado y pulido finalmente ejecutada en la realización del proyecto ha sido necesario un proceso de prueba y error en el que se han probado distintas secuencias y configuraciones de lijado y pulido.

Preparadas las probetas se ha procedido a ensayar. Durante la realización de este proyecto se han realizado distintos tipos de ensayos con el objetivo de caracterizar los laminados y determinar en qué momento y cómo (nivel de carga, deformación, tipo de daño) se produce la aparición del primer daño.

- Ensayos a rotura para caracterizar mecánicamente los laminados: se han llevado a la rotura una serie de probetas de cada laminado con el objetivo de determinar la carga promedio de rotura, tensión promedio de rotura y módulo de Young.
- Ensayos a primer aviso sonoro de rotura. Estos ensayos han sido realizados con el objetivo de analizar si se puede establecer una relación entre el primer aviso sonoro de rotura detectable por el oído humano y la aparición del primer daño transversal en las muestras analizadas. El modo de proceder ha sido cargar las probetas hasta el primer aviso sonoro de rotura detectado, parar el ensayo, barrer la probeta mediante una lupa cuando todavía estaba colocada en la máquina de ensayo y cargada para ver si contaba con alguna grieta, descargar y analizar en el microscopio el daño introducido en la sección de la capa a 90 grados.
- Ensayos a aumento gradual de la carga. Estos ensayos han sido realizados para determinar el rango de carga y deformación en la que se produce la aparición del primer daño transversal generalizado o grieta transversal en cada uno de los laminados. El modo de proceder ha sido 1) cargar la probeta bajo ensayo hasta un nivel de carga bajo, en la que de los ensayos anteriormente realizados en probetas del laminado correspondiente se supone que no se introduce daño en la probeta, 2) descargar, 3) analizarla en el

microscopio, 4) volver ensayar subiendo la carga entre 50 y 100 kg y 5) repetir el procedimiento hasta que se encuentre en la probeta al ser analizada al microscopio un único daño transversal generalizado o grieta transversal.

Tal y como se ha comentado, tras cada ensayo las muestras han sido analizadas en el microscopio y se ha analizado y tomado imágenes de cualquier anomalía o tipo de daño apreciado en el laminado.

Gracias a la observación microscópica ha sido posible determinar si existe o no relación entre el aviso sonoro de daño y la aparición del primer daño y acotar, mediante el proceso de incremento gradual de carga, el rango en carga (N), tensión (MPa) y deformación (%) al que aparece el primer daño transversal generalizado o la primera grieta transversal para cada uno de los laminados considerados.

Una vez obtenidos los resultados deseados se ha procedido a la comparación entre laminados diferenciando los mismos en los tres bloques comentados:

- $[0_4, 90_N, 0_4]$ con $N=1, 2, 4$ y 8 .
- $[0_Q, 90, 0_Q]$ con $Q=1, 2$ y 4 .
- $[0_P, 90_4, 0_P]$ con $P=1, 2$ y 4

Además de analizar si efectivamente el hecho de variar el espesor de las laminas a 90 grados o a 0 grados produce efecto escala, es decir, si se produce un retraso en la aparición del daño a medida que se reduce el espesor, se ha comparado también la forma en la que se inicia y se propaga el daño.

A la hora de establecer comparaciones entre distintos laminados se ha diferenciado entre distintos tipos de daño, estableciéndose comparación únicamente cuando el tipo de daño que aparecía en las muestras era el mismo.

Índice

Agradecimientos	9
Resumen	11
Índice	13
Índice de Tablas	15
Índice de Figuras	19
Índice de Gráficas	21
Índice de Ecuaciones	23
1 Introducción	1
1.1 <i>Contexto y motivación</i>	1
1.1.1 Concepto de material compuesto	1
1.1.2 Motivación	2
1.2 <i>Objetivo del proyecto</i>	2
1.3 <i>Metodología de trabajo</i>	2
2 Fabricación de las muestras a analizar	5
2.1 <i>Diseño de probetas</i>	5
2.2 <i>Material empleado</i>	5
2.3 <i>Proceso de fabricación</i>	6
2.3.1 Corte del material	6
2.3.2 Apilado de las láminas	7
2.3.3 Fabricación de la bolsa de vacío	8
2.3.4 Curado en autoclave	9
2.3.5 Resanado de los paneles	10
2.3.6 Corte de las probetas	10
2.3.7 Trazabilidad de las probetas obtenidas	10
3 Preparación de las probetas: proceso de lijado y pulido	11
3.1 <i>Material empleado en el lijado y pulido: lijas y paños.</i>	11
3.2 <i>Evolución del proceso durante el proyecto</i>	13
3.3 <i>Recomendaciones para proyectos futuros</i>	14
4 Ensayos Mecánicos	17
4.1 <i>Equipos y software</i>	18
4.2 <i>Procedimiento experimental</i>	19
5 Caracterización mecánica de los laminados	23
5.1 <i>Caracterización mecánica de laminados [0₄,90_n,0₄]</i>	23
5.2 <i>Caracterización mecánica de laminados [0₀,90,0₀]</i>	30
5.3 <i>Caracterización mecánica de laminados [0_p,90₄,0_p]</i>	33
6 Influencia del espesor de la capa a 90°: Estudio laminados [0₄,90_n,0₄]	39
6.1 <i>Detección del daño al primer aviso sonoro</i>	41
6.1.1 Detección del daño al primer aviso sonoro: Laminado [0 ₄ ,90 ₂ ,0 ₄]	42
6.1.2 Detección del daño al primer aviso sonoro: Laminado [0 ₄ ,90 ₈ ,0 ₄]	44

6.2	<i>Detección del primer daño transversal: aumento gradual de carga</i>	46
6.2.1	Detección del primer daño trasnversal: Laminado [0 ₄ ,90,0 ₄]	47
6.2.2	Detección del primer daño transversal: Laminado [0 ₄ ,90 ₂ ,0 ₄]	55
6.2.3	Detección del primer daño transversal: Laminado [0 ₄ ,90 ₄ ,0 ₄]	61
6.2.4	Detección del primer daño transversal: Laminado [0 ₄ ,90 ₈ ,0 ₄]	66
7	Influencia del espesor de la capa a 0°: Estudio laminados [0_q,90,0_q]	73
7.1	<i>Detección del daño al primer aviso sonoro</i>	73
7.1.1	Detección del daño al primer aviso sonoro: Laminado [0,90,0]	73
7.1.2	Detección del daño al primer aviso sonoro: Laminado [0 ₂ ,90,0 ₂]	74
7.1.3	Detección del daño al primer aviso sonoro: Laminado [0 ₄ ,90,0 ₄]	75
7.2	<i>Ensayos al 80% de la carga de rotura</i>	75
7.2.1	Ensayos al 80% de la carga de rotura: Laminado [0,90,0]	75
7.2.1	Ensayos al 80% de la carga de rotura: Laminado [0 ₂ ,90,0 ₂]	76
7.3.1	Detección del primer daño transversal: Laminado [0,90,0]	79
7.3.2	Detección del primer daño transversal: Laminado [0 ₂ ,90,0 ₂]	79
7.3.3	Detección del primer daño transversal: Laminado [0 ₄ ,90,0 ₄]	81
8	Influencia del espesor de la capa a 0°: Estudio laminados [0_p,90₄,0_p]	83
8.1	<i>Detección del daño al primer aviso sonoro</i>	83
8.1.1	Detección del daño al primer aviso sonoro: Laminado [0,90 ₄ ,0]	83
8.1.2	Detección del daño al primer aviso sonoro: Laminado [0 ₂ ,90 ₄ ,0 ₂]	84
8.1.3	Detección del daño al primer aviso sonoro: Laminado [0 ₄ ,90 ₄ ,0 ₄]	86
8.2	<i>Ensayos al 50 % de la carga de rotura</i>	86
8.2.1	Ensayos al 50% de la carga de rotura: Laminado [0,90 ₄ ,0]	86
8.2.2	Ensayos al 50% de la carga de rotura: Laminado [0 ₂ ,90 ₄ ,0 ₂]	87
8.3	<i>Detección del primer daño transversal: aumento gradual de la carga</i>	88
8.3.1	Detección del primer daño transversal: Laminado [0,90 ₄ ,0]	88
8.3.2	Detección del primer daño transversal: Laminado [0 ₂ ,90 ₄ ,0 ₂]	89
8.3.3	Detección del primer daño transversal: Laminado [0 ₄ ,90 ₄ ,0 ₄]	91
9	Discusión de los Resultados	93
9.1	<i>Influencia del espesor de la capa a 90°: Estudio de laminados [0₄,90_N,0₄]</i>	93
10	Conclusiones	99
	Referencias	105

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1. Secuencia de lijado y pulido empleada en proyectos anteriores.	13
Tabla 3-2. Secuencia de lijado y pulido empleada I.	14
Tabla 3-3. Secuencia de lijado y pulido empleada en el presente proyecto II.	14
Tabla 5-1. Propiedades del <i>BMS 8-256 D411_CL1_GR190 (T300 12K)</i> .	23
Tabla 5-2. Dimensiones de las probetas del laminado [0 ₄ ,90,0 ₄] llevadas a rotura.	24
Tabla 5-3. Resultados de resistencia y rigidez para las 5 probetas del panel [0 ₄ ,90,0 ₄] llevadas a la rotura.	24
Tabla 5-4. Resultados promedio de la resistencia y la rigidez para el panel [0 ₄ ,90,0 ₄].	24
Tabla 5-5. Dimensiones de las probetas del laminado [0 ₄ ,90 ₂ ,0 ₄] llevadas a rotura.	25
Tabla 5-6. Resultados de resistencia y rigidez para las 5 probetas del panel [0 ₄ ,90 ₂ ,0 ₄] llevadas a la rotura.	26
Tabla 5-7. Resultados promedio de la resistencia y la rigidez para el panel [0 ₄ ,90 ₂ ,0 ₄].	26
Tabla 5-8. Dimensiones de las probetas del laminado [0 ₄ ,90 ₄ ,0 ₄] llevadas a rotura.	27
Tabla 5-9. Resultados de resistencia y rigidez para las 5 probetas del panel [0 ₄ ,90 ₄ ,0 ₄] llevadas a la rotura.	27
Tabla 5-10. Resultados promedio de la resistencia y la rigidez para el panel [0 ₄ ,90 ₄ ,0 ₄].	27
Tabla 5-11. Dimensiones de las probetas del laminado [0 ₄ ,90 ₈ ,0 ₄] llevadas a rotura.	28
Tabla 5-12. Resultados de resistencia y rigidez para las 5 probetas del panel [0 ₄ ,90 ₈ ,0 ₄] llevadas a la rotura.	29
Tabla 5-13. Resultados promedio de la resistencia y la rigidez para el panel [0 ₄ ,90 ₈ ,0 ₄].	29
Tabla 5-14. Dimensiones de las probetas del laminado [0,90,0] llevadas a rotura.	30
Tabla 5-15. Resultados de resistencia y rigidez para las 5 probetas del panel [0,90,0] llevadas a la rotura.	30
Tabla 5-16. Resultados promedio de la resistencia y la rigidez para el panel [0,90,0].	31
Tabla 5-17. Dimensiones de las probetas del laminado [0 ₂ ,90,0 ₂] llevadas a rotura.	32
Tabla 5-18. Resultados de resistencia y rigidez para las 5 probetas del panel [0 ₂ ,90,0 ₂] llevadas a la rotura.	32
Tabla 5-19. Resultados promedio de la resistencia y la rigidez para el panel [0 ₂ ,90,0 ₂].	32
Tabla 5-20. Dimensiones de las probetas del laminado [0,90 ₄ ,0] llevadas a rotura.	34
Tabla 5-21. Resultados de resistencia y rigidez para las 5 probetas del panel [0,90 ₄ ,0] llevadas a la rotura.	34
Tabla 5-22. Resultados promedio de la resistencia y la rigidez para el panel [0,90 ₄ ,0].	34
Tabla 5-23. Dimensiones de las probetas del laminado [0 ₂ ,90 ₄ ,0 ₂] llevadas a rotura.	35
Tabla 5-24. Resultados de resistencia y rigidez para las 5 probetas del panel [0 ₂ ,90 ₄ ,0 ₂] llevadas a la rotura.	36
Tabla 5-25. Resultados promedio de la resistencia y la rigidez para el panel [0 ₂ ,90 ₄ ,0 ₂].	36

Tabla 6-1 .Dimensiones de las probetas del laminado [0 ₄ ,90 ₂ ,0 ₄] ensayadas al primer aviso sonoro.	42
Tabla 6-2. Resultados del ensayo a primer aviso sonoro de las probetas del laminado [0 ₄ ,90 ₂ ,0 ₄].	42
Tabla 6-3. Densidad de grietas en las probetas del laminado [0 ₄ ,90 ₂ ,0 ₄] ensayadas al primer aviso sonoro.	42
Tabla 6-4 .Dimensiones de las probetas del laminado [0 ₄ ,90 ₈ ,0 ₄] ensayadas al primer aviso sonoro.	45
Tabla 6-5. Resultados del ensayo a primer aviso sonoro de las probetas del laminado [0 ₄ ,90 ₈ ,0 ₄].	45
Tabla 6-6. Densidad de grietas en las probetas del laminado [0 ₄ ,90 ₈ ,0 ₄] ensayadas al primer aviso sonoro.	45
Tabla 6-7. Dimensiones de las probetas del laminado [0 ₄ ,90,0 ₄] ensayadas a primer daño transversal.	47
Tabla 6-8. [0 ₄ ,90,0 ₄]: Probeta 2. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar el primer daño transversal.	47
Tabla 6-9. [0 ₄ ,90,0 ₄]: Probeta 3. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar el primer daño transversal.	48
Tabla 6-10. [0 ₄ ,90,0 ₄]: Probeta 4. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar el primer daño transversal.	48
Tabla 6-11 [0 ₄ ,90,0 ₄]: Probeta 5. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar el primer daño transversal.	49
Tabla 6-12. [0 ₄ ,90,0 ₄]: Probeta 6. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar el primer daño transversal.	50
Tabla 6-13. [0 ₄ ,90,0 ₄]: Probeta 8. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar el primer daño transversal.	50
Tabla 6-14. [0 ₄ ,90,0 ₄]: Probeta 9. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar el primer daño transversal.	52
Tabla 6-15. [0 ₄ ,90,0 ₄]: Probeta 10. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar el primer daño transversal.	53
Tabla 6-16. [0 ₄ ,90,0 ₄]: Resumen de resultados. Rango de aparición del primer daño transversal generalizado.	55
Tabla 6-17. Dimensiones de las probetas del laminado [0 ₄ ,90 ₂ ,0 ₄] ensayadas a primera grieta transversal.	56
Tabla 6-18. [0 ₄ ,90 ₂ ,0 ₄]: Probeta 7. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar la primera grieta.	56
Tabla 6-19. [0 ₄ ,90 ₂ ,0 ₄]: Probeta 8. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar la primera grieta.	56
Tabla 6-20. [0 ₄ ,90 ₂ ,0 ₄]: Probeta 9. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar la primera grieta.	57
Tabla 6-21. [0 ₄ ,90 ₂ ,0 ₄]: Probeta 10. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar la primera grieta.	57
Tabla 6-22. [0 ₄ ,90 ₂ ,0 ₄]: Probeta 11. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar la primera grieta.	57
Tabla 6-23. [0 ₄ ,90 ₂ ,0 ₄]: Resumen de resultados. Rango de aparición de la primera grieta transversal.	61
Tabla 6-24. Dimensiones de las probetas del laminado [0 ₄ ,90 ₄ ,0 ₄] ensayadas a primera grieta transversal	61

Tabla 6-25. [0 ₄ ,90 ₄ ,0 ₄]: Probeta 19. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar la primera grieta.	61
Tabla 6-26. [0 ₄ ,90 ₄ ,0 ₄]: Probeta 20. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar la primera grieta.	62
Tabla 6-27. [0 ₄ ,90 ₄ ,0 ₄]: Probeta 21. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar la primera grieta.	62
Tabla 6-28. [0 ₄ ,90 ₄ ,0 ₄]: Probeta 22. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar la primera grieta.	62
Tabla 6-29. [0 ₄ ,90 ₄ ,0 ₄]: Probeta 23. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar la primera grieta.	62
Tabla 6-30. [0 ₄ ,90 ₄ ,0 ₄]: Probeta 24. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar la primera grieta.	63
Tabla 6-31.[0 ₄ ,90 ₄ ,0 ₄]: Resumen de resultados. Rango de aparición de la primera grieta transversal.	65
Tabla 6-32. Dimensiones de las probetas del laminado [0 ₄ ,90 ₈ ,0 ₄] ensayadas a primera grieta transversal.	66
Tabla 6-33.[0 ₄ ,90 ₈ ,0 ₄] : Probeta 20. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar la primera grieta.	66
Tabla 6-34. [0 ₄ ,90 ₈ ,0 ₄]: Probeta 21. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar la primera grieta.	67
Tabla 6-35. [0 ₄ ,90 ₈ ,0 ₄]: Probeta 23. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar la primera grieta.	67
Tabla 6-36. [0 ₄ ,90 ₈ ,0 ₄]: Probeta 24. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar la primera grieta.	67
Tabla 6-37. [0 ₄ ,90 ₈ ,0 ₄]: Probeta 25. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar la primera grieta.	68
Tabla 6-38. [0 ₄ ,90 ₈ ,0 ₄]: Resumen de resultados. Rango de aparición de la primera grieta transversal.	71
Tabla 7-1. Dimensiones de las probetas del laminado [0,90,0] ensayadas al primer aviso sonoro.	73
Tabla 7-2. Resultados del ensayo a primer aviso sonoro de la probeta del laminado [0,90,0].	73
Tabla 7-3. Dimensiones de las probetas del laminado [0 ₂ ,90,0 ₂] ensayadas al primer aviso sonoro.	74
Tabla 7-4. Resultados del ensayo a primer aviso sonoro de las probetas del laminado [0 ₂ ,90,0 ₂].	74
Tabla 7-5. Dimensiones de las probetas del laminado [0,90,0] ensayadas al 80% de la carga de rotura.	75
Tabla 7-6. Resultados del ensayo al 80% de la carga de rotura de las probetas del laminado [0,90,0].	75
Tabla 7-7. Dimensiones de las probetas del laminado [0 ₂ ,90,0 ₂] ensayadas al 80% de la carga de rotura.	76
Tabla 7-8. Resultados del ensayo al 80% de la carga de rotura de las probetas del laminado [0 ₂ ,90,0 ₂].	76
Tabla 7-9.Dimensiones de las probetas del laminado [0,90,0] ensayadas a aumento de carga gradual.	79
Tabla 7-10. [0,90,0]: Probeta 6. Proceso de incremento gradual de carga.	79
Tabla 7-11. [0,90,0]: Resumen de resultados del proceso de aumento gradual de carga.	79
Tabla 7-12. Dimensiones de las probetas del laminado [0 ₂ ,90,0 ₂] ensayadas a aumento de carga gradual.	80
Tabla 7-13. [0 ₂ ,90,0 ₂]: Probeta 14. Proceso de incremento gradual de carga.	80
Tabla 7-14. [0 ₂ ,90,0 ₂]: Probeta 15. Proceso de incremento gradual de carga.	80
Tabla 7-15. [0 ₂ ,90,0 ₂]: Resumen de resultados del proceso de aumento gradual de carga.	80

Tabla 7-16. [0 ₄ ,90 ₄ ,0 ₄]: Resumen de resultados del proceso de aumento gradual de carga.	81
Tabla 8-1. Dimensiones de las probetas del laminado [0,90 ₄ ,0] ensayadas al primer aviso sonoro.	83
Tabla 8-2. Resultados del ensayo a primer aviso sonoro de las probetas del laminado [0,90 ₄ ,0].	83
Tabla 8-3. Dimensiones de las probetas del laminado [0 ₂ ,90 ₄ ,0 ₂] ensayadas al primer aviso sonoro.	84
Tabla 8-4. Resultados del ensayo a primer aviso sonoro de las probetas del laminado [0 ₂ ,90 ₄ ,0 ₂].	85
Tabla 8-5. Dimensiones de las probetas del laminado [0,90 ₄ ,0] ensayadas al 50% de la carga de rotura.	87
Tabla 8-6. Resultados del ensayo al 50% de la carga de rotura de las probetas del laminado [0,90 ₄ ,0].	87
Tabla 8-7. Dimensiones de las probetas del laminado [0 ₂ ,90 ₄ ,0 ₂] ensayadas al 50% de la carga de rotura.	87
Tabla 8-8. Resultados del ensayo al 50% de la carga de rotura de las probetas del laminado [0 ₂ ,90 ₄ ,0 ₂].	88
Tabla 8-9. Dimensiones de las probetas del laminado [0,90 ₄ ,0] ensayadas a aumento de carga gradual.	88
Tabla 8-10. [0,90 ₄ ,0]: Probeta 12. Proceso de incremento gradual de carga.	88
Tabla 8-11. [0,90 ₄ ,0]: Probeta 15. Proceso de incremento gradual de carga.	89
Tabla 8-12.[0,90 ₄ ,0]: Resumen de resultados del proceso de aumento gradual de carga.	89
Tabla 8-13. Dimensiones de las probetas del laminado [0 ₂ ,90 ₄ ,0 ₂] ensayadas a aumento de carga gradual.	89
Tabla 8-14. [0 ₂ ,90 ₄ ,0 ₂]: Probeta 13. Proceso de incremento gradual de carga.	90
Tabla 8-15. [0 ₂ ,90 ₄ ,0 ₂]: Probeta 18. Proceso de incremento gradual de carga.	90
Tabla 8-16. [0 ₂ ,90 ₄ ,0 ₂]: Probeta 19. Proceso de incremento gradual de carga.	90
Tabla 8-17.[0 ₂ ,90 ₄ ,0 ₂]: Resumen de resultados del proceso de aumento gradual de carga.	91
Tabla 8-18. [0 ₄ ,90 ₄ ,0 ₄]: Resumen de resultados. Rango de aparición de la primera grieta transversal.	92
Tabla 9-1.Rango de aparición del primer daño trasversal generalizado o primera grieta en los laminados [0 ₄ ,90 _N ,0 ₄].	93
Tabla 9-2. Valor medio de los valores de carga y deformación en los que las muestras cuentan con un único daño trasversal generalizado o grieta trasnversal para los laminados [0 ₄ ,90 _N ,0 ₄].	93
Tabla 10-1. Secuencia de lijado y pulido empleada en el presente proyecto.	99
Tabla 10-2. Comparación entre la carga media de rotura experimental y teórica de los laminados [0 ₄ ,90 _N ,0 ₄].	101
Tabla 10-3. Comparación entre la carga media de rotura experimental y teórica de los laminados [0 _Q ,90,0 _Q].	101
Tabla 10-4. Comparación entre la carga media de rotura experimental y teórica de los laminados [0 _P ,90 ₄ ,0 _P]	101

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1. Morfología de material compuesto reforzado con fibras continuas-discontinuas en diferentes orientaciones [3].	1
Figura 2-1. Rollo del material compuesto empleado en la fabricación de las probetas.	6
Figura 2-2. (a) Utensilios empelados en el corte de las láminas; (b) láminas cortadas.	7
Figura 2-3. (a) Espátulas empeladas en el apilado manual; (b) aplicación de la presión manual.	7
Figura 2-4. Materiales empleados en la fabricación de la bolsa de vacío.	8
Figura 2-5. Distintas fases de la preparación de una bolsa de vacío.	9
Figura 2-6. Máquina de corte.	10
Figura 3-1. Equipo de lijado y pulido de las probetas.	11
Figura 3-2.(a) Lija SiC#320; (b) disco MD-Largo 9 μ m; (c) disco MD-Dac 3 μ m; (d) disco MD-Nap 1 μ m.	12
Figura 4-1. Máquina Universal de Ensayos Instron 4483 (izquierda) y Máquina Universal de Ensayos Instron 4482 (derecha).	18
Figura 4-2. Muestra de la lupa colocada para visulizar <i>in situ</i> la aparición de la primera grieta durante el ensayo.	18
Figura 4-3. Extensómetro 2630-112.	19
Figura 4-4. Pie de rey.	19
Figura 4-5. Mordaza empleada en los ensayos de tracción.	20
Figura 4-6. Programa de gestión de Máquinas Universales de Ensayos Instron. Esquema pantalla 2.	21
Figura 5-1. [0,90,0]: Probetas ensayadas hasta rotura.	31
Figura 5-2. [0 ₂ ,90,0 ₂]: Probetas ensayadas hasta rotura.	33
Figura 5-3. [0,90 ₄ ,0]: Probetas ensayadas hasta rotura.	35
Figura 5-4. [0 ₂ ,90 ₄ ,0 ₂]: Probetas ensayadas hasta rotura.	37
Figura 6-1. Clasificación del daño: Despegues aislados.	39
Figura 6-2. Clasificación del daño: Despegues continuos.	40
Figura 6-3. Clasificación del daño: daño transversal generalizado.	40
Figura 6-4. Clasificación del daño: grieta transversal.	41
Figura 6-5. [0 ₄ ,90 ₂ ,0 ₄]: Probeta 1. Grieta transversal a x200.	43
Figura 6-6. [0 ₄ ,90 ₂ ,0 ₄]: Probeta 1. Grieta transversal a x500.	43
Figura 6-7. [0 ₄ ,90 ₂ ,0 ₄]: Probeta 2. Grieta transversal a x200.	44
Figura 6-8. [0 ₄ ,90 ₂ ,0 ₄]: Probeta 2. Despegues continuos a x500.	44
Figura 6-9.[0 ₄ ,90 ₈ ,0 ₄]: Probeta 14. Fotografía de la grieta transversal con la probeta cargada.	46
Figura 6-10. [0 ₄ ,90 ₈ ,0 ₄]: Probeta 14. Grieta transversal a x200.	46
Figura 6-11. [0 ₄ ,90,0 ₄]: Probeta 5. Prueba 2. Primer daño transversal generalizado encontrado a x500.	49
Figura 6-12.[0 ₄ ,90,0 ₄]: Probeta 5. Prueba 2. Primer daño transversal generalizado encontrado a x500.	49

Figura 6-13. [0 ₄ ,90,0 ₄]: Probeta 6. Prueba 3. Despegues continuos a x500.	50
Figura 6-14. [0 ₄ ,90,0 ₄]: Probeta 8. Prueba 2. Primer daño transversal generalizado encontrado a x500.	51
Figura 6-15. [0 ₄ ,90,0 ₄]: Probeta 8. Prueba 3. Primer daño transversal generalizado encontrado a x500.	51
Figura 6-16. [0 ₄ ,90,0 ₄]: Probeta 8. Prueba 3. Despegues continuos a x500.	51
Figura 6-17. [0 ₄ ,90,0 ₄]: Probeta 9. Prueba 2. Primer daño transversal generalizado a x500.	52
Figura 6-18. [0 ₄ ,90,0 ₄]: Probeta 9. Prueba 3. Despegues continuos a x500.	52
Figura 6-19. [0 ₄ ,90,0 ₄]: Probeta 10. Prueba 3. Primer daño transversal generalizado a x500.	53
Figura 6-20. [0 ₄ ,90,0 ₄]: Probeta 10. Prueba 5. Daño transversal generalizado a x500.	53
Figura 6-21. [0 ₄ ,90 ₂ ,0 ₄]: Grietas transversales a x200 observadas en: (a) Probeta 7; (b) Probeta 8; (c) Probeta 9.	58
Figura 6-22. [0 ₄ ,90 ₂ ,0 ₄]: Probeta 8. Despegues aislados paralelos a las fibras de la lámina de 0 grados localizados en los extremos de la grieta transversal. Observados a x1000.	58
Figura 6-23. Daño propagado en la dirección de aplicación de la carga a x500. Figura (a): Probeta 8. Prueba 2; Figura (b) Probeta 11. Prueba 1.	59
Figura 6-24. [0 ₄ ,90 ₄ ,0 ₄]: Probeta 18. Primera grieta transversal a x50.	63
Figura 6-25. [0 ₄ ,90 ₄ ,0 ₄]: Probeta 19. Primera grieta transversal a x200.	63
Figura 6-26. [0 ₄ ,90 ₄ ,0 ₄]. Daño incipiente asociado a una potencial delaminación en la primera grieta transversal encontrada. (a) Probeta 19. Prueba 4; (b) Probeta 20. Prueba 2.	64
Figura 6-27. [0 ₄ ,90 ₈ ,0 ₄]: Probeta 23. Primera grieta transversal fotografiada con la probeta cargada.	68
Figura 6-28. [0 ₄ ,90 ₈ ,0 ₄]: Probeta 23. Primera grieta transversal a x200.	68
Figura 6-29. [0 ₄ ,90 ₈ ,0 ₄]: Probeta 21. Prueba 10. Daño incipiente asociado a una potencial delaminación en la primera grieta transversal encontrada.	69
Figura 6-30. [0 ₄ ,90 ₈ ,0 ₄]: Probeta 24. Prueba 2. Despegues continuos a x500.	69
Figura 7-1. [0,90,0]: Probeta 5. Ensayo al 80% de carga. Rotura.	74
Figura 7-2. [0 ₂ ,90,0 ₂]. Probeta 12. (a)-(f) Grietas transversales y delaminaciones a x200.	77
Figura 7-3. [0 ₂ ,90,0 ₂]: Probeta 13. (a)-(f) Grietas transversales y delaminaciones a x200.	78
Figura 7-4. [0 ₄ ,90,0 ₄]: Probeta 3. Prueba 1. Daño transversal generalizado a x500.	81
Figura 8-1. [0,90 ₄ ,0]: Probetas ensayadas a primer aviso sonoro. Rotura.	84
Figura 8-2. [0 ₂ ,90 ₄ ,0 ₂]: Probeta 8. Grieta transversal a x50.	85
Figura 8-3. [0 ₂ ,90 ₄ ,0 ₂]: Probeta 8. Grieta transversal a x500.	85
Figura 8-4. [0 ₂ ,90 ₄ ,0 ₂]: Probeta 14. Grieta transversal a x200.	86
Figura 8-5.[0 ₄ ,90 ₄ ,0 ₄]: Probeta 21. Prueba 2. Primera grieta transversal a x50.	91
Figura 8-6 .[0 ₄ ,90 ₄ ,0 ₄]: Probeta 21. Prueba 2. Primera grieta transversal a x200.	91
Figura 8-7. [0 ₄ ,90 ₄ ,0 ₄]: Probeta 20. Prueba 2. Primera grieta transversal a x100.	92
Figura 9-1.[0 ₂ ,90,0 ₂]: Probeta12. Grieta transversal.	95
Figura 9-2. [0 ₄ ,90,0 ₄]: Probeta 5. Prueba 4. Segundo daño transversal generalizado encontrado a x500.	96
Figura 9-3.[0 ₂ ,90 ₄ ,0 ₂]: Probeta 8.Grieta trasnversal curvada a x50.	97
Figura 9-4. [0 ₄ ,90 ₄ ,0 ₄]: Probeta 19. Primera grieta transversal a x200.	97

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfico 6-1. [0 ₄ ,90,0 ₄]: Fuerza. Rango de aparición del primer daño transversal generalizado.	54
Gráfico 6-2. [0 ₄ ,90,0 ₄]: Tensión. Rango de aparición del primer daño transversal generalizado.	54
Gráfico 6-3. [0 ₄ ,90,0 ₄]: Rango de aparición de la primera grieta transversal.	55
Gráfico 6-4. [0 ₄ ,90 ₂ ,0 ₄]: Fuerza. Rango de aparición de la primera grieta transversal.	59
Gráfico 6-5. [0 ₄ ,90 ₂ ,0 ₄]: Tensión. Rango de aparición de la primera grieta transversal.	60
Gráfico 6-6. [0 ₄ ,90 ₂ ,0 ₄]: Deformación. Rango de aparición de la primera grieta transversal.	60
Gráfico 6-7. [0 ₄ ,90 ₄ ,0 ₄]: Fuerza. Rango de aparición de la primera grieta transversal.	64
Gráfico 6-8. [0 ₄ ,90 ₄ ,0 ₄]: Tensión. Rango de aparición de la primera grieta transversal.	65
Gráfico 6-9. [0 ₄ ,90 ₄ ,0 ₄]: Deformación. Rango de aparición de la primera grieta transversal.	65
Gráfico 6-10. [0 ₄ ,90 ₈ ,0 ₄]: Fuerza. Rango de aparición de la primera grieta transversal.	70
Gráfico 6-11. [0 ₄ ,90 ₈ ,0 ₄]: Tensión. Rango de aparición de la primera grieta transversal.	70
Gráfico 6-12. [0 ₄ ,90 ₈ ,0 ₄]: Deformación. Rango de aparición de la primera grieta transversal.	71
Gráfico 9-1. Fuerza media de aparición de la primera grieta transversal en laminados [0 ₄ ,90 _N ,0 ₄] para N=2,4,8.	94
Gráfico 9-2. . Deformación media de aparición de la primera grieta transversal en laminados [0 ₄ ,90 _N ,0 ₄] para N=2,4,8.	94

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación (4-1)	17
Ecuación (4-2)	17
Ecuación (4-3)	17
Ecuación (4-4)	17
Ecuación (4-5)	17
Ecuación (4-6)	17
Ecuación (4-7)	17

1 INTRODUCCIÓN

En los últimos años los materiales compuestos han experimentado un gran desarrollo, en particular, en la Ingeniería Aeronáutica. Su gran auge y su aplicación en áreas en las que se deben cumplir estrictos criterios de seguridad han motivado la necesidad de caracterizar su comportamiento. En particular, en este trabajo se intentará profundizar en cómo se produce el “efecto a escala” en laminados de material compuesto.

Para ello, en este capítulo se introduce el concepto de material compuesto, se encuadra el trabajo realizado dentro de las líneas de investigación que se desarrollan en la actualidad en relación con estos materiales y se marcan los objetivos.

1.1 Contexto y motivación

1.1.1 Concepto de material compuesto

Un **material compuesto** se suele definir como la combinación a escala macroscópica de dos o más materiales con interfase de separación entre ellos para formar un nuevo material [2]. El objetivo de esta unión es, por un lado, conformar un material cuyas propiedades no pueden ser alcanzadas por ninguno de sus constituyentes aisladamente y, por otro, aunar las propiedades individuales de dichos constituyentes en un solo material.

Según los materiales empleados y la geometría del refuerzo que se introduce en la matriz se potenciarán unas características u otras. Los materiales compuestos pueden estar reforzados con fibras en distintas direcciones o con partículas, tal y como se ve en la Figura 1-1. Los primeros están más extendidos en la industria debido a sus excelentes propiedades mecánicas. En ellos las fibras actúan absorbiendo la mayor parte de la carga mientras que la matriz tiene la función de dar cohesión al material y aglutinar las fibras, transmitiendo las tensiones entre ellas.

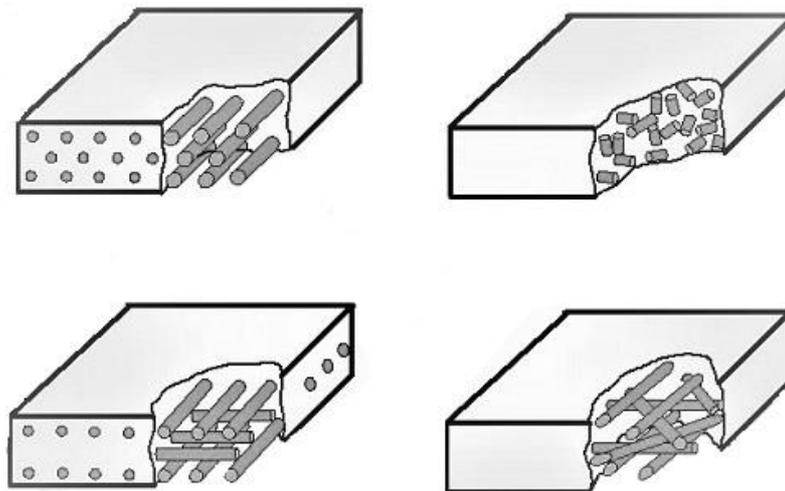


Figura 1-1. Morfología de material compuesto reforzado con fibras continuas-discontinuas en diferentes orientaciones [3].

A pesar de las buenas propiedades observadas en los materiales compuestos hay que dejar patente que estos presentan también una serie de inconvenientes, sobre todo en cuanto a su fabricación y control, ya que la inversión en instalaciones y equipos, tanto para su almacenamiento como para su fabricación y control son muy costosos. Además, se pueden producir variaciones en sus propiedades según las circunstancias: rigidez, resistencia mecánica, baja resistencia al impacto... y producirse defectos como delaminaciones, inclusiones de partícula o daños de fibras que pueden poner en peligro la estructura y que hay que detectar a tiempo, lo que trae consigo revisiones mediante ensayos no destructivos como pueden ser los rayos X o ultrasonidos que son muy costosos.

1.1.2 Motivación

Una de las líneas de investigación más importantes del Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales (GERM), perteneciente al Departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras de la Universidad de Sevilla es el estudio de materiales compuestos reforzados con fibra, dada la importancia y auge del uso de estos materiales en aplicaciones ingenieriles experimentado durante los últimos años.

Con el desarrollo de estos materiales surge la necesidad de establecer unas leyes que permitan determinar su comportamiento y en qué momento se va a producir el fallo del material. Aunque se ha avanzado mucho, desde criterios basados en el comportamiento de materiales metálicos a criterios más complejos que tienen en cuenta el fallo de cada uno de sus componentes, tanto matriz como fibra, todavía no se ha llegado a una ley definitiva, por lo que sigue siendo una línea de investigación abierta en la que se enmarca este trabajo. La dificultad de la predicción del fallo en estos materiales tiene distintas causas: la heterogeneidad y anisotropía de sus componentes, el número de láminas que pueden formar un laminado, las diferentes orientaciones que se pueden dar a las láminas o las distintas secuencias de apilado, la posible delaminación del material, etc. La alta complejidad de los mecanismos de fallo que terminan con el fracaso total de estos materiales está asociada, por tanto, a la microestructura a diferentes escalas e incluso a la interacción entre ellas.

1.2 Objetivo del proyecto

El objetivo de este trabajo es avanzar en el estudio de lo que se conoce como efecto escala, es decir, el efecto que consiste en un retraso en la aparición del primer daño a medida que se reduce el espesor de las capas del laminado. Para ello se han escogido laminados *cross-ply*, laminados formados únicamente por láminas a 0 grados y a 90 grados con respecto a la dirección de aplicación de la carga, y se ha evaluado, por un lado, el efecto en la aparición del daño que supone la variación del espesor de las láminas a 90 grados y, por otro, el efecto de la variación de las láminas a 0 grados. La aparición del daño se ha buscado en la sección de las láminas a 90 grados, ya que son las menos resistentes y, por tanto, las primeras en fallar en estos laminados.

Las secuencias de apilado escogidas a efectos de realizar tales comparaciones han sido:

- **Influencia de variar el espesor de la lámina a 90 grados**

[0₄,90,0₄] [0₄,90₂,0₄] [0₄,90₄,0₄] [0₄,90₈,0₄]

- **Influencia de variar el espesor de la lámina a 0 grados**

[0,90,0] [0₂,90,0₂] [0₄,90,0₄]
[0,90₄,0] [0₂,90₄,0₂] [0₄,90₄,0₄]

1.3 Metodología de trabajo

La metodología de trabajo seguida para conseguir el objetivo marcado ha sido:

1. Decisión de la secuencia de apilado y número de laminados para comparar cada uno de los efectos comentados.
2. Fabricación de las probetas.
3. Determinación de la resistencia a tracción de los laminados.

4. Preparación de las muestras: lijado y pulido para su posterior observación en el microscopio.
5. Ensayos.
6. Observación al microscopio.
7. Análisis de los resultados.

La preparación de las muestras se ha realizado antes del ensayo por un doble motivo: por un lado, tener la seguridad de que las probetas no han sido manipuladas tras el ensayo no habiendo sido eliminado ninguna capa de material para su posterior análisis en el microscopio y, por otro, colocar una lupa durante el ensayo para analizar cuando aparece la primera grieta o daño y comparar si el daño que aparece en la probeta cargada conserva su forma cuando se descarga y no “se cierra”.

2 FABRICACIÓN DE LAS MUESTRAS A ANALIZAR

El primer paso para cumplir con los objetivos de este proyecto ha sido la fabricación de las probetas a ensayar y analizar. En este apartado se describirán tanto el diseño de las probetas como los materiales y equipos empleados en las distintas etapas del proceso de fabricación.

2.1 Diseño de probetas

Como se ha comentado en la sección 1.2, el objetivo de este trabajo es analizar el efecto de aumentar el espesor de las láminas a 0 y 90 grados respecto a la dirección de aplicación de la carga en laminados *cross-ply*. Para ello se han rescatado las probetas realizadas en un proyecto anterior del departamento correspondientes a las secuencias de apilado [0₄,90₄,0₄], [0₄,90₂,0₄], [0₄,90₄,0₄] y [0₄,90₈,0₄], y se han fabricado cuatro laminados que cuentan con las siguientes secuencias de apilado:

[0,90,0]

[0₂,90,0₂]

[0,90₄,0]

[0₂,90₄,0₂]

Todos los paneles tenían unas dimensiones 300mmx500mm, lo cual permitió obtener de cada laminado 29 probetas de dimensiones 15mmx155mm.

Las dimensiones de las probetas se han establecido según la norma UNE-EN 2561[4]. Para llegar a estas dimensiones y al número de probetas finalmente obtenidas se han de tener en cuenta las dimensiones iniciales, la pérdida de material sufrida durante la fabricación de las probetas en procesos como el resanado y el corte.

En el proceso de fabricación seguido en el presente proyecto se ha decidido no emplear tacos debido a que el efecto a analizar es el daño que se produce a primer click sonoro o primer daño, no la rotura, y los tacos se emplean para asegurar, por un lado, que la probeta no resbale de las mordazas durante el ensayo y, por otro, que la rotura se produzca por la parte central. Se comprobó que se podían llevar las probetas a la rotura sin que estas resbalaran y se decidió prescindir de los tacos pues el daño a analizar está lejos de la rotura. Sin embargo, las probetas de los laminados heredados de un proyecto anterior [1] sí que cuentan con tacos.

2.2 Material empleado

Al no emplearse tacos en la fabricación de las probetas el único material necesario ha sido el carbono-epoxy empleado en la fabricación de los paneles anteriormente descritos, obtenido de un rollo de pre-preg (Figura 2-1, cuya designación es *BMS 8-256 D411_CL1_GR190 (T300 12K)*).

El rollo de material debe permanecer en una cámara frigorífica a una temperatura entre -18°C y -20°C introducido en una bolsa frigorífica cuando no se esté utilizando para evitar así la degradación de la resina. Esto hace necesario una espera de unos 30 minutos para que se atempere antes de su uso.



Figura 2-1. Rollo del material compuesto empleado en la fabricación de las probetas.

2.3 Proceso de fabricación

En este apartado se describe el proceso seguido para la obtención de las probetas que han sido objeto de estudio. Este se divide en las siguientes etapas:

- Corte del material
- Apilado de las láminas
- Fabricación de la bolsa de vacío para compactar las láminas
- Curado en autoclave de los laminados
- Resanado de los paneles
- Corte de las probetas
- Trazabilidad de las probetas obtenidas.

Para evitar la contaminación del material durante la fabricación, así como un deterioro de sus propiedades, las tres primeras etapas se han llevado a cabo en lo que se conoce como sala limpia, es decir, una sala con condiciones de humedad, temperatura y presión controladas.

2.3.1 Corte del material

La primera etapa necesaria para la fabricación de las probetas es el corte de las láminas requeridas para conformar el laminado deseado con las distintas orientaciones.

Tal y como se ha expuesto anteriormente, en el presente proyecto se han fabricado cuatro laminados de dimensiones 300mmx500mm. Teniendo en cuenta que el ancho del rollo empleado es de 600mm y que las fibras están orientadas en la dirección en el que este se enrolla, ha sido necesario cortar el siguiente número de láminas para fabricar los laminados:

- 10 láminas de 500mmx300mm para formar las láminas a 0 grados. Se han aprovechado los trozos sobrantes del corte de dimensiones 100mmx300mm para alcanzar las 12 láminas necesarias en esta orientación.
- 10 láminas de 300mmx500mm para formar las capas a 90 grados.

Las herramientas empleadas para el corte han sido escuadra y cartabón, cúter y regla para medir, tal y como aparece en la izquierda de la Figura 2-2(a). En la Figura 2-2 (b) aparecen las láminas a 0 grados y a 90 grados selladas en una bolsa de plástico para conservarlas en el congelador tras su corte, pues la fabricación se realizó otro día.

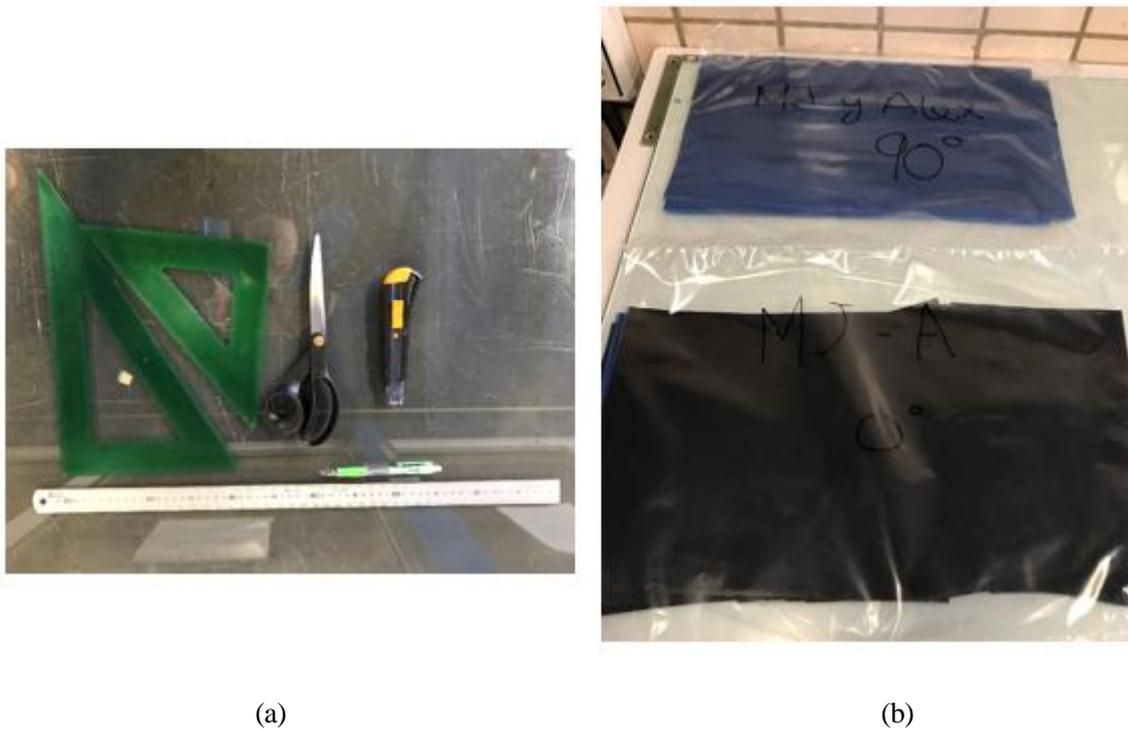


Figura 2-2. (a) Utensilios empleados en el corte de las láminas; (b) láminas cortadas.

2.3.2 Apilado de las láminas

Una vez cortadas todas las láminas de material necesarias se ha procedido al apilado de las mismas para conformar cada uno de los paneles con su correspondiente secuencia de apilado. Este proceso se ha llevado a cabo de manera manual, ejerciendo presión sobre las láminas mediante un útil o espátula de Nylon. En la Figura 2-3 pueden verse tanto (a) los útiles empleados como (b) la manera en que se ha ejercido la presión.

Para apilar se ha colocado la primera lámina con el papel protector que trae el pre-preg de fábrica sobre una superficie plana, previamente limpiada con acetona para evitar que entren en contacto con el material restos de polvo o de material sobrante del trabajo previo. A continuación, se han ido colocando el resto quitando este papel de forma que se han ido adheriendo unas a otras.



Figura 2-3. (a) Espátulas empleadas en el apilado manual; (b) aplicación de la presión manual.

2.3.3 Fabricación de la bolsa de vacío

Para aplicar el ciclo de curado que permite obtener paneles totalmente compactos se introducen los laminados en una bolsa de vacío. Esta bolsa tiene una triple función: evitar la inclusión de aire entre las distintas láminas, evitar la contaminación de los laminados mediante partículas de polvo, suciedad o humedad y proteger el material del aire caliente que recibirá en el autoclave y que permite que la resina fluya uniformemente, de forma que esta no se queme.

Los materiales necesarios para fabricar una bolsa de vacío son, tal y como se recoge en la Figura 2-4:

En la realización de la bolsa de vacío se han seguido los siguientes pasos:

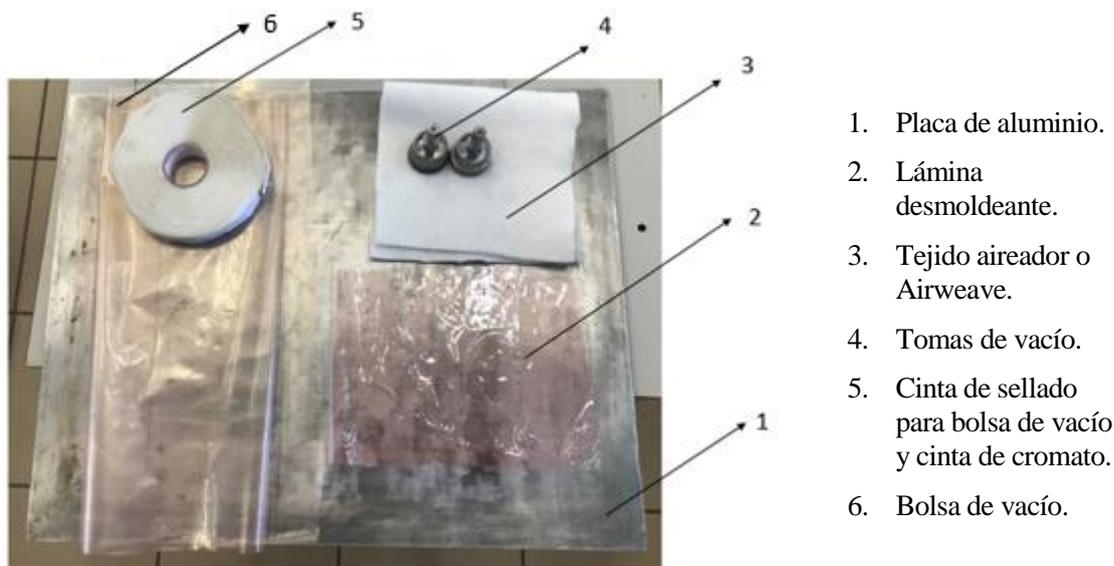


Figura 2-4. Materiales empleados en la fabricación de la bolsa de vacío.

- Colocación de una plancha de aluminio sobre una superficie plana. Esta plancha ha de ser recubierta con una capa de teflón.
- Se retiran los papeles protectores externos del material anteriormente apilado y se coloca este sobre el teflón, dejando márgenes y espacio suficiente para colocar las tomas de vacío, así como un cordón de corcho alrededor de cada lámina que evite que la resina escape durante el curado (Figura 2-5 (a)).
- Colocar el retenedor de corcho y recubrir el conjunto con una nueva capa de teflón (Figura 2-5 (b)).
- Recubrir el conjunto con una capa de *airweave* (tejido esponjoso que previene pinchazos en la bolsa de vacío y los consiguientes escapes) y la bolsa de vacío. Bajo la bolsa se colocan las tomas de vacío (Figura 2-5 (c) y (d)).
- Adherir la capa exterior de la bolsa a la placa metálica para evitar que entre aire en la bolsa una vez realizado el vacío. Se moldea el cromato de manera que todas las posibles vías de entrada de aire queden cerradas.

Una vez hecho esto queda conformada la bolsa de vacío, por lo que resta colocar las partes superiores de las tomas y activar el compresor para realizar el vacío (Figura 2-5 (e)). Alcanzado el vacío se ha comprobado que no existiera en la bolsa ningún tipo de escape de aire con el fin de que el proceso se ejecute adecuadamente.

Terminado el proceso se iniciará el curado en autoclave (Figura 2-5 (f)).

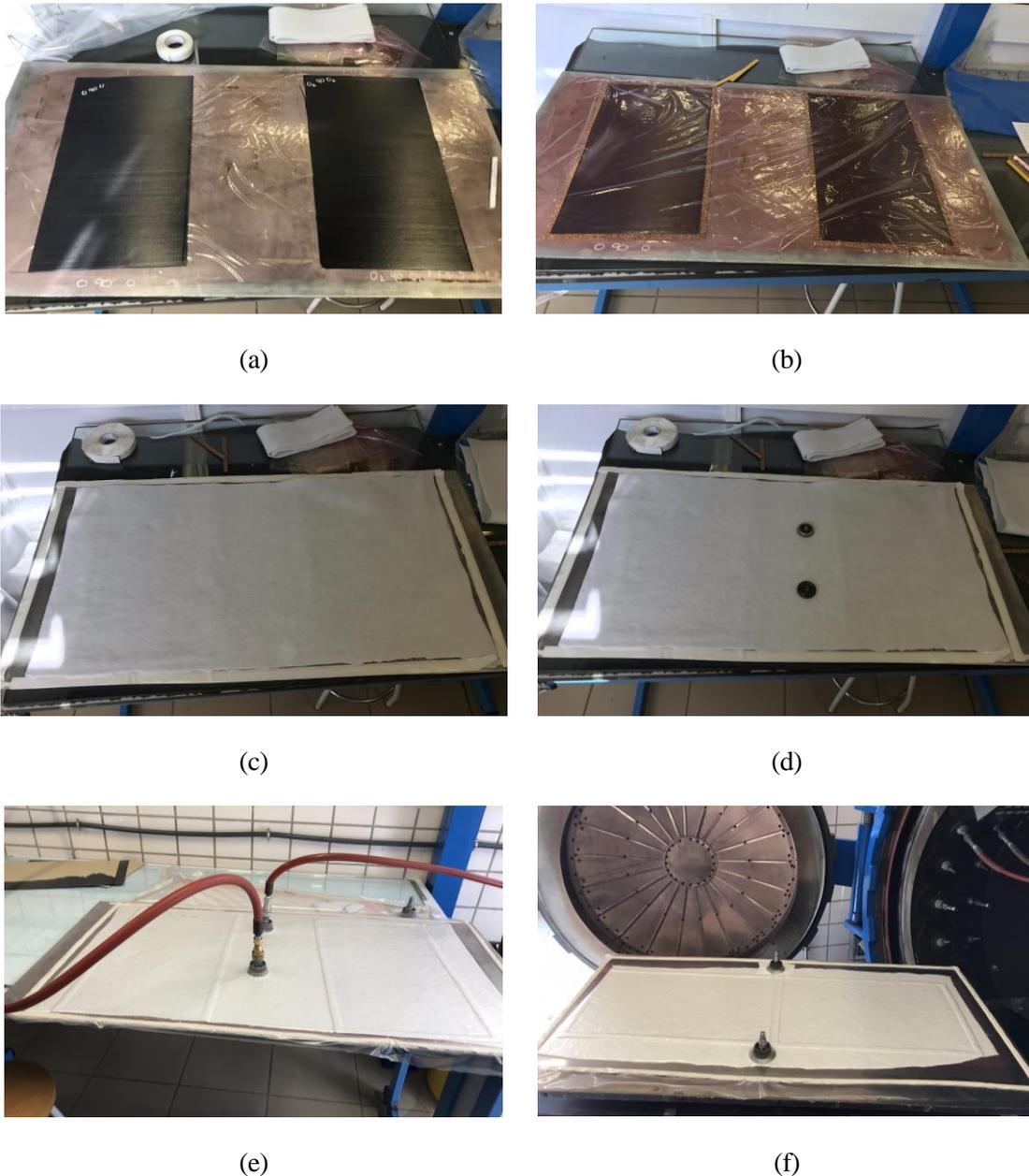


Figura 2-5. Distintas fases de la preparación de una bolsa de vacío.

Se han preparado en total dos bolsas de vacío en la realización de este proyecto, una por cada dos laminados.

2.3.4 Curado en autoclave

El siguiente paso fue introducir la bolsa de vacío en el autoclave para el curado de los laminados. Se define el curado como el proceso de secado o polimerización de la matriz para formar los enlaces permanentes entre la matriz y las fibras en una lámina y a su vez entre las propias láminas [2]. Aunque existen distintos métodos para realizar el curado el método más extendido en los materiales pre-preg es el método de bolsa de vacío, presión o autoclave.

Antes de aplicar el ciclo de curado se ha de comprobar que no existen pérdidas de aire en la bolsa de vacío. Para ello se conectan las tomas de vacío de la bolsa a las del autoclave y se aplica vacío hasta alcanzar en la bolsa los 0.8 bar de presión. Cuando se alcanzan, se corta el vacío y se espera unos minutos. Si no baja la presión dentro de la bolsa significa que el vacío se ha realizado correctamente y no tiene perdidas. Una vez comprobado este aspecto se procede a introducir la bolsa en el autoclave y a someter los paneles al ciclo de curado.

2.3.5 Resanado de los paneles

Una vez se tienen los paneles curados se procede al resanado de estos. El resanado es un proceso que consiste en eliminar, por un lado, el cerco de corcho con el que se rodearon los paneles a la hora de introducirlos en la bolsa de vacío para evitar que la resina fluyera, y, por otro, cualquier posible imperfección que haya podido surgir como consecuencia del proceso de fabricación como, por ejemplo, el que no todas las láminas lleguen perfectamente a los bordes y se produzcan en estas zonas huecos de material.

Para llevar a cabo el resanado se ha usado una máquina de corte como la que se muestra en la Figura 2-6. Esta máquina consta de un disco de diamante que corta mediante abrasión, siendo refrigerado en todo momento por agua, y de una bancada de movimiento manual sobre la que se coloca la pieza. Es importante tener en cuenta la dirección de las fibras en cada laminado a la hora de cortar y mantenerla. Para ello la máquina de corte consta de un apoyo que ayuda a mantener la perpendicularidad y, además, se ha hecho uso de una escuadra para encuadrar.



Figura 2-6. Máquina de corte.

2.3.6 Corte de las probetas

Una vez resanados los paneles se ha procedido al corte de los mismos mediante la misma máquina de corte. Para realizar el corte con las medidas deseadas se ha empleado un equipo de medición adjunto a la máquina que consiste en un calibre que permite regular la distancia entre el soporte metálico que sirve de apoyo para el corte y la línea de corte. Se ha marcado 15 mm y se ha procedido al corte de las probetas.

2.3.7 Trazabilidad de las probetas obtenidas

Conforme se fueron cortando las probetas se fueron numerando del 1 al 29. Además, se añadió la secuencia de apilado a cada una de las probetas para que todas quedaran perfectamente designadas.

3 PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS: PROCESO DE LIJADO Y PULIDO

Tal y como se ha comentado en el capítulo introductorio, antes de ensayar las probetas (exceptuando las probetas empleadas en determinar la resistencia del laminado), se han lijado y pulido para, por un lado, poder detectar mientras se realiza el ensayo si se abre alguna grieta transversal o algún daño que pueda ser visto mediante la lupa y, por otro, tener la seguridad de que las probetas no han sido manipuladas tras el ensayo no habiendo sido eliminada ninguna capa de material para su posterior análisis en el microscopio.

Para comenzar, se expondrá el material necesario para conseguir en las probetas una superficie que permita su observación a escala microscópica con el equipo disponible. A continuación, se comentará el proceso experimentado en este proyecto para llegar de la secuencia y útiles de pulido de anteriores trabajos a los finalmente empleados y se expondrán una serie de recomendaciones de cara a proyectos futuros.

3.1 Material empleado en el lijado y pulido: lijas y paños.

Para realizar el pulido y lijado de las muestras se procede de la misma manera, variando únicamente el grano del paño y el líquido empleado. Los equipos usados son los mostrados en la Figura 3-1:

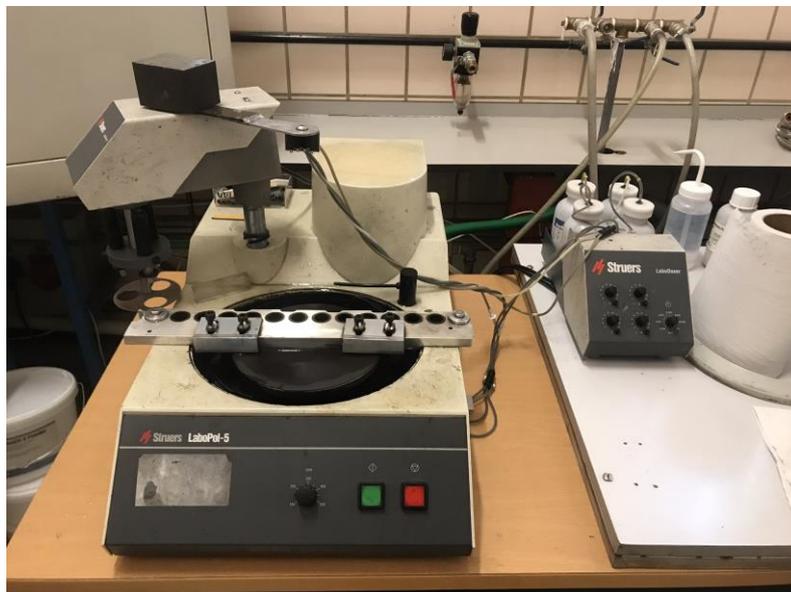


Figura 3-1. Equipo de lijado y pulido de las probetas.

- **Pulidora *LaboPol-5***: consta de un plato giratorio en el que se han de colocar las lijas y paños para realizar el proceso. Permite regular la velocidad de giro del plato. Consta de un grifo que proporciona agua, el cual se puede abrir y cerrar de manera que proporcione lubricación de forma continua en el proceso de lijado y sirva para aclarar las probetas. Además, está conectada al sistema de dosificación de líquido para cada uno de los paños empleados en el pulido.
- **Sistema de dosificación automático *LaboDoser* de *Struers***: permite el suministro continuo y uniforme, de forma automática, de las soluciones de diamante empleadas durante el proceso de pulido.

- **Soporte rígido de apoyo a las probetas:** se trata de un soporte diseñado por el personal de laboratorio que permite mantener las probetas de forma perpendicular a la lija con la menor vibración de la probeta con la rotación del disco. Además, facilita la aplicación uniforme de fuerza.
- **Taco de superficie plana:** para aplicar la presión lo más uniformemente posible se decidió aplicar con un taco de aproximadamente la longitud entre sujeciones del soporte rígido a la probeta.

En cada fase del proceso se emplea un disco con una determinada superficie que determina si se trata de un proceso de lijado (eliminación de material para evitar posibles rayones y marcas profundas anteriores) o pulido (superficie de espejo). Los discos son de 250 mm, al igual que el soporte de la lijadora, y se emplea cada uno junto a su líquido correspondiente. Se emplea agua para las lijas y un líquido formado por una suspensión estable de base acuosa, que contiene una mezcla de diamantes de alto rendimiento y lubricante refrigerante, para los paños. A continuación se detallan cada uno de los paños empleados en las muestras bajo estudio.

- **Papel de lija para pulidora SiC#320, SiC#500, SiC#800 y SiC#1200:** el número indica el tamaño de grano de la lija. Una muestra de una lija SiC#320 se puede observar en la Figura 3-2 (a).
- **Disco MD-Largo 9 μm :** disco con fijación magnética que posee incrustaciones de diamante para un paso de molienda fina en materiales con dureza 40-150 HV. El paño empleado es el de la Figura 3-2 (b).
- **Disco MD-Dac 3 μm :** paño de pulido para todo tipo de materiales, fabricado con un tejido satinado de acetato (Figura 3-2 (c)). Su rango abrasivo es 9-3 μm , y tiene dureza y resiliencia media. Está provisto de fijación magnética.
- **Disco MD-Nap 1 μm :** paño de pulido para todo tipo de materiales, fabricado con pelo sintético corto (Figura 3-2 (d)). Su rango abrasivo inferior a 1 μm , su resiliencia muy alta y su dureza muy baja. Posee fijación magnética.
- **Líquido DiaPro Allegro/Largo 9 μm :** para un alto rendimiento en el uso del disco MD-Largo.
- **Líquido DiaPro Dac 3 μm :** para pulido materialográfico de alto rendimiento y correcto nivel de lubricación con el disco MD-Dac.
- **Líquido DiaPro Nap B1 1 μm :** para pulido de alto rendimiento de materiales duros (HV>150) usando el disco MD-Nap.

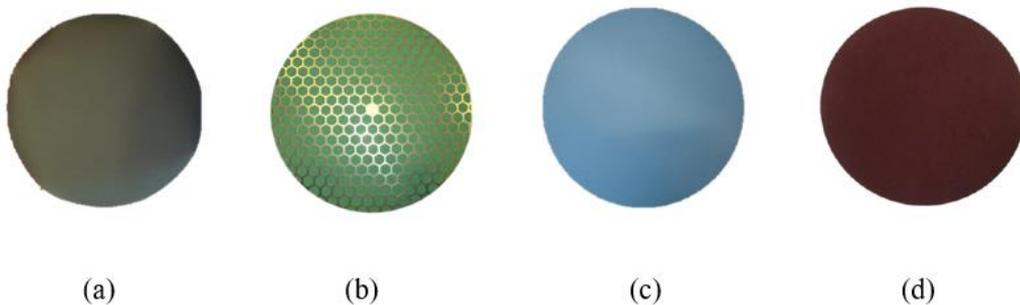


Figura 3-2.(a) Lija SiC#320; (b) disco MD-Largo 9 μm ; (c) disco MD-Dac 3 μm ; (d) disco MD-Nap 1 μm .

3.2 Evolución del proceso durante el proyecto

En los inicios del trabajo se comenzó a lijar y pulir siguiendo la metodología de proyectos anteriores [1]. En estos proyectos de lijado y pulido manual se había introducido el soporte rígido para apoyar las probetas pero no los agarres que permitían fijar las probetas al soporte. En la Tabla 3-1 se presenta la secuencia de pulido que se utilizaba:

Tabla 3-1. Secuencia de lijado y pulido empleada en proyectos anteriores.

Lija/Paño	Velocidad de giro del disco (RPM)	Tiempo (min)
<i>Lija SiC #320</i>	300	5
<i>MD-Largo 9 μm</i>	150	6
<i>MD-Dac 3 μm</i>	150	5
<i>MD-Nap 1 μm</i>	150	5

Se decidió empezar a lijar con las probetas de secuencia de apilado en las que se pretende estudiar el efecto de las laminas a 90°, pues al haber sido heredadas de otro proyecto estaban disponibles desde del principio.

El primer problema que se encontró fue el hecho de que el diámetro interior de la pulidora cuenta con un filo a una altura ligeramente superior al plato donde se colocan las lijas y paños, filo en el que la probeta se quedaba ligeramente apoyada debido a que su longitud era superior a la de dicho diámetro interior. Para solucionarlo se optó por cortar las probetas empleando la misma máquina de corte con disco de diamante que ya se empleó en la fabricación de las probetas, obteniendo probetas más cortas.

A pesar de esto, se observó que los resultados obtenidos no eran los esperados. Tras analizar la superficie de la probeta tras ser lijada y pulida en el microscopio, esta aparecía manchada y en la mayor parte de la sección no era posible distinguir bien las fibras y la matriz. Tras múltiples pruebas realizadas, cambiando las secuencias e introduciendo lijas de tamaño intermedio entre la lija de grano #320 y el paño de 9 μ m, se llegó a la conclusión de que las probetas vibraban en el momento en el que el disco iba más rápido (300 RPM) no manteniéndose en todo momento perfectamente verticales a la lija. Por ello, se decidió añadir unos agarres metálicos a la probeta que garantizaran que esta no rotara alrededor de su eje durante el lijado (estos agarres pueden verse en la Figura 3-1).

A pesar de que introducir estos agarres mejoró el resultado superficial este estaba lejos aún de ser el deseado. Se volvió a probar con la primera secuencia y con otras muchas. Algunos de los cambios que se probaron fueron:

- Añadir lijas de tamaño intermedio entre la lija de grano #320 y el paño de 9 μ m e ir variando el tiempo que se mantenía cada una de ellas así como las revoluciones.
- Cambiar el modo en el que se aplicaba la presión manual.
- Suprimir el paño de 9 μ m y emplear todas las lijas disponibles desde grano #320 a 9 μ m.
- Introducir el taco de superficie plana de longitud ligeramente inferior a la longitud entre los agarres a la probeta para aplicar la presión manual.

Finalmente, y tras las pruebas realizadas, se llegó a la conclusión de que el proceso que mejores resultados arrojaba y, que, por tanto, se ha empleado en el proyecto, es el mostrado en la Tabla 3-2:

Tabla 3-2. Secuencia de lijado y pulido empleada I.

Lija/Paño	Velocidad de giro del disco (RPM)	Tiempo (min)
<i>Lija SiC #320</i>	300	5
<i>Lija SiC #800</i>	300	4
<i>MD-Largo 9 μm</i>	150	6
<i>MD-Dac 3 μm</i>	150	5
<i>MD-Nap 1 μm</i>	150	5

Conforme avanzaba el proyecto llegó un momento en el que se agotaron las lijas de grano #800 por lo que se volvió a variar la secuencia encontrando otra que permitía obtener buenos resultados. En la Tabla 3-3 se recoge la secuencia de lijado y pulido que se empleó a partir de ese momento.

Tabla 3-3. Secuencia de lijado y pulido empleada en el presente proyecto II.

Lija/Paño	Velocidad de giro del disco (RPM)	Tiempo (min)
<i>Lija SiC #320</i>	300	5
<i>Lija SiC #500</i>	300	4
<i>Lija SiC #1200</i>	300	4
<i>MD-Largo 9 μm</i>	150	6
<i>MD-Dac 3 μm</i>	150	5
<i>MD-Nap 1 μm</i>	150	5

Una vez obtenida una buena secuencia de lijado y pulido se procedió a aplicar la misma a las probetas fabricadas en este proyecto, en las que se pretende estudiar el efecto de la lamina a 0°, y que, tal y como se comentó en el capítulo 2, no cuentan con tacos. Al hacer esto se comprobó que, sin tacos, estas probetas eran demasiado delgadas para que fueran sujetados por los agarres por lo que volvía a aparecer los problemas de acabado superficial que aparecían al principio. Para solucionar esto se decidió lijar y pulir tantas probetas a la vez como fueran necesarias para garantizar un buen agarre, comprobándose que mejoraban los resultados.

El problema que introduce esto es que no todas las probetas están cortadas con un ancho de 15 mm exactos, de manera que hay algunas ligeramente más anchas que otras y por tanto estas son las que más presión reciben durante el proceso. Este hecho trajo como resultado un peor acabado superficial en las probetas.

3.3 Recomendaciones para proyectos futuros

Tras todos los problemas observados, en este apartado se pretende hacer una serie de recomendaciones de cara a proyectos similares realizados dentro del departamento.

En primer lugar, se ha observado que añadir granos cada vez más finos entre la lija de grano #320 y paño de 9 μm mejora los resultados. Un compromiso entre calidad del acabado y tiempo se ha alcanzado añadiendo a la secuencia inicial (Tabla 3-1) la lija de grano #800 durante 4 minutos. De cara a proyectos futuros se recomienda comenzar con esta secuencia y si no se obtienen los resultados deseados ir disminuyendo paulatinamente el grano de la lija desde el de #320 al más pequeño disponible.

En segundo lugar, se ha de aplicar la presión lo más uniformemente posible, la forma óptima encontrada en este proyecto ha sido presionar hacia la superficie del disco de la lija con un taco de cara plana y sujetarla en la parte central contra el soporte rígido. Se ha de que el objeto con una de sus superficies plana empleado tenga una longitud tal que permita presionar toda la sección de la probeta que queda entre mordazas.

Por último, se ha observado que en las probetas que contaban con tacos, y por tanto con una mayor superficie de apoyo, se obtenían mejores resultados, a pesar de que estas probetas han debido ser lijadas una a una y, en el caso de las que no contaban con tacos, se podía aplicar el proceso a varias simultáneamente.

4 ENSAYOS MECÁNICOS

Los ensayos mecánicos sirven para comprobar cuál es la respuesta que ofrecen ciertos materiales al ser manipulados. Mediante distintos esfuerzos mecánicos se fuerza al límite el material, permitiendo caracterizarlo mecánicamente. El presente trabajo se centra en el análisis de la resistencia y el daño sufrido por materiales sometidos a tracción en la dirección perpendicular a la fibra en la parte central del laminado, para lo cual se procede de la siguiente forma:

- Determinación de la resistencia del laminado en la dirección de aplicación de la carga (X_t). Para determinar esta se llevan 5 probetas de cada panel hasta la carga de rotura obteniendo la fuerza máxima que aguanta cada una de ellas F_R . La resistencia del laminado se expresa en forma de tensión (MPa), para su cálculo se aplicará la Ecuación 4-1:

$$\sigma = \frac{F_R}{A} \quad (4-1)$$

Donde A se corresponde con el área de la sección resistente (sección de la probeta).

Para evaluar la dispersión de los resultados se emplearán los siguientes indicadores:

Valor medio $\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (4-2)$

Desviación típica $s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (4-3)$

Coefficiente de variación $C. C. = \frac{s}{\bar{X}} \cdot 100 \quad (4-4)$

Diferencia relativa porcentual $diferencia_R = \frac{|X_i - \bar{X}|}{\bar{X}} \quad (4-5)$

- Análisis microscópico del daño sufrido para distintos estados de carga que se corresponden al momento que:
 - 1) Se escucha el primer aviso sonoro de rotura en la capa a 90 grados.
 - 2) Aumento progresivo de carga hasta encontrar la primera grieta transversal.

En el análisis del daño sufrido por cada laminado se ha tenido en cuenta la deformación a la que se ha llegado para cada uno de los estados de carga analizados. Esta se ha determinado a partir de la medida del extensómetro, teniendo en cuenta que este tiene una apertura (L) de 50 mm.

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (4-6)$$

$$E = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \varepsilon} \quad (4-7)$$

- Comparación de resultados entre cada panel dependiente del efecto que se esté comparando: efecto de la lámina a 90 grados y a 0 grados.

Los ensayos a los que han sido sometidas las probetas han sido realizados en el Laboratorio de Elasticidad y Resistencia de Materiales (LERM), valiéndose por tanto de los equipos y software allí disponibles. A continuación, se detallan estos, así como los distintos ensayos realizados.

4.1 Equipos y software

A la hora de llevar a cabo el ensayo de las probetas en el laboratorio se han usado los siguientes equipos:

- Máquina Universal de Ensayos Instron 4483 con célula de carga de 15000 kg (Figura 4-1(a)).
- Máquina Universal de Ensayos Instron 4482 con célula de carga de 10000 kg (Figura 4-1(b)).



Figura 4-1. Máquina Universal de Ensayos Instron 4483 (izquierda) y Máquina Universal de Ensayos Instron 4482 (derecha).

- Lupa para ver la evolución de las grietas *in situ* (Figura 4-2).



Figura 4-2. Muestra de la lupa colocada para visualizar *in situ* la aparición de la primera grieta durante el ensayo.

- Extensómetro 2630-112 de 50 mm de apertura (Figura 4-3).

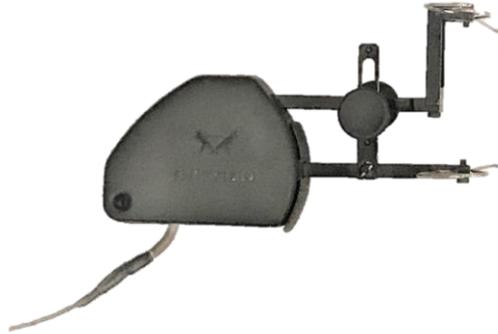


Figura 4-3. Extensómetro 2630-112.

- Ordenador provisto de tarjeta de adquisición de datos y software de Gestión de Máquinas Universales de Ensayos Instron, *Test Control Instron Series 44 V17-6*.

4.2 Procedimiento experimental

El primer paso a seguir para realizar los ensayos requeridos ha sido medir las dimensiones de las probetas. El software empleado graba datos de fuerza (N) en función de la apertura del extensómetro (mm). Para poder analizar cada probeta en términos de tensión (MPa) es de vital importancia tener correctamente caracterizada la sección, por lo que se han realizado medidas de espesor (h) y ancho (b) de cada probeta, siguiendo lo especificado en la norma UNE-EN 2561:1995 [4]. Esta norma detalla que tanto el ancho como el espesor son la media aritmética de 3 medidas: una en el centro de la probeta y dos en dos puntos opuestos a 30 mm del centro.

Para realizar las medidas se ha empleado un pie de rey tal y como el que aparece en la Figura 4-4.



Figura 4-4. Pie de rey.

Como se ha comentado en el capítulo 3, todas las probetas a excepción de las llevadas a rotura se han sometido a un proceso de lijado y pulido antes del ensayo para su posterior visualización en el microscopio. En estas probetas la medida se ha realizado después de este proceso de preparación debido a que este elimina un poco de material.

Una vez determinadas las dimensiones de cada probeta estas están listas para ser ensayadas. Para ello se hizo necesaria la preparación de una de las máquinas de tracción, lo que consta de dos pasos: asegurar que la célula de carga montada en la máquina es capaz de generar la fuerza de tracción suficiente y colocar las mordazas. El hecho de escoger unas mordazas apropiadas es de suma importancia, ya que unas mordazas con una apertura demasiado grande podrían no cerrar sobre la probeta correctamente y que esta resbalara durante el ensayo, mientras que con unas demasiado pequeñas no sería posible introducir la

probeta. Se eligieron unas mordazas cuya cara interior es plana y rugosa para asegurar la sujeción de la mordaza, con una apertura máxima de 6 mm, lo cual supera la dimensión de la superficie de agarre sin ser excesiva. En la Figura 4-5 se presenta una fotografía de la mordaza empleada.



Figura 4-5. Mordaza empleada en los ensayos de tracción.

Una vez preparada la máquina de ensayo se procede del siguiente modo:

- Calibración y balanceo de la máquina.
- Colocación de la probeta. Este punto es clave para realizar el ensayo de forma adecuada, pues debemos asegurar que se mantengan los ángulos escogidos respecto la dirección de aplicación de la carga, de tal forma que las láminas de 90° estén realmente a 90° y las de 0° a 0° respecto a esta dirección. Para centrar y alinear la probeta se ha hecho uso de una escuadra.
- Sujeción del extensómetro a la probeta.
- Conectar la máquina de ensayo con el ordenador pulsando la tecla "IEE488" del panel de control.
- Iniciar el programa *Test Control Instron Series 44 V17-6*.
- En la primera de las pantallas que ofrece el programa se marca el tipo de ensayo (*Tracción en sección rectangular con extensómetro (Resistencia, Límite, Módulo y deformación en rotura)*), el nombre elegido (*MJ-Secuencia probeta-Número de probeta*), el material (*Fibra de carbono*), la norma empleada (*sin especificar*), el cliente (*LERM*), el número de probetas que se deben ensayar (*1*), si estas han sufrido mecanizado (*sin especificar*) y el acondicionamiento de la probeta (*sin especificar*).
- La segunda pantalla (Figura 4-6) permite completar los datos de la probeta a ensayar, iniciar el ensayo y visualizar en pantalla los datos leídos de fuerza (N) y apertura del extensómetro (mm). En primer lugar, se han rellenado los datos del ensayo indicando el espesor (h) y el ancho de la probeta (b), así como la velocidad de ensayo. Esta se ha variado durante la realización del proyecto entre 0.2 y 0.5 mm/min. En segundo lugar, se ha reseteado la grafica pulsando los comandos "Reset", "Bal" y limpiar gráfica. A continuación, se da inicio al ensayo pulsando la flecha hacia arriba. Una vez realizado el ensayo se pulsa la parada y se graban los resultados dándole al icono de grabar.

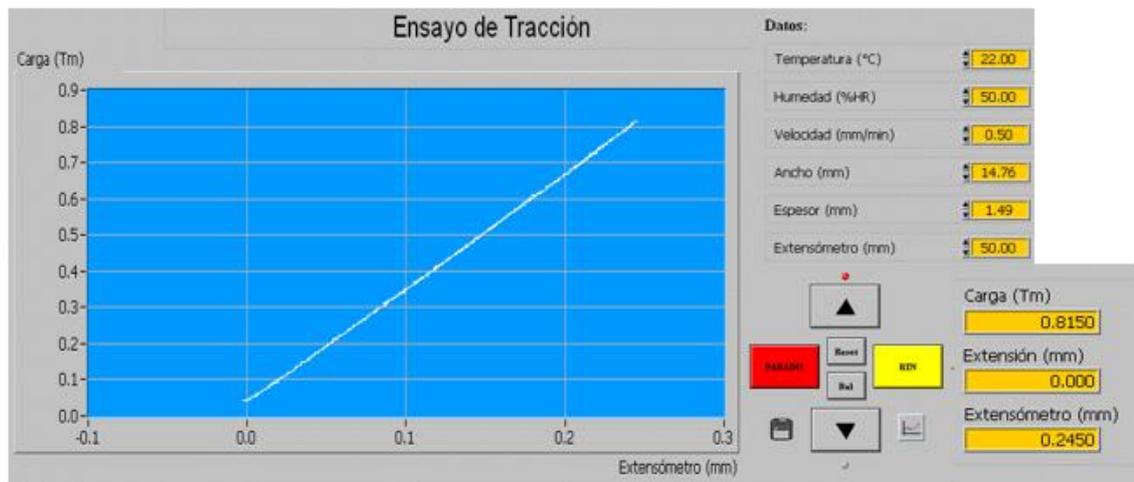


Figura 4-6. Programa de gestión de Máquinas Universales de Ensayos Instron. Esquema pantalla 2.

Se ha decidido separar los resultados arrojados por los ensayos en dos capítulos independientes. Uno en el que se analizan las probetas en las que se pretende estudiar el efecto que tiene variar el espesor de las láminas a 90° (Capítulo 6) respecto a la dirección de aplicación de la carga y otro en el que se estudia el efecto de variar las láminas a 0° (Capítulos 7 y 8).

5 CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE LOS LAMINADOS

Tal y como se comentó en el capítulo anterior el primer paso fue determinar la resistencia a rotura de cada uno de los laminados.

La resistencia de los laminados ha sido determinada llevando a rotura 5 probetas de cada laminado.

En las probetas en las que se pretende estudiar la influencia del espesor de las láminas a 90 grados la resistencia a rotura fue determinada en un proyecto anterior [1]. Estas probetas están fuera de la nomenclatura que se ha seguido con las demás, por lo que se designará cada probeta mediante un número seguido de la letra R para hacer referencia a su estado de rotura.

De cara a determinar la validez de los resultados se decidió calcular el reparto de carga teórico que se lleva cada lámina en el momento de la rotura y comparar con los resultados experimentales.

Para ello se partió de las propiedades del material dadas por el fabricante que aparecen recogidas en la Tabla 5-1.

Tabla 5-1. Propiedades del *BMS 8-256 D411_CL1_GR190 (T300 12K)*.

Propiedad	Valor	Propiedad	Valor
X_t	2207 MPa	E_{22}	10 GPa
X_c	1531 MPa	ν_{12}	0.3
Y_c	125 MPa	ν_{21}	0.02127
Y_t	81 MPa	G_{12}	4.7 GPa
S	114 MPa	α_1	$-6.7187 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$
E_{11}	141 GPa	α_2	$15.9375 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$

A continuación, se muestran los resultados obtenidos.

5.1 Caracterización mecánica de laminados [0₄,90_N,0₄]

➤ Laminado [0₄,90,0₄]

En la Tabla 5-2 se recogen las dimensiones de cada una de las probetas del laminado [0₄,90,0₄] que fueron llevadas a la rotura. A continuación, en la Tabla 5-3, se presenta el valor máximo de carga que soportó cada muestra antes de romperse, así como la tensión de rotura (calculada dividiendo entre el área de cada probeta recogida en la Tabla 5-1) y el módulo de Young (calculado a partir de la hoja de datos que se genera en el ensayo y la Ecuación 4-7). Por último, en la Tabla 5-4, se recogen los valores medios de cada una de estas magnitudes para dejar al laminado caracterizado mecánicamente. Además de los valores medios de carga a rotura, tensión de rotura y módulo de Young se han recogido los valores máximos y mínimos de cada magnitud y se han calculado la desviación típica y diferencias relativas porcentuales entre el valor medio y el máximo y el mínimo obtenido en los ensayos.

Se aprecia que las diferencias relativas están todas por debajo del 5% y que los valores de desviación típica y coeficiente de variación son pequeños, lo que indica que todas las probetas ensayadas muestran un comportamiento similar.

Tabla 5-2. Dimensiones de las probetas del laminado [0₄,90,0₄] llevadas a rotura.

Probeta	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Área (mm ²)
1.R	1,7487	14,9700	26,1775
2.R	1,7693	15,003	26,5459
3.R	1,7513	14,9433	26,1707
4.R	1,7717	14,9667	26,5159
5.R	1,7760	15,0267	26,6874

Tabla 5-3. Resultados de resistencia y rigidez para las 5 probetas del panel [0₄,90,0₄] llevadas a la rotura.

Probeta	Fuerza Rotura (N)	Resistencia (MPa)	Módulo de Young (GPa)
1.R	45626,31	1742,93	108,73
2.R	48588,93	1830,37	110,78
3.R	44635,50	1705,55	109,82
4.R	47715,84	1799,52	116,61
5.R	46077,57	1726,57	114,49

Tabla 5-4. Resultados promedio de la resistencia y la rigidez para el panel [0₄,90,0₄].

Panel [0 ₄ , 90, 0 ₄]	Fuerza (N)	Resistencia (MPa)	Rigidez (GPa)
Valor medio	46528,83	1760,38	112,05
Desviación Típica	1601,24	52,16	3,33
Coefficiente de variación	3,44	2,96	2,97
Valor máximo	48588,93	1830,37	116,62
Valor mínimo	44635,50	1705,55	108,73
Diferencia relativa Max.Porcentual (%)	4,43	3,98	4,07
Diferencia relativa Min.Porcentual (%)	0,97	0,99	1,13

En cuanto a los valores de carga de rotura obtenidos parecen coherentes. Teniendo en cuenta que antes de que se produzca la rotura teóricamente la carga se reparte de forma homogénea en la sección resistente [2] con un sencillo cálculo se puede ver una primera estimación la carga teórica que debería aguantar el laminado a rotura. La resistencia a tracción de una sola lámina a 0 grados es de $X_t=2207$ MPa el área media de la sección transversal de las probetas que nos ocupan es de $A_{st_{[0_4,90,0_4]}}=24,4186$ mm². Si el laminado estuviera únicamente formado por laminas a 0 grados y fuera completamente homogéneo, idealmente debería aguantar una carga en Newton de $F_{rotura-ideal} = X_t \cdot A_{st_{[0_4,90,0_4]}}$. Teniendo en cuenta que son las láminas a 0 grados las que aportan resistencia al laminado (las láminas formadas por fibras perpendiculares a la dirección de aplicación de la carga rompen a valores de carga muy bajos cuando se ensayan por si solas) se calcula la fuerza de rotura ideal de este laminado:

$$F_{rotura-ideal_{[0_4,90,0_4]}} = X_t \cdot A_{st_{[0_4,90,0_4]}} \cdot \frac{n^\circ \text{ de láminas a } 0 \text{ grados}}{n^\circ \text{ de láminas del laminado}} = 51827,4224 \text{ N}$$

La fuerza de rotura media obtenida de forma experimental es de $F_{rotura-experimental_{[0_4,90,0_4]}}=46528,83$ N, es decir, se rompe antes de lo que dice la teoría. Este comportamiento está totalmente dentro de lo esperado si se tiene en cuenta la no homogeneidad de las muestras, posibles defectos introducidos en la fabricación o el estado tensional que genera la aparición de daño en la capa de 90 grados antes de la rotura.

Para estimar la diferencia entre el valor teórico y el experimental se va a aplica la ecuación 4-5:

$$\%diferencia_{teórico-experimental} = 10,23\%$$

➤ Laminado [0,90₂,0₄]

La forma de proceder en el resto de ensayos ha sido la misma que para el laminado [0₄,90,0₄].

En la Tabla 5-5 se muestran las dimensiones de las probetas del laminado [0₄,90₂,0₄] llevadas a la rotura. En la Tabla 5-6 los resultados de los ensayos de rotura realizados sobre estas muestras y, por último, en la Tabla 5-7 los valores medios de cada magnitud y parámetros para analizar la dispersión de los resultados entre unas muestras y otras. Comparando los resultados con los del laminado [0₄,90,0₄] se aprecian diferencias relativas y coeficiente de variación mayores lo que es indicativo de una mayor heterogeneidad del laminado.

Tabla 5-5. Dimensiones de las probetas del laminado [0₄,90₂,0₄] llevadas a rotura.

Probeta	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Área (mm ²)
1.R	1,9067	15,0533	28,7017
2.R	1,9437	15,0300	29,2133
3.R	1,9232	15,0567	28,9690
4.R	1,9307	15,0533	29,0630
5.R	1,9430	15,0200	29,1839

Tabla 5-6. Resultados de resistencia y rigidez para las 5 probetas del panel [0₄,90₂,0₄] llevadas a la rotura.

Probeta	Fuerza Rotura (N)	Resistencia (MPa)	Módulo de Young (GPa)
1.R	45881,37	1570,56	98,50
2.R	43595,64	1504,90	90,84
3.R	40868,46	1406,20	109,54
4.R	48176,91	1650,81	98,20
5.R	39004,56	1347,76	106,04

Tabla 5-7. Resultados promedio de la resistencia y la rigidez para el panel [0₄,90₂,0₄].

Panel 90 ₂	Fuerza (N)	Resistencia (MPa)	Rigidez (GPa)
Valor medio	43433,47	1492,05	100,41
Desviación Típica	3698,42	122,11	7,33
Coefficiente de variación	8,51	8,18	7,30
Valor máximo	48176,91	1650,81	109,55
Valor mínimo	39004,56	1347,76	90,84
Diferencia relativa Max.Porcentual (%)	10,92	10,64	9,53
Diferencia relativa Min.Porcentual (%)	2,13	0,86	1,91

Repitiendo el cálculo de la fuerza teórica que debería aguantar el laminado se ve que, al igual que sucedía con el laminado [0₄,90,0₄], se obtiene un valor superior al experimental pero del mismo orden. Esta desviación se achaca a los mismos motivos: heterogeneidad de las probetas, defectos de fabricación y efecto del daño previo en la capa de láminas a 90.

$$F_{rotura-ideal_{[0_4,90_2,0_4]}} = X_t \cdot A_{St_{[0_4,90_2,0_4]}} \cdot \frac{n^\circ \text{ de láminas a } 0 \text{ grados}}{n^\circ \text{ de láminas del laminado}} = 51247,5994N$$

$$A_{St_{[0_4,90_2,0_4]}} = 29,0256 \text{ mm}^2$$

$$F_{rotura-experimental_{[0_4,90_2,0_4]}} = 43433,4754N < F_{rotura-ideal_{[0_4,90_2,0_4]}}$$

$$\%diferencia_{teórico-experimental} = 15,25\%$$

➤ **Laminado [0₄,90₄,0₄].**

En la Tabla 5-8 se muestran las medidas de las probetas del laminado [0₄,90₄,0₄] llevadas a rotura.

Tabla 5-8. Dimensiones de las probetas del laminado [0₄,90₄,0₄] llevadas a rotura.

Probeta	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Área (mm ²)
1.R	2,2693	15,0667	34,1913
2.R	2,3057	15,0100	34,6080
3.R	2,3687	15,0467	34,1359
4.R	2,3157	15,0200	34,7813
5.R	2,2940	15,0267	34,4711

En la Tabla 5-9 se recogen los valores de carga a rotura obtenida en cada ensayo, así como la tensión de rotura y el módulo de Young calculados, viéndose que estos se mueven en un rango estrecho.

Tabla 5-9. Resultados de resistencia y rigidez para las 5 probetas del panel [0₄,90₄,0₄] llevadas a la rotura.

Probeta	Fuerza Rotura (N)	Resistencia (MPa)	Módulo de Young (GPa)
1.R	43311,15	1266,73	94,22
2.R	39446,00	1139,79	89,67
3.R	41731,74	1222,52	95,18
4.R	45194,67	1299,39	87,11
5.R	41790,60	1212,33	87,84

En la Tabla 5-10 se recogen los valores medios de cada una de las magnitudes: fuerza, resistencia y rigidez, así como los valores máximos y mínimos obtenidos de cada magnitud, la desviación típica y la diferencia relativa porcentual máximo y mínimo. Se aprecia un coeficiente de variación superior que al de los laminados [0₄,90,04] y [0₄,90₂,04] pero aún así dentro de lo esperado. Las diferencias relativas están dentro de lo obtenido para el resto de laminados analizados hasta ahora.

Tabla 5-10. Resultados promedio de la resistencia y la rigidez para el panel [0₄,90₄,0₄].

Panel 90 ₄	Fuerza (N)	Resistencia (MPa)	Rigidez (GPa)
Valor medio	42294,83	1226,94	112,05
Desviación Típica	4997,24	60,52	3,33

Coefficiente de variación	11,81	4,93	2,97
Valor máximo	45194,67	1299,39	116,61
Valor mínimo	39446,00	1139,79	108,73
Diferencia relativa Max.Porcentual (%)	6,85	7,10	4,07
Diferencia relativa Min.Porcentual (%)	1,19	0,36	1,13

En cuanto al valor de carga obtenido es coherente.

$$F_{rotura-ideal_{[0_4,90_4,0_4]}} = X_t \cdot A_{st_{[0_4,90_4,0_4]}} \cdot \frac{n^\circ \text{ de láminas a } 0 \text{ grados}}{n^\circ \text{ de láminas del laminado}} = 50667,717N$$

$$A_{st_{[0_4,90_4,0_4]}} = 34,4366 \text{ mm}^2$$

$$F_{rotura-experimental_{[0_4,90_4,0_4]}} = 42294,832N < F_{rotura-ideal_{[0_4,90_4,0_4]}}$$

$$\%diferencia_{teórico-experimental} = 16,53\%$$

➤ Laminado [0₄,90₈,0₄]

En la Tabla 5-11 se muestran las dimensiones del laminado [0₄,90₈,0₄] llevadas a rotura.

Tabla 5-11. Dimensiones de las probetas del laminado [0₄,90₈,0₄] llevadas a rotura.

Probeta	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Área (mm ²)
1.R	3,0203	14,9967	45,2949
2.R	3,0183	15,0067	45,2951
3.R	3,0083	14,9733	45,8058
4.R	3,0503	15,0167	45,8390
5.R	3,0593	14,9833	45,5062

En la Tabla 5-12 están los valores de fuerza de rotura, tensión de rotura y módulo de Young. Se observa que todas las probetas rompen a una carga muy similar.

Tabla 5-12. Resultados de resistencia y rigidez para las 5 probetas del panel [0₄,90₈,0₄] llevadas a la rotura.

Probeta	Fuerza Rotura (N)	Resistencia (MPa)	Módulo de Young (GPa)
1.R	45371,25	1001,68	87,21
2.R	44360,82	984,82	76,87
3.R	40633,02	887,07	83,81
4.R	42251,67	921,74	70,79
5.R	46254,15	1016,44	73,59

En la Tabla 5-13 se presenta el resumen de resultados. Se observan unos valores de los parámetros empleados para medir la desviación reducidos, lo que es un indicador de la validez del laminado fabricado.

Tabla 5-13. Resultados promedio de la resistencia y la rigidez para el panel [0₄,90₈,0₄].

Panel 90 ₈	Fuerza (N)	Resistencia (MPa)	Rigidez (Pa)
Valor medio	43725,10	961,05	78,20
Desviación Típica	2304,45	55,44	6,90
Coefficiente de variación	5,27	5,77	8,83
Valor máximo	46254,15	1016,44	87,21
Valor mínimo	40633,02	887,07	70,78
Diferencia relativa Max.Porcentual (%)	7,07	7,70	11,51
Diferencia relativa Min.Porcentual (%)	1,45	2,47	1,70

En cuanto al valor de carga a rotura obtenido se ve, al igual que en el resto de laminados [0₄,90_N,0₄]. considerados, está dentro de lo esperado.

$$F_{rotura-ideal_{[0_4,90_4,0_4]}} = X_t \cdot A_{st_{[0_4,90_4,0_4]}} \cdot \frac{n^\circ \text{ de láminas a } 0 \text{ grados}}{n^\circ \text{ de láminas del laminado}} = 50261,7767N$$

$$A_{st_{[0_4,90_4,0_4]}} = 45,5476 \text{ mm}^2$$

$$F_{rotura-experimental_{[0_4,90_4,0_4]}} = 43725,0988 < F_{rotura-ideal_{[0_4,90_4,0_4]}}$$

$$\%diferencia_{teórico-experimental} = 13,01\%$$

5.2 Caracterización mecánica de laminados [0_q,90,0_q]

Tal y como se ha comentado en la introducción de este trabajo se han fabricado 6 laminados a efectos de comparar con los que ya se contaba del proyecto anterior:

$$\begin{array}{ccc} [0,90,0] & [0_2,90,0_2] & [0_4,90,0_4] \\ [0,90_4,0] & [0_2,90_4,0_2] & [0_4,90_4,0_4] \end{array}$$

A diferencia de los laminados [0₄,90_N,0₄] estos han sido caracterizados mecánicamente mediante ensayos realizados durante el desarrollo del proyecto. A continuación se muestran los resultados obtenidos.

➤ Laminado [0,90,0]

En la Tabla 5-14 se muestran las dimensiones de las probetas del laminado [0,90,0] llevadas a la rotura. A continuación, en la Tabla 5-15, se muestran los valores de carga y tensión a los que ha roto cada muestra. En estas muestras no se ha calculado el módulo de Young porque no se ha colocado el extensómetro durante los ensayos. Por último, en la Tabla 5-16 se recogen los valores medios de cada magnitud, así como los valores máximos y mínimos de estos valores identificados en un ensayo en el momento de la rotura, y los valores de desviación típica, coeficiente de variación y diferencias relativas máximas y mínimas. A través de estos últimos se ve que la desviación de los resultados en este laminado es mayor que en el resto de laminados analizados hasta el momento.

Tabla 5-14. Dimensiones de las probetas del laminado [0,90,0] llevadas a rotura.

Probeta	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Área (mm ²)
0	0,6733	14,6180	9,8423
1	0,6857	15,3128	10,5000
2	0,6800	14,8300	10,0844
3	0,6798	15,0530	10,2340
4	0,68011	14,9875	10,1932

Tabla 5-15. Resultados de resistencia y rigidez para las 5 probetas del panel [0,90,0] llevadas a la rotura.

Probeta	Fuerza Rotura (N)	Resistencia (MPa)
0	9175,09	932,21
1	7531,73	717,31
2	7834,46	776,89
3	9625,96	940,59
4	9183,14	900,91

Tabla 5-16. Resultados promedio de la resistencia y la rigidez para el panel [0,90,0].

[0, 90, 0]	Fuerza (N)	Resistencia (MPa)
Valor medio	8629,59	848,66
Desviación Típica	46330	50,35
Coefficiente de variación	5,37	5,93
Valor máximo	9625,96	940,59
Valor mínimo	7531,73	717,31
Diferencia relativa Max.Porcentual (%)	11,55	16,95
Diferencia relativa Min.Porcentual (%)	6,32	8,7

En la Figura 5-1 se ve como han roto algunas de las probetas del laminado [0,90,0] llevadas a la rotura. Se ve que en contra de lo esperado algunas de ellas han roto por la zona de los tacos.

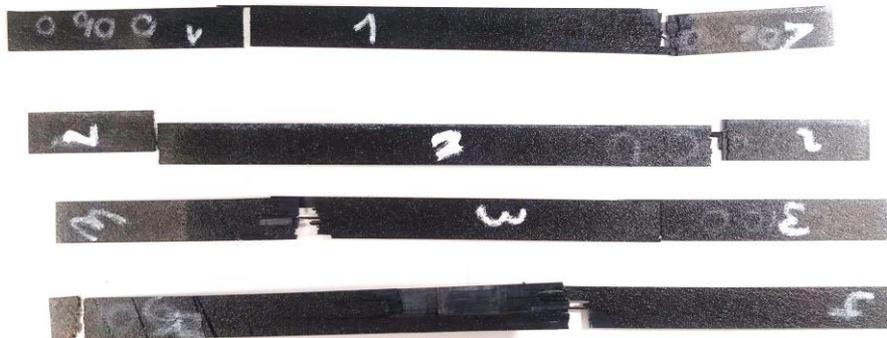


Figura 5-1. [0,90,0]: Probetas ensayadas hasta rotura.

A la hora de analizar el valor de carga a rotura obtenida se ve que, a diferencia de lo que ocurría en los laminados [0₄,90_N,0₄], la distancia respecto al valor teórico es bastante considerable. Esto podría ser indicativo de un mayor efecto del estado tensional que se genera en la lámina de 90 grados en la resistencia del laminado cuando el número de láminas a 0 grados a cada lado es muy reducido (una a cada lado en este caso).

$$F_{rotura-ideal_{[0,90,0]}} = X_t \cdot A_{st_{[0,90,0]}} \cdot \frac{n^{\circ} \text{ de láminas a } 0 \text{ grados}}{n^{\circ} \text{ de láminas del laminado}} = 14918,29N$$

$$A_{st_{[0,90,0]}} = 10,1393mm^2$$

$$F_{rotura-experimental_{[0,90,0]}} = 8629,5856 < F_{rotura-ideal_{[0,90,0]}}$$

$$\%diferencia_{teórico-experimental} = 42,16\%$$

➤ **Laminado [0₂,90,0₂]**

Las dimensiones de las probetas del laminado [0₂,90,0₂] llevadas a la rotura se recogen en la Tabla 5-17. A continuación, en la Tabla 5-18 se muestra la carga y tensión última que ha resistido cada muestra a tracción antes de romper. En la Tabla 5-19 se recogen los valores medios que permiten caracterizar el laminado, así como los parámetros de variación calculados para dar una idea de la heterogeneidad del laminado y de la validez de los resultados. Se ve que estos permanecen dentro de un rango aceptable.

Tabla 5-17. Dimensiones de las probetas del laminado [0₂,90,0₂] llevadas a rotura.

Probeta	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Área (mm ²)
1	1,1000	15,1403	16,6540
2	1,1081	15,0291	16,5330
3	1,1002	14,8777	16,3680
4	1,0733	14,9937	16,0928
5	1,0600	14,9700	15,8682

Tabla 5-18. Resultados de resistencia y rigidez para las 5 probetas del panel [0₂,90,0₂] llevadas a la rotura.

Probeta	Fuerza Rotura (N)	Resistencia (MPa)
1	19804,04	1189,14
2	19077,90	1153,93
3	20152,78	1231,23
4	17313,28	1075,84
5	21313,09	1343,13

Tabla 5-19. Resultados promedio de la resistencia y la rigidez para el panel [0₂,90,0₂].

[0, 90 ₂ , 0]	Fuerza (N)	Resistencia (MPa)
Valor medio	19486,28	1195,43
Desviación Típica	740,40	43,47
Coefficiente de variación	3,80	4,14
Valor máximo	21313,09	1343,13
Valor mínimo	17313,28	1075,84
Diferencia relativa	9,37	11,16

Max.Porcentual (%)		
Diferencia relativa Min.Porcentual (%)	3,42	0,56

En la Figura 5-2 se ven las probetas del laminado [0₂,90,0₂] llevadas a la rotura.



Figura 5-2. [0₂,90,0₂]: Probetas ensayadas hasta rotura.

Si comparamos el valor medio de carga obtenido con el experimental calculado a partir de las propiedades del laminado se observa que está por debajo, tal y como cabría esperar debido a la heterogeneidad del material fabricado, y que la diferencia con respecto al valor teórico está un rango intermedio entre las diferencias existentes para el laminado [0₄,90,0₄] y el [0,90,0].

$$F_{rotura-ideal_{[0_2,90,0_2]}} = X_t \cdot A_{st_{[0_2,90,0_2]}} \cdot \frac{n^\circ \text{ de láminas a } 0 \text{ grados}}{n^\circ \text{ de láminas del laminado}} = 26504,839N$$

$$A_{st_{[0_2,90,0_2]}} = 10,1393mm^2$$

$$F_{rotura-experimental_{[0_2,90,0_2]}} = 19486,282 < F_{rotura-ideal_{[0_2,90,0_2]}}$$

$$\%diferencia_{teórico-experimental} = 26,48\%$$

➤ Laminado [0₄,90,0₄]

El laminado [0₄,90,0₄] ha quedado caracterizado mecánicamente en la sección 5.1.

5.3 Caracterización mecánica de laminados [0_P,90₄,0_P]

➤ Laminado [0,90₄,0]

En la Tabla 5-20 aparecen las dimensiones de las probetas del laminado [0,90₄,0] llevadas a rotura. A continuación, en la Tabla 5-21 muestran los valores de los ensayos. Puede verse que una de las muestras, la probeta 5, ha roto a un valor muy inferior al resto pero que en general el comportamiento es bastante

homogéneo. En la Tabla 5-22, los valores medios de carga y tensión de rotura que dejan caracterizada la resistencia del laminado, así como una serie de parámetros para analizar si todos los valores oscilan alrededor de un mismo valor. Aquí se puede ver que a pesar de que existe una muestra que ha roto muy por debajo del resto (lo que ha elevado la diferencia relativa máxima cometida entre el valor medio y el valor de rotura de una de las muestras) la desviación típica y el coeficiente de variación son reducidos aportando solidez a los resultados.

Tabla 5-20. Dimensiones de las probetas del laminado [0,90₄,0] llevadas a rotura.

Probeta	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Área (mm ²)
1	1,2597	15,2033	19,1520
2	1,3000	15,0500	19,5650
3	1,2893	15,2377	19,6467
4	1,2797	15,0533	19,2640
5	1,2800	15,0400	19,2512

Tabla 5-21. Resultados de resistencia y rigidez para las 5 probetas del panel [0,90₄,0] llevadas a la rotura.

Probeta	Fuerza Rotura (N)	Resistencia (MPa)
1	10349,55	540,39
2	10329,93	527,98
3	10084,68	513,30
4	10997,01	570,86
5	8243,34	428,20

Tabla 5-22. Resultados promedio de la resistencia y la rigidez para el panel [0,90₄,0].

Panel [0, 90 ₄ , 0]	Fuerza (N)	Resistencia (MPa)
Valor medio	9954,32	513,78
Desviación Típica	520,15	26,80
Coefficiente de variación	5,22	5,216
Valor máximo	10349,55	570,86
Valor mínimo	8243,34	428,20
Diferencia relativa Max.Porcentual (%)	17,18	19,98

Diferencia relativa Min.Porcentual (%)	1,31	0,09
---	------	------

En la Figura 5-3 se ve como han roto las probetas del laminado [0,90₄,0].

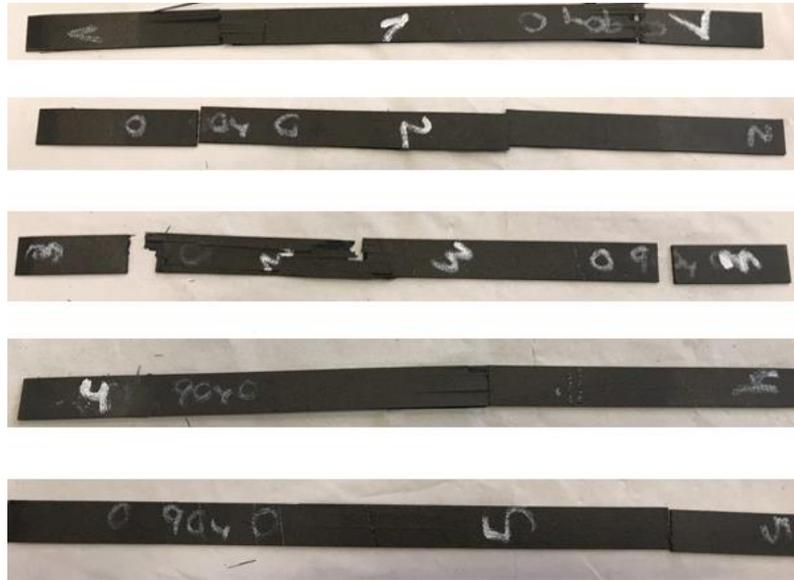


Figura 5-3. [0,90₄,0]: Probetas ensayadas hasta rotura.

A la hora de comparar el valor medio de carga obtenido con el experimental calculado a partir de las propiedades del laminado se observa que la diferencia entre el valor teórico y el experimental está por debajo [0,90,0] pero por encima del resto de laminados, con 2 y 4 laminas de 0 grados.

$$F_{rotura-ideal_{[0,90_4,0]}} = X_t \cdot A_{st_{[0,90_4,0]}} \cdot \frac{n^\circ \text{ de láminas a } 0 \text{ grados}}{n^\circ \text{ de láminas del laminado}} = 14253,4681 \text{ N}$$

$$A_{st_{[0,90_4,0]}} = 19,3748 \text{ m}^2$$

$$F_{rotura-experimental_{[0,90_4,0]}} = 9954,3244 < F_{rotura-ideal_{[0,90_4,0]}}$$

$$\%diferencia_{teórico-experimental} = 30,17\%$$

➤ Laminado [0₂,90₄,0₂]

Por último, se muestran los resultados del laminado [0₂,90₄,0₂]. En primer lugar, en la Tabla 5-23 se recogen las dimensiones de las probetas llevadas a la rotura. En segundo lugar, en la Tabla 5-24 se muestran los valores de carga y tensión de rotura de cada una de ellas. Por último, en la Tabla 5-25 queda caracterizada mecánicamente su resistencia y se calcula la desviación típica, que se ve que es de valor reducido, el coeficiente de variación y diferencias relativas, que son del orden de lo obtenido para el resto laminados.

Tabla 5-23. Dimensiones de las probetas del laminado [0₂,90₄,0₂] llevadas a rotura.

Probeta	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Área (mm ²)
1	1,6602	15,2377	25,2984
2	1,7002	14,8582	25,2620
3	1,7211	15,1107	26,0064
4	1,6777	15,3379	25,7218
5	1,7125	15,0778	25,8210

Tabla 5-24. Resultados de resistencia y rigidez para las 5 probetas del panel [0₂,90₄,0₂] llevadas a la rotura.

Probeta	Fuerza Rotura (N)	Resistencia (MPa)
1	17705,98	699,88
2	16500,72	653,18
3	18697,86	718,97
4	19502,28	758,20
5	19659,24	761,37

Tabla 5-25. Resultados promedio de la resistencia y la rigidez para el panel [0₂,90₄,0₂].

[0 ₂ , 90 ₄ , 0 ₂]	Fuerza (N)	Resistencia (MPa)
Valor medio	18374,41	717,18
Desviación Típica	660,73	22,41
Coefficiente de variación	3,60	3,12
Valor máximo	19659,24	761,37
Valor mínimo	16500,72	653,18
Diferencia relativa Max.Porcentual (%)	10,20	9,80
Diferencia relativa Min.Porcentual (%)	1,76	0,25

En la Figura 5-4 se ve como han roto las probetas del laminado [0₂,90₄,0₂].



Figura 5-4. [0₂,90₄,0₂]: Probetas ensayadas hasta rotura.

Realizando el sencillo cálculo que se ha empleado en este apartado para comparar el valor medio de carga obtenido con el experimental se observa que está por debajo del obtenido en el laminado [0,90,0] pero por encima del resto de laminados, con 2 y 4 laminas de 0 grados.

$$F_{rotura-ideal_{[0_2,90_4,0_2]}} = X_t \cdot A_{st_{[0_2,90_4,0_2]}} \cdot \frac{n^\circ \text{ de láminas a } 0 \text{ grados}}{n^\circ \text{ de láminas del laminado}} = 28271,8907 \text{ N}$$

$$A_{st_{[0_2,90_4,0_2]}} = 25,6202 \text{ m}^2$$

$$F_{rotura-experimental_{[0_2,90_4,0_2]}} = 18374,409 < F_{rotura-ideal_{0_2,90_4,0_2}}$$

$$\%diferencia_{teórico-experimental} = 35,01\%$$

6 INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LA CAPA A 90°: ESTUDIO LAMINADOS [0₄,90_N,0₄]

Tal y como se comentó en el capítulo 2, las probetas en las que se va a analizar la influencia del espesor de lámina a 90 grados fueron fabricadas durante el desarrollo de un proyecto anterior [1] y sus secuencias de apilado son:

$$[0_4,90,0_4] \quad [0_4,90_2,0_4] \quad [0_4,90_4,0_4] \quad [0_4,90_8,0_4]$$

Es decir, se mantiene constante el espesor de la capa a 0 grados y se va variando el espesor de la capa a 90 grados.

A continuación se describen los ensayos realizados en ambos laminados en el intento de detectar el primer daño, así como los resultados obtenidos tras analizar las muestras mediante el microscopio óptico.

A la hora de identificar el daño que aparece en las probetas analizadas se ha denominado este en función de su estado de crecimiento y de cómo se desarrolla a través de la capa de 90 grados. Se ha establecido la siguiente clasificación:

- ***Despegues aislados:*** se englobará dentro esta categoría todo daño que haya supuesto la separación parcial de una fibra de la matriz, de forma aislada y puntual, aun pudiéndose encontrar separaciones a pares o levemente consecutivas. A modo de aclaración se ha añadido la Figura 6-1 donde se han representado un par de despegues fibra/matriz consecutivos y un despegue fibra/matriz alrededor de una única fibra. Este tipo de daño es el que se ha englobado en la categoría de despegues aislados y que se podrá ver en ejemplos reales en los apartados siguientes.

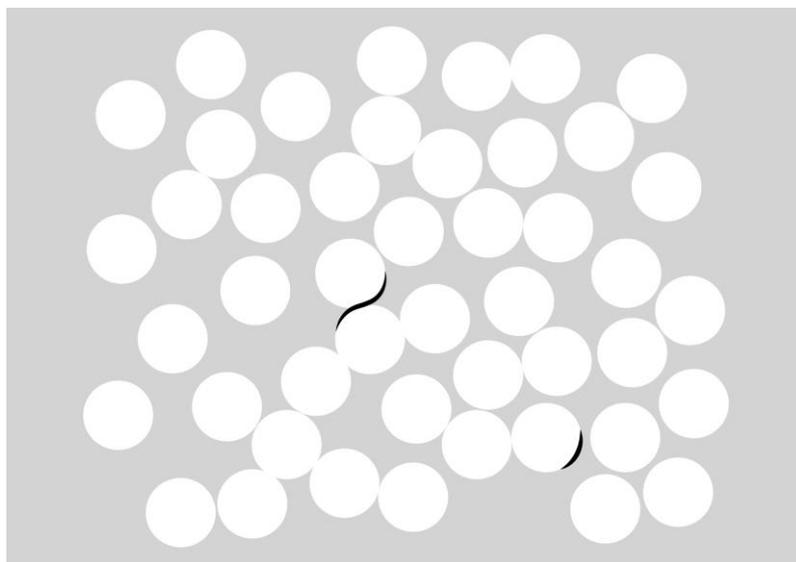


Figura 6-1. Clasificación del daño: Despegues aislados.

- ***Despegues continuos:*** dentro de esta categoría se ha incluido el daño correspondiente a, por un lado, el estado en el que han aparecido suficientes despegues aislados consecutivos como para visualizar daño continuo inminente, y, por otra, un daño que ha supuesto una mayor separación fibra matriz. En la Figura 6-2 se presenta un esquema de este tipo de daño que se clasificará en adelante dentro de esta categoría.

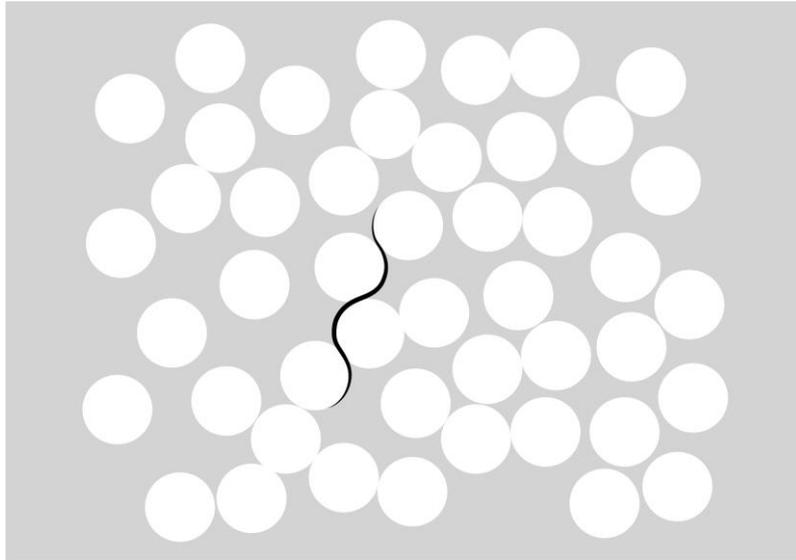


Figura 6-2. Clasificación del daño: Despegues continuos.

- ***Daño transversal generalizado:*** Se engloba dentro de esta categoría aquel daño transversal formado por despegues continuos a lo largo de toda la sección de la capa a 90 grados que buscan conectarse pero que no terminan de hacerlo ni de llegar del todo a la interfase entre la capa a 90 grados y la capa a 0. En la Figura 6-3 se ha representado un esquema del tipo de daño que se englobará dentro de esta categoría.

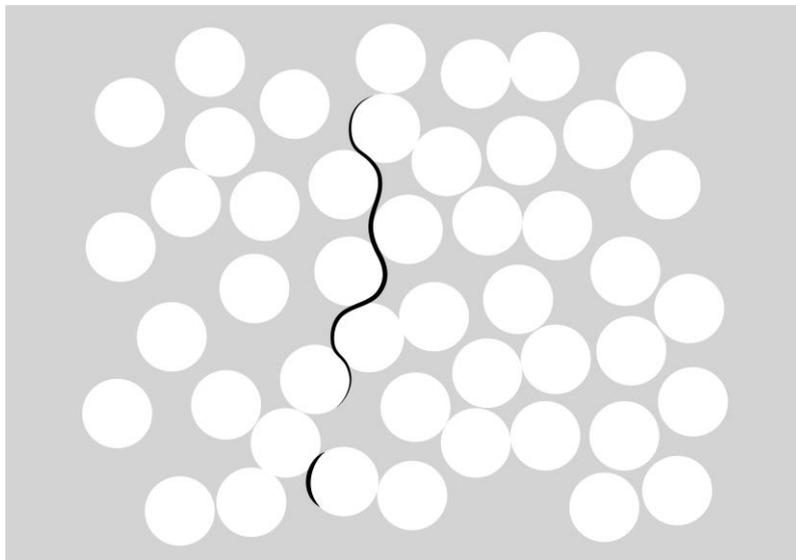


Figura 6-3. Clasificación del daño: daño transversal generalizado.

- ***Grieta transversal:*** En esta categoría de clasificación se engloba aquel daño transversal a la dirección de aplicación de la carga que se extiende de forma completa a través de todas las láminas a 90 grados, llegando a la interfase de separación de las láminas a 0-90 grados sin que se aprecien tramos en los que la grieta no se abra camino separando fibra/matriz o matriz/matriz. Ha de ser un daño extendido, sin que se aprecien discontinuidades en el mismo. En la Figura 6-4 aparece un esquema de esta categoría de clasificación. Es de recalcar que en este tipo de daño puede darse que cuando la grieta alcanza las últimas fibras de las láminas a 90 grados antes de llegar a las láminas a 0 grados se extienda paralelamente a las láminas a 0 grados y, si se continúa cargando la probeta, pueden aparecer delaminaciones.

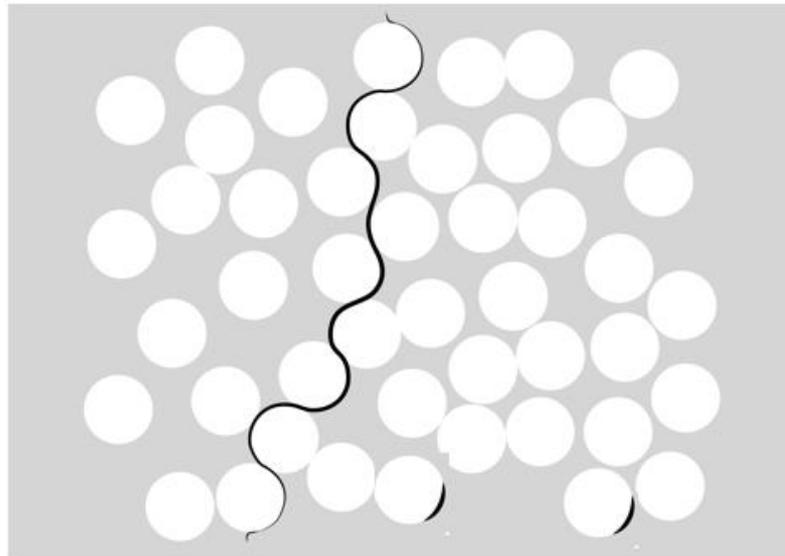


Figura 6-4. Clasificación del daño: grieta transversal.

Comentar que en estos ensayos se ha colocado el extensómetro para determinar cuánto se ha deformado la probeta cuando se produce el primer daño. El objetivo de esto es relacionarlo con estudios previos [5] que han estimado que la aparición del daño se produce para deformaciones mayores a medida que disminuye el espesor de la probeta.

6.1 Detección del daño al primer aviso sonoro

El primer paso fue intentar relacionar el primer aviso sonoro de rotura en la capa de 90 grados con la aparición de daño en dicha sección del laminado.

En el proyecto anterior [1] del que se han rescatado las probetas ya se identificó a qué carga se daba el primer aviso sonoro de rotura en la capa de 90 grados y qué daño había en las muestras a esa carga para los laminados $[0_4,90,0_4]$ y $[0_4,90_4,0_4]$. Por lo tanto, en este trabajo solo se han sometido a este ensayo las muestras de los laminados $[0_4,90_2,0_4]$ y $[0_4,90_8,0_4]$.

Para ello se procedió en primer lugar cargando 5 probetas de cada laminado hasta el primer aviso sonoro de fallo. Una vez escuchado este se ha detenido la máquina de ensayo y con la probeta aún cargada se ha procedido a la inspección de la probeta mediante una lupa (montada tal y como se ve en la Figura 4-2) para ver si se había producido o no la primera grieta transversal. Tras este primer barrido de la probeta con la lupa se ha descargado la probeta y se ha pasado a buscar daño a nivel de despegues, delaminaciones o grietas que no se hayan podido visualizar con los aumentos de la lupa, mediante un microscopio óptico.

La detección del primer aviso sonoro se ha realizado mediante la audición directa por parte del autor del proyecto, sin ningún tipo de micrófono o útil que ayudara a este objetivo.

La velocidad de ensayo ha sido de 0,2 mm/min.

Aunque en un primer momento se intentó recorrer con la lupa las probetas de ambos laminados en los ensayos realizados se comprobó que en las probetas que solo contaban con 2 láminas a 90 grados no era posible visualizar bien la existencia o no de grieta. Esto se debía a la poca estabilidad del montaje, que hacía muy difícil enfocar la probeta al barrerarla desplazando la lupa hacia arriba o hacia abajo al máximo número de aumentos. Por este motivo finalmente se decidió únicamente emplear la lupa en las probetas del laminado $[0_4,90_8,0_4]$ y pasar directamente al visionado mediante el microscopio óptico con el laminado $[0_4,90_2,0_4]$. A continuación, se muestran los resultados obtenidos con ambos laminados.

6.1.1 Detección del daño al primer aviso sonoro: Laminado [04,90₂,0₄]

En el laminado [04,90₂,0₄] se han ensayado a primer aviso sonoro las probetas nombradas de 1 a 5. Las dimensiones de estas se presentan en la Tabla 6-1. A continuación se ha realizado el ensayo obteniéndose los resultados de carga y deformación de las probetas recogidos en la Tabla 6-2. En dicha tabla se presenta también el porcentaje que supone la carga a la que se ha escuchado el primer aviso sonoro del valor medio de la carga de rotura que en este laminado se corresponde con el valor de 43379,49 N.

Tabla 6-1 .Dimensiones de las probetas del laminado [04,90₂,0₄] ensayadas al primer aviso sonoro.

Probeta	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Área (mm ²)
1	1,9067	14,8633	28,3399
2	1,9033	14,9067	28,3718
3	1,9000	15,1167	28,728
4	1,8367	15,0267	27,6736
5	1,9067	15,0800	28,6520

Tabla 6-2. Resultados del ensayo a primer aviso sonoro de las probetas del laminado [04,90₂,0₄].

Probeta	Cara primer aviso sonoro (N)	Tensión primer aviso sonoro (MPa)	Deformación en el primer aviso sonoro (%)	Porcentaje de la carga de rotura (%)
1	25859,16	915,89	0,8430	61,38
2	25770,87	910,31	0,7892	61,01
3	18531,09	645,05	0,5128	43,23
4	15136,83	546,98	0,4886	36,66
5	15705,81	548,16	0,4846	36,74

Se aprecia que para este laminado el primer aviso sonoro se produce en un amplio rango de carga. Además, tras ser visualizadas en el microscopio se ha observado que en todas ha aparecido ya la primera grieta transversal, por lo que en este laminado no ha sido posible relacionar el primer aviso sonoro con la aparición del primer daño.

Se ha analizado la sección entre tacos y se ha determinado la densidad con la que contaba cada probeta. En la Tabla 6-3 se observa que el daño va desde un par de grietas hasta la saturación de la probeta.

Tabla 6-3. Densidad de grietas en las probetas del laminado [04,90₂,0₄] ensayadas al primer aviso sonoro.

Probeta	Distancia entre taps (mm)	Número de grietas	Densidad de grietas (grieta/mm)
1	132,47	45	0,3397

2	132,22	60	0,4538
3	132,56	5	0,0378
4	132,62	2	0,0151
5	133,37	4	0,0299

En las Figuras 6-5 a 6-8 se ve una muestra del daño encontrado en estas muestras.

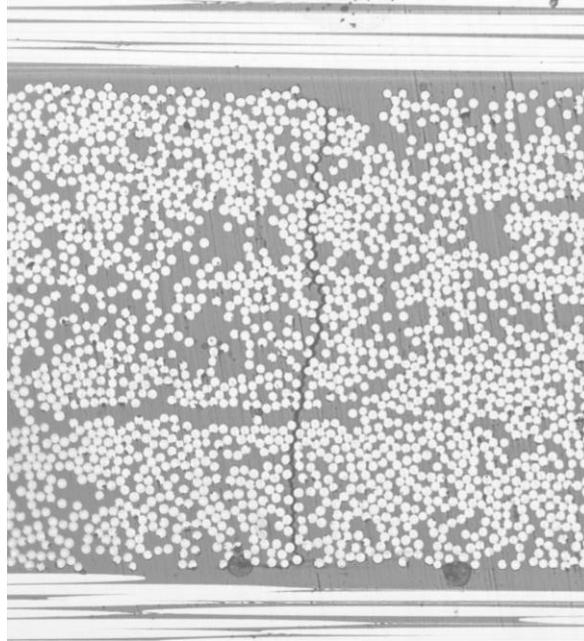


Figura 6-5. $[0_4,90_2,0_4]$: Probeta 1. Grieta transversal a x200.

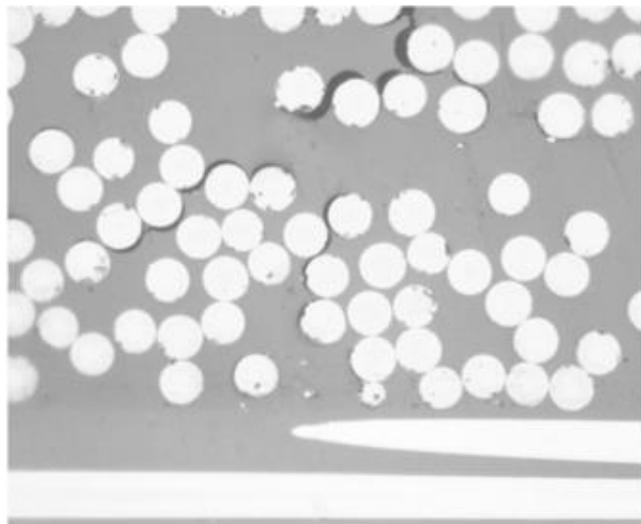


Figura 6-6. $[0_4,90_2,0_4]$: Probeta 1. Grieta transversal a x500.

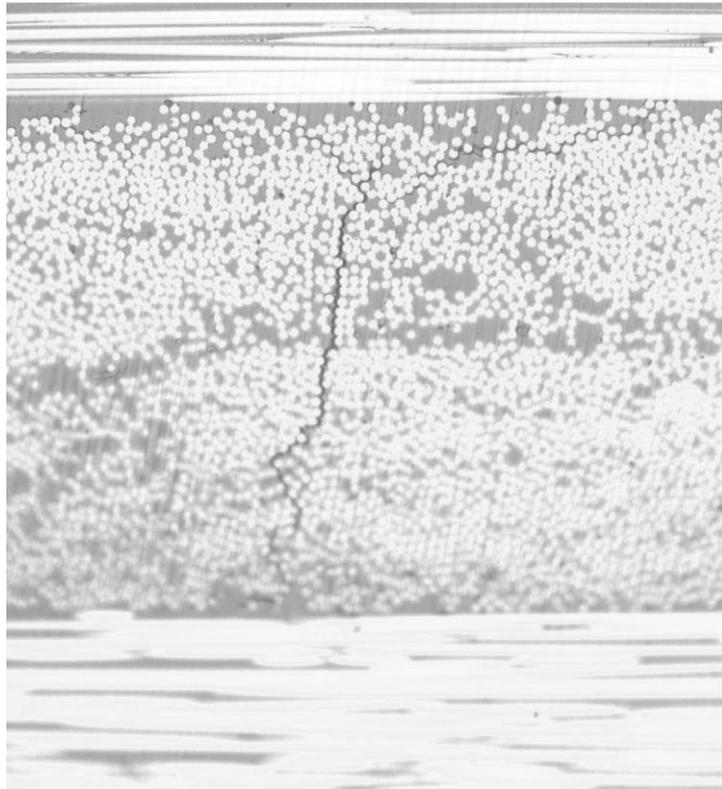


Figura 6-7. [04,90₂,0₄]: Probeta 2. Grieta transversal a x200.

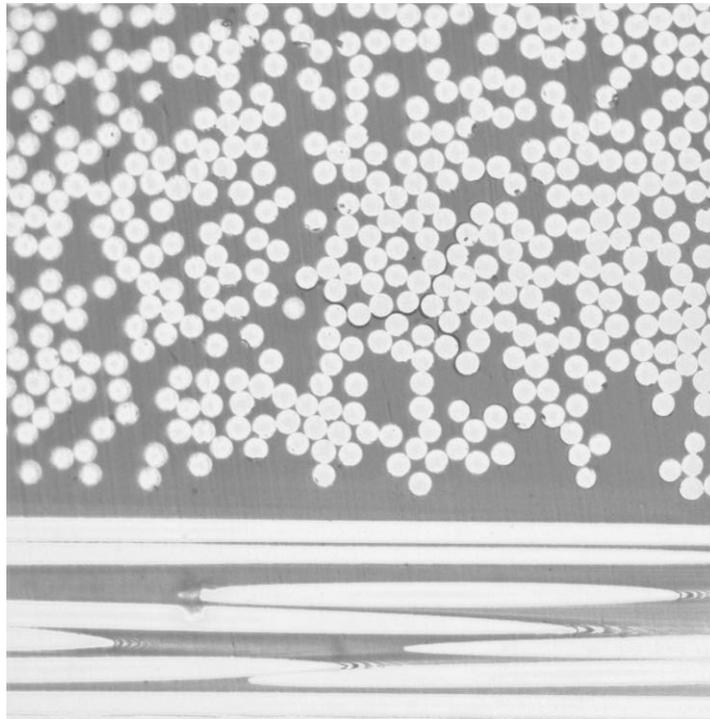


Figura 6-8. [04,90₂,0₄]: Probeta 2. Despegues continuos a x500.

6.1.2 Detección del daño al primer aviso sonoro: Laminado [04,90₈,0₄]

En el laminado [04,90₈,0₄] se han ensayado a primer aviso sonoro las probetas nombradas como 10, 11, 12, 14 y 18. No se ha empleado una serie de probetas con nomenclatura consecutiva pues durante la búsqueda de una buena secuencia de pulido se despreciaron varias de estas muestras.

En primer lugar, en la Tabla 6-4 se exponen las dimensiones y a continuación, en las Tablas 6-5 y 6-6 los resultados extraídos para estas muestras.

Tabla 6-4 .Dimensiones de las probetas del laminado [0₄,90₈,0₄] ensayadas al primer aviso sonoro.

Probeta	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Área (mm ²)
10	2,9533	14,9663	44,4609
11	2,9300	15,0867	44,2137
13	2,9097	15,1433	44,0628
14	2,9300	15,3567	45,0048
18	2,9267	15,2567	44,7118

Tabla 6-5. Resultados del ensayo a primer aviso sonoro de las probetas del laminado [0₄,90₈,0₄].

Probeta	Carga primer aviso sonoro (N)	Tensión primer aviso sonoro (MPa)	Deformación en el primer aviso sonoro (%)	Porcentaje de la carga de rotura (%)
10	15117,21	340,01	0,2322	35,38
11	9533,36	215,62	0,3046	22,44
13	12046,68	273,40	0,4014	28,45
14	11762,19	261,35	0,4684	27,19
18	11546,37	258,24	0,326	26,87

Se aprecia que para este laminado el primer aviso sonoro se produce en un rango de carga mucho más estrecho y para una carga menor. Tras ser visualizadas en el microscopio se ha observado que para este laminado el rango de aparición de la primera grieta transversal parece cercano al primer aviso sonoro, pues todas las muestras tienen una o ninguna grieta. En la Tabla 6-6 se recoge la densidad de grietas de cada probeta.

Tabla 6-6. Densidad de grietas en las probetas del laminado [0₄,90₈,0₄] ensayadas al primer aviso sonoro.

Probeta	Distancia entre taps (mm)	Número de grietas	Densidad de grietas (grieta/mm)
10	131,43	1	0,0076
11	131,65	0	0,0000
13	131,72	0	0,0378
14	131,90	1	0,0076
18	132,61	0	0,0299

En la Figura 6-9 se puede observar una fotografía realizada con la lupa a la grieta de la probeta 14 cuando esta estaba cargada y en la Figura 6-10 una realizada mediante la composición de tres microfotografías tomadas con el microscopio a 200 aumentos.

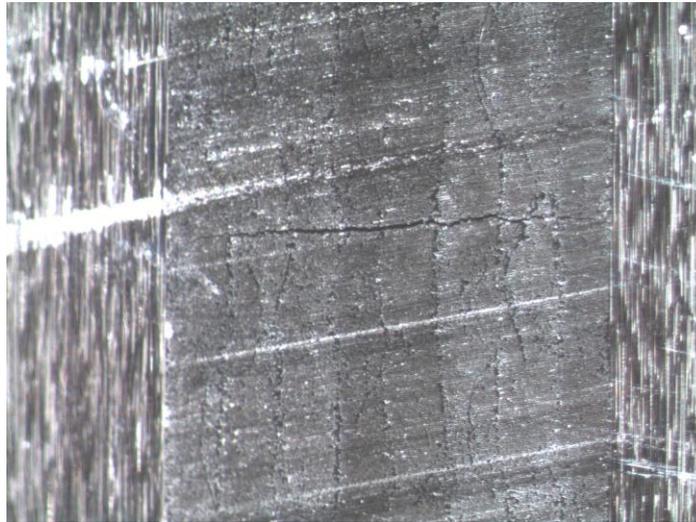


Figura 6-9.[04,90₈,0₄]: Probeta 14. Fotografía de la grieta transversal con la probeta cargada.

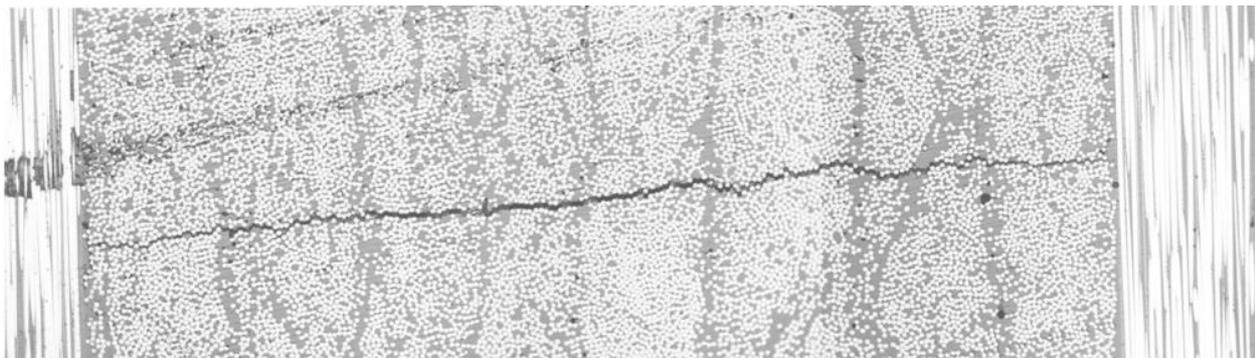


Figura 6-10. [04,90₈,0₄]: Probeta 14. Grieta transversal a x200.

6.2 Detección del primer daño transversal: aumento gradual de carga

Al no ser posible relacionar la aparición del primer daño o de la primera grieta transversal con el primer aviso sonoro en todos los laminados se decidió llevar a cabo un procedimiento diferente basado en un aumento gradual de carga con el objetivo de encontrar el rango de carga para el que se produce la primera grieta transversal completa (que cruza toda la sección de las láminas a 90 grados) en el laminado. Al igual que en el apartado anterior, en la búsqueda de la primera grieta transversal en el laminado con 8 láminas a 90 grados se empleó tanto la lupa como el microscopio mientras que en el resto solo el microscopio debido al poco espesor de las muestras.

En estos ensayos se colocó el extensómetro para comparar el valor de deformación al que aparece el primer daño en cada laminado.

El modo de proceder con cada laminado ha sido elegir una serie de probetas, prepararlas para el ensayo (lijado y pulido), llevarlas a una carga determinada donde se suponía, a partir de los ensayos a primer aviso sonoro, que no había ningún tipo de daño, barrido con la lupa en el laminado [04,90₈,0₄], descarga de las probetas, visionado en el microscopio óptico y volver a cargar entre 50 y 100 kg respecto de la carga del ensayo anterior hasta que se ha encontrado la primera grieta transversal.

El número de probetas ensayado ha variado de un laminado a otro en función de lo que ha costado encontrar el

rango en el que se produce el primer daño transversal o la primera grieta transversal.

6.2.1 Detección del primer daño trasnversal: Laminado [0₄,90,0₄]

En la Tabla 6-7 se recogen las dimensiones de las probetas del laminado [0₄, 90 , 0₄] ensayadas a primera grieta o primer daño transversal y, a continuación, hasta que carga se ha llevado cada probeta para cada incremento gradual de carga realizado, así como la deformación experimentada por la probeta en cada caso. Se especifica si ha existido o no aviso sonoro en cada incremento y si al ser la probeta visionada en el microscopio presentaba una grieta u otro tipo de daño.

Tabla 6-7. Dimensiones de las probetas del laminado [0₄,90,0₄] ensayadas a primer daño transversal.

Probeta	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Área (mm ²)
2	1,6967	14,5900	24,8030
3	1,6767	14,5700	24,4776
4	1,6967	14,3867	24,4630
5	1,6933	14,7433	24,9106
6	1,7500	14,1567	24,7800
8	1,6733	14,0133	23,4017
9	1,6567	14,6667	24,2055
10	1,6890	14,6033	24,6909

En la Tabla 6-8 se recoge el proceso de aumento gradual de carga al que se sometió la probeta 2. En esta probeta se ha parado el incremento de carga cada vez que se oía un aviso sonoro de rotura, de manera que las pruebas 1 a 3 se corresponden con los primeros avisos sonoros. Después de la tercera prueba se decidió cargar la probeta con un incremento mayor en base a los resultados obtenidos en el proyecto de referencia [1]. Al ser visionada en el microscopio se ve que para la carga correspondiente a la prueba 4 la probeta ya estaba saturada de daño por lo que no se ha tenido en cuenta para continuar a la hora de extraer el resultado deseado.

Tabla 6-8. [0₄,90,0₄]: Probeta 2. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar el primer daño transversal.

Probeta 2					
Prueba	Carga ensayo (N)	Apertura extensómetro (mm)	Deformación (%)	Presencia de daño	Aviso sonoro
1	7766,58	0,1255	0,2510	NO	NO
2	10791	0,1886	0,3772	NO	NO
3	16451,37	0,3174	0,6348	NO	NO
4	21591,81	0,5275	1,0550	SI (+1)	SI

En el siguiente ensayo, correspondiente a la probeta 3, tal y como se muestra en la Tabla 6-9, se decidió comenzar a cargar la muestra con la última carga a la que no había aparecido daño transversal en el ensayo anterior, pero al visionar la muestra en el microscopio se encontraron 3 daños transversales generalizados, por lo que esta probeta tampoco se ha tenido en cuenta.

Tabla 6-9. [04,90,04]: Probeta 3. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar el primer daño transversal.

Probeta 3					
Prueba	Carga ensayo (N)	Apertura extensómetro (mm)	Deformación (%)	Presencia de daño	Aviso sonoro
1	16686,81	0,2852	0,5704	SI (+3)	SI (Primero a 0,59 Toneladas)

En base a los resultados obtenidos se decidió empezar por un valor de carga menor. En la Tabla 6-10 se puede observar el proceso de aumento gradual de carga al que se sometió la probeta 4. Se ve que tras realizar el primer incremento de carga se encontraron dos daños transversales generalizados, por lo que este resultado, a pesar de servir para acotar aún más el valor al que se produce la primera grieta, no es válido.

Tabla 6-10. [04,90,04]: Probeta 4. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar el primer daño transversal.

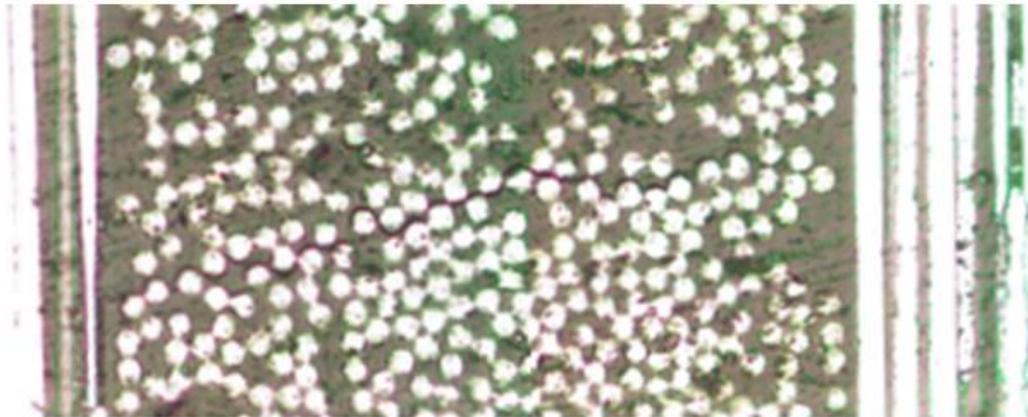
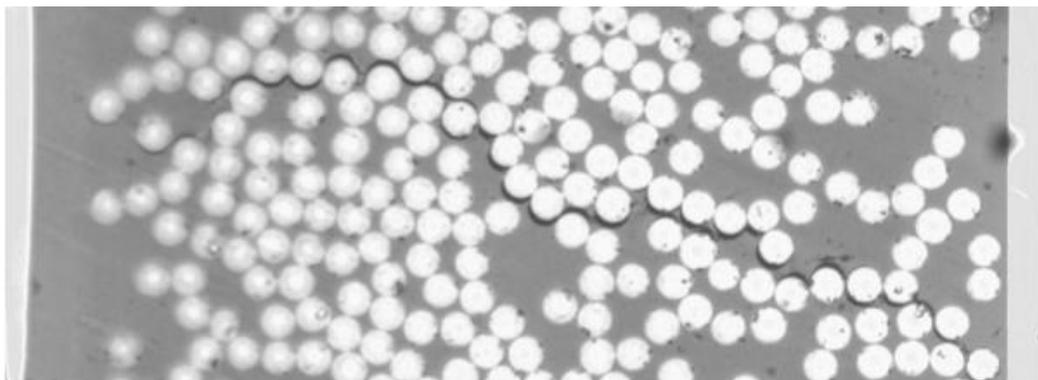
Probeta 4					
Prueba	Carga ensayo (N)	Apertura extensómetro (mm)	Deformación (%)	Presencia de daño	Aviso sonoro
1	14302,98	0,2852	0,5704	NO	SI (Primero a 0,62 Toneladas)
2	15234,93	0,2953	0,5906	SI(+2)	SI

En base a estos resultados fue posible establecer el rango de ensayo al que se originaba el primer daño transversal.

En la Tabla 6-11 se puede ver que en la probeta 5 se encontró en la prueba 2 un primer daño que se corresponde con el tipo de daño que se ha clasificado en el presente proyecto como daño transversal generalizado. Este daño transversal generalizado se muestra en la Figura 6-11, donde puede verse que dicho daño no formaba una grieta transversal completa pues no estaba completamente cerrado (no era continuo, presentaba discontinuidades en su recorrido alrededor de las fibras) y no cruzaba completamente el espesor de láminas a 90 grados hasta las de 0, por lo que se decidió seguir cargando para ver si se formaba una grieta transversal completa. En la prueba 3 se observó que el daño transversal generalizado se mantenía exactamente igual y en la prueba 4 ya había otro daño transversal generalizado (Figura 6-12), además de una serie de despegues continuos en otras zonas de la probeta. En este apartado se busca la aparición de la primera grieta transversal, pero al no ser posible encontrarla se ha tomado la carga a la que apareció el primer daño transversal generalizado a la hora de extraer resultados, aunque teniendo en cuenta que este no es una grieta transversal tal y como la definimos.

Tabla 6-11 [0₄,90,0₄]: Probeta 5. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar el primer daño transversal.

Probeta 5					
Prueba	Carga ensayo (N)	Apertura extensómetro (mm)	Deformación (%)	Presencia de daño	Aviso sonoro
1	13841,91	0,2208	0,4416	NO	Si (Primero a 0,61 Toneladas)
2	14803,29	0,247	0,4940	SI	SI
3	14881,77	0,2550	0,5100	SI	SI
4	15009,30	0,2523	0,5046	SI, más de una.	SI

Figura 6-11. [0₄,90,0₄]: Probeta 5. Prueba 2. Primer daño transversal generalizado encontrado a x500.Figura 6-12.[0₄,90,0₄]: Probeta 5. Prueba 2. Primer daño transversal generalizado encontrado a x500.

En cuanto a la probeta 6, en la Tabla 6-12 se ve que el primer daño transversal generalizado se encontró en la prueba 3. A pesar de que presentaba las mismas características que el encontrado en la probeta 5, en primera instancia se decidió no seguir cargando pues existía daño en otras zonas de la probeta (despegues continuos) tal y como aparece en la Figura 6-13. Es de destacar que estos despegues continuos discurrían de forma paralela a las láminas a 0 grados, y no de forma transversal como cabría esperar.

Esta probeta no ha sido contabilizada a la hora de analizar los resultados pues se busca el momento en el que la probeta tenga un único daño transversal generalizado.

Tabla 6-12. [04,90,04]: Probeta 6. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar el primer daño transversal.

Probeta 6					
Prueba	Carga ensayo (N)	Apertura extensómetro (mm)	Deformación (%)	Presencia de daño	Aviso sonoro
1	13773,24	0,2221	0,4442	NO	SI (Primero a 0,69 Toneladas)
2	14734,62	0,2523	0,5046	NO	SI
3	15391,89	0,2691	0,5382	SI	SI

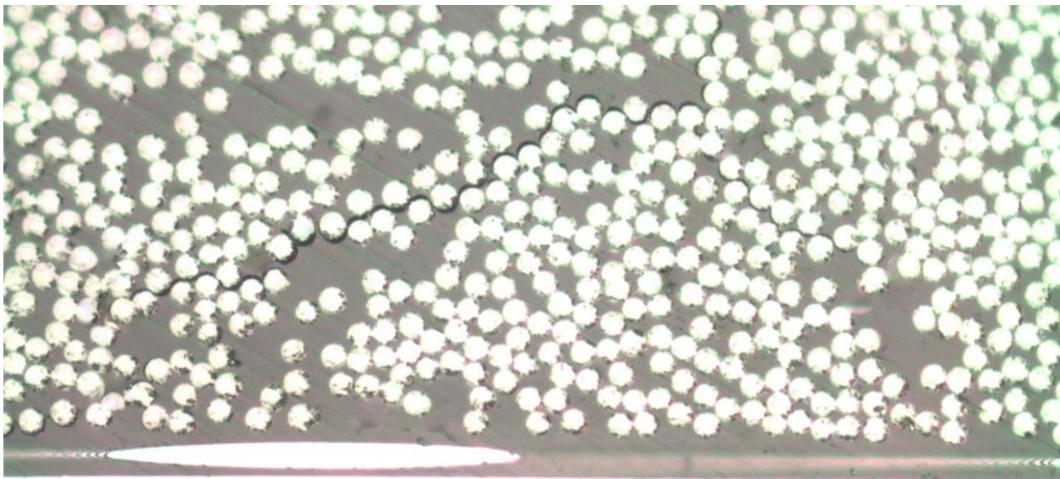


Figura 6-13. [04,90,04]: Probeta 6. Prueba 3. Despegues continuos a x500.

En el resto de probetas ensayadas a primer daño transversal el procedimiento seguido y resultados encontrados han sido los mismos que en la probeta 5. Se ha encontrado un primer daño transversal generalizado, por lo que se ha decidido seguir cargando con el objetivo de ver si se terminaba de unir y formaba una grieta transversal completa. Al no cerrarse la grieta en ninguno de los casos se ha parado el proceso de incremento gradual de carga cuando se ha encontrado más daño y se ha tomado como valor de carga y deformación para establecer el rango en que aparece el primer daño transversal correspondiente a un daño transversal generalizado.

En la Tabla 6-13 se muestra el proceso de aumento gradual de carga al que se ha sometido la probeta 8.

Tabla 6-13. [04,90,04]: Probeta 8. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar el primer daño transversal.

Probeta 8					
Prueba	Carga ensayo (N)	Apertura extensómetro (mm)	Deformación (%)	Presencia de daño	Aviso sonoro
1	12242,88	0,2123	0,4246	NO	Si(Primero a 0,59 toneladas)

2	13753,62	0,2327	0,4654	SI	SI
3	13989,06	0,2577	0,5154	SI, y un daño.	SI

En las Figuras 6-14 a 6-16 se ve cómo a pesar de haber incrementado la carga de la prueba 2 a la 3 el daño transversal generalizado no crece, pero sí que aparece más daño.



Figura 6-14. [0₄,90,0₄]: Probeta 8. Prueba 2. Primer daño transversal generalizado encontrado a x500.

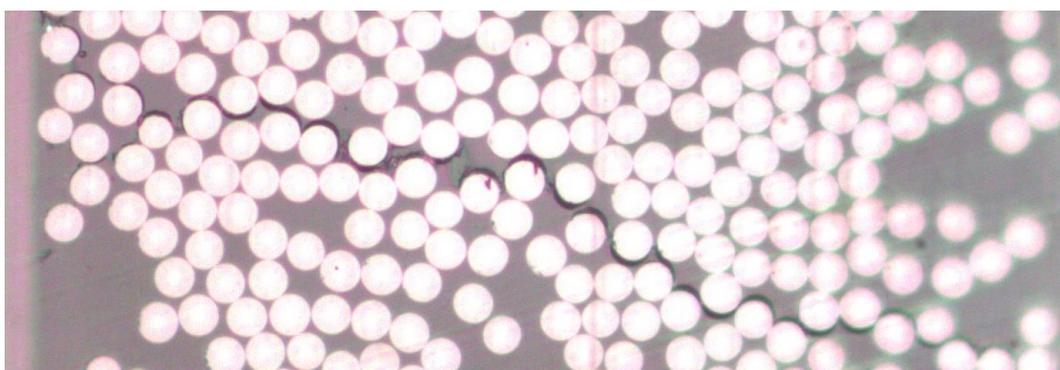


Figura 6-15. [0₄,90,0₄]: Probeta 8. Prueba 3. Primer daño transversal generalizado encontrado a x500.

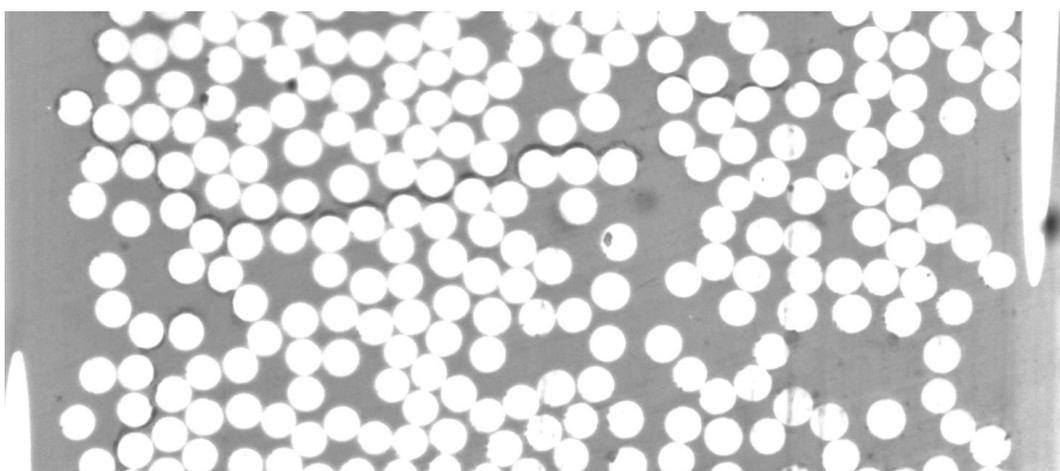


Figura 6-16. [0₄,90,0₄]: Probeta 8. Prueba 3. Despegues continuos a x500.

En la Tabla 6-14 se recoge el proceso de aumento gradual de carga al que se ha sometido la probeta 9. En la Figura 6-17 se muestra el primer daño transversal generalizado identificado en el proceso de aumento gradual

de carga en la probeta 9, y en la Figura 6-18, despegues continuos encontrados en otra zona de la capa a 90 grados cuando se ha vuelto a cargar para comprobar si el despegue transversal generalizado podía evolucionar hacia una grieta transversal completa.

Tabla 6-14. [04,90,04]: Probeta 9. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar el primer daño transversal.

Probeta 9					
Prueba	Carga ensayo (N)	Apertura extensómetro (mm)	Deformación (%)	Presencia de daño	Aviso sonoro
1	13292,55	0,2114	0,4228	NO	Si(Primero a 0,66 toneladas)
2	13979,25	0,2356	0,4712	SI	SI
3	14067,54	0,2517	0,5034	SI, y un daño.	SI

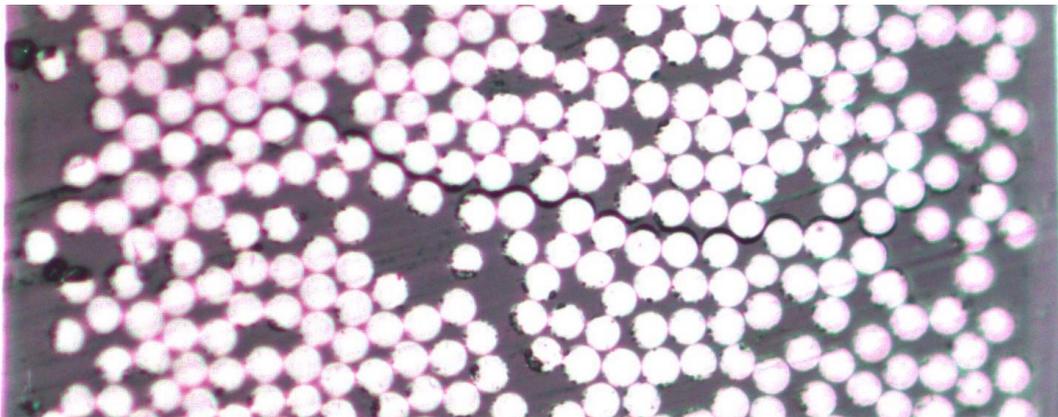


Figura 6-17. [04,90,04]: Probeta 9. Prueba 2. Primer daño transversal generalizado a x500.

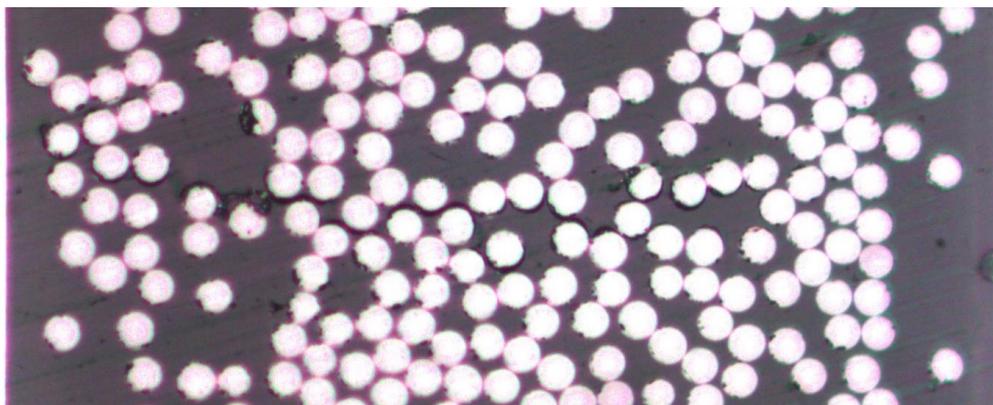


Figura 6-18. [04,90,04]: Probeta 9. Prueba 3. Despegues continuos a x500.

En la Tabla 6-19 se muestra el proceso de aumento gradual de carga al que se ha sometido la probeta 10. En la Figura 6-19 se recoge el primer daño transversal generalizado y en la Figura 6-20 el siguiente daño generalizado encontrado cuando se ha seguido cargando.

Tabla 6-15. [0₄,90,0₄]: Probeta 10. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar el primer daño transversal.

Probeta 10					
Prueba	Carga ensayo (N)	Apertura extensómetro (mm)	Deformación (%)	Presencia de daño	Aviso sonoro
1	12802,05	0,157	0,314	NO	SI (Primero a 0,62 toneladas)
2	13753,62	0,2443	0,4886	NO	SI
3	14283,36	0,245	0,49	SI	SI
4	14597,28	0,2471	0,4942	SI	SI
5	14979,87	0,249	0,498	SI(+2)	SI

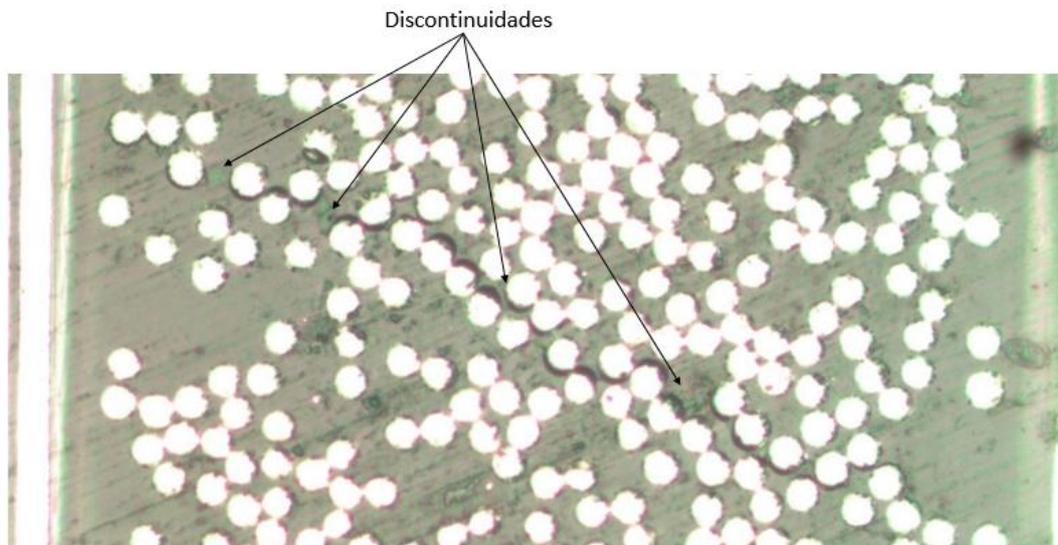


Figura 6-19. [0₄,90,0₄]: Probeta 10. Prueba 3. Primer daño transversal generalizado a x500.

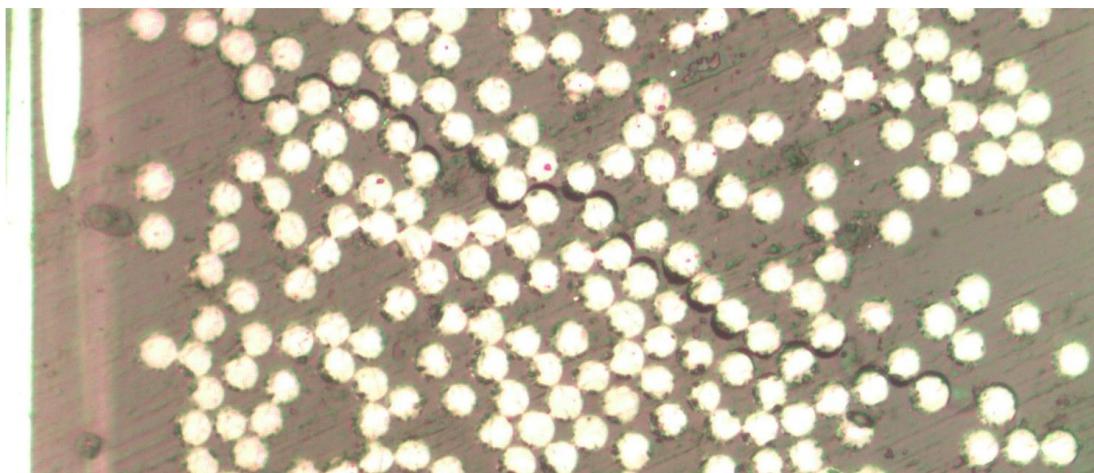


Figura 6-20. [0₄,90,0₄]: Probeta 10. Prueba 5. Daño transversal generalizado a x500.

Un punto de interés a comentar es el hecho de que en este laminado el aviso sonoro de daño en la capa a 90 grados se produce de forma mucho más estruendosa y mantenida a lo largo del ensayo.

En las gráficas 6-1 a 6-3 se ha representado el rango de valores de fuerza, tensión y deformación en el que se ha movido la aparición del daño transversal generalizado en este laminado.

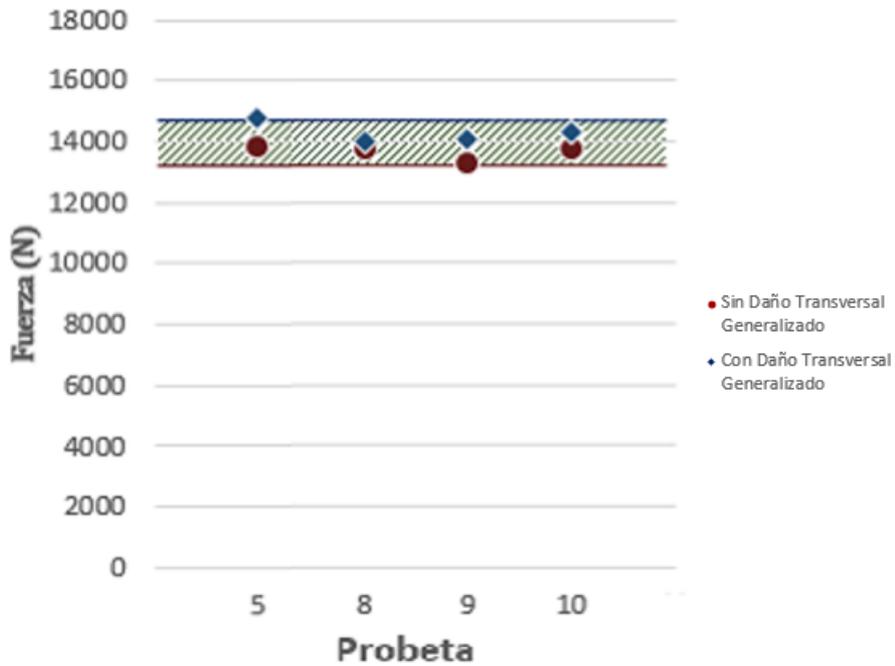


Gráfico 6-1. [04,90,04]: Fuerza. Rango de aparición del primer daño transversal generalizado.

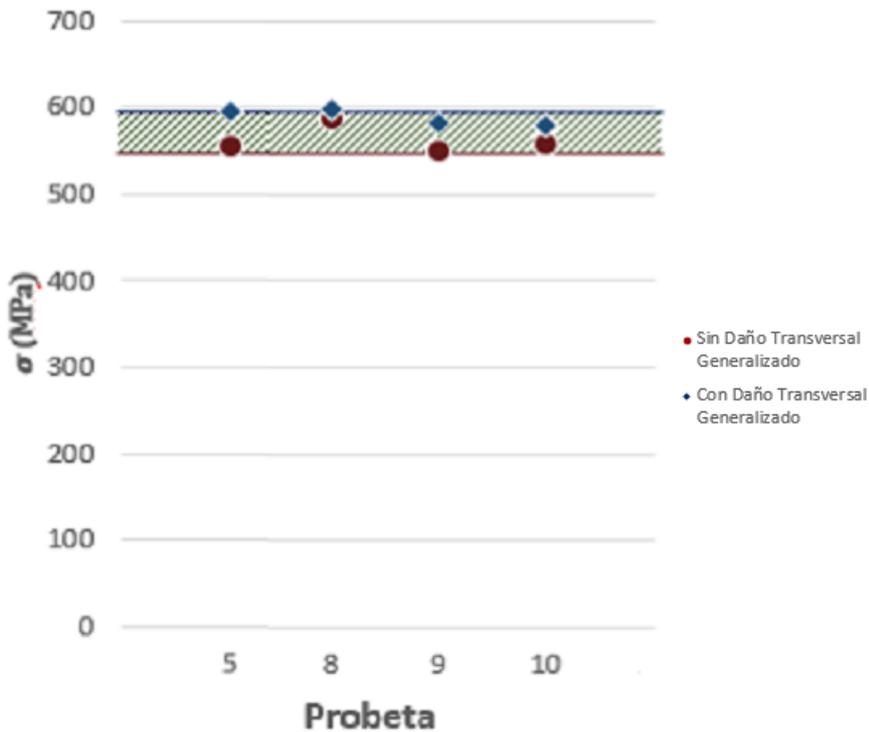


Gráfico 6-2. [04,90,04]: Tensión. Rango de aparición del primer daño transversal generalizado.

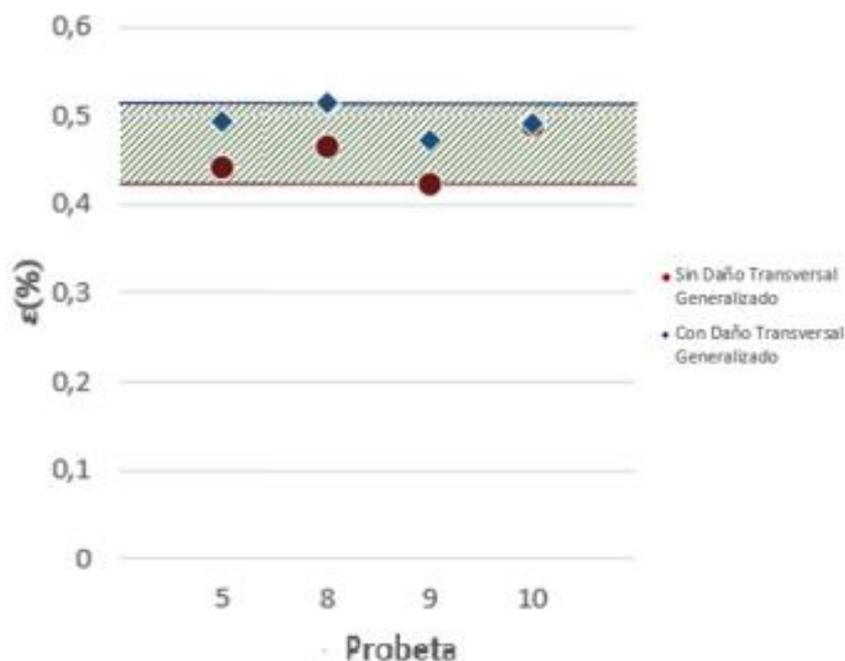


Gráfico 6-3. [0,90,0,4]: Rango de aparición de la primera grieta transversal.

En la Tabla 6-16 se recoge un resumen de los rangos representados con valores numéricos, siendo los valores mínimos de fuerza, tensión y deformación los que determinan los límites inferiores del intervalo, correspondientes al valor mínimo de las magnitudes en el ensayo anterior a la aparición del primer daño transversal generalizado, y los máximos el límite superior que se corresponde con el valor máximo de la magnitud correspondiente al que se ha visto solo un daño transversal generalizado en las probetas ensayadas.

Tabla 6-16. [0,90,0,4]: Resumen de resultados. Rango de aparición del primer daño transversal generalizado.

	Mínimo	Máximo
Fuerza [N]	13292,55	14803,29
Tensión [MPa]	549,15	597,78
Deformación [%]	0,4228	0,5154
Porcentaje de la carga media a rotura [%]	28,57	31,81

6.2.2 Detección del primer daño transversal: Laminado [0,90₂,0₄]

Las dimensiones de la sección resistente del laminado [0,90₂,0₄] se recogen en la Tabla 6-17.

Tabla 6-17. Dimensiones de las probetas del laminado [0₄,90₂,0₄] ensayadas a primera grieta transversal.

Probeta	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Área (mm ²)
7	1,8933	15,0033	28,4058
8	1,9267	15,0167	28,9886
9	1,9033	15,0667	28,6330
10	1,9433	14,9600	29,0224
11	1,9067	14,8767	28,4017

A continuación, en las Tablas 6-18 a 6-22, se muestra el proceso gradual de carga experimentado por cada una de las probetas de este laminado. Comentar que a diferencia del laminado [0,90,0] en el resto si que ha sido posible encontrar una primera grieta transversal completa sin que existiera más daño en el resto de la probeta. El nivel de carga y de deformación para el que se ha encontrado esta primera grieta será el que se tome para comparar resultados.

Tabla 6-18. [0₄,90₂,0₄]: Probeta 7. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar la primera grieta.

Probeta 7					
Prueba	Carga ensayo (N)	Apertura extensómetro (mm)	Deformación (%)	Presencia de grieta	Aviso sonoro
1	4245,768	0,0899	0,1798	NO	NO
2	6212,673	0,1027	0,2054	NO	NO
3	8195,274	0,1403	0,2806	NO	NO
4	9391,113	0,0973	0,1946	NO	NO
5	10143,54	0,1617	0,3234	NO	NO
6	11997,63	0,1913	0,3826	NO	NO
7	12782,43	0,2302	0,4604	NO	NO
8	14244,12	0,2698	0,5396	NO	NO
9	15156,45	0,2678	0,5356	NO	NO
10	15774,48	0,2685	0,537	NO	NO
11	17128,26	0,3013	0,6026	NO	NO
12	18315,27	0,3141	0,6282	SI	Primero

Tabla 6-19. [0₄,90₂,0₄]: Probeta 8. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar la primera grieta.

Probeta 8					
Prueba	Carga ensayo (N)	Apertura extensómetro (mm)	Deformación (%)	Presencia de grieta	Aviso sonoro
1	14754,24	0,2658	0,5316	NO	NO

2	16255,17	0,2913	0,5826	NO	NO
3	17334,27	0,3617	0,7234	SI	NO

Tabla 6-20. [0₄,90₂,0₄]: Probeta 9. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar la primera grieta.

Probeta 9					
Prueba	Carga ensayo (N)	Apertura extensómetro (mm)	Deformación (%)	Presencia de grieta	Aviso sonoro
1	13753,62	0,2127	0,4254	NO	NO
2	15745,05	0,2738	0,5476	SI	NO

Tabla 6-21. [0₄,90₂,0₄]: Probeta 10. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar la primera grieta.

Probeta 10					
Prueba	Carga ensayo (N)	Apertura extensómetro (mm)	Deformación (%)	Presencia de grieta	Aviso sonoro
1	15166,26	0,2248	0,4496	NO	NO
2	15746,05	0,2624	0,5248	NO	NO
3	16726,05	0,2658	0,5316	NO	NO
4	17402,94	0,2758	0,5516	SI	NO

Tabla 6-22. [0₄,90₂,0₄]: Probeta 11. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar la primera grieta.

Probeta 11					
Prueba	Carga ensayo (N)	Apertura extensómetro (mm)	Deformación (%)	Presencia de grieta	Aviso sonoro
1	12782,43	0,2302	0,4604	NO	NO
2	14646,33	0,2611	0,5222	SI (2 grietas)	SI

En la Figura 6-21 se observan muestras de las grietas encontradas en estas probetas. En la Figura 6-22 se puede ver que además de la presencia de una grieta transversal completa en cada una de las probetas se da también la presencia de un daño incipiente asociado a una futura posible delaminación. Dicho daño consiste en una serie de despegues aislados paralelos a las fibras de la lámina a 0 grados y cercanos a ella que se han encontrado en todas las muestras analizadas.

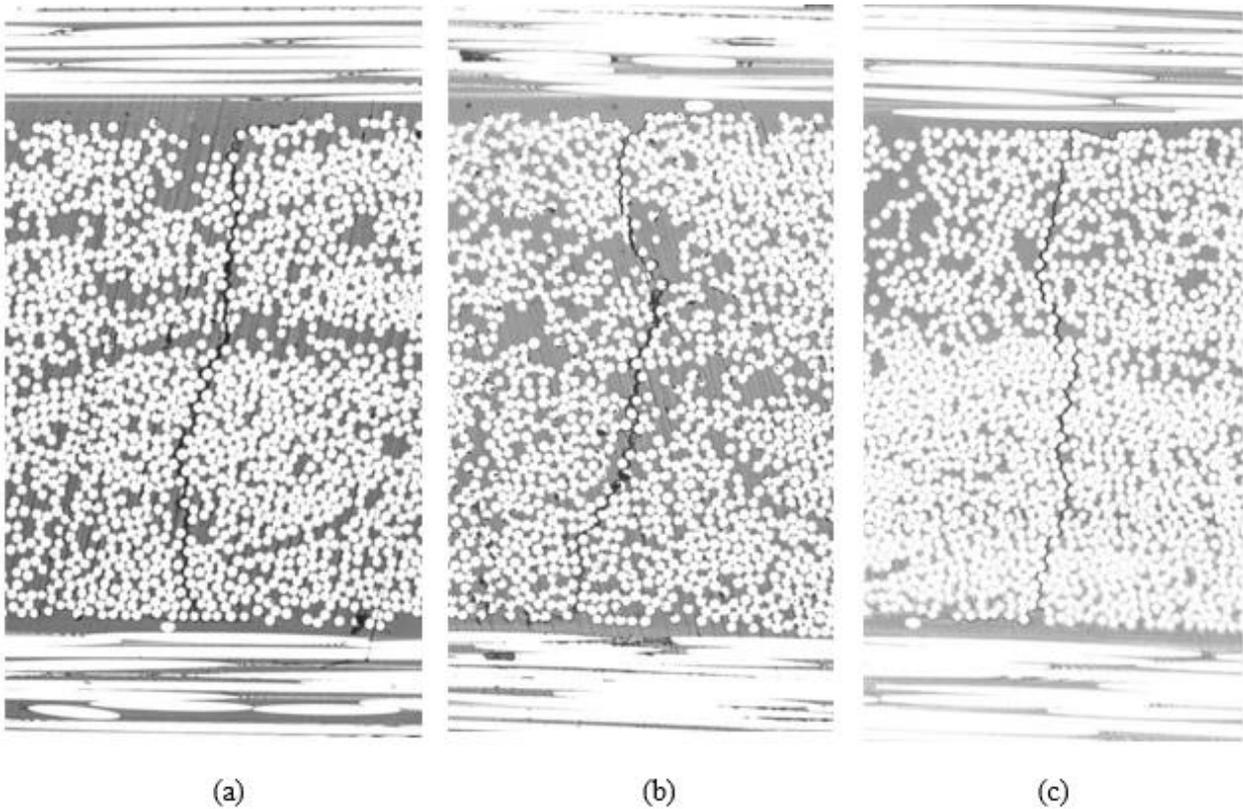


Figura 6-21. [04,90₂,04]: Grietas transversales a x200 observadas en: (a) Probeta 7; (b) Probeta 8; (c) Probeta 9.

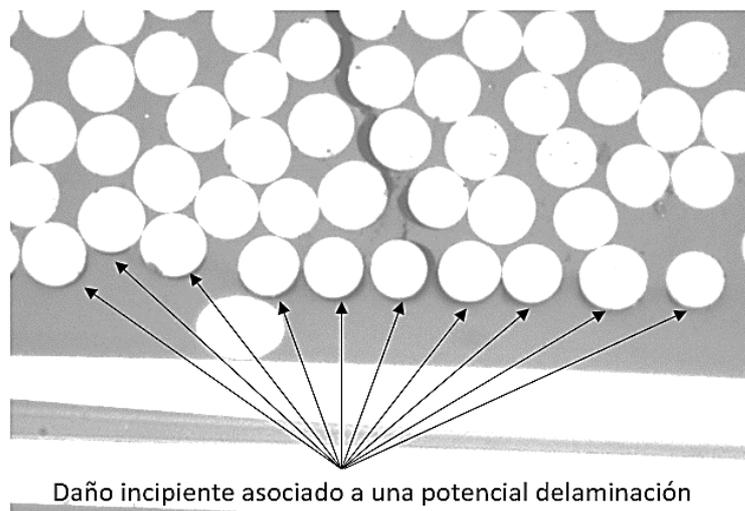


Figura 6-22. [04,90₂,04]: Probeta 8. Despegues aislados paralelos a las fibras de la lámina de 0 grados localizados en los extremos de la grieta transversal. Observados a x1000.

Por último, comentar que a pesar de que lo esperado es que cuando el daño se inicia se propague de forma perpendicular a la dirección de aplicación de la carga en este laminado se ha encontrado daño propagado en la dirección contraria. En la Figura 6-23 se recogen ejemplos de este efecto, identificándose este por la probeta en la que han aparecido y el nivel de carga.

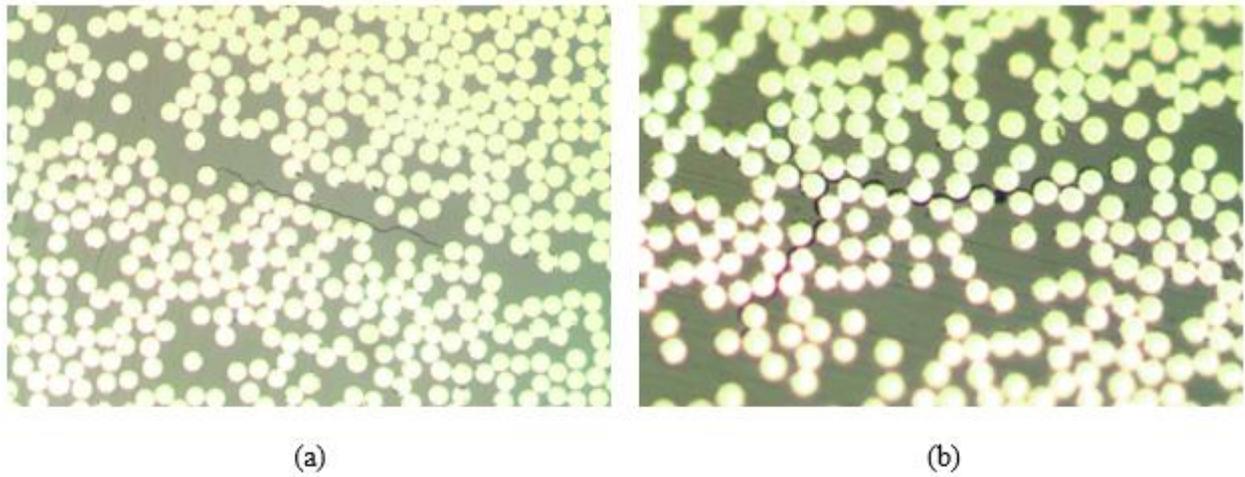


Figura 6-23. Daño propagado en la dirección de aplicación de la carga a x500. Figura (a): Probeta 8. Prueba 2; Figura (b) Probeta 11. Prueba 1.

En las gráficas 6-4 a 6-6 se ha representado el rango de valores de fuerza, tensión y deformación en el que se ha movido la aparición de la primera grieta transversal en este laminado. La probeta 11 se ha extraído de la representación gráfica porque en el incremento gradual de carga no se controló la aparición de la primera grieta y esta cuenta con dos grietas transversales. Hay que destacar que la aparición de estas dos grietas transversales se produjo a un nivel de carga y de deformación algo inferior, cuyos valores exactos se muestran en la Tabla 6-22.

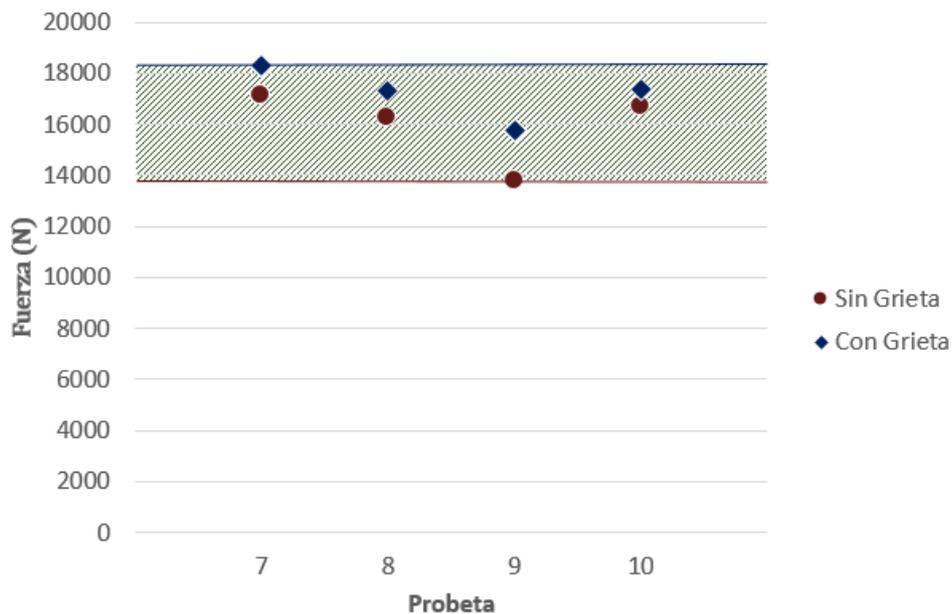


Gráfico 6-4. [0₄,90₂,0₄]: Fuerza. Rango de aparición de la primera grieta transversal.

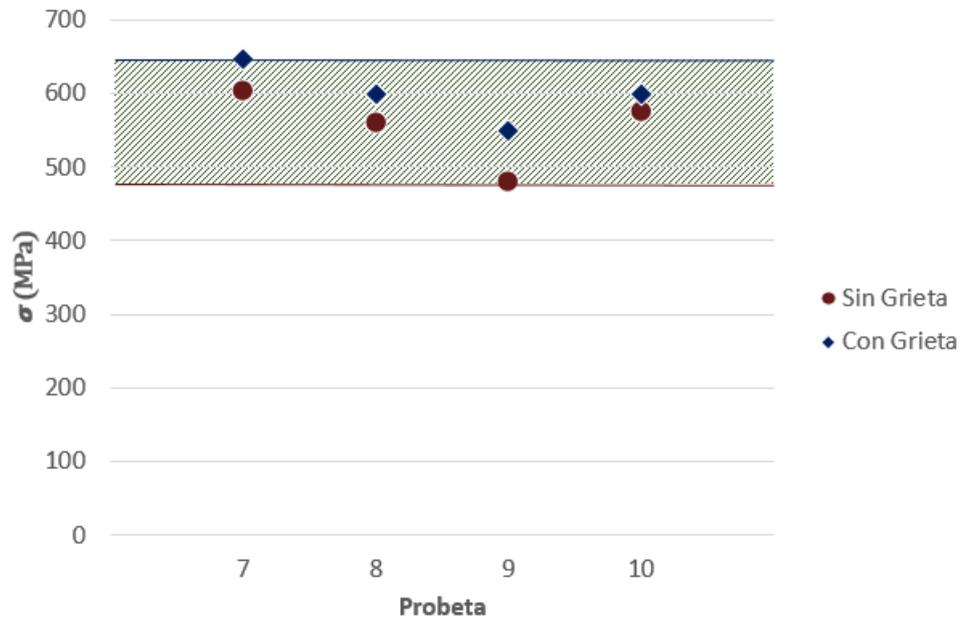


Gráfico 6-5. [0₄,90₂,0₄]: Tensión. Rango de aparición de la primera grieta transversal.

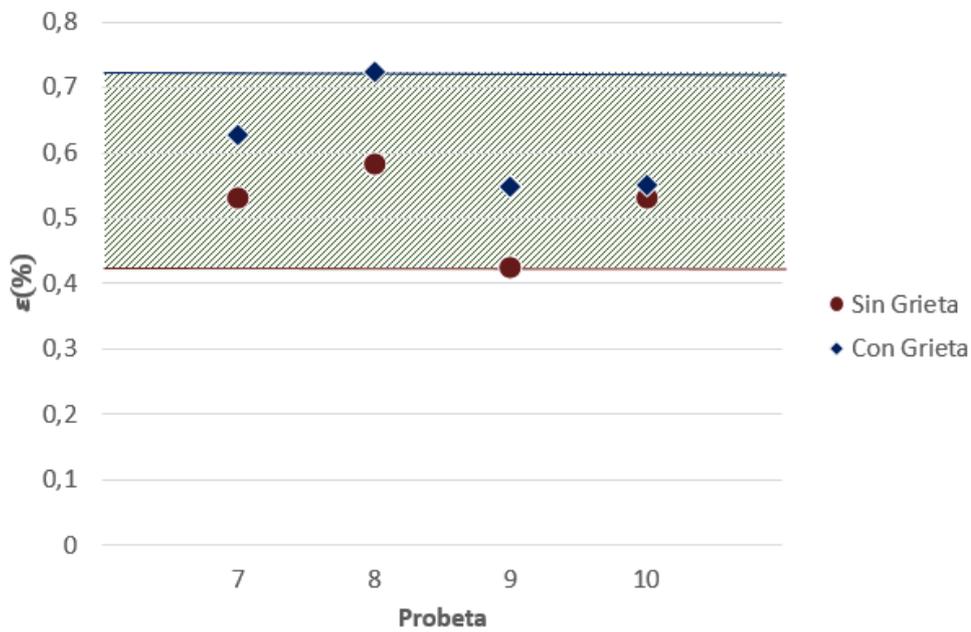


Gráfico 6-6. [0₄,90₂,0₄]: Deformación. Rango de aparición de la primera grieta transversal.

En la Tabla 6-23 se recoge un resumen de los intervalos representados en los gráficos con valores numéricos.

Tabla 6-23. [0₄,90₂,0₄]: Resumen de resultados. Rango de aparición de la primera grieta transversal.

	Mínimo	Máximo
Fuerza [N]	13753,62	18315,27
Tensión [MPa]	480,34	646,04
Deformación [%]	0,43	0,72
Porcentaje de la carga media a rotura [%]	31,66	42,17

6.2.3 Detección del primer daño transversal: Laminado [0₄,90₄,0₄]

Las dimensiones de la sección de las probetas del laminado [0₄,90₄,0₄] ensayadas a primera grieta transversal se recogen en la Tabla 6-24.

Tabla 6-24. Dimensiones de las probetas del laminado [0₄,90₄,0₄] ensayadas a primera grieta transversal

Probeta	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Área (mm ²)
19	2,1800	14,7500	32,1550
20	2,2367	14,5000	32,4321
21	2,1767	14,8467	32,3730
22	2,1467	14,6433	31,4760
23	2,1667	14,7200	31,9424
24	2,1533	14,8067	31,8415

A continuación, en las Tablas 6-25 a 6-30, se muestra el proceso de incremento gradual de carga experimentado por cada una de las probetas.

Tabla 6-25. [0₄,90₄,0₄]: Probeta 19. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar la primera grieta.

Probeta 19					
Prueba	Carga ensayo (N)	Apertura extensómetro (mm)	Deformación (%)	Presencia de grieta	Aviso sonoro
1	14273,55	0,2389	0,4778	NO	NO
2	15274,17	0,251	0,502	NO	NO
3	15960,87	0,2705	0,541	NO	NO
4	16264,98	0,2844	0,5688	SI	NO

Tabla 6-26. [0₄,90₄,0₄]: Probeta 20. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar la primera grieta.

Probeta 20					
Prueba	Carga ensayo (N)	Apertura extensómetro (mm)	Deformación (%)	Presencia de grieta	Aviso sonoro
1	14302,98	0,245	0,49	NO	NO
2	15803,91	0,2859	0,5718	SI	NO

Tabla 6-27. [0₄,90₄,0₄]: Probeta 21. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar la primera grieta.

Probeta 21					
Prueba	Carga ensayo (N)	Apertura extensómetro (mm)	Deformación (%)	Presencia de grieta	Aviso sonoro
1	12782,43	0,2302	0,4604	NO	NO
2	14646,33	0,2611	0,5222	SI	SI

Tabla 6-28. [0₄,90₄,0₄]: Probeta 22. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar la primera grieta.

Probeta 22					
Prueba	Carga ensayo (N)	Apertura extensómetro (mm)	Deformación (%)	Presencia de grieta	Aviso sonoro
1	13930,2	0,2208	0,4416	NO	NO
2	14312,79	0,2282	0,4564	NO	NO
3	14871,96	0,2436	0,4872	NO	NO
4	15352,65	0,2577	0,5154	NO	NO
5	15852,96	0,2611	0,5222	SI	NO

Tabla 6-29. [0₄,90₄,0₄]: Probeta 23. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar la primera grieta.

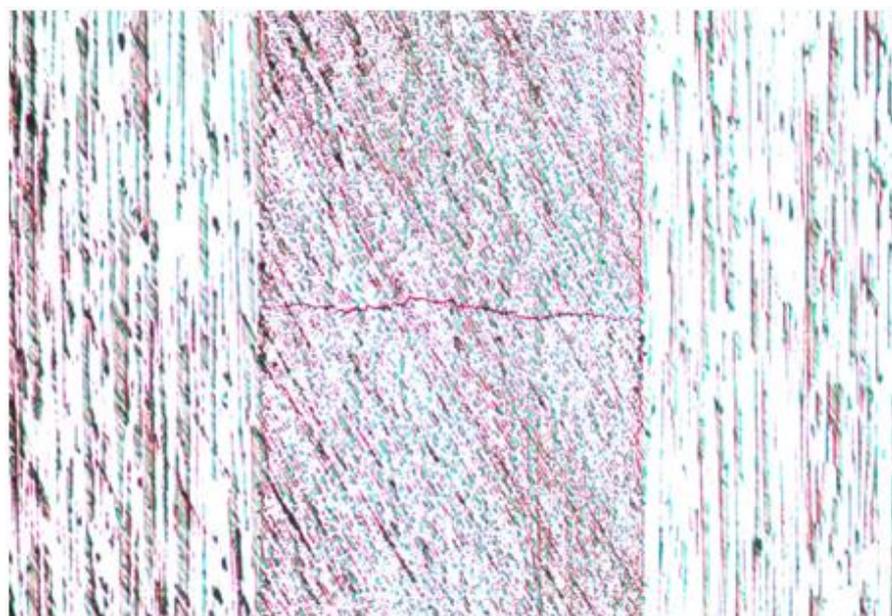
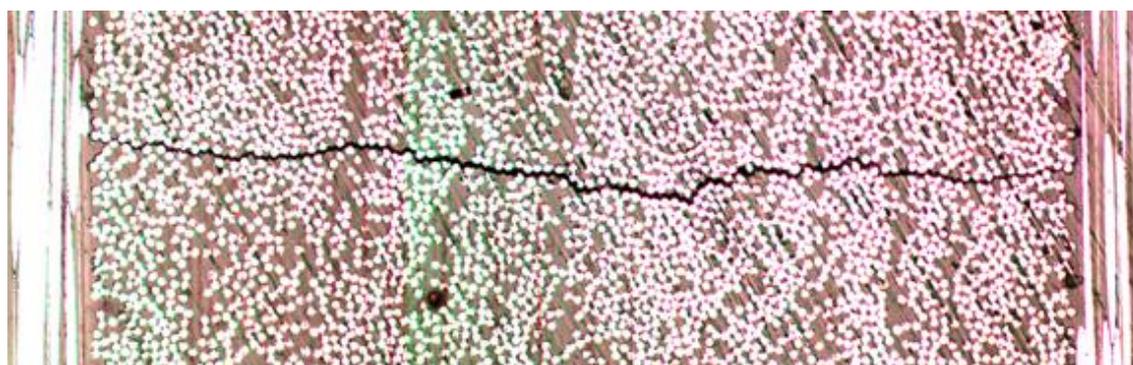
Probeta 23					
Prueba	Carga ensayo (N)	Apertura extensómetro (mm)	Deformación (%)	Presencia de grieta	Aviso sonoro
1	14283,36	0,245	0,49	NO	NO
2	14754,24	0,245	0,49	NO	NO
3	15293,79	0,2222	0,4444	NO	NO
4	16019,73	0,2476	0,4952	1 despegue	NO
5	16480,8	0,2877	0,5754	3	NO

Tabla 6-30. [0₄,90₄,0₄]: Probeta 24. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar la primera grieta.

Probeta 24					
Prueba	Carga ensayo (N)	Apertura extensómetro (mm)	Deformación (%)	Presencia de grieta	Aviso sonoro
1	14744,43	0,2517	0,5034	NO	NO
2	14960,25	0,2651	0,5302	Despegus	NO
3	15764,67	0,2792	0,5584	Despegues	NO
4	16078,59	0,2805	0,561	Grieta	NO

En la probeta 23 no fue posible encontrar una única grieta transversal, por lo que se excluye del análisis de resultados.

En las Figuras 6-24 a 6-26 se ve una muestra del daño experimentado por las probetas. En todas las muestras tenidas en cuenta se ha encontrado una grieta transversal completa y daño incipiente asociado a una futura delaminación en distintas fases de desarrollo.

Figura 6-24. [0₄,90₄,0₄]: Probeta 18. Primera grieta transversal a x50.Figura 6-25. [0₄,90₄,0₄]: Probeta 19. Primera grieta transversal a x200.

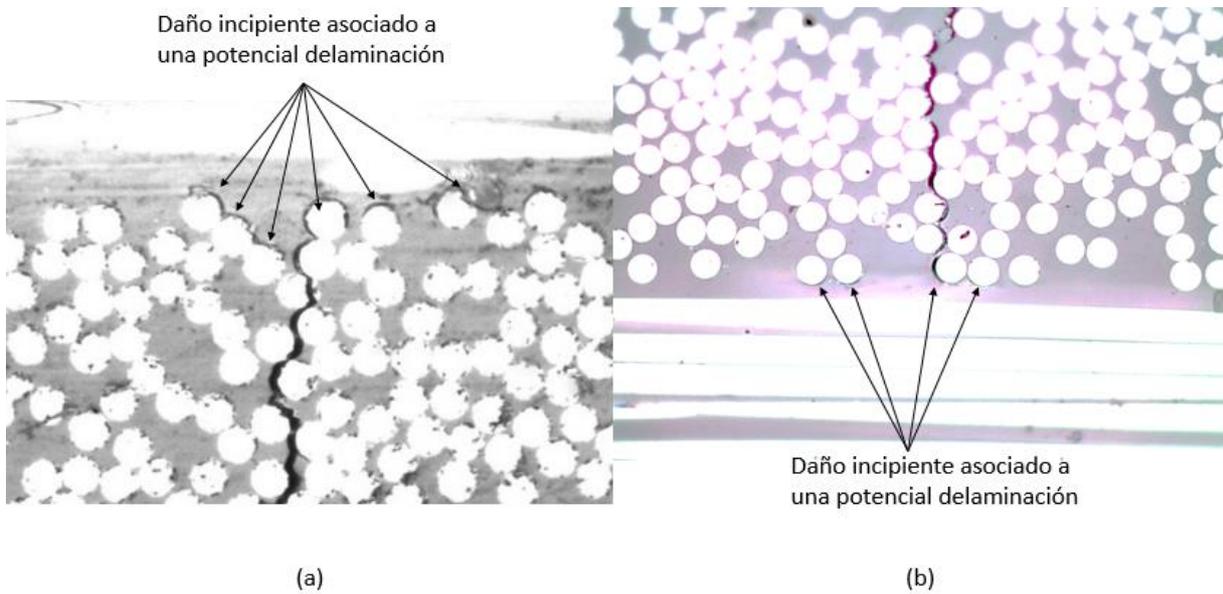


Figura 6-26. [0₄,90₄,0₄]. Daño incipiente asociado a una potencial delaminación en la primera grieta transversal encontrada. (a) Probeta 19. Prueba 4; (b) Probeta 20. Prueba 2.

En las gráficas 6-7 a 6-9 se ha representado el rango de valores de fuerza, tensión y deformación en el que se ha movido la aparición de la primera grieta transversal en este laminado.

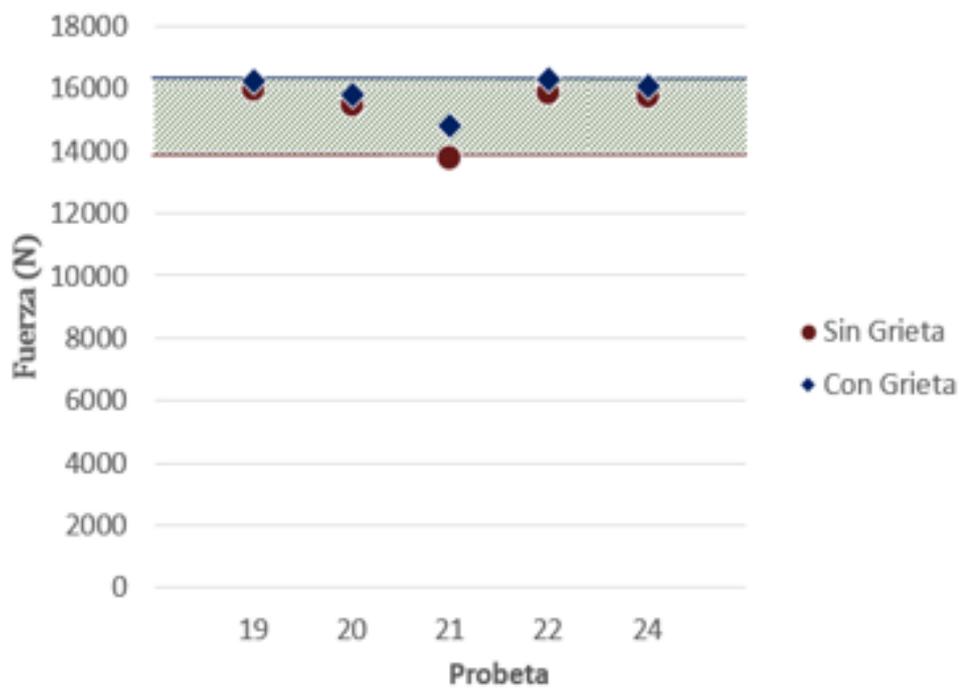


Gráfico 6-7. [0₄,90₄,0₄]: Fuerza. Rango de aparición de la primera grieta transversal.

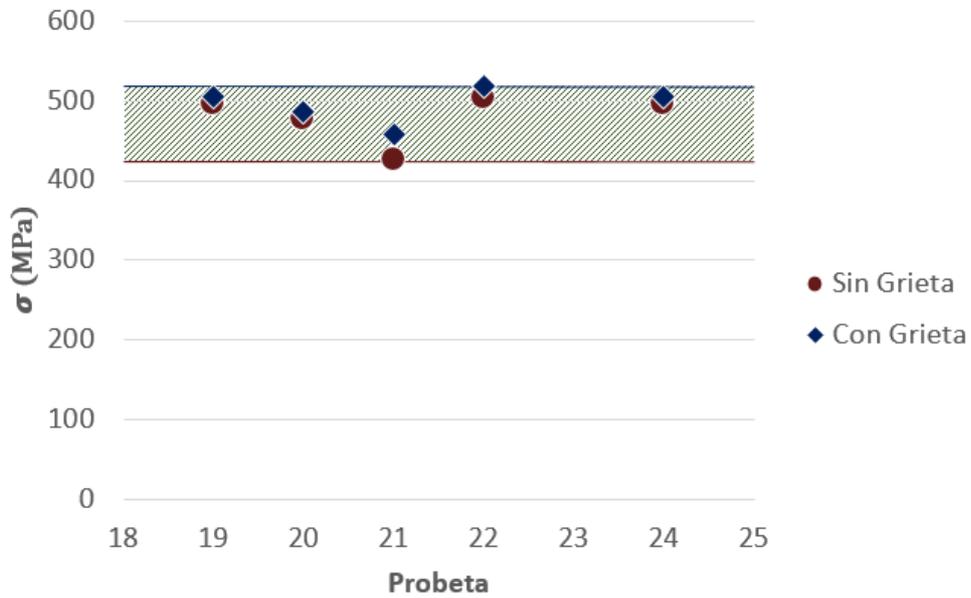


Gráfico 6-8. [0₄,90₄,0₄]: Tensión. Rango de aparición de la primera grieta transversal.

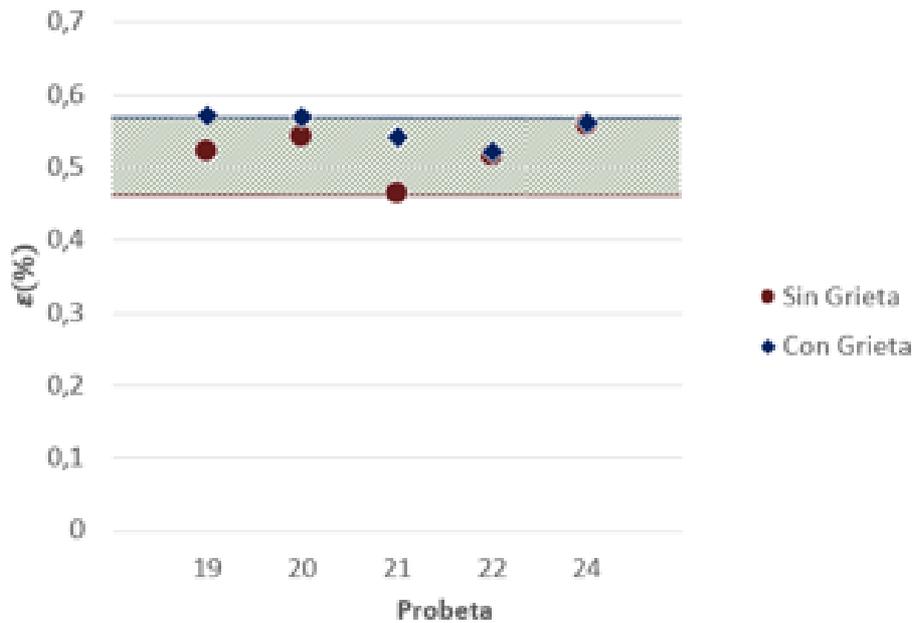


Gráfico 6-9. [0₄,90₄,0₄]: Deformación. Rango de aparición de la primera grieta transversal.

En la Tabla 6-31 se recoge un resumen de los intervalos representados en los gráficos con valores numéricos.

Tabla 6-31.[0₄,90₄,0₄]: Resumen de resultados. Rango de aparición de la primera grieta transversal.

	Mínimo	Máximo
Fuerza [N]	13792,86	16323,84

Tensión [MPa]	426,06	518,61
Deformación [%]	0,46	0,55
Porcentaje de la carga media a rotura [%]	24,64	35,08

6.2.4 Detección del primer daño transversal: Laminado [0₄,90₈,0₄]

Por último, se muestran los resultados para el laminado que cuenta con un mayor número de láminas a 90 grados. En la Tabla 6-32 se muestran las dimensiones de las probetas del laminado [0₄,90₈,0₄] ensayadas a primera grieta transversal.

Tabla 6-32. Dimensiones de las probetas del laminado [0₄,90₈,0₄] ensayadas a primera grieta transversal.

Probeta	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Área (mm²)
20	2,9803	15,0400	44,9182
21	3,0267	14,8767	45,0864
23	2,9900	14,9167	44,6108
24	2,9700	14,9833	44,4906
25	2,9367	14,9467	43,9530

A continuación, en las Tablas 6-33 a 6-37 se puede ver el proceso de aumento gradual de carga a la que se ha sometido cada una de las muestras. Puede observarse que, aunque en las primeras muestras ensayadas ha sido necesario un mayor número de pruebas para encontrar la primera grieta transversal, una vez que se ha acotado el rango de carga en la que esta aparece para este laminado el número de pruebas realizadas ha sido mucho menor.

Tabla 6-33.[0₄,90₈,0₄] : Probeta 20. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar la primera grieta.

Probeta 20					
Prueba	Carga ensayo (N)	Apertura extensómetro (mm)	Deformación (%)	Presencia de grieta	Aviso sonoro
1	8864,316	0,1329	0,2658	NO	NO
2	9075,231	0,1376	0,2752	NO	SI
3	9898,29	0,1732	0,3464	NO	SI
4	10849,86	0,1733	0,3466	NO	NO
5	11850,48	0,1772	0,3544	NO	SI
6	12340,98	0,1919	0,3838	SI	NO

Tabla 6-34. [0₄,90₈,0₄]: Probeta 21. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar la primera grieta.

Probeta 21					
Prueba	Carga ensayo (N)	Apertura extensómetro (mm)	Deformación (%)	Presencia de grieta	Aviso sonoro
1	10329,93	0,1671	0,3342	NO	SI
2	11821,05	0,1933	0,3866	NO	SI
3	12321,36	0,2081	0,4162	NO	SI
4	12880,53	0,2081	0,4162	NO	NO
5	13812,48	0,2188	0,4376	NO	NO
6	15146,64	0,2289	0,4578	NO	NO
7	15951,06	0,2497	0,4994	NO	SI
8	16755,48	0,2758	0,5516	NO	SI
9	17805,15	0,2497	0,4994	NO	SI
10	18688,05	0,2906	0,5812	SI	SI

Tabla 6-35. [0₄,90₈,0₄]: Probeta 23. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar la primera grieta.

Probeta 23					
Prueba	Carga ensayo (N)	Apertura extensómetro (mm)	Deformación (%)	Presencia de grieta	Aviso sonoro
1	13066,92	0,2107	0,4214	NO	SI
2	14705,19	0,2168	0,4336	NO	SI
3	15754,86	0,2201	0,4402	NO	SI
4	16716,24	0,2523	0,5046	NO	SI
5	17716,86	0,2577	0,5154	NO	SI
6	18619,38	0,2886	0,5772	SI	SI

Tabla 6-36. [0₄,90₈,0₄]: Probeta 24. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar la primera grieta.

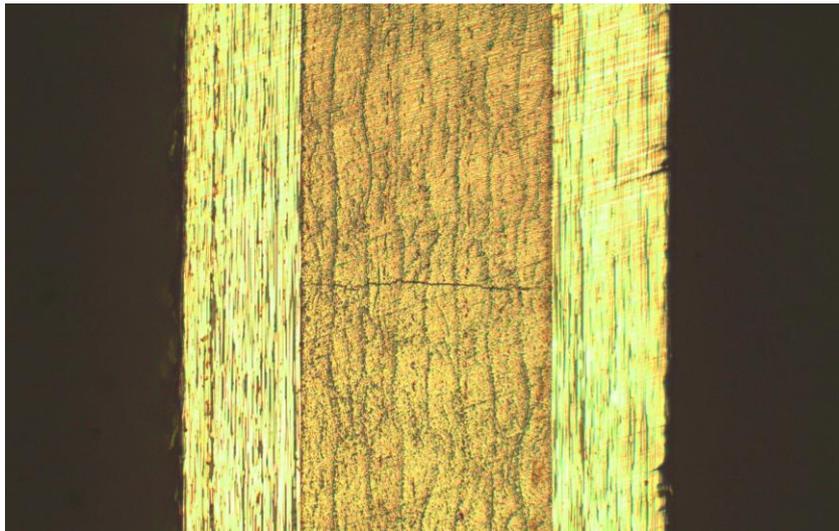
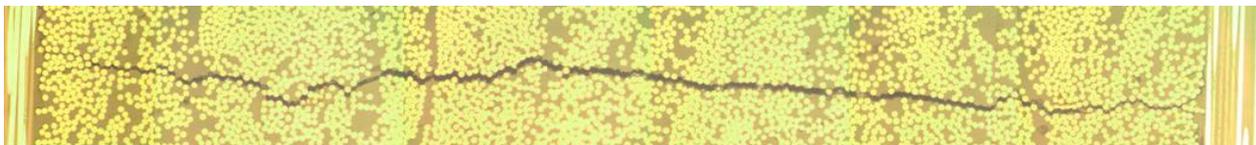
Probeta 24					
Prueba	Carga ensayo (N)	Apertura extensómetro (mm)	Deformación (%)	Presencia de grieta	Aviso sonoro
1	14057,73	0,2302	0,4604	NO	SI
2	15313,41	0,2523	0,5046	SI	SI

Tabla 6-37. [04,90₈,0₄]: Probeta 25. Proceso de incremento gradual de carga hasta encontrar la primera grieta.

Probeta 25					
Prueba	Carga ensayo (N)	Apertura extensómetro (mm)	Deformación (%)	Presencia de grieta	Aviso sonoro
1	12802,05	0,2195	0,439	NO	SI
2	14293,17	0,2349	0,4698	SI	SI

Tal y como se ha comentado en el laminado [04,90₈,0₄] se ha realizado un recorrido con la lupa durante el ensayo para identificar cuando se producía la grieta transversal. En las Figuras 6-27 y 6-28 se pueden ver muestras de las grietas halladas con la lupa y cómo se han visto estas al microscopio. En cada una de las muestras analizadas se ha observado una grieta transversal completa más daño avanzado asociado a la delaminación. Un ejemplo de esto se ve en la Figura 6-29. Además, tal y como se ve en la Figura 6-30, en la probeta 24 se encontró una serie de despegues continuos transversales a la dirección de aplicación de la carga lo que hace pensar que si se hubiera seguido cargando un poco más habrían dado lugar a una segunda grieta transversal.

En las gráficas 6-10 a 6-12 se representan los resultados.

Figura 6-27. [04,90₈,0₄]: Probeta 23. Primera grieta transversal fotografiada con la probeta cargada.Figura 6-28. [04,90₈,0₄]: Probeta 23. Primera grieta transversal a x200.

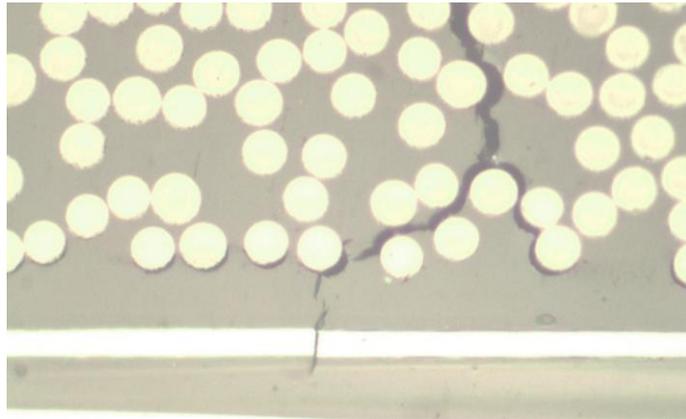


Figura 6-29. $[0_4,90_8,0_4]$: Probeta 21. Prueba 10. Daño incipiente asociado a una potencial delaminación en la primera grieta transversal encontrada.

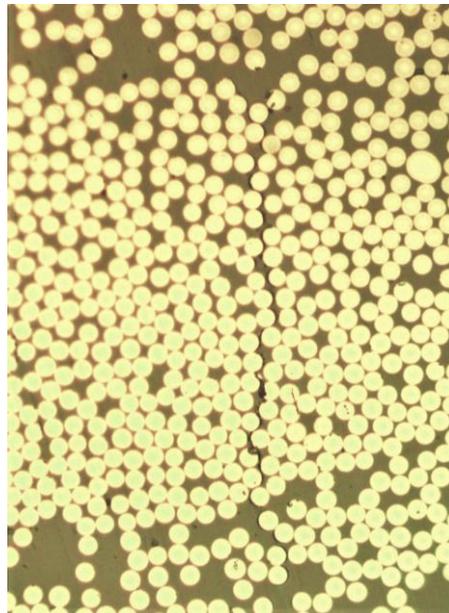


Figura 6-30. $[0_4,90_8,0_4]$: Probeta 24. Prueba 2. Despegues continuos a x500.

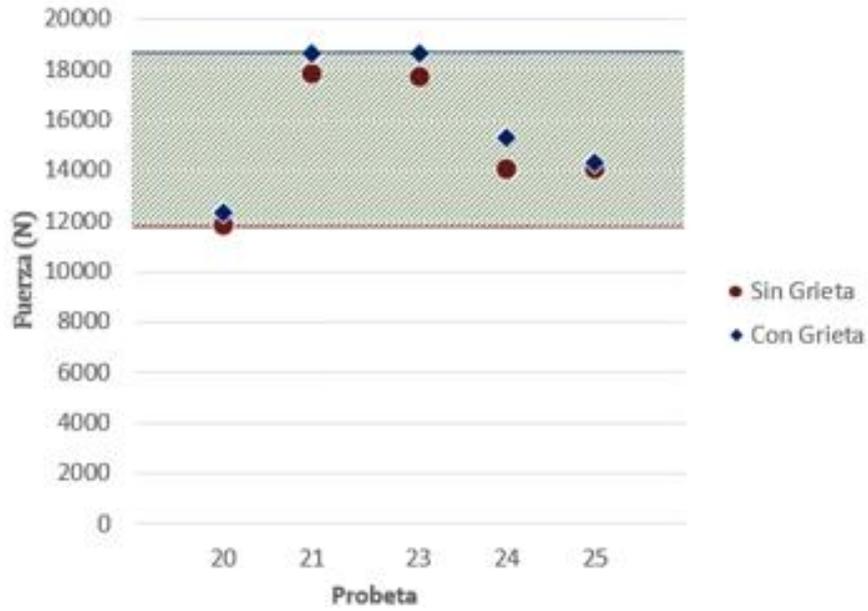


Gráfico 6-10. [04,90₈,0₄]: Fuerza. Rango de aparición de la primera grieta transversal.

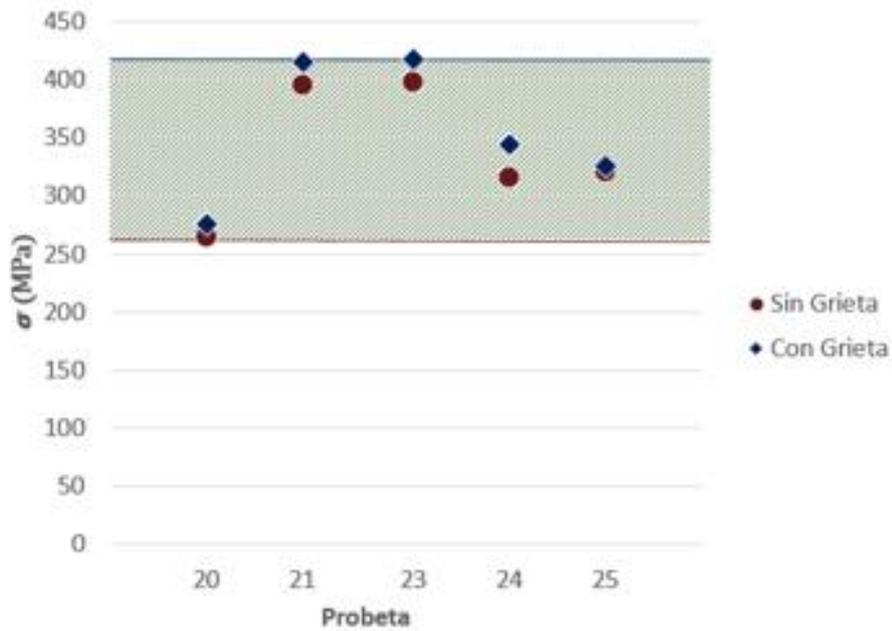


Gráfico 6-11. [04,90₈,0₄]: Tensión. Rango de aparición de la primera grieta transversal.

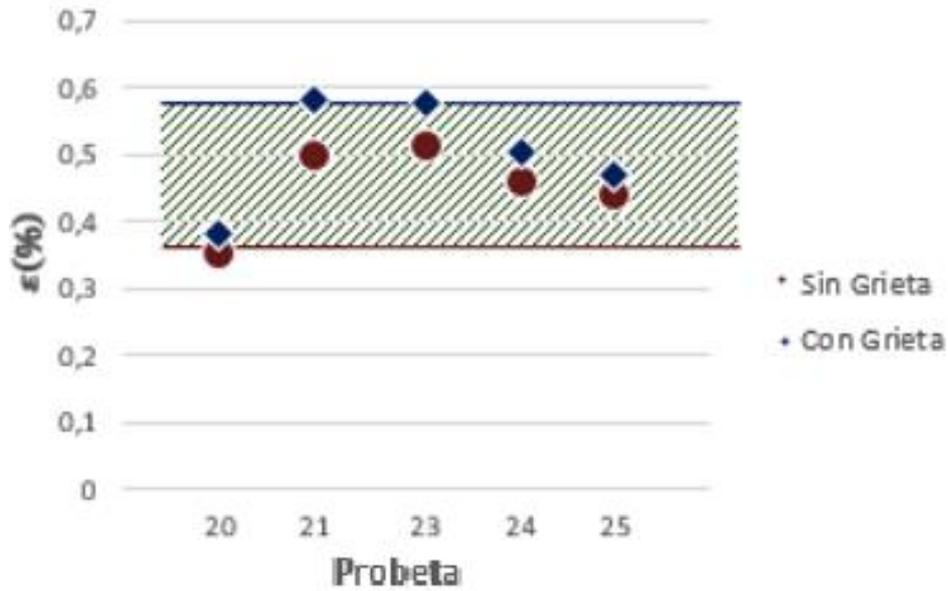


Gráfico 6-12. [0₄,90₈,0₄]: Deformación. Rango de aparición de la primera grieta transversal.

En la Tabla 6-38 se recoge el resumen de resultados obtenidos para el laminado [0₄, 90₈, 0₄].

Tabla 6-38. [0₄,90₈,0₄]: Resumen de resultados. Rango de aparición de la primera grieta transversal.

	Mínimo	Máximo
Fuerza [N]	11850,48	18688,05
Tensión [MPa]	264,41	417,37
Deformación [%]	0,38	0,51
Porcentaje de la carga media a rotura [%]	28,22	42,74

7 INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LA CAPA A 0°: ESTUDIO LAMINADOS [0_Q,90,0_Q]

A la hora de estudiar la influencia de variar el espesor de las láminas a 0 grados vamos a diferenciar dos grupos: [0_P,90₄,0_P] y [0_Q,90,0_Q], rescatando de la sección 6 los casos $P = 4$ y $Q = 4$.

A estos laminados se les va a someter al mismo tipo de ensayos ya empleados para estudiar la influencia del espesor de las láminas a 90 grados.

A continuación se describen los resultados obtenidos para los laminados [0_Q,90,0_Q].

7.1 Detección del daño al primer aviso sonoro

Siguiendo el mismo procedimiento que con las probetas en las que se ha analizado el efecto que tiene variar el espesor de las láminas a 90 grados, se ha intentado relacionar el primer aviso sonoro de rotura en la capa de 90 grados con la aparición de daño en la sección del laminado conformado por láminas a 90 grados con respecto a la dirección de aplicación de la carga.

Para ello se han ensayado 5 muestras de cada laminado hasta el primer aviso de daño y una vez escuchado este se ha detenido la máquina de ensayo, se ha descargado y se ha analizado la muestra en el microscopio. En los ensayos se ha variado la velocidad de 0.1 a 0.2 mm/min y en algunos se ha empleado el extensómetro y en otros no, debido a que fue durante la realización de estos ensayos cuando se decidió usarlo para ver a qué deformación aparecía el primer daño. En aquellos ensayos en los que se ha utilizado se incluirá el valor de la deformación.

7.1.1 Detección del daño al primer aviso sonoro: Laminado [0,90,0]

Aunque en un primer momento, tal y como se ha comentado, se prepararon 5 probetas para detectar el primer aviso sonoro, finalmente solo se ensayó una y se decidió ensayar las demás a porcentajes de la carga de rotura debido a que esta se rompió sin escuchar ningún tipo de aviso sonoro.

Las dimensiones y los resultados de carga a la que rompió la probeta ensayada se recogen en las Tablas 7-1 y 7-2 respectivamente.

Probeta	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Área (mm ²)
5	0,5600	14,7300	8,2488

Tabla 7-1. Dimensiones de las probetas del laminado [0,90,0] ensayadas al primer aviso sonoro.

Probeta	Carga primer aviso sonoro	Carga de rotura (N)	Tensión rotura (MPa)	Porcentaje de la cara de rotura (%)	Presencia de grieta
5	—	5928,18	718,67	85,10	NO

Tabla 7-2. Resultados del ensayo a primer aviso sonoro de la probeta del laminado [0,90,0].

Esta probeta rompió antes de que se escuchara aviso sonoro de rotura de fibra. Se ve que la tensión a la que se rompió la probeta es muy inferior a su carga de rotura. Este hecho se achacó a las muescas, es decir, a los cambios de sección que deja el proceso de lijado y pulido al que se somete a las probetas. Por ello, se decidió cortar las probetas por la zona de las muescas para que toda la probeta cuente con la misma sección en los ensayos posteriores.

Hay que destacar que la probeta no se rompió de forma explosiva, sino que se rompió formando un corte seco en la dirección perpendicular a la dirección de aplicación de la carga, tal y como se ve en la Figura 7-1, y que tras ser analizada en el microscopio no se encontró daño en el resto de la sección.



Figura 7-1. [0,90,0]: Probeta 5. Ensayo al 80% de carga. Rotura.

7.1.2 Detección del daño al primer aviso sonoro: Laminado [0₂,90,0₂]

En el laminado [0₂,90,0₂] se han ensayado a primer aviso sonoro las probetas nombradas en la nomenclatura de 6 a 10. Las dimensiones de estas probetas se recogen en la Tabla 7-3. A continuación, en la Tabla 7-4, se muestran los valores de carga y tensión a los que se apreció el primer aviso de daño, el porcentaje de la carga de rotura que esta carga supone y si se ha observado o no grieta.

Tabla 7-3. Dimensiones de las probetas del laminado [0₂,90,0₂] ensayadas al primer aviso sonoro.

Probeta	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Área (mm ²)
6	1,0267	14,6133	15,0483
7	1,0433	14,7800	15,3712
8	1,0733	14,4933	15,5043
9	1,0530	14,48	15,2040
10	1,0067	14,7300	14,8282

Tabla 7-4. Resultados del ensayo a primer aviso sonoro de las probetas del laminado [0₂,90,0₂].

Probeta	Carga primer aviso sonoro (N)	Tensión primer aviso sonoro (MPa)	Porcentaje de la carga de rotura (%)	Presencia de grietas
6	14401,08	956,99	73,90	NO
7	16108,20	1047,95	82,66	NO

8	11438,27	737,75	58,69	NO
9	14832,72	975,58	76,12	NO
10	7863,70	533,86	40,35	NO

Se observa que el primer aviso sonoro de daño aparece para un amplio rango de carga, que va desde el 40,35% al 82,66% de la carga de rotura del laminado. Sin embargo, al ser inspeccionadas en el microscopio ninguna de las muestras presentaba daño, por lo que no ha sido posible relacionar el primer aviso sonoro de rotura con la aparición de daño a escala microscópica en la sección de láminas a 90 grados.

7.1.3 Detección del daño al primer aviso sonoro: Laminado [0₄,90,0₄]

Los resultados obtenidos para este laminado a primer aviso sonoro se recogen en un proyecto anterior [1] y a efectos de analizar los resultados del presente proyecto no se van a tener en cuenta.

7.2 Ensayos al 80% de la carga de rotura

Al no ser posible relacionar el primer aviso sonoro con la presencia de daño transversal y al romperse las probetas [0,90,0] sin presencia de grieta se decidió cargar 3 probetas de cada laminado a un porcentaje determinado de su correspondiente carga de rotura y, a partir de ahí, realizar el aumento gradual de carga.

En base a los resultados obtenidos en el ensayo a primer aviso sonoro se decidió partir de un 80% de carga.

Para aplicar el porcentaje se tomó la tensión media de rotura del laminado correspondiente calculada en la sección 5 y se multiplicó por el área de la probeta a ensayar.

Los ensayos se realizaron a una velocidad de 0.2mm/min. Las probetas estaban preparadas y cortadas por las zonas de las muescas y se colocó el extensómetro.

7.2.1 Ensayos al 80% de la carga de rotura: Laminado [0,90,0]

En la Tabla 7-5 se muestran las dimensiones de las probetas del laminado [0,90,0] ensayadas al 80% de la carga media de rotura. En la Tabla 7-6 se recogen las cargas a las que han sido ensayadas cada una de las muestras, si durante el proceso de carga ha sido posible detectar o no aviso de rotura y si, al ser analizadas las muestras al microscopio, se ha observado la aparición de algún daño.

Tabla 7-5. Dimensiones de las probetas del laminado [0,90,0] ensayadas al 80% de la carga de rotura.

Probeta	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Área (mm ²)
6	0,5753	14,4167	8,2915
7	0,5933	14,6767	8,6612
8	0,5467	14,6267	8,0465

Tabla 7-6. Resultados del ensayo al 80% de la carga de rotura de las probetas del laminado [0,90,0].

Probeta	Carga ensayo (N)	Apertura extensómetro	Deformación (%)	Presencia de grieta	Aviso sonoro
---------	------------------	-----------------------	-----------------	---------------------	--------------

(mm)					
6	5562,27	0,3624	0,7248	NO	NO
7	5968,404	0,3819	0,7638	NO	NO
8	5613,282	0,3557	0,7114	NO	NO

Se ve que a este nivel de carga no aparece ni aviso sonoro de daño ni presencia de grieta. Estos valores se emplearon para obtener un valor del que partir en el proceso de incremento gradual de carga que se realizó posteriormente.

7.2.1 Ensayos al 80% de la carga de rotura: Laminado [0₂,90,0₂]

En la Tabla 7-7 se muestran las dimensiones de las probetas del laminado [0₂,90,0₂] ensayadas al 80% de la carga media de rotura. En la Tabla 7-8 se recogen las cargas a las que han sido ensayadas cada una de las muestras, si durante el proceso de carga ha sido posible detectar o no aviso de rotura y si, al ser analizadas las muestras al microscopio, se ha observado la aparición de algún daño.

Tabla 7-7. Dimensiones de las probetas del laminado [0₂,90,0₂] ensayadas al 80% de la carga de rotura.

Probeta	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Área (mm ²)
12	1,0567	14,3933	15,2534
13	1,0467	14,2433	14,9520
14	1,1000	14,8133	16,2910

Tabla 7-8. Resultados del ensayo al 80% de la carga de rotura de las probetas del laminado [0₂,90,0₂].

Probeta	Carga ensayo (N)	Porcentaje de la carga de rotura (%)	Apertura extensómetro (mm)	Deformación (%)	Presencia de grieta	Aviso sonoro
12	14607,09	74,96	0,3906	0,78	SI (+1)	SI (1,260 toneladas)
13	14322,6	73,5	0,4302	0,86	SI (+1)	SI(1,256 toneladas)
14	15588,09	79,99	0,4584	0,92	NO	SI(1,589 toneladas)

En dos de las probetas ensayadas sí que se encontró daño. Además, tal y como se ve en las Figuras 7-2 y 7-3 se trata de un daño generalizado, en el que aparecen grandes delaminaciones entre las láminas a 0 grados y las láminas a 90 grados y en la que la mayoría de las grietas aparecen inclinadas formando un ángulo aproximado de 45 grados con respecto a la dirección de aplicación de la carga. Además en ambas probetas existía una alta densidad de grietas.

Hay que destacar el hecho de que cuando se encontró el daño ya se había producido el primer aviso sonoro de daño (en las Tablas se da el valor numérico en toneladas de la carga a la que se escuchó).

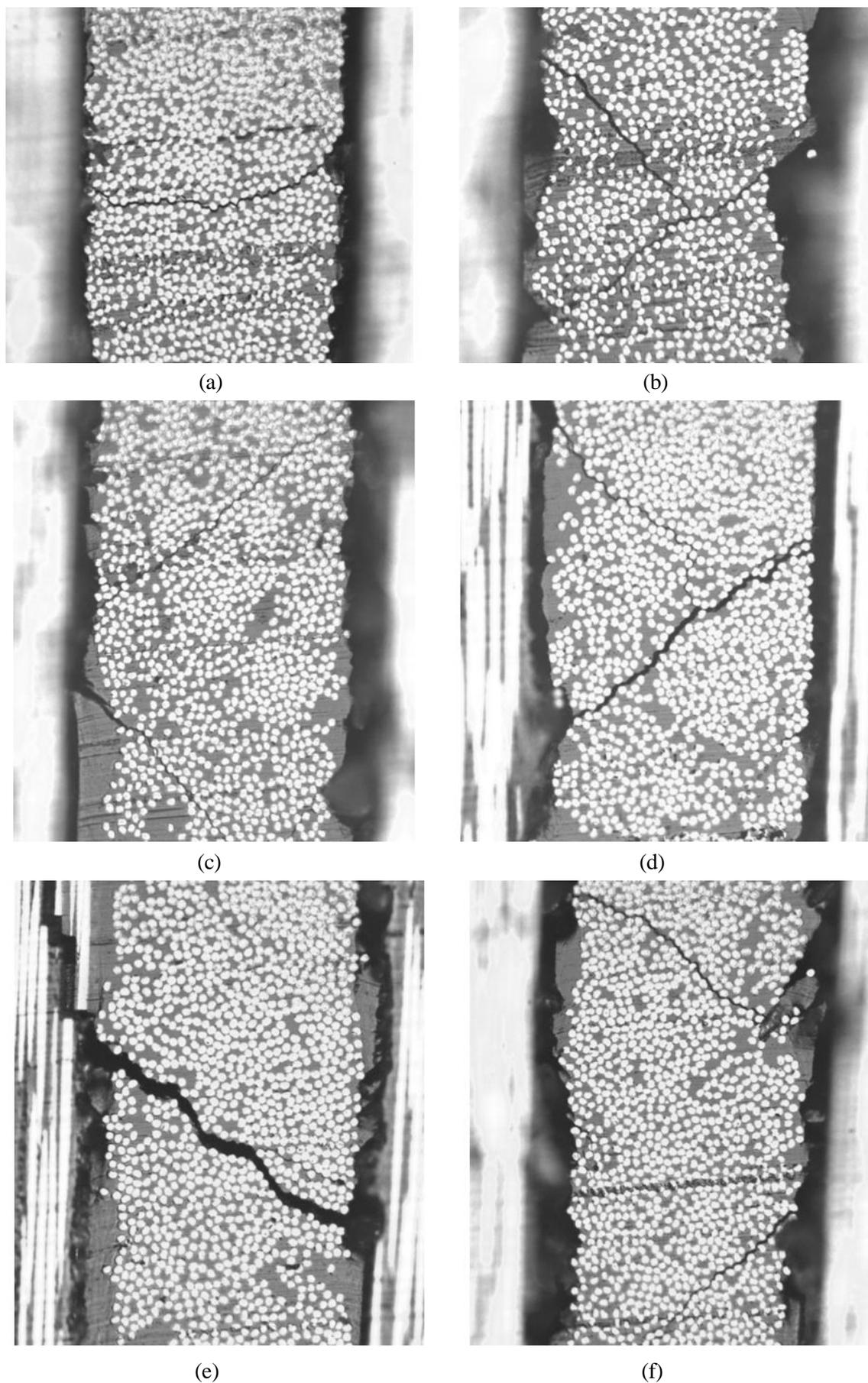


Figura 7-2. $[0_2,90_2,0_2]$. Probeta 12. (a)-(f) Grietas transversales y delaminaciones a x200.

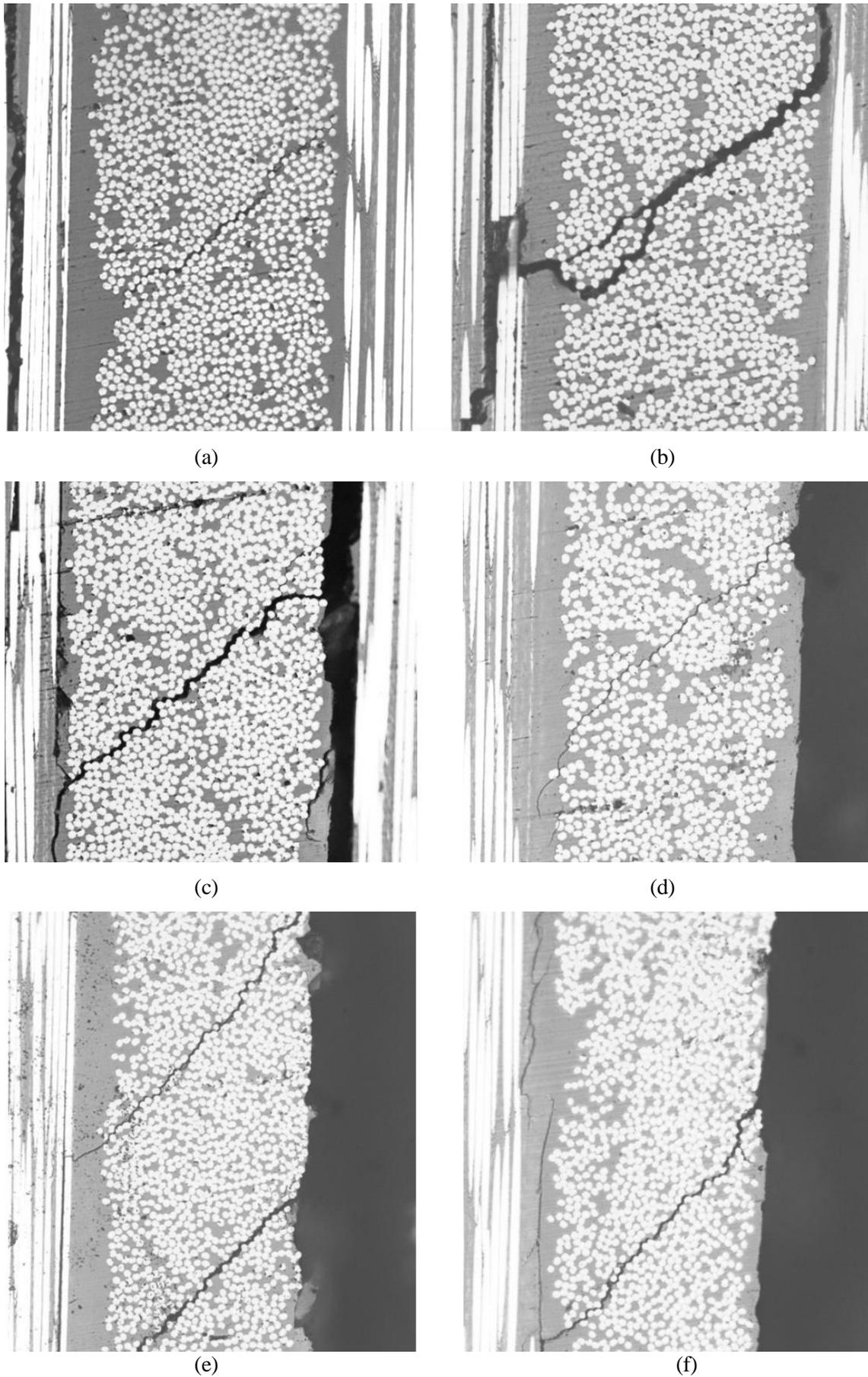


Figura 7-3. $[0_2,90,0_2]$: Probeta 13. (a)-(f) Grietas transversales y delaminaciones a x200.

7.3 Detección del primer daño transversal: aumento gradual de carga

7.3.1 Detección del primer daño transversal: Laminado [0,90,0]

En primer lugar, en la Tabla 7-9, se recogen las dimensiones de las probetas del laminado [0,90,0] sometida a un proceso de aumento gradual de carga.

A continuación, en la Tabla 7-10, se muestran los resultados obtenidos a la hora de tratar de encontrar en qué momento se produce el primer daño transversal generalizado o la primera grieta transversal para el laminado [0,90,0].

Tabla 7-9. Dimensiones de las probetas del laminado [0,90,0] ensayadas a aumento de carga gradual.

Probeta	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Área (mm ²)
6	0,5750	14,4167	8,2915

Tabla 7-10. [0,90,0]: Probeta 6. Proceso de incremento gradual de carga.

Probeta 6					
Prueba	Carga ensayo (N)	Apertura extensómetro (mm)	Deformación (%)	Presencia de daño	Aviso sonoro
1	5562,27	0,3624	0,7248	NO	NO
2	5625,05	0,4013	0,8026	ROTA	NO

Se ve que al incrementar gradualmente la carga las probetas rompían antes de que se llegara a encontrar la primera grieta. Además, tampoco se apreciaba aviso sonoro de daño.

Es destacable el hecho de que ninguna de las dos probetas alcanzara su carga de rotura y rompiera incluso a cargas inferiores a las que ya se había sometido la misma probeta. Esto hace pensar que alguno de los valores de carga anteriores aplicados ha sido suficiente para dañar la probeta y generar el debilitamiento de la misma.

En la Tabla 7-11 se puede ver a qué porcentaje de la carga de rotura nominal calculada en el capítulo 5 ha roto la probeta 6 del laminado [0,90,0].

Tabla 7-11. [0,90,0]: Resumen de resultados del proceso de aumento gradual de carga.

Probeta	Máxima carga que ha aguantado antes de la rotura	Porcentaje de la carga de rotura
6	5625,05	65,18%

7.3.2 Detección del primer daño transversal: Laminado [0₂,90,0₂]

En este apartado se recogen los resultados para el laminado [0₂,90,0₂]. En la Tabla 7-12 se pueden ver las dimensiones de las probetas de este laminado ensayadas aplicando un aumento gradual de carga. A continuación, en las Tablas 7-13 y 7-14 se muestra el proceso de aumento gradual de carga al que se han sometido las muestras.

En esta tabla se puede apreciar que se produce el mismo mecanismo de fallo que en el laminado [0,90,0]: las probetas se debilitan al ser cargadas y descargadas y rompen a una carga inferior a la de rotura, con un corte perpendicular a la dirección de la carga y sin que se aprecie más daño en la sección.

En la Tabla 7-15 aparece a qué porcentaje de la carga media de rotura del laminado determinada experimentalmente se rompió cada probeta.

Tabla 7-12. Dimensiones de las probetas del laminado [0₂,90,0₂] ensayadas a aumento de carga gradual.

Probeta	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Área (mm ²)
14	1,0667	14,8100	16,291
15	1,0800	14,7600	15,9408

Tabla 7-13. [0₂,90,0₂]: Probeta 14. Proceso de incremento gradual de carga.

Probeta 14					
Prueba	Carga ensayo (N)	Apertura extensómetro (mm)	Deformación (%)	Presencia de daño	Aviso sonoro
1	15588,09	0,4584	0,9168	NO	SI(Primero a 1,59 toneladas)
2	16108,02	0,5396	1,0792	NO	NO
3	13243,5	0,4604	0,9208	NO	SI

Tabla 7-14. [0₂,90,0₂]: Probeta 15. Proceso de incremento gradual de carga.

Probeta 15					
Prueba	Carga ensayo (N)	Apertura extensómetro (mm)	Deformación (%)	Presencia de daño	Aviso sonoro
1	12174,21	0,4295	0,8590	NO	NO
2	13429,89	0,4544	0,9088	ROTA	SI(Primero a 1,23 toneladas)

Tabla 7-15. [0₂,90,0₂]: Resumen de resultados del proceso de aumento gradual de carga.

Probeta	Máxima carga que ha aguantado antes de la rotura	Porcentaje de la carga de rotura
14	16108,02	82,66%
15	13429,89	68,92%

7.3.3 Detección del primer daño transversal: Laminado [0₄,90,0₄]

Para este laminado se rescatan los resultados de la sección 6. En este laminado sí que fue posible identificar un primer daño transversal en el proceso de aumento gradual de la carga, pero dicho daño no era una grieta transversal completa, tal y como se ve en la Figura 7-4, sino lo que hemos denominado como un daño transversal generalizado (el daño no se cerraba completamente en su recorrido a través de las fibras y no llegaba a las láminas de 0).

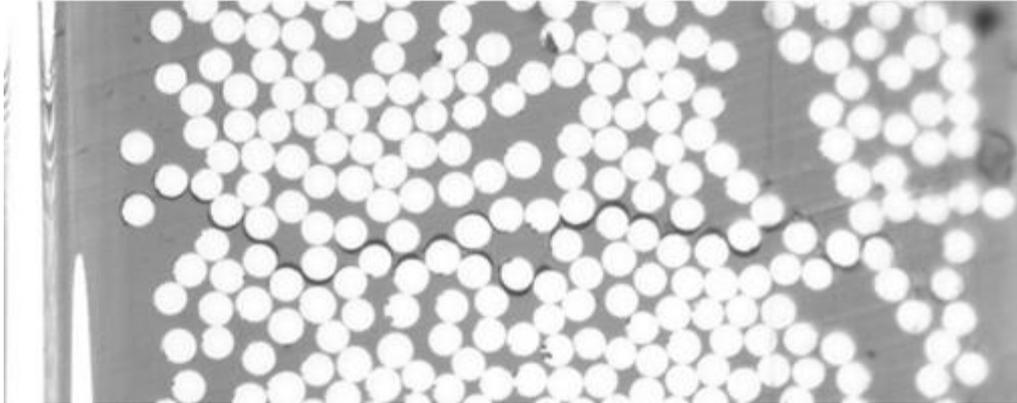


Figura 7-4. [0₄,90,0₄]: Probeta 3. Prueba 1. Daño transversal generalizado a x500.

En la Tabla 7-16 se recogen los rangos de aparición de este primer daño transversal.

	Mínimo	Máximo
Fuerza [N]	13292,55	14803,29
Tensión [MPa]	549,15	597,78
Deformación [%]	0,4228	0,5154
Porcentaje de la carga media a rotura [%]	28,57	31,81

Tabla 7-16. [0₄,90,0₄]: Resumen de resultados del proceso de aumento gradual de carga.

8 INFLUENCIA DEL ESPESOR DE LA CAPA A 0°: ESTUDIO LAMINADOS [0_P,90₄,0_P]

Por último, se han ensayado los laminados [0_p, 90₄, 0_p] con el objetivo de ver cómo afecta variar el número de láminas a 0 grados (espesor de las capas correspondientes) a la aparición y crecimiento del daño cuando se tienen cuatro láminas a 0°.

Los ensayos realizados han sido del mismo tipo que en las secciones anteriores.

8.1 Detección del daño al primer aviso sonoro

Estas probetas fueron ensayadas conjuntamente con las muestras analizadas en la sección anterior por lo que la forma de proceder ha sido la misma: se han ensayado 5 muestras de cada laminado hasta primer aviso sonoro de fallo variando la velocidad de 0.1 a 0.2 mm/min y en algunos se ha empleado el extensómetro y en otros no, debido que fue durante la realización de estos ensayos cuando se decidió usarlo para ver a que deformación aparecía el primer daño. En aquellos ensayos en los que se ha utilizado se incluirá el valor de la deformación.

8.1.1 Detección del daño al primer aviso sonoro: Laminado [0,90,0]

A continuación, en las Tablas 8-1 y 8-2, se presentan las dimensiones y cargas a las que se llevo cada probeta de este laminado en el intento de detectar un primer aviso sonoro.

Tabla 8-1. Dimensiones de las probetas del laminado [0,90,0] ensayadas al primer aviso sonoro.

Probeta	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Área (mm ²)
7	1,0867	14,9800	16,1784
8	1,2000	14,7967	17,76
9	1,1900	14,9333	17,7667
10	1,1400	14,4500	16,473

Tabla 8-2. Resultados del ensayo a primer aviso sonoro de las probetas del laminado [0,90,0].

Probeta	Carga primer aviso sonoro (N)	Carga rotura (N)	Tensión rotura (MPa)	Deformación rotura (%)	Porcentaje de la carga de rotura (%)	Presencia de grieta
7	—	5198,319	321,312305	0,3074	52,22	NO
8	—	4519,467	254,474493	0,2933	45,40	NO
9	—	4519,467	254,378528	0,2919	45,40	NO
10	—	6925,86	420,437079	0,4356	69,57	NO

Se ve también que la tensión a la que se rompió la probeta es muy inferior a su carga de rotura, por lo que se decidió hacer lo mismo que con las muestras del laminado [0,90,0]: cortarlas por la zona de las muescas que deja el pulido en los ensayos posteriores.

En la Figura 8-1 se puede ver la manera en que rompieron estas muestras: con cortes secos perpendiculares a la dirección de aplicación de la carga.



Figura 8-1. [0,90₄,0]: Probetas ensayadas a primer aviso sonoro. Rotura.

8.1.2 Detección del daño al primer aviso sonoro: Laminado [0₂,90₄,0₂]

En la Tabla 8-3 se recogen las dimensiones de las probetas del laminado [0₂, 90₄, 0₂] ensayadas a primer aviso sonoro de rotura.

Tabla 8-3. Dimensiones de las probetas del laminado [0₂,90₄,0₂] ensayadas al primer aviso sonoro.

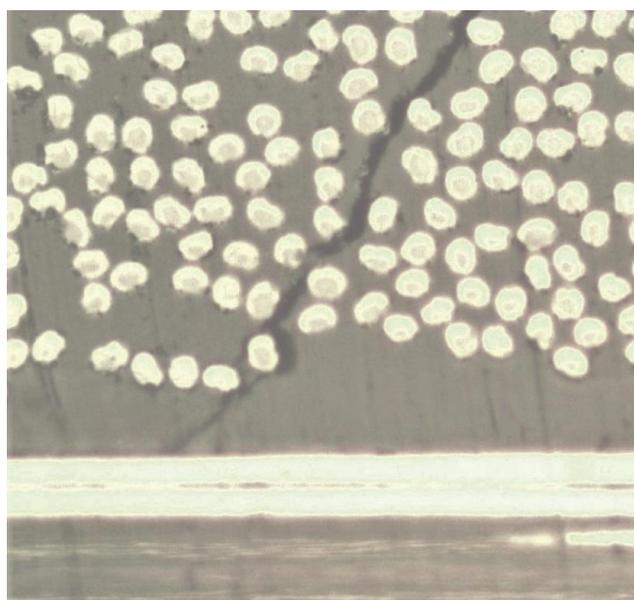
Probeta	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Área (mm ²)
6	1,6900	14,8677	25,1303
7	1,6733	14,7133	24,2715
8	1,6600	14,9867	24,8668
10	1,6300	14,6733	23,9121
14	1,6100	14,9933	24,1339

En este laminado sí que fue posible detectar aviso sonoro de rotura antes de que la probeta llegara a su carga de rotura. En la Tabla 8-4 se recoge la carga y tensión a la que se ha producido la detección del primer aviso de rotura, el porcentaje de la carga de rotura que esta carga supone y si se ha observado o no grieta. Se puede ver que en este laminado si que fue posible establecer una relación entre el primer aviso sonoro de rotura de fibra y la aparición de una única grieta transversal en dos de las muestras.

Tabla 8-4. Resultados del ensayo a primer aviso sonoro de las probetas del laminado [0₂,90₄,0₂].

Probeta	Carga primer aviso sonoro (N)	Tensión primer aviso sonoro (MPa)	Porcentaje de la carga de rotura (%)	Presencia de grieta
6	12242,88	487,18	67,9290641	NO
7	12085,92	497,95	69,4309024	NO
8	14587,47	586,62	81,7955706	SI(1)
10	13165,02	550,56	76,766814	NO
14	9001,656	372,99	52,0073368	SI(1)

En las Figuras 8-2 a 8-4 se recogen imágenes de las grietas encontradas. En la Figura 8-3 se ve que en ambas grietas aparece un incipiente daño asociado a la delaminación.

Figura 8-2. [0₂,90₄,0₂]: Probeta 8. Grieta transversal a x50.Figura 8-3. [0₂,90₄,0₂]: Probeta 8. Grieta transversal a x500.

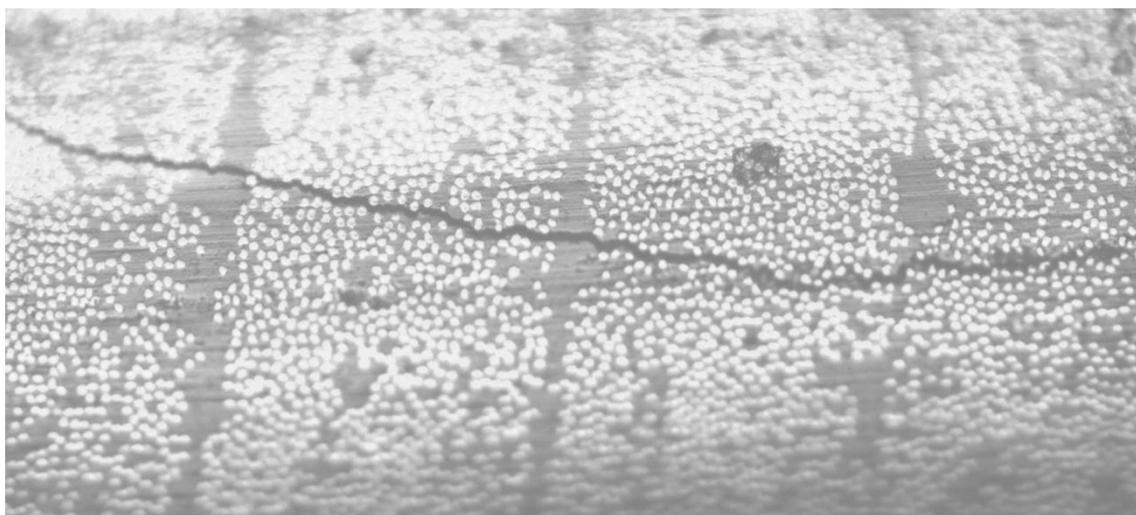


Figura 8-4. [0₂,90₄,0₂]: Probeta 14. Grieta transversal a x200.

Ambas grietas formadas no son completamente rectas sino que están curvadas, tal y como se aprecia en las Figuras 8-2 y 8-5. Este es un hecho destacable que establece diferencias en cómo se propaga el daño según la relación entre el espesor de las capas de 0 y 90 grados.

8.1.3 Detección del daño al primer aviso sonoro: Laminado [0₄,90₄,0₄]

Los ensayos a primer aviso sonoro de este laminado fueron realizados en un Trabajo Fin de Grado anterior [1] y no se utilizarán a efectos de comparación de resultados en el presente trabajo.

8.2 Ensayos al 50 % de la carga de rotura

Tal y como se ha visto en el apartado anterior, en el laminado [0,90₄, 0] no fue posible detectar el primer aviso sonoro. Sin embargo, en el laminado [0₂, 90₄, 0₂] sí que fue posible encontrar una primera grieta transversal en dos muestras ensayadas a dos porcentajes de la carga de rotura muy diferentes (52% y 81%).

Como el objetivo de este trabajo es analizar el efecto que tiene variar el espesor de las láminas a 0 grados en la aparición y propagación del daño, se decidió cargar una serie de probetas a distintos porcentajes de carga y, a partir de los resultados encontrados, realizar el proceso de aumento gradual de la carga hasta detectar la primera grieta. Como este proceso ya fue realizado para el laminado [0₄, 90₄, 0₄] no se han sometido estas probetas de nuevo a ensayos a un porcentaje determinado de su carga de rotura.

En base a los resultados obtenidos en los ensayos a primer aviso sonoro de daño se decidió cargar las probetas al 50 %.

Se han empleado 3 probetas de cada laminado y se han ensayado a velocidad 0.2 mm/min. En estos ensayos todas las probetas estaban cortadas por la zona de las muescas que deja el pulido y se empleó el extensómetro.

8.2.1 Ensayos al 50% de la carga de rotura: Laminado [0,90₄,0]

En la Tabla 8-5 se muestran las dimensiones de las probetas del laminado [0,90₄, 0] ensayadas al 50% de la carga media de rotura. Para calcular la carga de ensayo se ha tomado la tensión media de rotura (MPa) determinada en el capítulo 5, se ha multiplicado por el área particular de cada probeta y se ha aplicado el porcentaje. En la Tabla 8-6 se recogen las cargas a las que han sido ensayadas cada una de las muestras, si durante el proceso de carga ha sido posible detectar o no aviso de rotura y si, al ser analizadas las muestras al microscopio, se ha observado la aparición de algún daño.

Tabla 8-5. Dimensiones de las probetas del laminado [0,90₄,0] ensayadas al 50% de la carga de rotura.

Probeta	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Área (mm ²)
11	1,2900	14,5200	18,7308
12	1,2633	14,7367	18,4125
13	1,2633	14,7133	18,5873

Tabla 8-6. Resultados del ensayo al 50% de la carga de rotura de las probetas del laminado [0,90₄,0].

Probeta	Carga ensayo (N)	Apertura extensómetro (mm)	Deformación (%)	Presencia de grieta	Aviso sonoro
11	4816,71	0,2906	0,5812	NO	NO
12	4738,23	0,2785	0,557	NO	NO
13	4832,406	—	—	NO	NO

Se ve que a este nivel de carga no aparece ni aviso sonoro rotura ni presencia de grieta. Estos valores se emplearon para obtener un valor del que partir en el proceso de incremento gradual de carga que se realizó posteriormente.

En la probeta 13 el extensómetro se resbaló y por eso se ha omitido el valor de la deformación.

8.2.2 Ensayos al 50% de la carga de rotura: Laminado [0₂,90₄,0₂]

Se ha procedido igual que con el laminado [0,90₄,0]. En la Tabla 8-7 se recogen las dimensiones de las probetas del laminado [0₂,90₄,0₂] ensayadas al 50% de la carga.

Tabla 8-7. Dimensiones de las probetas del laminado [0₂,90₄,0₂] ensayadas al 50% de la carga de rotura.

Probeta	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Área (mm ²)
13	1,6667	14,3933	23,8874
15	1,6500	14,2333	23,496
16	1,7100	14,8100	25,3251

En la Tabla 8-8 se observa lo mismo que para el laminado [0,90₄,0].

Tabla 8-8. Resultados del ensayo al 50% de la carga de rotura de las probetas del laminado [0₂,90₄,0₂].

Probeta	Carga ensayo (N)	Apertura extensómetro (mm)	Deformación (%)	Presencia de grieta	Aviso sonoro
13	8932,986	0,302	0,604	NO	NO
15	8987,922	0,302	0,604	NO	NO
16	9162,54	0,2966	0,5932	NO	NO

8.3 Detección del primer daño transversal: aumento gradual de la carga

8.3.1 Detección del primer daño transversal: Laminado [0,90₄,0]

A continuación se muestran los resultados obtenidos a la hora de tratar de encontrar en qué momento se produce el primer daño transversal generalizado o la primera grieta transversal para el laminado [0,90₄,0].

En la Tabla 8-9 se recogen las dimensiones de las probetas [0,90₄,0] sometidas al proceso de aumento gradual de carga y, a continuación, en las Tablas 8-10 y 8-11, el nivel de carga, la deformación, la presencia o no de daño y la detección o no de aviso sonoro de rotura en cada prueba que se ha realizado sobre la muestra correspondiente.

Tabla 8-9. Dimensiones de las probetas del laminado [0,90₄,0] ensayadas a aumento de carga gradual.

Probeta	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Área (mm ²)
12	1,2533	14,7367	18,4125
15	1,2366	14,4467	17,918

Tabla 8-10. [0,90₄,0]: Probeta 12. Proceso de incremento gradual de carga.

Probeta 12					
Prueba	Carga ensayo (N)	Apertura extensómetro (mm)	Deformación (%)	Presencia de daño	Aviso sonoro
1	4738,23	0,2785	0,557	NO	NO
2	5636,826	0,3362	0,6724	NO	NO
3	6616,845	0,3819	0,7638	NO	NO
4	6991,587	0,4168	0,8336	NO	NO
5	7880,373	0,4685	0,937	NO	NO
6	8355,177	1,039	1,039	ROTA	SI

Tabla 8-11. [0,90₄,0]: Probeta 15. Proceso de incremento gradual de carga.

Probeta 15					
Prueba	Carga ensayo (N)	Apertura extensómetro (mm)	Deformación (%)	Presencia de daño	Aviso sonoro
1	6277,419	0,3765	0,753	NO	NO
2	8022,618	0,4993	0,9986	NO	NO
3	6308,811	0,4013	0,8026	ROTA	SI

Se ve el mismo efecto que ya apareció en otros laminados ([0,90,0] y [0₄,90₂,0₄]) al realizar el aumento gradual de carga: la probeta rompe a una carga inferior a su carga de rotura ($\bar{F}_{rotura} = 8629,58 \text{ N}$), con un corte seco perpendicular a la dirección de aplicación de la carga y sin que aparezca ninguna grieta en el resto de la sección.

Si se comparan los valores de carga máxima aguantada por cada una de las probetas sometidas a un incremento gradual de la carga con la carga de rotura del laminado se obtienen los resultados de la Tabla 8-12.

Tabla 8-12.[0,90₄,0]: Resumen de resultados del proceso de aumento gradual de carga.

Probeta	Máxima carga que ha aguantado antes de la rotura	Porcentaje de la carga de rotura
12	8355,18	83,93%
15	8022,62	80,59%

8.3.2 Detección del primer daño transversal: Laminado [0₂,90₄,0₂]

Las dimensiones de las probetas del laminado [0₂,90₄,0₂] sometidas a un proceso de aumento gradual de carga se recogen en la Tabla 8-13.

Tabla 8-13. Dimensiones de las probetas del laminado [0₂,90₄,0₂] ensayadas a aumento de carga gradual.

Probeta	Espesor (mm)	Ancho (mm)	Área (mm ²)
13	1,6667	14,3933	23,8874
18	1,7200	14,9433	25,6968
19	1,7000	14,7267	25,041

En las Tablas 8-14 a 8-16 se muestra el proceso de incremento gradual de carga al que se ha sometido a las probetas. Se observa el mismo efecto que al aumentar gradualmente la carga en el laminado [0,90₄,0]: las probetas rompían antes de que se llegara a encontrar la primera grieta sin que se aprecie primer aviso sonoro de rotura de fibra. Además, sucede también que ninguna de las probetas alcanza su carga de rotura (18374,4089 N) y rompen a cargas inferiores a las aguantadas por la misma probeta en pasos del aumento gradual de carga anteriores.

Tabla 8-14. [0₂,90₄,0₂]: Probeta 13. Proceso de incremento gradual de carga.

Probeta 13					
Prueba	Carga ensayo (N)	Apertura extensómetro (mm)	Deformación (%)	Presencia de daño	Aviso sonoro
1	8932,986	0,302	0,604	NO	NO
2	11791,62	0,3812	0,7624	NO	NO
3	12860,91	0,4268	0,8536	NO	NO
4	13943,59	0,2765	0,8612	NO	SI
5	11343,50	0,3329	0,6458	ROTA	SI

Tabla 8-15. [0₂,90₄,0₂]: Probeta 18. Proceso de incremento gradual de carga.

Probeta 18					
Prueba	Carga ensayo (N)	Apertura extensómetro (mm)	Deformación (%)	Presencia de daño	Aviso sonoro
1	12802,05	0,406	0,812	NO	NO
2	14754,24	0,4476	0,8952	NO	NO
3	11850,48	0,4121	0,8242	ROTA	SI

Tabla 8-16. [0₂,90₄,0₂]: Probeta 19. Proceso de incremento gradual de carga.

Probeta 19					
Prueba	Carga ensayo (N)	Apertura extensómetro (mm)	Deformación (%)	Presencia de daño	Aviso sonoro
1	13135,59	0,4051	0,8102	NO	NO
2	13743,81	0,4054	0,8108	NO	NO
3	14724,81	0,4631	0,9262	NO	NO
4	8821,152	0,2765	0,553	NO	SI
5	11418,84	0,3329	0,6658	ROTA	SI

Si se comparan estos resultados con los obtenidos a primer aviso sonoro para este laminado, en los que sí fue posible encontrar la primera grieta transversal para dos de las muestras, se ve que el comportamiento es muy heterogéneo.

Las grietas aparecieron para porcentajes de la carga de rotura de 52% y 81,79%. Las 3 muestras en las que no se encontró nada presentaron el primer aviso sonoro de rotura de fibra en el rango del 69,43 al 76,77% de la

carga de rotura. Tal y como se ve en la Tabla 8-17, las cargas aguantadas por las probetas sometidas a incremento gradual de carga están en torno a estos valores, lo que podría explicar la no presencia de grieta transversal observada cuando se ha sometido las probetas a este procedimiento.

Tabla 8-17.[0₂,90₄,0₂]: Resumen de resultados del proceso de aumento gradual de carga.

Probeta	Máxima carga que ha aguantado antes de la rotura	Porcentaje de la carga de rotura
13	13943,59	77,88%
18	14754,24	80,29%
19	14724,81	80,13%

8.3.3 Detección del primer daño transversal: Laminado [0₄,90₄,0₄]

Tal y como se vio en la sección 5, para el laminado [0₄,90₄,0₄] si que fue posible encontrar el rango al que se produce el primer daño transversal generalizado y, cuando este se formaba, era una grieta transversal completa con daño incipiente asociado a la delaminación.

En las Figuras 8-5 a 8-7 se ven más muestras de las grietas transversales observadas y de dicho daño asociado a la delaminación.

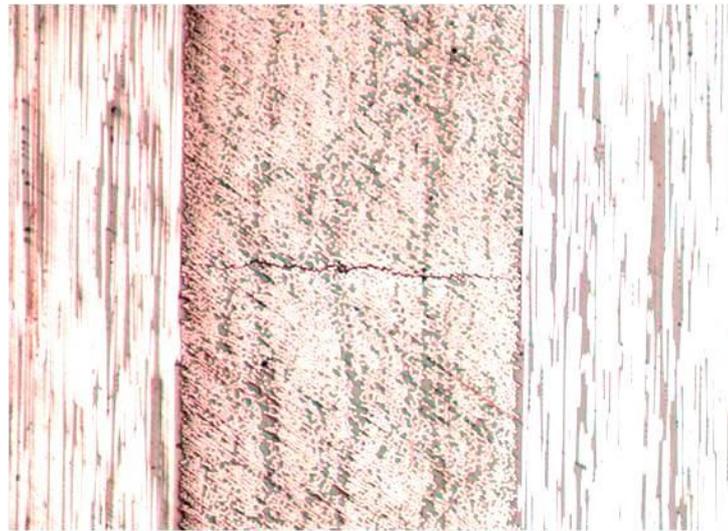


Figura 8-5.[0₄,90₄,0₄]: Probeta 21. Prueba 2. Primera grieta transversal a x50.

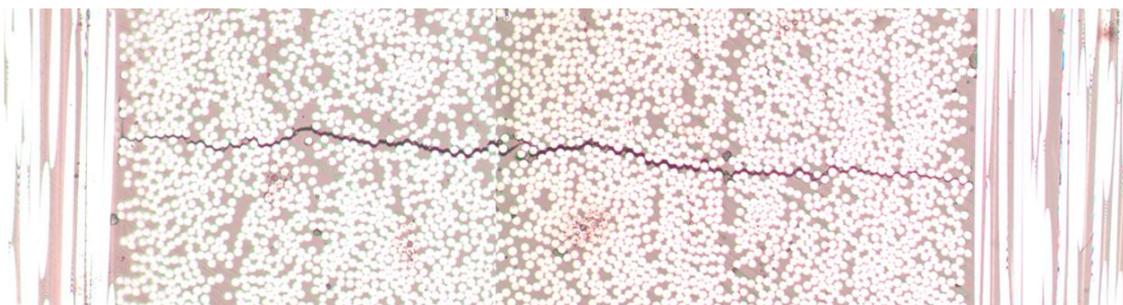


Figura 8-6.[0₄,90₄,0₄]: Probeta 21. Prueba 2. Primera grieta transversal a x200.

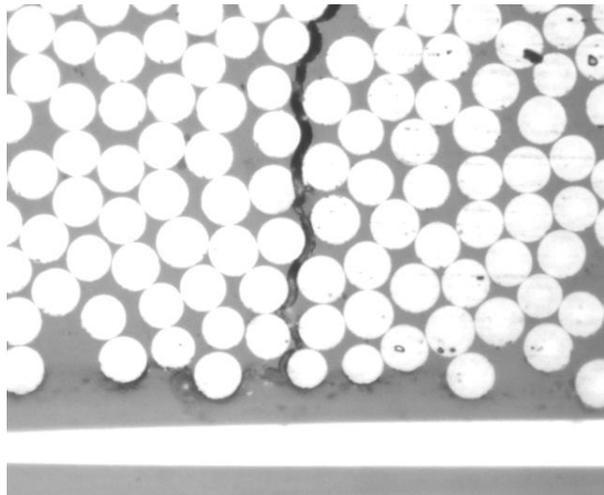


Figura 8-7. [0₄,90₄,0₄]: Probeta 20. Prueba 2. Primera grieta transversal a x100.

Además, las probetas de este laminado no se rompieron a cargas inferiores a las de rotura en el proceso realizado. En la Tabla 8-18 se recoge un resumen de los rangos a los que aparecía la primera grieta transversal, correspondiéndose el valor mínimo con el mínimo valor al que se cargo una muestra antes de encontrar la primera grieta transversal y el máximo al que se encontró una única grieta transversal en una de las muestras.

	Mínimo	Máximo
Fuerza [N]	13792,86	16323,84
Tensión [MPa]	426,06	518,61
Deformación [%]	0,4644	0,5522
Porcentaje de la carga media a rotura [%]	24,64	35,08

Tabla 8-18. [0₄,90₄,0₄]: Resumen de resultados. Rango de aparición de la primera grieta transversal.

Se ve que el valor de carga máximo al que se ha encontrado una primera grieta es del 38,59 % de su carga de rotura ($\bar{F}_{rotura} = 42294,83 N$), lo que hace pensar que un aumento del espesor de la lámina a 0 grados sí que puede tener influencia en el daño que se produce en la capa a 90 grados.

9 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Tras exponer los resultados obtenidos en cada uno de los laminados sometidos a estudio se pasa al análisis de resultados.

9.1 Influencia del espesor de la capa a 90°: Estudio de laminados $[0_4, 90_N, 0_4]$

En estos laminados ha sido posible determinar el rango de aparición en carga y deformación de la primera grieta transversal o daño transversal generalizado. A la hora de comparar resultados, se ha de tener en cuenta esta distinción.

En la realización de este proyecto se ha intentado encontrar el momento en el que se producía la primera grieta transversal completa (que cruce completamente la sección de las láminas a 90 grados sin discontinuidades y llega a las de 0), pero en el laminado $[0_4, 90, 0_4]$ no ha sido posible. Se ha comprobado que para $N=1$ se puede llegar a daño transversal generalizado, pero no a grieta transversal, ya que antes de que esta se produzca se ha producido otro daño transversal generalizado.

A efectos de analizar el posible efecto escala que aparezca en estos laminados, en la Tabla 9-1 se vuelven a rescatar los rangos de carga y deformación de aparición del daño transversal y, a continuación, en la Tabla 9-2 se recogen los valores medios de fuerza y deformación a los que las muestras de cada laminado contaban con una única grieta transversal.

Tabla 9-1. Rango de aparición del primer daño trasversal generalizado o primera grieta en los laminados $[0_4, 90_N, 0_4]$.

	$[0_4, 90, 0_4]$		$[0_4, 90_2, 0_4]$		$[0_4, 90_4, 0_4]$		$[0_4, 90_8, 0_4]$	
	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
Fuerza [N]	13292,55	14803,29	13753,62	18315,27	13792,86	16323,84	11850,48	18688,05
Tensión [MPa]	549,15	597,78	480,34	646,04	426,06	518,61	264,41	417,37
Deformación [%]	0,4228	0,5154	0,4300	0,7200	0,4644	0,5522	0,3800	0,5100
Porcentaje de la resistencia media a rotura [%]	28,57	31,81	31,66	42,17	24,64	35,08	28,22	42,74

Tabla 9-2. Valor medio de los valores de carga y deformación en los que las muestras cuentan con un único daño transversal generalizado o grieta trasversal para los laminados $[0_4, 90_N, 0_4]$.

	$[0_4, 90, 0_4]$		$[0_4, 90_2, 0_4]$		$[0_4, 90_4, 0_4]$		$[0_4, 90_8, 0_4]$	
	Media	Desviación típica	Media	Desviación típica	Media	Desviación típica	Media	Desviación típica

Fuerza [N]	14282,32	317,62	17173,99	1068,10	15842,79	626,06	15653,65	2781,3473
Tensión [MPa]	1760,38	52,16	1492,05	122,11	1226,94	60,52	961,05	55,44
Deformación [%]	0,4924	0,0157	0,6087	0,082	0,5526	0,02098	0,449	0,0634

En las gráficas 9-1 y 9-2 se representan los valores medios calculados mostrando también el rango de error mediante la desviación típica. El caso N=1 se ha dejado fuera de la representación pues, tal y como se ha comentado, en las muestras analizadas no se ha llegado a producir una grieta transversal completa si no un daño transversal generalizado, por lo que no estaríamos comparando efecto del espesor en el mismo mecanismo de fallo.

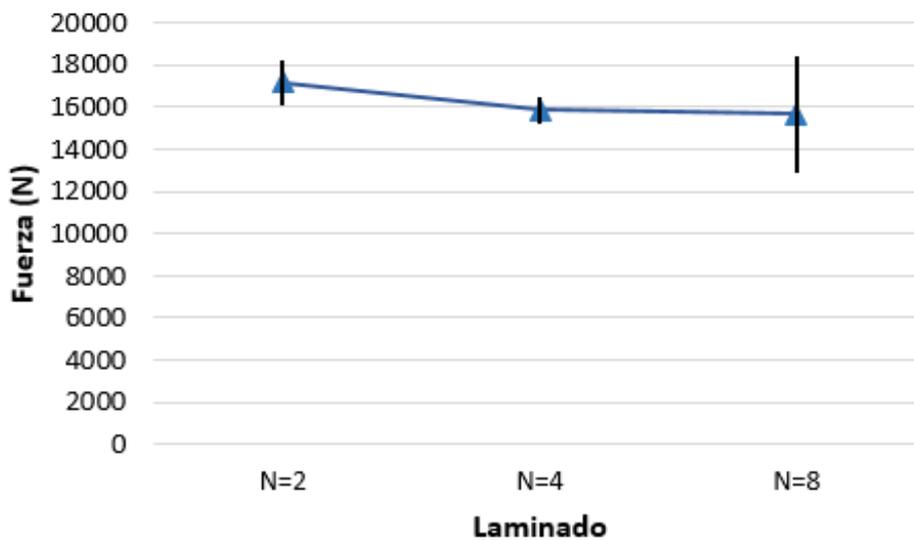


Gráfico 9-1. Fuerza media de aparición de la primera grieta transversal en laminados $[0_4,90_N,0_4]$ para $N=2,4,8$.

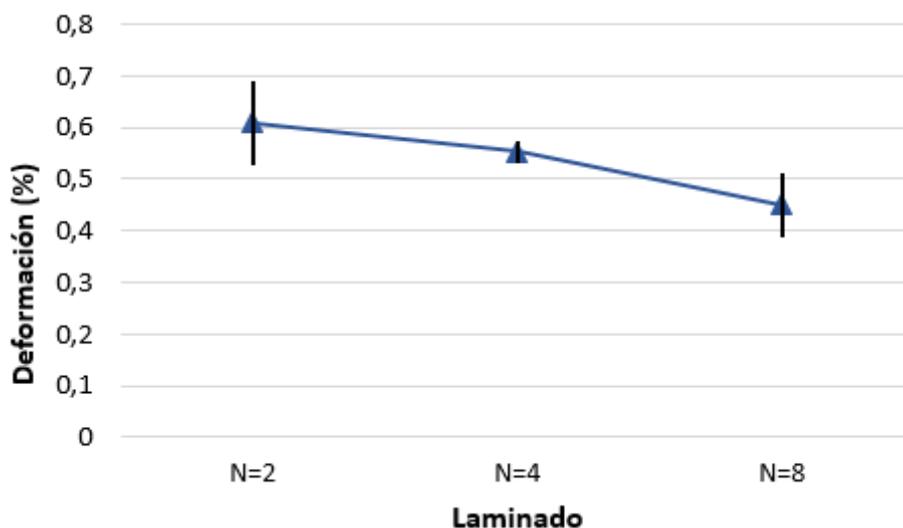


Gráfico 9-2. . Deformación media de aparición de la primera grieta transversal en laminados $[0_4,90_N,0_4]$ para $N=2,4,8$.

Si se comparan los tres laminados en los que se ha encontrado una única grieta transversal con daño incipiente asociado a la delaminación en cada una de las muestras, se ve que conforme aumenta el espesor de las láminas a 90 grados cae tanto la carga como la deformación media a la que aparece la primera grieta. Este es el efecto que esperábamos encontrar: retraso de la aparición del daño a medida que disminuimos el espesor de las láminas. Es decir, se aprecia efecto escala tal y como lo hemos definido.

Otro dato curioso a comentar en cuanto al aviso sonoro de daño es el hecho de que la rotura de fibras del laminado $N=1$ era mucho más estruendosa que la del resto de laminados. Esto se puede asociar con una mayor energía asociada al mecanismo de rotura. Si se compara el valor medio de tensión (Fuerza por unidad de área que está aguantando la probeta, asociado a la carga que se lleva cada lámina) en el momento en el que se ha encontrado un único daño transversal generalizado ($N=1$) o grieta transversal ($N=2,4,8$) se ve que es mayor para $N=1$.

9.2 Influencia del espesor de la capa a 0° : Estudio de laminados $[0_Q, 90, 0_Q]$

En los laminados ensayados para distintos espesores de la lámina a 0 se han encontrado resultados muy diferentes, lo que hace pensar que esta tiene un importante efecto en la forma en la que se inicia y se propaga el daño.

A continuación, se rescatan y analizan los resultados obtenidos para cada uno de los laminados:

- $Q=1$ → Las muestras con una única lámina a 0 grados se han roto sin que se escuchara antes de la rotura ningún aviso sonoro de daño y sin que se viese daño en la sección de las láminas a 90. Además, el tipo de rotura ha sido un corte seco en la dirección perpendicular a la dirección de aplicación de la carga.
- $Q=2$ → En estas probetas sí que se ha apreciado aviso sonoro de daño, pero cuando éste se producía no se ha visto en el análisis al microscopio ningún daño. Al seguir incrementando la carga se han encontrado muestras en las que ha aparecido un daño muy generalizado, formado por grietas transversales inclinadas $\pm 45^\circ$ con respecto a la dirección de aplicación de la carga, e importantes delaminaciones entre las láminas a 0 y 90 grados que se conectaban con las grietas, tal y como se puede apreciar en la Figura 9-1. Al intentar realizar un proceso de aumento gradual de carga hasta encontrar la primera grieta se ha visto que las probetas se debilitaban y rompían a una carga inferior a la carga de rotura sin que apareciera daño aparente en la sección. Además, el tipo de rotura identificado se corresponde con un corte recto y perpendicular a la dirección de aplicación de la carga.

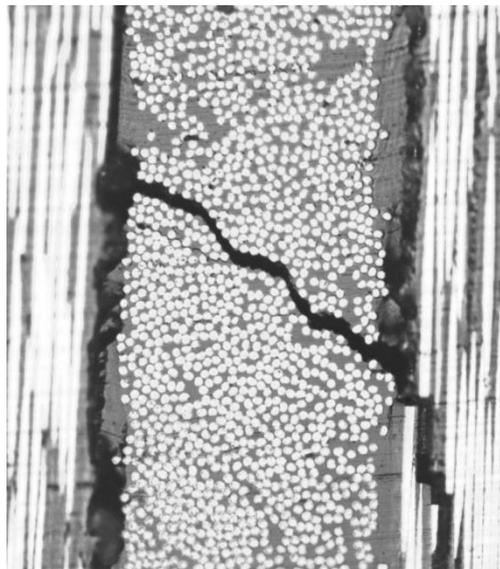


Figura 9-1. $[0_2, 90, 0_2]$: Probeta12. Grieta transversal.

- $Q=4 \rightarrow$ En estas probetas sí que fue posible encontrar un primer aviso sonoro de rotura de fibra pero no primera grieta transversal completa. La forma de propagación de estos laminados es tal que aparece un primer daño generalizado (Figura 9-2) y al seguir cargando se forma otro y el primero no crece para formar la grieta transversal completa.

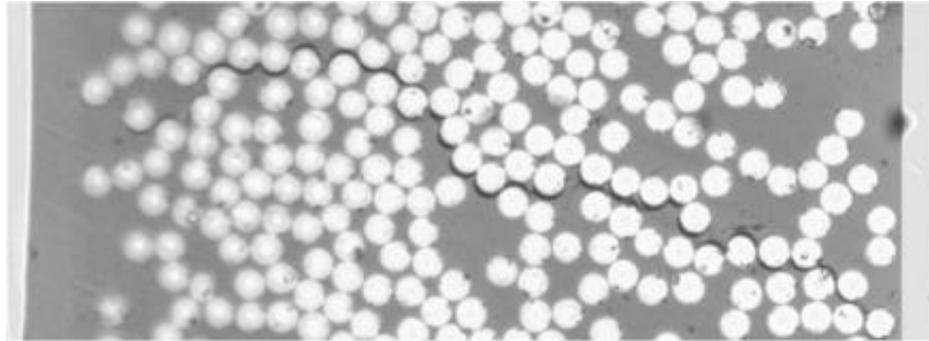


Figura 9-2. $[0_4, 90_4, 0_4]$: Probeta 5. Prueba 4. Segundo daño transversal generalizado encontrado a x500.

Todo esto parece indicar que el espesor de la lámina a 0 grados sí que tiene efecto y que conforme disminuye su espesor se generan estados tensionales que originan mecanismos de fallo diferentes a los esperados. Los resultados obtenidos para cada laminado son tan distintos que no se pueden establecer comparaciones. Estamos ante fenómenos de fallo distintos que sientan las bases de estudio para proyectos futuros.

9.3 Influencia del espesor de la capa a 0° : Estudio de laminados $[0_P, 90_4, 0_P]$

Al estudiar el efecto que tiene aumentar el espesor de las láminas a 0 grados cuando se tienen cuatro láminas a 90 se observa:

- $P=1 \rightarrow$ Las muestras con una única lámina a 0 grados se han roto sin que se escuchara antes de la rotura ningún aviso sonoro de rotura de fibra y sin que se viese daño en la sección de las láminas a 90. Además, el tipo de rotura ha sido un corte seco en la dirección perpendicular a la dirección de aplicación de la carga.
- $P=2 \rightarrow$ En estas probetas sí que se ha apreciado aviso sonoro de daño en la capa a 90 grados y este se producía en un rango cercano a la aparición de la primera grieta. En dos de las muestras ensayadas a primer aviso sonoro se ha encontrado una grieta transversal y dicha grieta era una grieta curvada en los dos casos, tal y como se ve en la Figura 9-3. Sin embargo, al intentar realizar un proceso de aumento gradual como el realizado en los laminados en los que se pretende estudiar la influencia del espesor de las laminas a 90° para obtener un rango, se ha visto que las probetas se debilitaban y rompían a una carga inferior a la carga de rotura sin que apareciera daño aparente en la sección. Además, el tipo de rotura identificado es el mismo que se vio en las probetas con $P=1$: un corte recto y perpendicular a la dirección de aplicación de la carga.

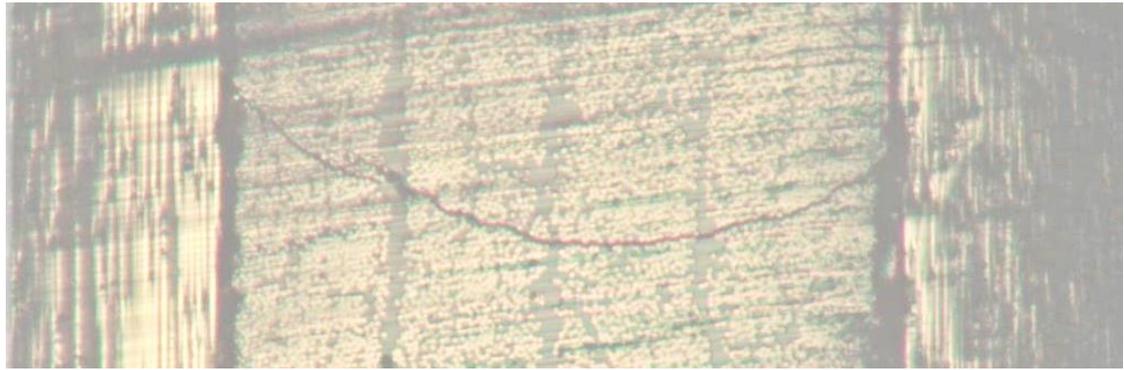


Figura 9-3. $[0_2,90_4,0_2]$: Probeta 8. Grieta transversal curvada a x50.

- $P=4 \rightarrow$ En estas probetas sí que fue posible encontrar un primer aviso sonoro de daño y una primera grieta transversal completa y que se propaga tal y como cabría esperar: de forma perpendicular a la dirección de aplicación de la carga. En la Figura 9-4 aparece una muestra de una de las grietas encontradas en este laminado.

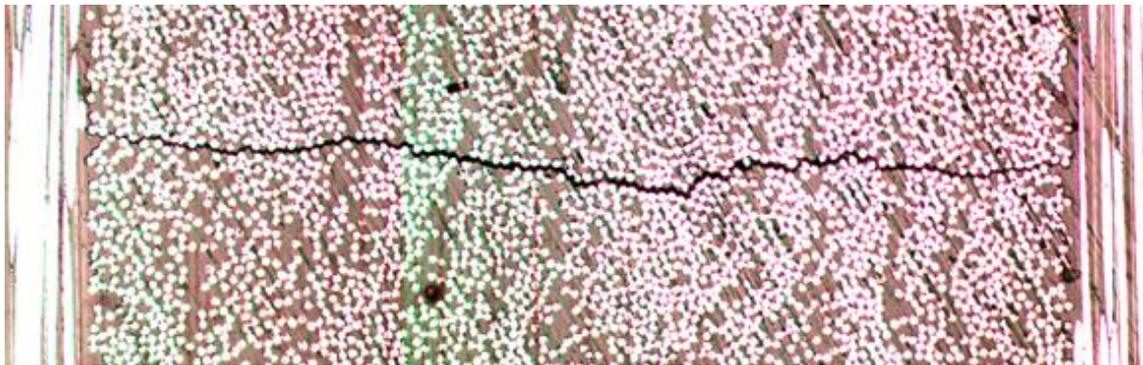


Figura 9-4. $[0_4,90_4,0_4]$: Probeta 19. Primera grieta transversal a x200.

Al ver la forma de rotura que estaban teniendo algunas de las probetas de esta secuencia de laminados se decidió analizar la carga que aguantan las láminas de 0 en el momento de la rotura y compararlas con lo que estos laminados deberían aguantar teóricamente.

10 CONCLUSIONES

Tal y como se comentó en el capítulo introductorio, el objetivo de este proyecto es ahondar en el llamado efecto escala, es decir, estudiar si se produce un retraso en la aparición del primer daño a medida que se reduce el espesor de las láminas. Para ello, se ha realizado un estudio experimental de los mecanismos de iniciación y evolución del daño asociados al fallo de la matriz en laminados de material compuesto sometidos a cargas estáticas de tracción en una serie de laminados *cross-ply* con diferentes espesores en las capas a 90 y 0 grados, siendo los grupos de laminados entre los que se ha establecido la comparación 3:

- Laminados $[0_4, 90_N, 0_4]$ con $N=1, 2, 4$ y 8 .
- Laminados $[0_P, 90_4, 0_P]$ con $P=1, 2$ y 4 .
- Laminados $[0_Q, 90, 0_Q]$ con $Q=1, 2$ y 4 .

Para ello, se ha procedido a la fabricación de los laminados y obtención de las probetas para su posterior ensayo.

Una vez obtenidas las probetas, estas se han sometido a un proceso de lijado y pulido en una de sus caras laterales (donde se puede ver la evolución del daño de la capa a 90 grados) que ha permitido posteriormente analizar si aparece o no daño tras realizar los ensayos y cómo éste evoluciona, barriéndolas visualmente mediante un microscopio óptico.

El realizar el proceso de lijado y pulido antes de ensayar las probetas ha supuesto un cambio respecto al modo tradicional de proceder en proyectos anteriores, donde para observar el daño al microscopio se cortaban las muestras después de ensayarlas, se encapsulaban y se introducían en un útil de la pulidora que aplicaba el movimiento de lijado y pulido y la presión de forma automática.

Además de permitir someter al proceso de lijado y pulido más de una muestra a la vez, este proceso estaba optimizado tras la realización de los múltiples trabajos relacionados desarrollados en el laboratorio.

En este proyecto se partió de la secuencia de lijado y pulido a la que se sometían las muestras cuando el proceso se realizaba de forma automática, cambiando el útil que aplicaba el movimiento y presión de forma automática por un soporte metálico donde apoyar las probetas y la presión se ha aplicado manualmente.

Se vio que esta secuencia no arrojaba los resultados esperados y que para obtener unos buenos resultados hacia falta una mayor sujeción. Tras múltiples pruebas el primer paso que se siguió fue añadir unos agarres metálicos a la probeta para garantizar que esta no rotará alrededor de su eje durante el lijado y tener una mayor estabilidad al aplicar la presión manualmente.

Otra cosa que mejoró bastante los resultados fue pasar de aplicar la presión de forma manual con los dedos directamente sobre la probeta a aplicarla mediante un taco de superficie plana con un ancho aproximado de la distancia entre agarres, garantizando que la presión se ejercía de forma más homogénea.

Introducidas estas mejoras se realizaron distintas pruebas de lijado y pulido siendo la que mejor resultados arrojó la que se presenta en la Tabla 10-1.

Tabla 10-1. Secuencia de lijado y pulido empleada en el presente proyecto.

Lija/Paño	Velocidad de giro del disco (RPM)	Tiempo (min)
<i>Lija SiC #320</i>	300	5
<i>Lija SiC #800</i>	300	4
<i>MD-Largo 9 μm</i>	150	6

<i>MD-Dac 3 μm</i>	150	5
<i>MD-Nap 1 μm</i>	150	5

Las principales conclusiones que se pueden sacar de todo el proceso hasta llegar a la secuencia definitiva que se ha empleado en este proyecto, tras analizar distintas secuencias y como han ido variando los resultados según el espesor de las muestras a pulir y de si estas tenían o no tacos son las siguientes:

- Se ha observado que usar lijas de granos cada vez más fino entre la lija de grano #320 y paño de 9 μ m mejora los resultados. Un compromiso entre calidad del acabado y tiempo se ha alcanzado añadiendo a la secuencia inicial la lija de grano #800 durante 4 minutos. De cara a proyectos futuros se recomienda comenzar con esta secuencia y si no se obtienen los resultados deseados ir disminuyendo paulatinamente el grano de la lija desde el de #320 al más pequeño disponible.
- Se ha de aplicar la presión lo más uniformemente posible. La forma óptima encontrada en este proyecto ha sido presionar hacia la superficie del disco de la lija con un taco de cara plana y sujetarla en la parte central contra el soporte rígido. Se ha de intentar en lo medida de lo posible que el objeto con una de sus superficies plana empleado tenga una longitud tal que permita presionar toda la sección de la probeta que queda entre mordazas.
- Se ha observado que en las probetas que contaban con tacos, y por tanto, con una mayor superficie de apoyo, se obtenían mejores resultados. En las probetas que no contaban con tacos, cuando eran de poco espesor se han obtenido mejores resultados al someter al proceso de lijado y pulido varias a la vez. Aún así los resultados no eran tan buenos como en las probetas con tacos, por lo que se puede concluir que lo mejor para ensayar este tipo de muestras es fabricar con tacos y someter las muestras a la secuencia encontrada de una en una.

Una vez se consiguió optimizar el proceso de lijado y pulido se sometieron las muestras a dicho proceso y se procedió a ensayar. Se han realizado tres tipos de ensayos principalmente durante la evolución del proyecto:

- 1) Ensayos a rotura con el objetivo de caracterizar mecánicamente cada uno de los laminados.
- 2) Ensayos hasta la detección del primer aviso sonoro de daño en la capa de 90 grados, donde el objetivo era intentar relacionar el primer aviso sonoro de rotura en la capa de 90 con la aparición de daño en la misma al ser visionadas las muestras en el microscopio óptico. El modo de proceder ha sido cargar la probeta a tracción hasta que se ha detectado el primer aviso sonoro, detener el ensayo y descargar la muestra.
- 3) Procedimiento de aumento gradual de carga hasta encontrar el primer daño transversal generalizado o la primera grieta transversal generalizada, con el objeto de relacionar los valores de carga y deformación a los que aparece la primera grieta transversal en cada laminado con la variación del espesor de cada una de sus capas. El modo de proceder ha sido: 1) cargar la probeta bajo ensayo hasta un nivel de carga bajo, en la que de los ensayos anteriormente realizados en probetas del laminado correspondiente se supone que no se introduce daño en la probeta, 2) descargar, 3) analizarla en el microscopio, 4) volver a ensayar subiendo la carga entre 50 y 100 kg y, 5) repetir el procedimiento hasta que se encuentre en la probeta al ser analizada al microscopio un único daño transversal generalizado o grieta transversal.

A continuación, se desarrollan las conclusiones que se han extraído de cada tipo de ensayo.

1) Ensayos a rotura: Caracterización mecánica de los laminados.

El primer tipo de ensayos realizados, es decir, ensayos hasta la carga de rotura, permitió obtener la resistencia de cada laminado. Los valores obtenidos se recogen a modo de resumen en las Tablas 10-2 a 10-4, correspondiéndose cada una de ellas a cada uno de los grupos de laminados que se van a comparar.

Tabla 10-2. Comparación entre la carga media de rotura experimental y teórica de los laminados [0₄,90_N,0₄].

Laminados [0 ₄ , 90 _N , 0 ₄]	N=1	N=2	N=4	N=8
Carga media de rotura (Newtons)	46528,83	43433,47	42294,83	43725,10
Resistencia (MPa)	1760,38	1492,05	1226,94	961,05
Carga teórica de rotura aproximada (Newtons)	51827,42	51247,60	50667,72	50261,78
<i>Diferencia</i> _{teórico-experimental} (%)	10,23	15,25	16,53	13,01

Tabla 10-3. Comparación entre la carga media de rotura experimental y teórica de los laminados [0_Q,90,0_Q].

Laminados [0 _Q , 90, 0 _Q]	Q=1	Q=2	Q=4
Carga media de rotura (Newton)	8629,59	19486,28	46528,83
Resistencia (MPa)	846,66	1195,43	1760,38
Carga teórica de rotura aproximada (Newtons)	14918,29	26504,84	51827,42
<i>Diferencia</i> _{teórico-experimental} (%)	42,16	26,48	10,23

Tabla 10-4. Comparación entre la carga media de rotura experimental y teórica de los laminados [0_P,90₄,0_P].

Laminados [0 _P , 90 ₄ , 0 _P]	P=1	P=2	P=4
Carga media de rotura (Newton)	9954,32	18374,41	42294,83
Resistencia (MPa)	513,78	717,18	1226,94
Carga teórica de rotura aproximada (Newtons)	14253,47	28271,89	50667,72
<i>Diferencia</i> _{teórico-experimental} (%)	30,17	35,01	16,53

Se ve al comparar los valores de la fuerza de rotura media obtenida de forma experimental con el valor teórico de fuerza de rotura a la que deberían romper los paneles si fuesen ideales que los resultados experimentales arrojan un resultado del mismo orden del que indica la teoría, pero de menor valor. Este comportamiento está totalmente dentro de lo esperado si se tiene en cuenta la no homogeneidad de las muestras, posibles defectos introducidos en la fabricación o el estado tensional que genera la aparición de daño en la capa de 90 grados antes

de la rotura. Además, ha de destacarse que conforme aumenta el número de láminas en un grupo de laminados determinado (N en los laminados $[0_4, 90_N, 0_4]$, Q en los laminados $[0_Q, 90, 0_Q]$ y P en los laminados $[0_P, 90_4, 0_P]$) aumenta la carga de rotura tal y como cabría esperar.

2) Ensayos a primer aviso sonoro

En cuanto a los ensayos realizados a primer aviso sonoro de rotura en la capa de 90 grados se han obtenido resultados muy heterogéneos.

En los laminados $[0_4, 90_N, 0_4]$ solo se han estudiado los casos N=2 y N=8, pues el resto se desarrollaron en un proyecto anterior [1].

En el laminado N=2 se ha visto que el primer aviso sonoro de rotura en la capa de 90 se produce para un amplio rango de carga que va desde el 36,74% al 61,38% de la carga de rotura de este laminado. Debido a esto, la cantidad de grietas encontrada es muy variable, yendo desde 2 grietas en los laminados sometidos a menor carga a 45-60 grietas en los sometidos a una carga mayor.

En el laminado N=8 el rango de carga al que se produce el primer aviso sonoro es más estrecho, abarcando el rango del 22,44 al 35,38% de la carga de rotura del laminado, y al analizar las muestras sometidas a este tipo de ensayo se ha visto que hay probetas con 1 grieta y otras con ninguna, por lo que a priori, parece que para este laminado sí que es posible determinar el rango en que se produce la primera grieta trasversal.

En cuanto a los laminados $[0_Q, 90, 0_Q]$ se han analizado los casos Q=1 y 2.

En el laminado Q=1 se da que la probeta rompe sin que se produzca ningún aviso sonoro y sin que al ser analizadas las muestras al microscopio se vea daño en el resto de la capa de láminas a 90. La forma de romper de estas muestras ha sido mediante un corte seco en la dirección perpendicular a la dirección de aplicación de la carga.

Sin embargo, en el laminado Q=2 se observó que el primer aviso sonoro de rotura de fibra aparece para un amplio rango de carga, que va desde el 40,35% al 82,66% de la carga de rotura del laminado. Al ser inspeccionadas en el microscopio ninguna de las muestras presentaba daño.

Por último, se analizaron los casos P= 1 y 2 de los laminados $[0_P, 90_4, 0_P]$.

En el laminado P=1 se observó el mismo efecto que en el laminado $[0, 90, 0]$: las probetas se rompían sin que se produjera antes ningún aviso sonoro de rotura de fibra y con un corte seco perpendicular a la dirección de aplicación de la carga. Al analizar las dos secciones de probeta resultantes tras la rotura no se apreció ningún otro daño en el resto de la sección.

En el laminado P=3 sí que fue posible detectar aviso sonoro antes de la rotura y al ser analizadas las muestras en el microscopio se encontró que había probetas sin ninguna grieta y otras con una sola, es decir, el mismo comportamiento que el laminado $[0_4, 90_8, 0_4]$.

Se puede observar que los resultados obtenidos mediante este tipo de ensayos son muy heterogéneos tanto de un laminado a otro como dentro de un mismo laminado con la secuencia de apilado y, que mientras que hay algunos que presentan un comportamiento más homogéneo y en los que parece posible establecer el rango de aparición de la primera grieta, hay otros en los que ni siquiera se escucha aviso sonoro de daño antes de la rotura.

Se puede concluir por tanto que, mediante este tipo de ensayos y, según se han realizado (a percepción sonora del oído de la autora del proyecto), no es posible relacionar el primer sonido acústico de daño en la probeta con la aparición del primer daño en la sección de la capa a 90 grados.

3) Ensayos a aumento gradual de carga

A la hora de determinar el rango de aparición de la primera grieta trasversal se han apreciado distintos comportamientos según se ha variado el espesor de la capa a 90 grados o 0 grados.

➤ Efecto de variar el espesor de la capa a 90 grados

En los laminados $[0_4, 90_N, 0_4]$ fue posible determinar el rango de aparición del primer daño trasversal generalizado o la primera grieta trasversal en cada uno de los laminados sometidos a ensayo.

Sin embargo, mientras que en los laminados $[0_4, 90_2, 0_4]$, $[0_4, 90_4, 0_4]$ y $[0_4, 90_8, 0_4]$ fue posible encontrar el momento en el que la probeta tenía una única grieta transversal completa, en el laminado $[0_4, 90, 0_4]$ el primer daño transversal más allá de despegues continuos encontrado fue un daño transversal generalizado que, al seguir cargando, no evolucionaba hacia una grieta completa sino que se formaba otro daño transversal generalizado en otra zona de la capa a 90 grados.

Por tanto, a efectos de analizar el posible efecto escala que aparece al variar el espesor de la capa a 90 grados en laminados $[0_4, 90_N, 0_4]$ se ha excluido el laminado correspondiente a $N=1$, por ser el mecanismo de fallo que aparece diferente.

Al comparar los laminados $[0_4, 90_N, 0_4]$ con $N=2, 4$ y 8 se ha apreciado que sí se da el efecto que buscábamos, es decir, a medida que aumenta el espesor de la capa a 90 grados se reduce tanto el nivel de carga (N) como la deformación (%) media a la que aparece la primera grieta transversal. Este es el efecto que esperábamos encontrar: retraso de la aparición del daño a medida que disminuimos el espesor de las láminas. Se aprecia efecto escala tal y como lo hemos definido.

➤ Efecto de variar el espesor de la capa a 0 grados

A la hora de variar el espesor de la capa a 0 grados se ha partido de dos de los laminados con los que se contaba para estudiar el efecto de variar el espesor de las láminas a 90 grados.

Se han elegido los laminados de las secuencias $[0_4, 90_N, 0_4]$ correspondientes a $N=1$ y $N=4$ y se ha variado el espesor de las láminas a 0 para cada valor de N .

En el grupo de laminados $[0_Q, 90, 0_Q]$ se han apreciado unos resultados muy heterogéneos.

- Para $Q=1$ se vio que las muestras se rompían sin que fuera posible detectar un daño transversal antes de la rotura. Además, al aplicarle el proceso de aumento gradual de carga las probetas se debilitaban y terminaban rompiendo a una carga inferior a su carga media de rotura.
- Para $Q=2$ tampoco fue posible detectar el rango en que aparecía el primer daño transversal pues las probetas también se debilitaban al cargarlas y se rompían a una carga inferior a la rotura en el proceso de aumento gradual de carga. Sin embargo, en el daño encontrado en los ensayos a primer aviso sonoro (en los que se realizaba un único ciclo de carga y descarga), sí que se encontró en algunas de las muestras un daño muy generalizado, digno de comentar, pues difiere mucho a los mecanismos de fallo y propagación del daño encontrados en el resto de laminados. En estas muestras se han apreciado un daño muy generalizado formado por grietas transversales inclinadas ± 45 grados con respecto a la dirección de aplicación de la carga, e importantes delaminaciones entre las láminas a 0 y 90 grados que se conectaban con las grietas.
- Para $Q=4$ fue posible establecer el rango al que aparece el primer daño transversal generalizado, pero tal y como se ha comentado, dicho daño no llegaba a evolucionar a una grieta transversal completa.

En cuanto a los laminados $[0_P, 90_4, 0_P]$ se ha apreciado un comportamiento similar al variar el espesor de la capa de 0.

- Para $P=1$ las muestras se han roto sin que se escuchara antes de la rotura ningún aviso sonoro de rotura de fibra y sin que se viese daño en la sección de las láminas a 90.
- Para $P=2$ tampoco fue posible detectar el rango en que aparecía el primer daño transversal pues las probetas también se debilitaban al cargarlas y se rompían a una carga inferior a la rotura en el proceso de aumento gradual de carga. Sin embargo, en el daño encontrado en los ensayos a primer aviso sonoro (en los que se realizaba un único ciclo de carga y descarga), sí que se encontraron algunas probetas con una única grieta y esta no era completamente transversal, si no que se curvaba a lo largo de su recorrido.
- Para $P=4$ sí que fue posible establecer el rango al que aparece la primera grieta transversal perpendicular a la dirección de aplicación de la carga.

Es decir, a pesar de no poder establecer comparaciones respecto al nivel de carga y deformación al que aparece el primer daño entre laminados de un mismo grupo (con el mismo número de láminas a 90 grados y diferente número de láminas a 0 grados) debido a los diferentes mecanismos de fallo que aparecen, parece claro que variar el espesor de las láminas a 0 grados tiene un importante efecto.

Al comparar laminados con el mismo número de láminas a 90 grados y distinto número de láminas a 0 no se ha encontrado ningún laminado en el que se produzca el mismo mecanismo de fallo: presentan formas de rotura diferentes, diferentes comportamientos al ser cargadas y descargadas, distintos tipos de daño y niveles de carga de aparición del mismo.

Hasta ahora, el posible efecto que tuviera variar el espesor de la capa a 0 grados no se había tenido en cuenta en las distintas líneas de investigación llevadas a cabo por el GERM pero, en vista a los resultados obtenidos, parece necesaria una investigación futura más profunda.

Expuestos los resultados obtenidos en este trabajo se plantean una serie de líneas de investigación abiertas para trabajos posteriores:

- Realizar proyectos en los que se analice el efecto que tiene variar el espesor de las láminas a 0 grados dejando fijo el número de láminas a 90.
- Estudiar la configuración del laminado $[0_2,90,0_2]$, analizando porque el daño se inicia y propaga tal y como hemos visto: crecimiento de grietas a ± 45 grados en la dirección de aplicación de la carga conectadas por una delaminación continuada entre la capa a 0 y 90 grados.
- Completar los resultados obtenidos con estudios similares realizados con láminas ultradelgadas.
- Comparar los mecanismos de daño que se producen con laminados formados por láminas convencionales y aquellos fabricados con láminas ultradelgadas.

REFERENCIAS

- [1] Arroyo E., «Efecto a escala en la resistencia a tracción en laminados de material compuesto», Trabajo Fin de Grado, Universidad de Sevilla, Sevilla, 2018.
- [2] Paris Caballero F., Cañas Delgado J., Marín Vallejo J. C. y Barroso A., Introducción al Análisis y Diseño con Materiales Compuestos, Sevilla: Sección de Publicaciones. Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales. Universidad de Sevilla.
- [3] UPV Universitat Politècnica de València, «www.upv.es,» [En línea]. Available: https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm15/pfcm15_9_2.html.
- [4] AENOR, «Material aeroespacial, Plásticos reforzados con fibra de carbono, Estratificados unidireccionales, ensayo de tracción paralelamente a la dirección de la fibra,» Norma Española, 1996.
- [5] Parvizi A., Garret K.V. y Bailey J.E., «Constrained cracking in glass fibre-reinforced epoxy cross-ply laminates.,» J of Mat Sci, 1978;13;195-201.

