

# Trabajo de Fin de Máster

## Ingeniería Industrial

### Estimación de las propiedades a fractura de la interfase entre láminas en laminados $[0,90_n]_s$

Autor: Paula María Caballos Galindo

Tutor: Federico París Carballo

Antonio Blázquez Gamez

María Luisa Velasco López

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

**Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2021





Trabajo Fin de Máster  
Ingeniería Industrial

# **Estimación de las propiedades a fractura de la interfase entre láminas en laminados [0,90n]s**

Autor:

Paula María Caballos Galindo

Tutores:

Federico Paris Carballo

Antonio Blazquez Gamez

María Luisa Velasco López

Dpto. Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021



Trabajo Fin de Máster: Estimación de las propiedades a fractura de la interfase entre láminas en laminados  
[0,90n]s

Autor: Paula María Caballos Galindo

Tutores: Federico Paris Carballo  
Antonio Blazquez Gamez  
María Luisa Velasco López

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2021

El Secretario del Tribunal



*A mi familia*





# Agradecimientos

---

Con el presente trabajo pongo punto final a una de las etapas más maravillosas y enriquecedoras de mi vida como estudiante. Es por ello, que me gustaría agradecerles a todas las personas que me han acompañado en este camino, su apoyo incondicional en cada uno de los momentos.

En primer lugar, a mis padres por ofrecerme la oportunidad de estudiar y formarme, así como su confianza y apoyo desde el primer día. A mis hermanos, por entenderme y seguirme en el camino hasta el final.

En segundo lugar, a mis tutores, Federico, Antonio y María Luisa. Agradecerles a los tres la confianza, la guía durante los meses de trabajo y la apuesta por mí en todo momento.

Y, por último, aquellos que han estado conmigo desde el inicio del trabajo, día a día. Mis compañeros de laboratorio, Pablo, Miguel, José Ramón y Antonio.

*Muchas gracias,*

*Paula.*







<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Índice</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xiv</b>
<b>Índice de Gráficas</b>	<b>xv</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xvi</b>
<b>Índice de Ecuaciones</b>	<b>xvii</b>
<b>1 Motivación e introducción</b>	<b>1</b>
1.1 <i>Concepto de material compuesto</i>	1
1.2 <i>Identificación del problema</i>	1
1.3 <i>Objetivo del trabajo</i>	2
<b>2 Fabricación de probetas</b>	<b>3</b>
<b>3 Ensayos e Inspección</b>	<b>5</b>
3.1 <i>Ensayos a tracción</i>	5
3.2 <i>Nomenclatura del modelo</i>	10
3.3 <i>Inspección al microscopio y fotocomposiciones</i>	11
<b>4 Trabajo numérico</b>	<b>21</b>
<b>5 Modeling</b>	<b>23</b>
5.1 <i>Cálculo de <b>GIC900</b></i>	23
5.2 <i>Cálculo de <b>GC00 – 900</b></i>	23
5.3 <i>Programas de cálculo</i>	25
<b>6 Resultados</b>	<b>27</b>
6.1 <i>Cálculo de <b>GIC900</b></i>	27
6.2 <i>Cálculo de <b>GIC0 – 900</b> y <b>GIIC0 – 900</b></i>	29
6.3 <i>Segunda grieta</i>	30
<b>7 Conclusiones y trabajo a futuro</b>	<b>33</b>
<b>Referencias</b>	<b>35</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 3-1. Datos de ensayo, probeta 16-26.	6
Tabla 3-2. Datos de ensayo, probeta 16-27.	7
Tabla 3-3. Datos ensayos de tracción 16-19.	7
Tabla 3-4. Datos ensayo de tracción 16-20.	8
Tabla 3-5. Datos ensayo de tracción 16-21.	8
Tabla 3-6. Datos ensayo de tracción 16-22.	9
Tabla 3-7. Datos de delaminación en $\mu\text{m}$ probeta 16-19.	15
Tabla 3-8. Datos de delaminación en $\mu\text{m}$ probeta 16-20.	15
Tabla 3-9. Datos de delaminación en $\mu\text{m}$ probeta 16-21.	16
Tabla 3-10. Datos de delaminación en $\mu\text{m}$ probeta 16-22.	16
Tabla 3-11. Datos de las delaminaciones de cada probeta en G11 y deformaciones.	18
Tabla 3-12. Datos de las delaminaciones de cada probeta en G12 y deformaciones.	18
Tabla 3-13. Datos de las delaminaciones de cada probeta en G22 y deformaciones.	19
Tabla 5-1. Comparativa de la tensión en el laminado 90 grados. BEM vs TGL.	25
Tabla 6-1. Datos de los ensayos de las probetas procedentes de los laminados n=4 y n=8.	27
Tabla 6-2. Tabla de datos de delaminación de las probetas procedentes del laminado n=16.	29
Tabla 6-3. Tabla de resultado del índice de liberación <i>GIC00</i> – 900.	30
Tabla 6-4. Datos de ensayo de las probetas procedentes del laminado n=16.	30
Tabla 6-5. Tabla de datos de delaminación de las probetas del primer daño cuando aparece el segundo daño procedentes del laminado n=16.	31
Tabla 6-6. Incremento de delaminación del primer daño de las probetas procedentes dellaminado n=16.	31
Tabla 6-7. Tabla de datos de delaminación del segundo daño de las probetas procedentes del laminado n=16.	31
Tabla 6-8. Tabla de resultado del índice de liberación <i>GIIC00</i> – 900.	32

# ÍNDICE DE GRÁFICAS

---

Gráfica 3-1. Tensión-Deformación 16-19.	7
Gráfica 3-2. Tensión-Deformación 16-20.	8
Gráfica 3-3. Tensión-Deformación 16-21.	8
Gráfica 3-4. Tensión-Deformación 16-22.	9
Gráfica 3-5. Comparación de carga I entre probetas.	9
Gráfica 6-1. Representación $n$ vs $\epsilon$ .	28
Gráfica 6-2. Daño de delaminación 'a' vs. $G$ [ $\text{KJ/m}^2$ ].	29

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 2-1. Probetas ensayadas 16-19, 20, 21, 22, 23, 24, 26, 27.	3
Figura 3-1. Fotocomposición con grieta, probeta 16-24.	5
Figura 3-2. Fotocomposición con grietas, probeta 16-24.	5
Figura 3-3. Fotocomposición con grietas, probeta 16-24.	6
Figura 3-4. Grieta transversal, probeta 16-26.	6
Figura 3-5. Grieta transversal, probeta 16-27.	6
Figura 3-6. Modelo de visualización de probetas.	10
Figura 3-7. Configuración delaminación en T.	10
Figura 3-8. Configuración delaminación en triángulo.	11
Figura 3-9. Evolución delaminación en LA 16-26.	11
Figura 3-10. Evolución delaminación en LB 16-26.	12
Figura 3-11. Evolución delaminación en LB 16-27.	12
Figura 3-12. Evolución delaminación en LD 16-27.	12
Figura 3-13. Evolución delaminación en LB 16-19.	13
Figura 3-14. Evolución delaminación en LC 16-19.	13
Figura 3-15. Evolución delaminación en LD 16-19.	13
Figura 3-16. Evolución delaminación en LB 16-21.	14
Figura 3-17. Evolución delaminación en LD 16-21.	14
Figura 3-18. Evolución delaminación en LA 16-22.	14
Figura 3-19. Evolución delaminación en LC 16-22.	15
Figura 3-20. Modelo en la cara de la probeta.	16
Figura 3-21. Modelo efecto ‘túnel’.	17
Figura 3-22. Ejemplo de fotocomposición sin encapsular.	17
Figura 3-23. Ejemplo de fotocomposición de probeta encapsulada. Mismo lado y probeta figura 3-22.	18
Figura 5-1. DELMEDIA.	24
Figura 5-2. Simulación real de la grieta en la probeta.	24
Figura 5-3. Simulación hipotética para el cálculo de la grieta en la probeta.	24
Figura 5-4. Ilustración de la regla del trapecio compuesta.	26
Figura 6-1. Daño de la probeta 8-20 procedente del laminado n=8.	28
Figura 6-2. Ejemplo de la medición de la delaminación en triángulo.	31



# ÍNDICE DE ECUACIONES

---

Ecuación 5-1. Balance energético para daño transversal.	23
Ecuación 5-2. Balance energético para daño transversal y daño de delaminación.	23
Ecuación 5-3. Cálculo de DELMEDIA	24
Ecuación 5-4. Ecuación referente a la regla del trapecio compuesta.	25
Ecuación 6-1. Balance energético para daño transversal y delaminación, segunda grieta.	32



# 1 MOTIVACIÓN E INTRODUCCIÓN

---

El ser humano está en constante evolución, así como todo lo que le rodea. El avance para una mejor supervivencia se aplica a cualquier ámbito de estudio. Es aquí donde entra el desarrollo de las tecnologías, donde los materiales forman un papel prioritario. En el último tiempo, los materiales compuestos han acaparado un papel fundamental, ya que las diferentes combinaciones de estos pueden aportar diferentes prestaciones. El fin primordial es obtener materiales con mejores características que sus constituyentes de forma individual.

En este capítulo se va a describir brevemente el concepto de material compuesto, el interés por aportar nuevos conocimientos en esta rama de investigación y el fin del presente trabajo.

## 1.1 Concepto de material compuesto

En términos generales, un material compuesto es aquel constituido por dos o más componentes. Esta combinación hace que el material final tenga unas propiedades superiores a la de sus elementos por separado.

En este trabajo el material de estudio es un material formado por fibra de carbono y resina epoxi.

Algunas de las ventajas de este tipo de materiales son:

- Alta relación resistencia-peso.
- Elevada rigidez.
- Excelentes propiedades mecánicas.
- ...

Por el contrario, existen desventajas como:

- El coste elevado de la materia prima.
- Falta de información sobre el comportamiento final de la pieza.
- Falta de herramientas de cálculo exhaustivas.
- ...

## 1.2 Identificación del problema

El trabajo que se recoge en *Estudio del daño en laminados  $[0,90n]_s$  con grandes espesores de la lámina de 90 grados* [1], trata de profundizar en el efecto escala. Esto es referente a la resistencia en el material compuesto cuando se combinan diferentes espesores en la lámina de 90 grados y la orientación de las láminas contiguas. El objetivo principal del trabajo [1] es la observación del daño transversal producido en el espesor de 90 grados cuando se somete a una carga a tracción y el fallo entre las láminas de 90 y 0 grados. Finalmente, contiene un análisis numérico para relacionar el comportamiento experimental y dar una explicación del efecto escala a nivel macro mecánico.

Es en este trabajo [1] donde surge la necesidad de ampliar un estudio con otros valores de  $n$ , de rango inferior. Con este estudio, se obtendría una mayor información que permitiría predecir el comportamiento de los laminados.

La obtención de  $G_C$ , índice de liberación de energía en el crecimiento de una grieta, para el daño de delaminación hace que generar un método de determinación de esta propiedad del material sea de gran importancia. Todo esto siempre y cuando exista cierta correlación entre procedimientos experimentales y analíticos.

### 1.3 Objetivo del trabajo

A raíz de los resultados obtenidos en dicho trabajo [1], se concibió la idea de estudiar más en detalle las delaminaciones en la interfase 90-0 grados cuando aparece el daño transversal y con ello obtener una estimación de  $G_{IC}$  de la lámina de 90 grados,  $G_{IC}$  y  $G_{IIC}$  de la interfase 90-0 grados.

Para la realización de este trabajo se han usado probetas realizadas en el trabajo anterior [1] y se han exportado resultados de ensayos. Así como información referente a otros laminados del trabajo *Efecto escala en materiales compuestos: estudio del fallo a primera lámina en laminados  $[0,90_n]_s$*  [2] para poder completar un estudio más amplio y exhaustivo.

A continuación, se va a describir en los siguientes capítulos las distintas etapas del proceso que conforman el presente trabajo.

## 2 FABRICACIÓN DE PROBETAS

---

En este trabajo no se ha realizado ninguna actividad de fabricación puesto que las probetas que se han utilizado para los ensayos se han extraído del panel procedente del trabajo de fin de grado [1]. El laminado ha sido el  $[0_4/90_8]_s$ , del cual se han ensayado las probetas denominadas 16-19, 16-20, 16-21, 16-22, 16-23, 16-24, 16-26 y 16-27.

El proceso de fabricación de las probetas, así como la descripción del laminado y máquinas utilizadas para realizar el mismo se encuentran en [1].



Figura 2-1. Probetas ensayadas 16-19, 20, 21, 22, 23, 24, 26, 27.

En el siguiente apartado se va a detallar qué se ha hecho en cada probeta para obtener los resultados finales y las conclusiones.



# 3 ENSAYOS E INSPECCIÓN

A continuación, se va a desarrollar todo el estudio práctico que se ha trabajado en el Laboratorio de Elasticidad y Resistencia de Materiales (LERM) ubicado en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla.

## 3.1 Ensayos a tracción

Es bien conocido que los ensayos mecánicos se hacen para confirmar la respuesta que muestran los materiales cuando se trabaja con ellos. Con los distintos esfuerzos mecánicos se lleva al límite el material para poder caracterizarlo. La información obtenida es muy valiosa en el sector industrial para seleccionar de forma adecuada los materiales para la diversidad de servicios que deben prestar.

En este trabajo, como se ha comentado en el capítulo 2, las probetas que se han empleado corresponden a otro trabajo [1], por lo que el material ya está caracterizado. En el trabajo presente directamente se va a pasar a la etapa de ensayos e inspección.

En primer lugar, se han extraído tres probetas vírgenes, es decir, no habían sido lijadas, pulidas y ensayadas. Por lo que se ha procedido a lijar y pulir por ambas caras de la probeta. Una vez finalizado esta etapa, el primer ensayo a tracción corresponde a la probeta 16-24. Dicha probeta se ha cargado y parado el ensayo cuando se apreciaban sonidos para poder inspeccionar el daño in situ con la lupa colocada delante de la máquina de ensayo. En esta probeta aparecieron 6 grietas.

Este ensayo ha servido para estimar cuando aparecían los daños transversales y en qué orden. Para las próximas probetas se van a ensayar hasta la aparición de la segunda grieta transversal como ya se desarrollará más adelante.

En las siguientes imágenes se pueden observar las fotocomposiciones de la probeta 16-24 con las 6 grietas transversales recuadradas en rojo. Como se puede apreciar en la figura 3.1. hay una primera grieta y en la figura 3.2 hay dos grietas. Mientras que en la figura 3.3 hay tres grietas, dos de ellas se encuentran cercanas por lo que están señalizadas en el mismo recuadro rojo. Las fotocomposiciones están sacadas a un aumento de x20.

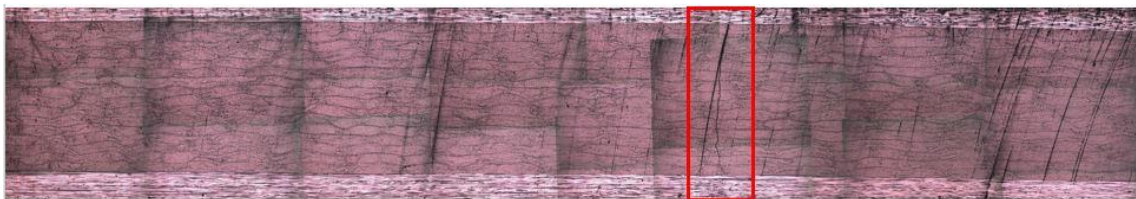


Figura 3-1. Fotocomposición con grieta, probeta 16-24.

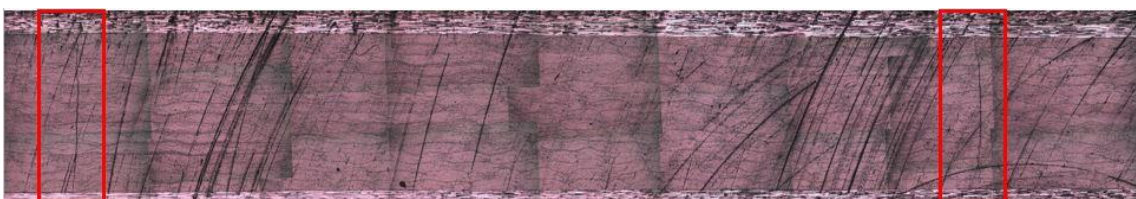


Figura 3-2. Fotocomposición con grietas, probeta 16-24.

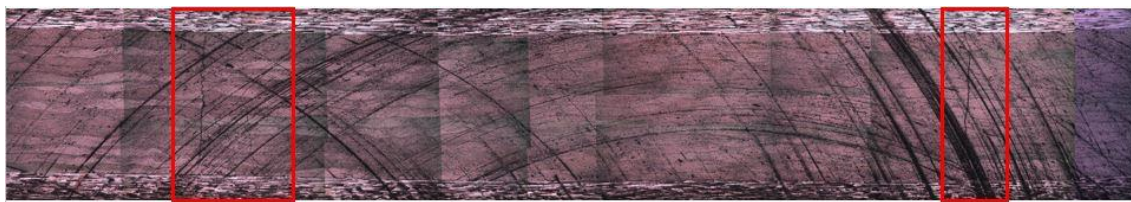


Figura 3-3. Fotocomposición con grietas, probeta 16-24.

Como se puede ver en las figuras anteriores, los rayones que aparecen en la probeta corresponden con el mal lijado de la misma.

En segundo lugar, se han lijado y pulido las probetas 16-26 y 16-27. Estas probetas se han traccionado hasta que se escuchó el primer sonido apreciable, que coincide con la aparición de la primera grieta transversal en la probeta. Este tipo de ensayo ya se había realizado con anterioridad en el trabajo precedente [1]. En este punto, se ha decidido tomar fotocomposiciones para cada incremento de carga hasta la obtención de una segunda grieta transversal, que igual que la primera grieta coincide con un sonido notorio.

A continuación, se presentan las fotocomposiciones que se tomaron durante el proceso de ensayo, así como la tabla de datos. En estas dos probetas no se había colocado el extensómetro por lo que no se han podido representar los datos de deformación.

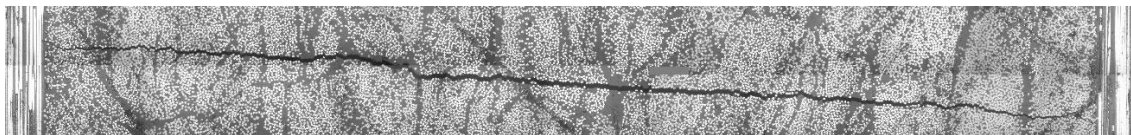


Figura 3-4. Grieta transversal, probeta 16-26.

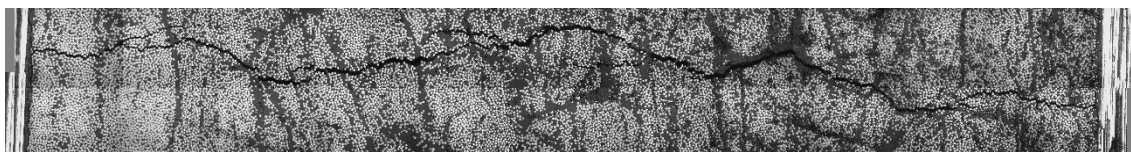


Figura 3-5. Grieta transversal, probeta 16-27.

Antes de presentar las tablas de datos de los ensayos, definir que los números romanos 'I' quiere decir la carga a la que aparece el primer daño en la probeta mientras que 'II' corresponde con el segundo daño que aparece en la misma. Los números arábigos ordena los diferentes incrementos de carga a las que se ha ido traccionando la probeta.

Tabla 3-1. Datos de ensayo, probeta 16-26.

Proebta 16-26	Carga (N)	Tensión (MPa)	velocidad ensayo (mm/min)
I	11242,26	164,3052775	1,5
1	10447,65	152,6920772	1,5
2	13577,04	198,428014	1
3	19433,61	284,0216009	1,5
4	21631,05	316,1371176	1,5
II	22288,32	325,7430981	1,5



Tabla 3-2. Datos de ensayo, probeta 16-27.

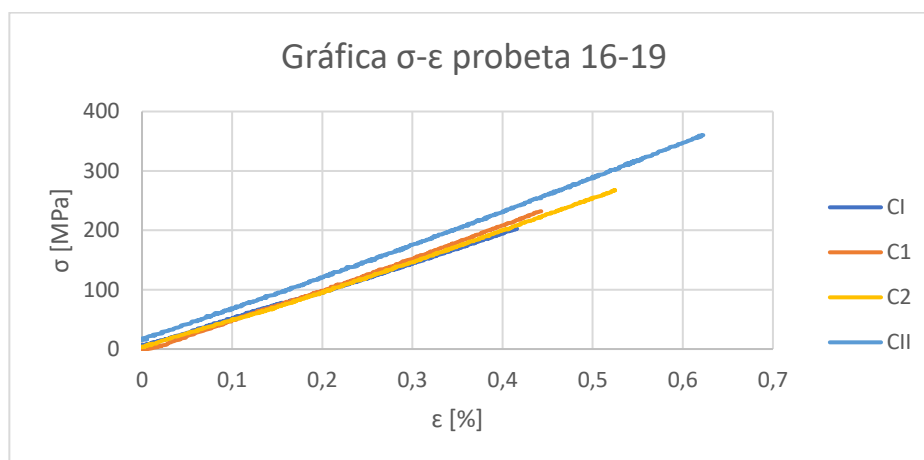
Probeta 16-27	Carga (N)	Tensión (MPa)	Velocidad de ensayo (mm/min)
I	17069,4	249,6840442	0,3-0,5
1	16461,18	240,7872565	1
2	17451,99	255,2804107	1
3	20934,54	305,9576458	1
II	23230,08	339,7998947	1

En tercer lugar, para poder tener más datos sobre las delaminaciones y la aparición de una segunda grieta, se han extraído de ensayos realizados en el trabajo previo [1], cuatro de las probetas que se habían examinado a tracción hasta la primera grieta transversal. Estas probetas son la 16-19, 16-20, 16-21, y 16-22. Al igual que con las probetas 16-26 y 16-27, se tomaron fotocomposiciones a distintos incrementos de carga hasta la aparición de la segunda grieta transversal.

En las siguientes tablas aparecen los datos de ensayo de cada muestra para cada incremento de carga. En esta ocasión sí se ha contado con el extensómetro por lo que los datos de deformación serán de utilidad en los siguientes apartados.

Tabla 3-3. Datos ensayos de tracción 16-19.

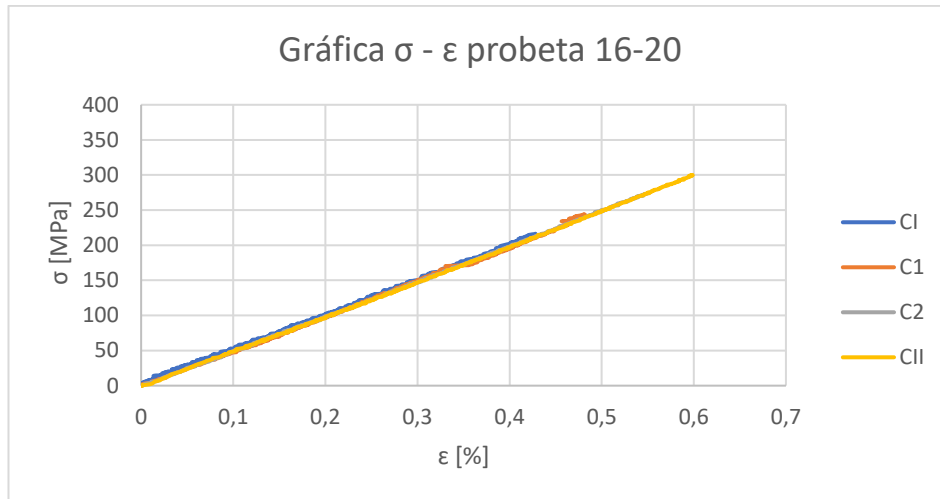
Probeta 16-19	Extensómetro (mm)	Carga (N)	$\sigma$ (MPa)	$\epsilon$ (%)
I	0,2081	13802,67	202,50	0,4162
1	0,2215	15813,72	232,01	0,443
2	0,2624	18256,41	267,84	0,5248
II	0,3107	24554,43	360,24	0,6214



Gráfica 3-1. Tensión-Deformación 16-19.

Tabla 3-4. Datos ensayo de tracción 16-20.

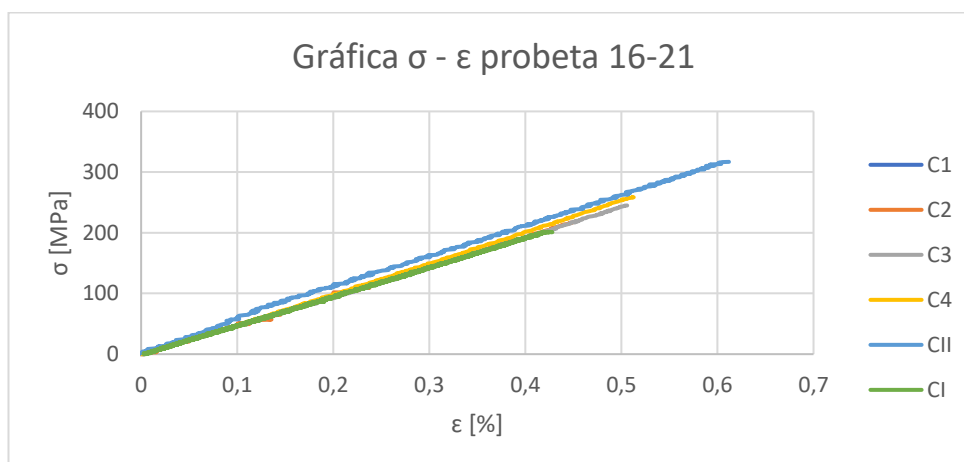
Probeta 16-20	Extensómetro (mm)	Carga (N)	$\sigma$ (MPa)	$\epsilon$ (%)
I	0,2141	14852,34	216,32	0,4282
1	0,2403	16755,48	244,04	0,4806
2	0,2745	18756,72	273,19	0,549
II	0,2993	20601	300,05	0,5986



Gráfica 3-2. Tensión-Deformación 16-20.

Tabla 3-5. Datos ensayo de tracción 16-21.

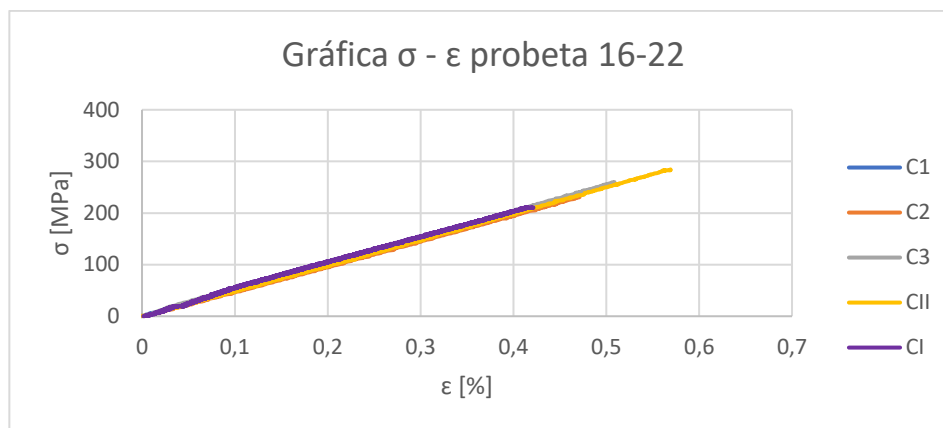
Probeta 16-21	Extensómetro (mm)	Carga (N)	$\sigma$ (MPa)	$\epsilon$ (%)
I	0,2121	13802,67	201,44	0,4242
1	0,2235	14862,15	216,91	0,447
2	0,253	16784,91	244,97	0,506
3	0,2557	17736,48	258,85	0,5114
II	0,306	21709,53	316,84	0,612



Gráfica 3-3. Tensión-Deformación 16-21.

Tabla 3-6. Datos ensayo de tracción 16-22.

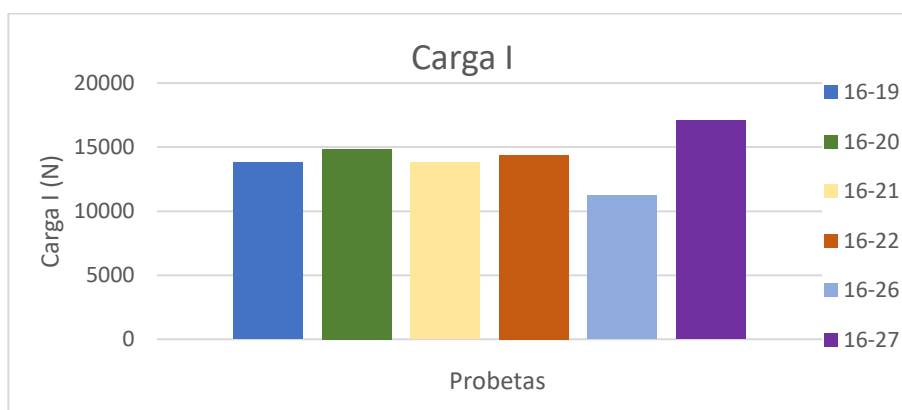
Probeta 16-22	Extensómetro (mm)	Carga (N)	$\sigma$ (MPa)	$\epsilon$ (%)
I	0,2101	14401,08	210,55	0,4202
1	0,2356	15794,1	231,11	0,4712
2	0,2544	17765,91	259,96	0,5088
II	0,2846	19433,61	284,37	0,5692



Gráfica 3-4. Tensión-Deformación 16-22.

Las velocidades de ensayo de estas cuatro probetas se habían iniciado en un rango entre 0.2 – 0.8 mm/min, es decir, cuando se realizó para el trabajo [1] referido a la carga I. Mientras que, en la segunda etapa, es decir, cuando se han ensayado los diferentes incrementos de carga, la velocidad ha sido de 1.5 mm/min.

En la siguiente gráfica 3-5, se ha representado la carga a la que aparece el primer daño para cada probeta ensayada. El significado de esta gráfica es comparar en qué momento las probetas fallan respecto a la velocidad de ensayo. Como se puede observar las probetas correspondientes con 16-19, 20, 21 y 22, han sido ensayadas con las mismas velocidades y su carga al primer daño es aproximado. Por el contrario, las probetas 16- 26 y 27, ensayadas a distintas velocidades de ensayo entre ellas, la aparición del daño varía considerable. La conclusión de este análisis es que la velocidad que se aplica en el ensayo influye en la aparición del daño en la probeta.



Gráfica 3-5. Comparación de carga I entre probetas.

### 3.2 Nomenclatura del modelo

Llegados a este punto, se va a explicar la nomenclatura utilizada en los siguientes capítulos.

En la siguiente figura 3-6, se puede visualizar las 3 configuraciones en las que podemos observar la probeta. En la primera posición veríamos la probeta de frente siendo 'Nº' el número de probeta correspondiente. En la segunda y tercera posiciones, el punto de vista es referente a la visión que proyecta la lupa. Esto quiere decir que la probeta se encuentra de canto, que es donde se encuentra la información referente al daño transversal y la zona que está lijada y pulida.

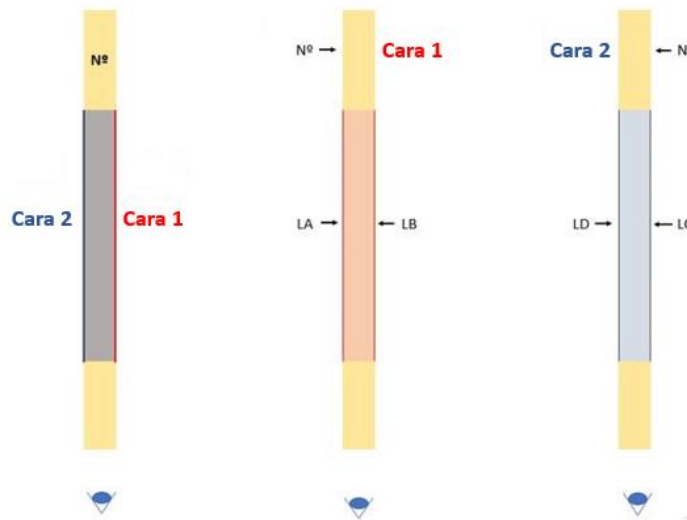


Figura 3-6. Modelo de visualización de probetas.

Hay que analizar cada lado de la probeta en cada cara, es decir, en una probeta encontraremos cuatro situaciones a estudiar. Se va a explicar cómo se asigna cada lado.

Número referido al número de láminas de 90° (en este caso 16) - número de probeta -  $LX_q^{ij}$

- X: A, B, C, D. Se refiere al lado de la probeta.

Al realizar las inspecciones, se ha identificado dos tipos de delaminaciones. Dichas configuraciones se van a denominar delaminación en T (figura 3-7.) y delaminación en triángulo (figura 3-8).

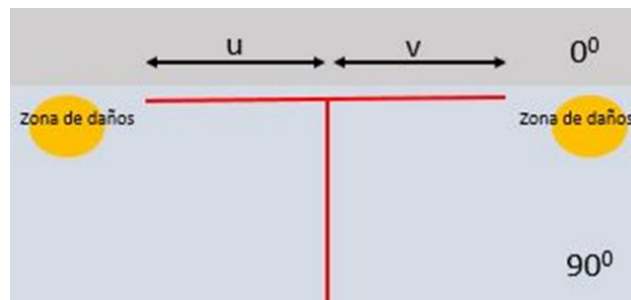


Figura 3-7. Configuración delaminación en T.

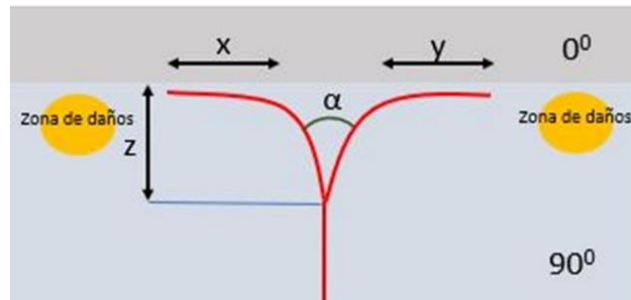


Figura 3-8. Configuración delaminación en triángulo.

Los parámetros representados en las imágenes anteriores, figuras 3-7. y 3-8., se definen:

- $u, v, x, y$ : medidas en  $\mu\text{m}$  del daño.
- $z$ : medida en  $\mu\text{m}$  desde la punta de la grieta transversal hasta la interfase 90-0.
- $\alpha$ : ángulo que aparece en la configuración en triángulo.
- Zona de daños: zona en la que no existe delaminación pero si hay despegues en fibras.

### 3.3 Inspección al microscopio y fotocomposiciones

En este capítulo, se ha procedido a estudiar cada probeta mediante una inspección al microscopio. Las probetas completas han sido inspeccionadas para detectar la existencia de daños en cada incremento de carga.

A continuación, se van a mostrar algunas de las composiciones tomadas de cada probeta, así como su evolución al ir aumentando la carga en el ensayo de tracción. Hay que tener en cuenta que las probetas no están bien preparadas, es decir, no se han lijado y pulido con esmero. Esto es así, ya que el objetivo de trabajo [1] era otro. Aun así, se extraen datos relevantes como se estudiará más adelante.

En primer lugar, se van a mostrar algunas de las fotocomposiciones de las probetas 16-26 y 16-27.

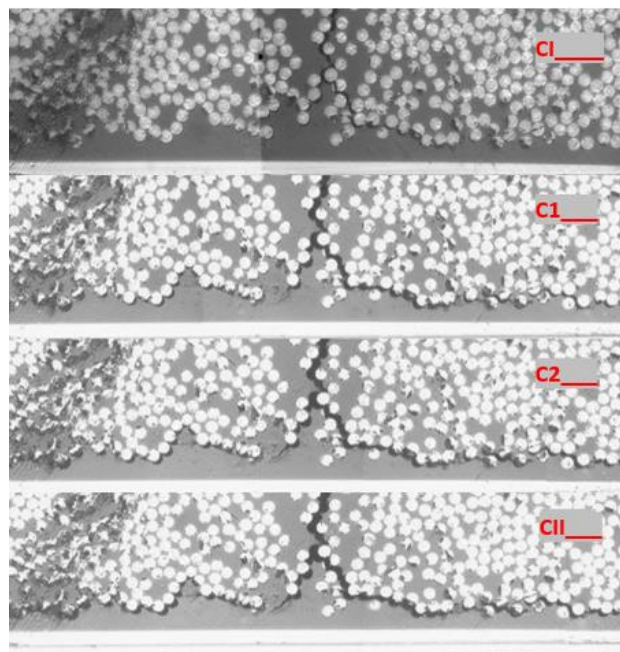


Figura 3-9. Evolución delaminación en LA 16-26.

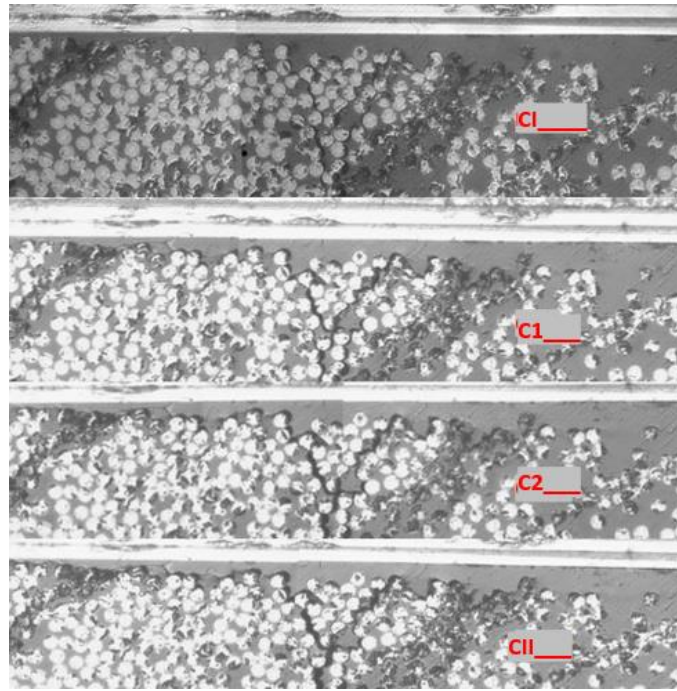


Figura 3-10. Evolución delaminación en LB 16-26.

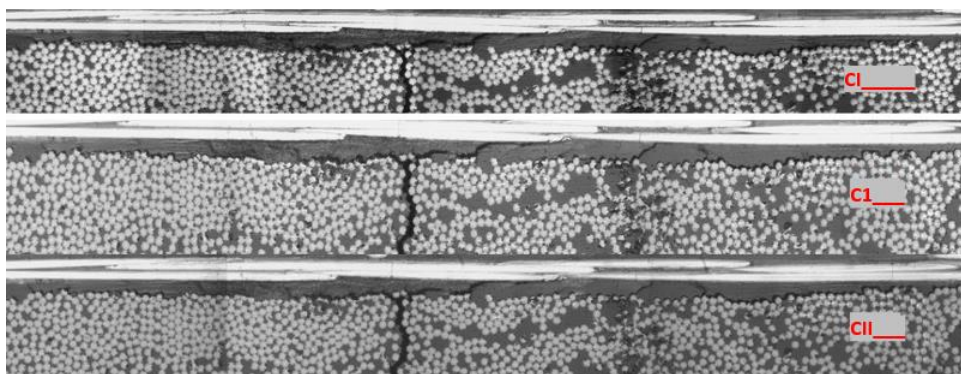


Figura 3-11. Evolución delaminación en LB 16-27.

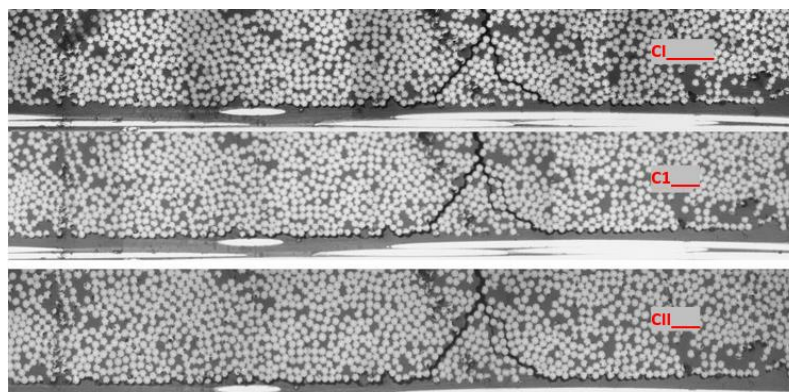


Figura 3-12. Evolución delaminación en LD 16-27.

En segundo lugar, se muestran algunas de las fotocomposiciones de las probetas de estudio, que como ya se ha comentado son 16-19, 16-20, 16-21 y 16-22.

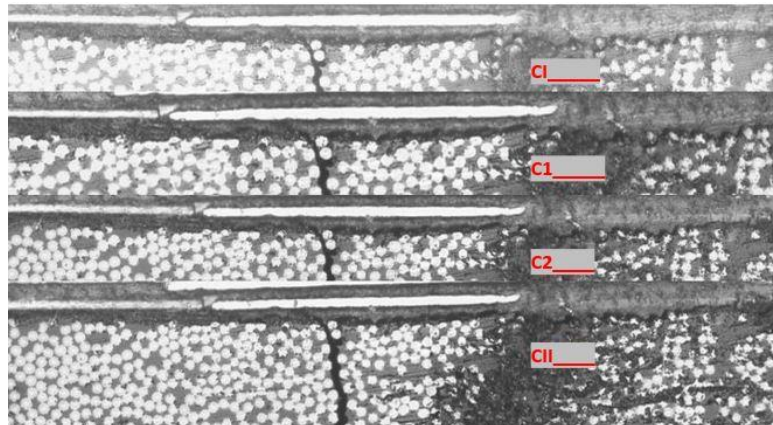


Figura 3-13. Evolución delaminación en LB 16-19.

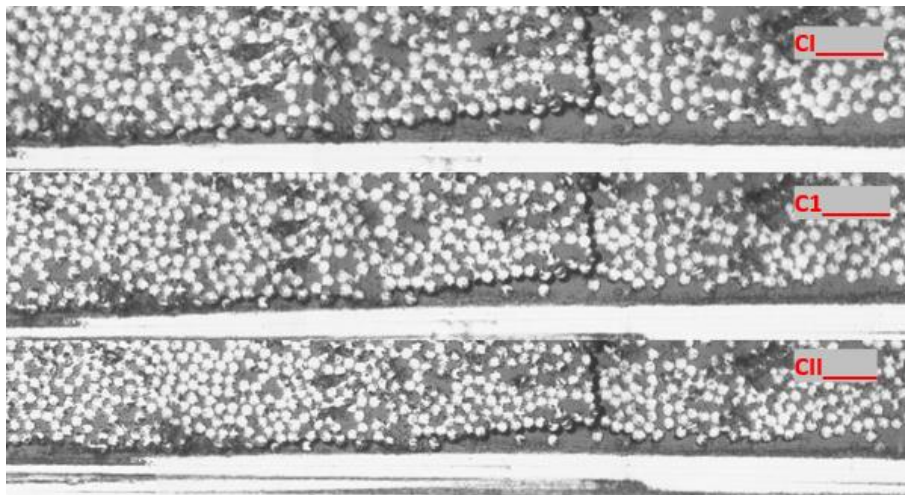


Figura 3-14. Evolución delaminación en LC 16-19.

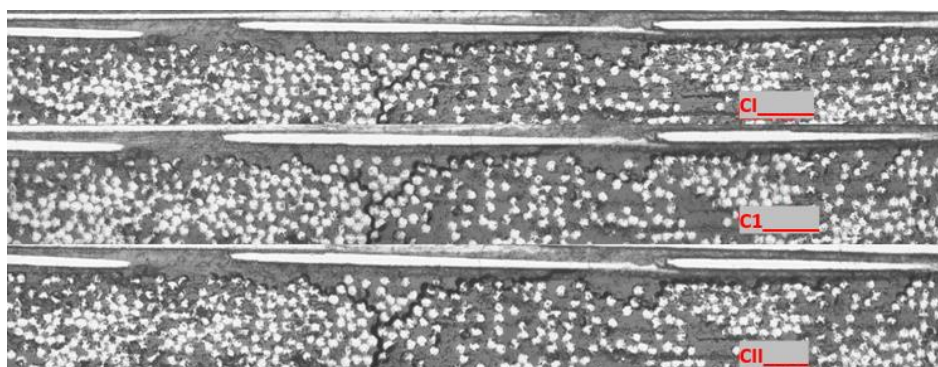


Figura 3-15. Evolución delaminación en LD 16-19.

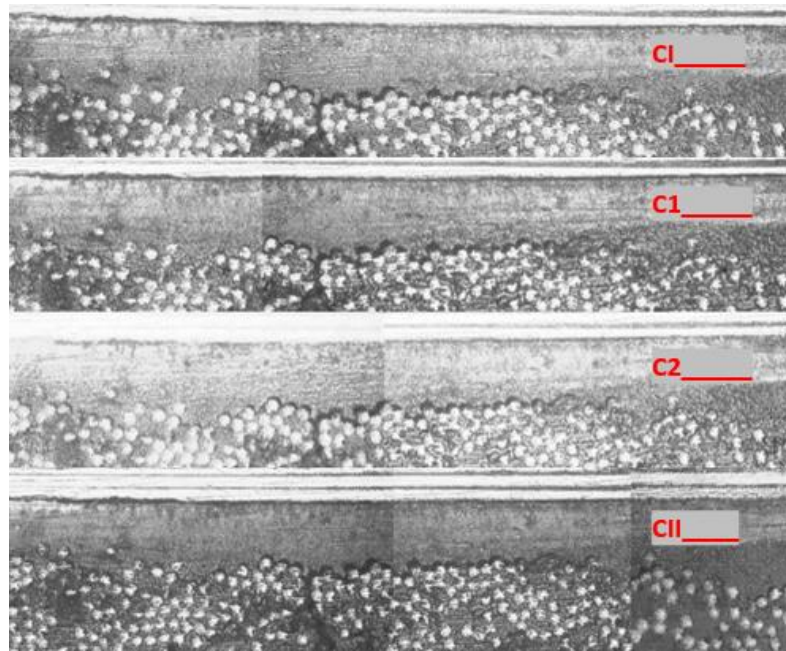


Figura 3-16. Evolución delaminación en LB 16-21.

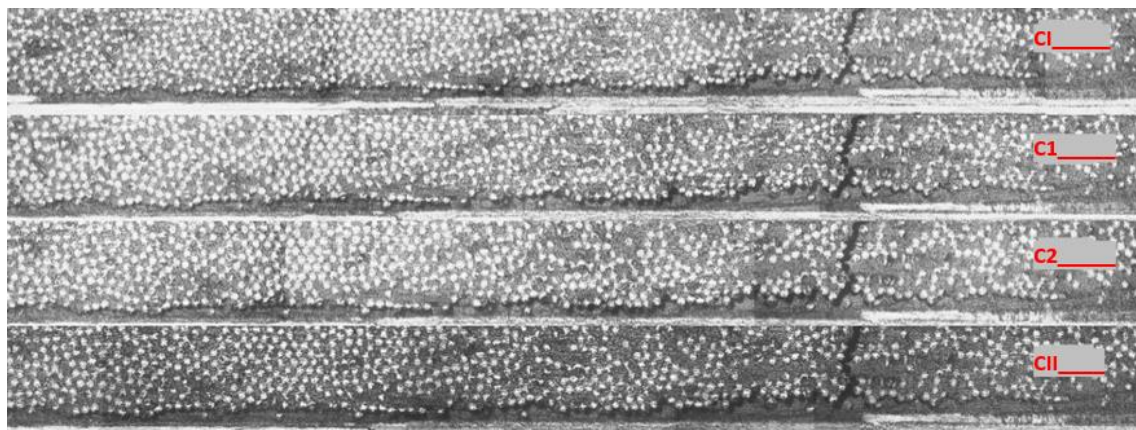


Figura 3-17. Evolución delaminación en LD 16-21.

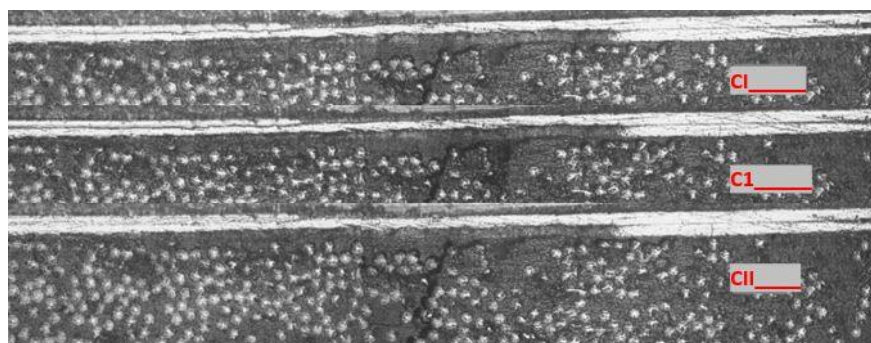


Figura 3-18. Evolución delaminación en LA 16-22.



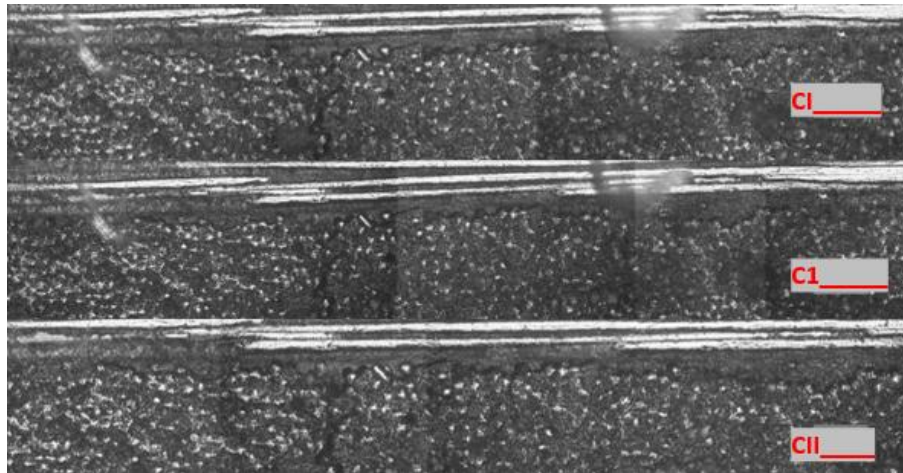


Figura 3-19. Evolución delaminación en LC 16-22.

Para cada probeta se completa una tabla en la que se recogen todos los datos de las delaminaciones, después estos datos nos servirán para poder analizar y estudiar qué es lo que ocurre en el material.

En la columna de la tabla identificada como carga se definen como I o II, que se refiere si la grieta de estudio es la que aparece al primer sonido apreciable o II cuando aparece la segunda grieta. Estas definiciones vienen determinadas por el concepto explicado anteriormente de 'I' y 'II', capítulo 3.1. En la columna nombrada como nº de grietas, se señala con el número 1 porque el estudio se refiere al primer daño en la probeta. Todas las medidas que aparecen en la tabla 3-7 están en  $\mu\text{m}$ .

Tabla 3-7. Datos de delaminación en  $\mu\text{m}$  probeta 16-19.

Probeta 16 19			medidas	
Carga	nº grietas	Lado	u	v
I	1	LA	306,97	320,9
		LB	88,72	243,7
		LC	401,65	41,53
		LD	118,58	369,1
II	1	LA	306,97	320,9
		LB	103,77	298,17
		LC	406,06	127,68
		LD	221,66	359,43

Tabla 3-8. Datos de delaminación en  $\mu\text{m}$  probeta 16-20.

Probeta 16 20			medidas					
Carga	nº grietas	Lado	u	v	x	y	z	$\alpha$
I	1	LA	366,11	62,99				
		LB	349,05	526,07				
		LC	139,62	277,96				
		LD	214,26	136,21				
II	1	LA	366,11	62,99				
		LB	317,63	604,98				
		LC	139,62	139,62				
		LD	214,26	136,21	144,32	67,55	131,37	52,85

Tabla 3-9. Datos de delaminación en  $\mu\text{m}$  probeta 16-21.

Probeta 16 21			medidas	
Carga	nº grietas	Lado	u	v
I	1	LA	55,03	159,24
		LB	146,72	396,24
		LC	665,96	92
		LD	270	975,54
II	1	LA	55,03	159,24
		LB	200,62	409,05
		LC	665,96	92
		LD	270	136,94

Tabla 3-10. Datos de delaminación en  $\mu\text{m}$  probeta 16-22.

Probeta 16 22			medidas	
Carga	nº grietas	Lado	u	v
I	1	LA	296,58	42,09
		LB	35,54	138,63
		LC	139,19	429,53
		LD	719,58	233,46
II	1	LA	296,58	42,09
		LB	82,03	139,77
		LC	139,19	429,53
		LD	719,58	233,46

Tras conocer los datos referentes al daño en cada probeta, se han hecho dos tipos de estudios, uno en la misma cara de la probeta y otro para las delaminaciones con efecto ‘túnel’.

Se va a representar el modelo que se ha seguido para poder hacer equivalencias entre delaminaciones de una misma probeta. Conocido la nomenclatura propuesta con anterioridad en una probeta, capítulo 3.2, se tiene que:

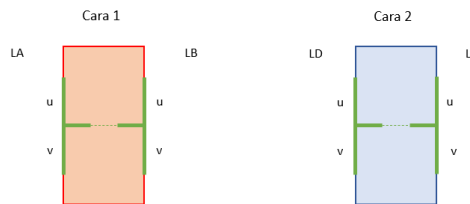


Figura 3-20. Modelo en la cara de la probeta.

Esta configuración, figura 3-20, ha servido para analizar las delaminaciones de una misma cara, es decir, Cara 1 y Cara 2. Las preguntas que se tuvieron que contestar para poder llegar a conclusiones serían las siguientes:

- ¿Tiene LA y LB (LC y LD) la misma configuración? (Triángulo o en T).
- ¿Es  $LA_u = LB_u$  y/o  $LA_v = LB_v$  ( $LA_u = LB_u$  y/o  $LA_v = LB_v$ )?
- ¿Es  $\Sigma LA = \Sigma LB$  ( $\Sigma LC = \Sigma LD$ )?
- ¿Es  $LA_u = LA_v$  ( $LB_u = LB_v$ ,  $LC_u = LC_v$ ,  $LD_u = LD_v$ )?

Esta comparación se ha hecho para cada una de las probetas. Una vez concluido, se confirmó que la configuración predominante es la denominada delaminación en T, excepto en un caso, el cual se corresponde con la Cara 2 de la probeta 16-19. En esa excepción, la configuración era la delaminación en triángulo. También se pudo afirmar que el daño que se observa desde uno de los lados es simétrico al otro lado, o sea, que se encuentran situados a la misma altura. Esto fue así para todas las probetas.

La segunda observación se centró en las similitudes de las delaminaciones en lo que definió como efecto ‘túnel’. Se considera efecto ‘túnel’ al daño que atraviesa la probeta de un lado de la cara a la cara opuesta. Dicho efecto se representa en la siguiente figura 3-21.

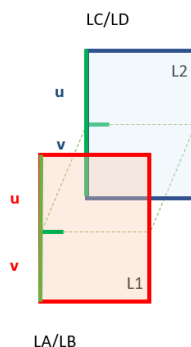


Figura 3-21. Modelo efecto ‘túnel’.

En la figura 3-21, se representa la configuración en T pero podría ser en cualquier caso configuración en triángulo. Saber que las similitudes se realizan entre delaminaciones de LA con LC y LB con LD para cualquier lado de cualquier probeta.

Las pautas seguidas para obtener los resultados son las siguientes:

- ¿Es la misma configuración?
- ¿Es  $\Sigma LA = \Sigma LC$  y  $\Sigma LB = \Sigma LD$ ?
- ¿Es  $LA_u = LA_v$  ( $LB_u = LB_v$ ,  $LC_u = LC_v$ ,  $LD_u = LD_v$ )?
- ¿Es  $LA_u = LC_u$  ( $LB_u = LB_u$ ,  $LC_u = LC_u$ ,  $LD_u = LD_u$ )?

Finalizado este estudio, el resultado que se obtuvo es que las delaminaciones no siguen ningún patrón.

Durante la realización del trabajo, las probetas 16-20,21 y 22 se han encapsulado para poder observar con mejor detalle la superficie dañada. Este proceso de encapsulado está detallado en el trabajo [1]. Este paso se considera mera curiosidad, ya que en la etapa de lijado y pulido hace que la superficie de daño cambie. Esto quiere decir que no se pueden realizar comparaciones entre el daño que había aparecido inicialmente con el final del ensayo, ya que una vez encapsulada la probeta no se puede volver a ensayar. El progreso de la grieta transversal y de las delaminaciones en el material es heterogéneo a través del espesor como se puede observar en el ejemplo de a continuación. Esta teoría también se puede ver en la figura 5-2. Esta afirmación está detallada en *Efecto escala en la resistencia a tracción de laminado de material compuesto* [3].

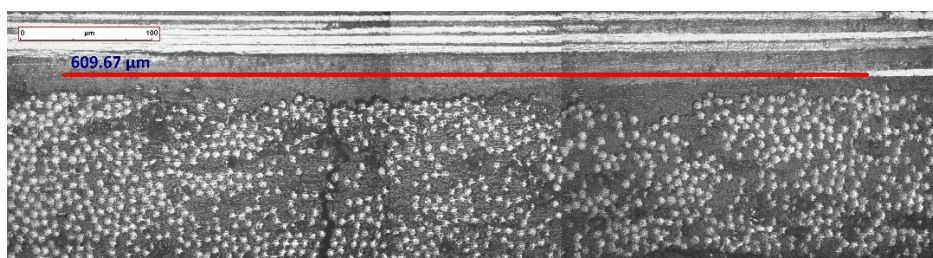


Figura 3-22. Ejemplo de fotocomposición sin encapsular.

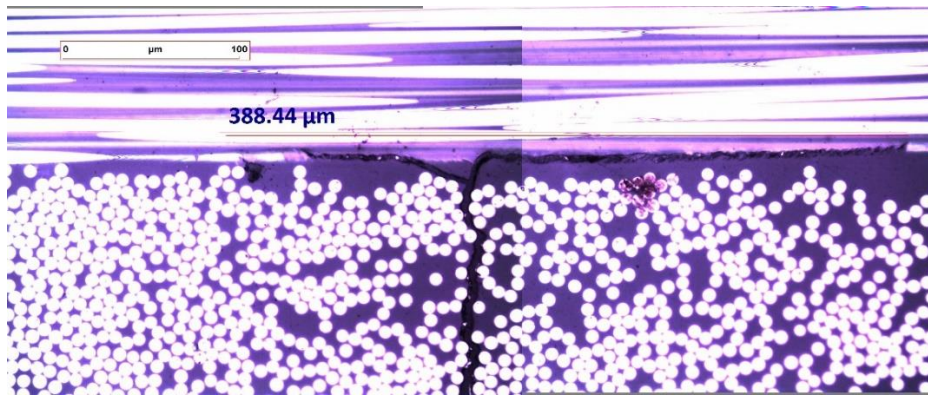


Figura 3-23. Ejemplo de fotocomposición de probeta encapsulada. Mismo lado y probeta figura 3-22.

Ambas imágenes están tomadas al mismo aumento la única diferencia es el número de fotos realizadas para componer cada una de ellas. Como se puede observar, la segunda imagen es más nítida y se puede observar el daño, así como las fibras con mayor detalle que en la primera. Aun así, el objetivo principal de esta demostración es ver como la superficie de daño cambia tras los diferentes ciclos de lijado y pulido que se realizan a la probeta. Es por esta razón que se van a tener en cuenta únicamente los datos obtenidos de las probetas sin encapsular cuando aparece la primera grieta y la segunda grieta.

Una vez recogidos todos los datos, para comparar los datos de las delaminaciones de cada una de las probetas hay que observar si aparecen a la misma deformación ( $\epsilon$ ).

- G11: datos referentes a las delaminaciones de cada lado de dicha probeta en la primera grieta.
- G12: datos referentes a las delaminaciones de cada lado de dicha probeta en la primera grieta cuando aparece la segunda grieta.
- G22: datos referentes a las delaminaciones de cada lado de dicha probeta en la segunda grieta cuando aparece la segunda grieta.
- D: suma de las delaminaciones en cada lado de la probeta, unidades en mm.

Tabla 3-11. Datos de las delaminaciones de cada probeta en G11 y deformaciones.

G11				
Probeta	19	20	21	22
LA	627,87	429,1	367,54	338,67
LB	332,49	875,26	214,27	174,17
LC	443,18	417,58	543,55	568,72
LD	487,82	350,47	757,96	953,04
D [mm]	0,23642	0,25905125	0,235415	0,254325
$\epsilon$ [%]	0,407967	0,4294505	0,4126285	0,4193225

Tabla 3-12. Datos de las delaminaciones de cada probeta en G12 y deformaciones.

G12				
Probeta	19	20	21	22
LA	627,87	429,1	367,54	338,67
LB	401,94	922,61	609,67	221,8
LC	533,74	417,58	543,55	568,72
LD	581,09	350,47	865,03	953,04
D [mm]	0,26808	0,26497	0,29822375	0,26027875
$\epsilon$ [%]	0,6214	0,5986	0,612	0,5692

Tabla 3-13. Datos de las delaminaciones de cada probeta en G22 y deformaciones.

G22				
Probeta	19	20	21	22
LA	827,78	442,32	638,96	803,03
LB	1139,2128	1408,72	1341,19	1292,56
LC	773,0128	385,88	477,44	1018,58
LD	708,2	1349,2306	948,833	1067,29
D [mm]	0,4310257	0,44826883	0,42580288	0,5226825
$\epsilon$ [%]	0,6214	0,5986	0,612	0,5692

Como se puede observar en las tablas, el daño aparece en cada una de las probetas a la misma deformación para cada escenario propuesto (G11, G12 y G22). Es por esto por lo que podemos hacer comparaciones en el mismo nivel de deformación entre probetas. A continuación, se va a explicar los trabajos que se han ido realizando en cada caso.



## 4 TRABAJO NUMÉRICO

---

La tenacidad a fractura de un material se determina mediante la tasa crítica de liberación de energía,  $G_C$ . Para que suceda el avance de la grieta, dicha tasa debe superar ese valor crítico.

El objetivo principal de este trabajo es calcular valores aproximados del índice de liberación de energía cuando se propaga la grieta por el material. Con esto lo que se quiere obtener es una caracterización de  $G_C$  tanto del material como de la interfase entre láminas, es decir, una estimación del valor nominal de la tenacidad a fractura del laminado a  $90^\circ$  y de la interfase entre las láminas de  $0^\circ$  y  $90^\circ$ .

La tasa de liberación de energía se va a calcular para la lámina de  $90^\circ$  en modo I y para la interfase  $90-0$  tanto en modo I como en modo II. Esto es así porque en un primer instante la grieta está sometida a carga normal por lo que se produce un modo I. Este modo I o modo de abertura se corresponde al modo normal de separación de las caras de la grieta bajo la acción de tensiones normales. Siendo el modo más importante.

Seguidamente en la interfase entre las láminas de  $0^\circ$  y  $90^\circ$  la delaminación que se aprecia es generada por la combinación entre el modo I y el modo II debido a su localización, a su asimetría y las tensiones tangenciales que se generan cuando la grieta transversal llega a dicha interfase. El modo II o modo de desplazamiento, se refiere al desplazamiento de los labios bajo la acción de tensiones de corte perpendicular al frente de grieta.

Los diferentes índices de liberación de energía que se van a calcular son:

- $G_{IC}^{90^\circ}$
- $G_{IC}^{0^\circ-90^\circ}$
- $G_{IIC}^{0^\circ-90^\circ}$





## 5 MODELING

### 5.1 Cálculo de $G_{IC}^{90^0}$

El cálculo de  $G_{IC}^{90^0}$  se va a obtener a partir del modelo donde solo ha aparecido una grieta transversal en el laminado  $90^0$ , es decir, no se ha producido la delaminación en la interfase  $0 - 90$  grados. A continuación, se presenta el balance de energía, ecuación 5-1, que hay que realizar para la obtención de dicho parámetro.

Ecuación 5-1. Balance energético para daño transversal.

$$\int_{t_{90^0}/2} \frac{1}{2} \cdot (\sigma^{90^0} \cdot u^{90^0}) \cdot 2 \cdot 2 \cdot dx = G_{IC}^{90^0} \cdot t_{90^0}$$

Siendo:

- $t_{90^0}/2$ , corresponde a la mitad del espesor del laminado de 90 grados en unidad [mm]. Se obtiene de forma experimental.
- $\sigma^{90^0}$ , tensión del laminado de 90 grados en unidad [MPa]. Se calcula mediante la Teoría General del Laminado (TGL) y el Método de Elemento de Contorno (BEM) cuando aún no ha aparecido ningún daño.
- $u^{90^0}$ , desplazamiento de los labios de la grieta transversal en unidad [mm]. Se calcula mediante BEM.
- $G_{IC}^{90^0}$ , índice de liberación de energía en el crecimiento de la grieta en unidad [J/m<sup>2</sup>]. Incógnita del problema, se calcula a través de un código matemático desarrollado que se explicará más adelante.

### 5.2 Cálculo de $G_C^{0^0-90^0}$

Para el cálculo de los valores  $G_{IC}^{0^0-90^0}$  y  $G_{IC}^{0^0-90^0}$  se parte de un modelo donde ya ha aparecido la grieta transversal y comienza el daño en la interfase entre  $0^0$  y  $90^0$ . Al Realizar el balance que se presenta a continuación, ecuación 5-2, se va a obtener un valor de  $G_C^{0^0-90^0}$  aparente. Más adelante se harán aproximaciones para conocer de forma aproximada cada término de manera individual.

Ecuación 5-2. Balance energético para daño transversal y daño de delaminación.

$$\int_{t_{90^0}} \frac{1}{2} \cdot (\sigma^{90^0} \cdot u^{90^0} (DELMEDIA)) \cdot 2 \cdot 2 \cdot dx = G_{IC}^{90^0} \cdot t_{90^0} + G_C^{0^0-90^0} DELMEDIA$$

Siendo:

- $t_{90^0}/2$ , corresponde a la mitad del espesor del laminado de 90 grados en unidad [mm]. Se obtiene de forma experimental.
- $\sigma^{90^0}$ , tensión del laminado de 90 grados en unidad [MPa]. Se calcula mediante TGL y BEM.
- $u^{90^0} (DELMEDIA)$ , desplazamiento de los labios de la grieta transversal cuando hay delaminación en unidad [mm]. Se calcula mediante BEM.
- $DELMEDIA$ , es un valor que se calcula de forma experimental en unidad [mm]. Como se va a explicar a continuación es un valor medio entre las delaminaciones de los lados de la probeta.

El valor de este parámetro se obtiene a partir de las imágenes captadas, capítulo 3.3, en el microscopio. Se mide cada lado de cada cara de una probeta y se calcula el valor de DELMEDIA. Este valor se considera una media de las delaminaciones en una cara.

Ecuación 5-3. Cálculo de DELMEDIA

$$DELMEDIA = \frac{\sum LX}{2}$$

- X: A, B, C, D. Se refiere al lado de la probeta.

El valor que se representa en la figura 5-1 sería el valor de la delaminación del lado de una cara.

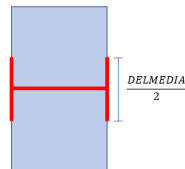


Figura 5-1. DELMEDIA.

En cualquier caso, se va a suponer que la grieta transversal y las grietas de delaminación son lineales. Esto quiere decir que, como se ha comentado en el capítulo 3.3, tras realizar el encapsulado de la probeta se ha observado que la superficie de daño va variando en el espesor, figura 5-2. Es por esta razón que a efectos prácticos vamos a considerar que las grietas avanzan de manera uniforme en todo el espesor, figura 5-3.

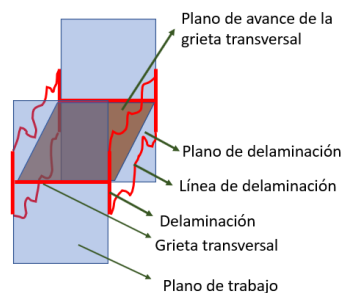


Figura 5-2. Simulación real de la grieta en la probeta.

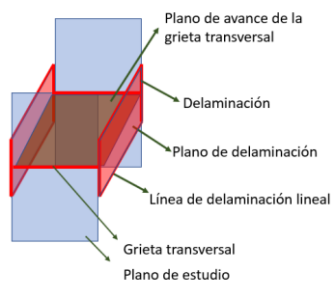


Figura 5-3. Simulación hipotética para el cálculo de la grieta en la probeta.

- $G_{IC}^{90}$ , índice de liberación de energía en el crecimiento de la grieta en unidad [ $J/m^2$ ]. Calculado en el apartado anterior. Se considera constante ya que se trata de una propiedad de material.
- $G_C^{0-90}$ , índice de liberación de energía en el crecimiento de la grieta aparente en unidad [ $J/m^2$ ]. Incógnitas del problema, se calcula a través de un código matemático desarrollado que se explicará más adelante.

### 5.3 Programas de cálculo

En este apartado se va a explicar los diferentes programas que se han utilizado para resolver los diferentes problemas que se han planteado para obtención de los valores explicados en los apartados anteriores (capítulo 5.2 y capítulo 5.3).

Para la obtención de  $\sigma^{90^\circ}$  uno de los programas que se desarrolla es un código basado en la Teoría General del Laminado. Dicho código e implantación se encuentra en el trabajo [1].

El resto de los programas se han establecido según el Método de los Elementos de Contorno (Boundary Element Method: BEM). Cada programa se ha ajustado a un problema en concreto dependiendo del valor que se quiera obtener en cada caso.

En cada uno de los programas los parámetros a introducir son diferentes pero cuyas soluciones han de ser aproximadas. Es en el caso de la obtención de la tensión en la lámina de 90 grados cuando no hay ningún daño. Para ello, con los valores experimentales de deformación y carga que se han obtenido en los ensayos y según el programa:

- En TGL: el valor de entrada sería la carga axial a la que es sometida el laminado (experimental). Y los resultados serían la deformación y  $\sigma^{90^\circ}$ .
- En BEM: el valor de entrada sería la deformación que se produce en el laminado al aplicarle cierta carga (experimental). Y el resultado sería la tensión en el laminado,  $\sigma^{90^\circ}$ .

Con estos programas lo que se obtiene es la tensión del laminado de 90 grados, es decir,  $\sigma^{90^\circ}$ .

Ambos resultados, deberían ser aproximados. A continuación, en la siguiente tabla 5-1 se puede observar los valores obtenidos para un ejemplo en concreto.

Tabla 5-1. Comparativa de la tensión en el laminado 90 grados. BEM vs TGL.

Probeta 4-16	BEM	TGL
$\sigma_{90}$ [MPa]	49,77004	47,82037
$\varepsilon$ [mm]	0,005688	0,005294

Mediante BEM se van a obtener los desplazamientos de los labios de la grieta transversal tanto para el modelo de grieta transversal como para el modelo de grieta transversal con delaminación en la interfase. En ambos casos y al igual que en el código utilizado para obtener  $\sigma^{90^\circ}$  mediante BEM, el parámetro de entrada es el mismo.

Finalmente, para la resolución de las ecuaciones 5-1 y 5-2 se ha desarrollado un código matemático. Dicho código está basado en la Regla de los Trapecios.

Para obtener el resultado se programa un código en Python para la integración. El método de integración utilizado es la regla del trapecio compuesta o regla de los trapecios. Dicha regla es una forma de aproximar una integral definida utilizando n trapecios. En la formulación de este método se supone que f es continua y positiva en el intervalo [a,b]. De tal modo la integral definida  $\int_a^b f(x) dx$  representa el área de la región delimitada por la gráfica de f y el eje x, desde  $x = a$  hasta  $x = b$ . Primero se divide el intervalo [a,b] en n subintervalos, cada uno de ancho  $\Delta x = (b - a)/n$ . Después de realizar todo el proceso matemático y llega a la siguiente fórmula:

Ecuación 5-4. Ecuación referente a la regla del trapecio compuesta.

$$\int_a^b f(x) dx \sim \frac{h}{2} [f(a) + 2f(a+h) + 2f(a+2h) + \dots + f(b)]$$

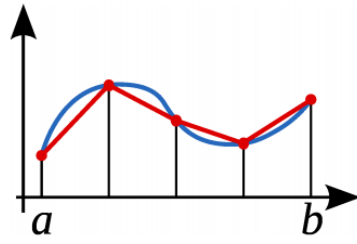


Ilustración de la regla del trapecio compuesta

Figura 5-4. Ilustración de la regla del trapecio compuesta.

## 6 RESULTADOS

### 6.1 Cálculo de $G_{IC}^{90}$

En primer lugar, se va a calcular el índice de liberación de energía del crecimiento de la grieta para un modelo donde solo ha aparecido una grieta transversal. Esta propiedad se va a considerar constante para el laminado de 90 grados. En cualquier caso, en una primera instancia se va a realizar el balance energético de la ecuación 5-1. para los laminados  $[0_4,90_2]_s$  y  $[0_4,90_4]_s$ . Esto es así porque para el laminado  $[0_4,90_8]_s$  aparece una delaminación entre las láminas 90-0 grados junto con la grieta transversal.

Para la mejor comprensión de los resultados, los laminados se van a nominar de tal manera:

$$[0_4, 90_n]_s$$

Siendo n el valor que toma según el laminado que estemos estudiando.

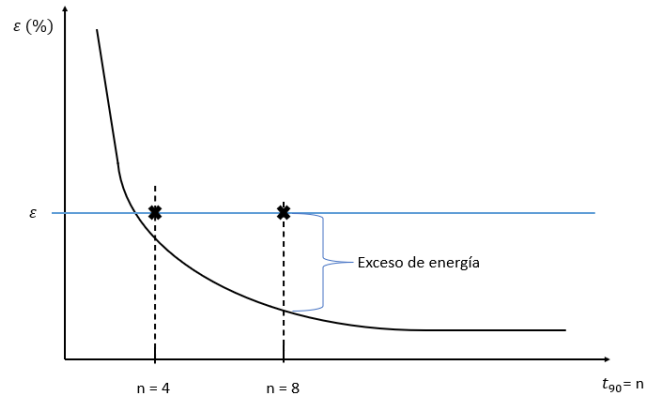
Tabla 6-1. Datos de los ensayos de las probetas procedentes de los laminados n=4 y n=8.

n=4			
Probeta	Deformación Media	Tensión Media 90 (MPa)	GIC (J/m <sup>2</sup> )
19	0,005490895	47,82037	37,47826
20	0,005475205	47,685665	37,2659
21	0,00497896	43,36462	30,81748
22	0,00520984	45,36522	33,7342
24	0,005411545	47,129465	36,403
<b>Total</b>	<b>0,005309646</b>	<b>46,2413357</b>	<b>35,04444203</b>

n=8			
Probeta	Deformación Media	Tensión media 90 (MPa)	GIC (J/m <sup>2</sup> )
20	0,003828415	33,412505	36,83508846
21	0,00582918	50,87351	85,39497
22	0,00579063	50,537	84,26910427
23	0,00490128	42,77896	60,37718209
25	0,004574265	39,92445	52,58887032
<b>Total</b>	<b>0,004924891</b>	<b>42,98291572</b>	<b>60,95731276</b>

Como se puede observar, la  $G_{IC}$  correspondiente a cada uno de los laminados no son iguales, cuando deberían ser valores similares, debido a que se trata de una propiedad del material. Entrando en más detalle, para los laminados con n=4 los valores obtenidos son aproximadamente iguales mientras que los resultados para n=8 son más dispersos y en general superiores a los de n=4. Una explicación de esta cuestión puede estar en la dependencia de la variación de la deformación aplicada y la energía liberada que aparece en la figura plim, en la cual, a efectos de la explicación que sigue, se han representado unos hipotéticos valores de n=4 y n=8 que podrían explicar lo encontrado.



Gráfica 6-1. Representación  $n$  vs  $\epsilon$ .

En el balance de energía realizado para encontrar el valor de  $G_{IC}$  de la lamina de 90, se ha supuesto que toda la energía liberada por la grieta transversal va a romper los enlaces de la lámina de 90. Sin embargo, en el caso de  $n=8$ , de acuerdo con la gráfica 6-1, hay un exceso de energía sobre la requerida para tener una grieta transversal, empleándose este exceso de energía en daño asociado a la delaminación entre las láminas de 0 y 90. En cambio en la situación dibujada en la gráfica 6-1 el caso de  $n=4$  estaría en una zona en que toda la energía liberada se usa para romper los enlaces de la lamina de 90. Parece por tanto razonable que en el caso de  $n=8$ , si empleamos toda la energía para la grieta transversal, ello nos lleve a valores más elevados de la  $G_{IC}$  aparente de la lamina de 90. Por todo ello en lo que sigue adoptamos como  $G_{IC}$  los valores obtenidos del caso  $n=4$ .

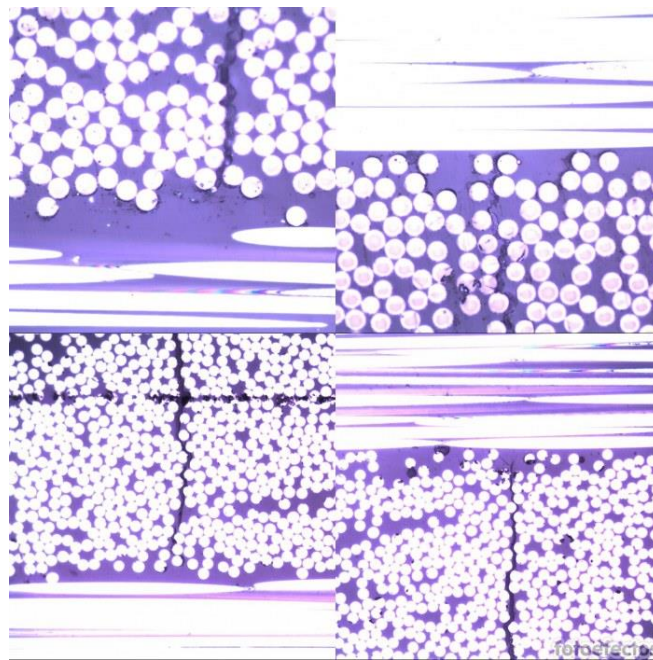


Figura 6-1. Daño de la probeta 8-20 procedente del laminado  $n=8$ .

Concluido todo lo anterior, se han estudiado los laminados con espesores inferiores, estos corresponden con  $n=1$  y  $n=2$  que se encuentran en el trabajo [2]. Se ha podido ver que la grieta transversal que se ha buscado no es una grieta en sí. Se trata de un conjunto de despegues enlazados pero aislados, además de conformar una línea tenue donde los desplazamientos de los despegues son mínimo. Esto es en comparación con las imágenes que se pueden observar para  $n = 8$  donde la grieta se ve a la perfección abierta y con desplazamiento superiores. Por ello, tras estudiar y analizar los laminados se ha llegado a la conclusión de implementar  $G_{IC}^{90}$  como el valor obtenido en el laminado  $n=4$ .

$$G_{IC}^{90} \approx 35 \text{ J/m}^2$$

## 6.2 Cálculo de $G_{IC}^{0-90^0}$ y $G_{IIC}^{0-90^0}$

Calculado el  $G_{IC}^{90^0}$  del modelo dañado por una grieta transversal, se ha supuesto que dicho valor es constante para cualquier otro modelo en el laminado de 90 grados, ya que se parte de que  $G_{IC}^{90^0}$  sería una propiedad del material.

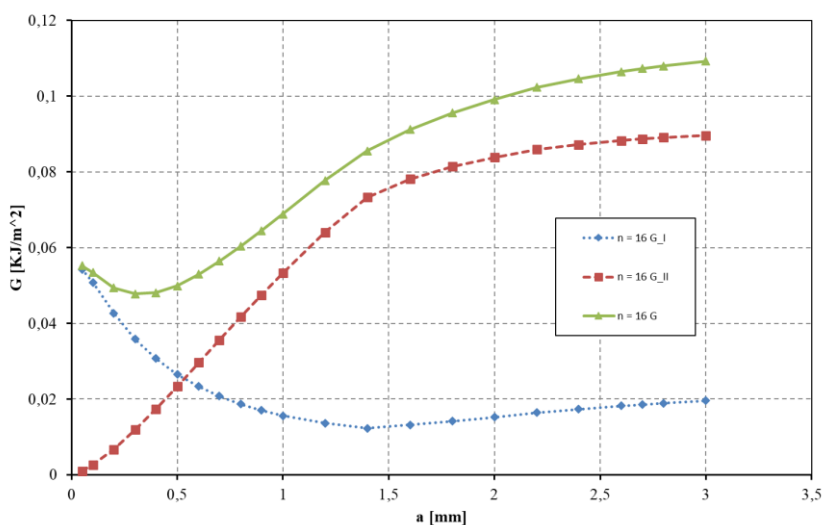
En este apartado analizamos el laminado correspondiente a  $n=16$ . En esta nueva situación, como se ha estado viendo en los capítulos anteriores, las probetas ensayadas están dañadas con una grieta transversal acompañada de delaminación en la interfase 0-90 grados. El objetivo principal de este apartado es calcular el valor de  $G_c$  de delaminación.

En la tabla 6-2 se muestran las delaminaciones aparecidas en el instante que aparece el daño. Con anterioridad se ha descrito el proceso que se ha seguido para realizar los cálculos y con ello la definición de los parámetros que aparecen en ella.

Tabla 6-2. Tabla de datos de delaminación de las probetas procedentes del laminado  $n=16$ .

G11				
Probeta	19	20	21	22
LA	627,87	429,1	367,54	338,67
LB	332,49	875,26	214,27	174,17
LC	443,18	417,58	543,55	568,72
LD	487,82	350,47	757,96	953,04
$\Sigma LX$ [ $\mu m$ ]	1891,36	2072,41	1883,32	2034,6
DELMEDIA [mm]	0,94568	1,036205	0,94166	1,0173
D [mm]	0,23642	0,25905125	0,235415	0,254325

Estos datos, tabla 6-2, son útiles para el cálculo del índice de liberación de energía. En la gráfica 6-1, se representa en el eje de abscisas el tamaño del daño de delaminación frente a  $G$ . Al situar el valor del parámetros 'D' que corresponde con el tamaño de grieta de delaminación que se incluye en los cálculos numéricos, se observa que el valor de  $G_{IC}$  es mayor que  $G_{IIC}$ , por lo que podemos despreciar este último.



Gráfica 6-2. Daño de delaminación 'a' vs.  $G$  [ $KJ/m^2$ ].

Seguidamente, se ha aplicado el balance energético de la ecuación 5-2 para obtener  $G_{IC}^{0^{\circ}-90^{\circ}}$ . En la tabla 6-3 aparecen los resultados de  $G_{IC}^{0^{\circ}-90^{\circ}}$ . También aparece el valor  $G_{IC}$  correspondiente con el valor del índice de liberación de energía para una grieta transversal. Este valor se ha supuesto constante para todo el laminado de  $90^{\circ}$ .

Tabla 6-3. Tabla de resultado del índice de liberación  $G_{IC}^{0^{\circ}-90^{\circ}}$ .

n=16				
Probeta	Deformación Media	Tensión Media 90 (MPa)	Glc (J/m <sup>2</sup> )	Gc 0-90 (J/m <sup>2</sup> )
19	0,00407967	35,64685	35,044442	155,2636
20	0,004294505	37,52686		167,1638434
21	0,004126285	36,05841		162,1209716
22	0,004193225	36,6421		157,7119767
<b>Total</b>	<b>0,004172644</b>	<b>36,46175583</b>		<b>160,5014529</b>

En este punto, se puede concluir que se obtiene un valor aproximado de un  $G_{IC}$  de delaminación, ya que se ha despreciado el  $G_{IC}$  de delaminación. Por tanto, hasta el momento se ha calculado un  $G_{IC}$  transversal y un  $G_{IC}$  de delaminación. El valor aproximado de la tasa de liberación de energía de delaminación entre los laminados  $0^{\circ} - 90^{\circ}$  sería:

$$G_{IC}^{0^{\circ}-90^{\circ}} \cong 160 \text{ J/m}^2$$

### 6.3 Segunda grieta

Como ya se sabe, las probetas han sido cargadas hasta la aparición de una segunda grieta, y es con esta con la que se quiere obtener un valor de  $G_{IC}$  de delaminación.

A continuación, tabla 6-4, se presentan los datos de ensayos de las probetas correspondientes al laminado n=16. En la primera tabla aparece la deformación y la tensión a la que aparece el primer daño. Mientras que en la segunda tabla se representa la deformación y la tensión a la que aparece el segundo daño. Se observa que la deformación de aparición del daño es diferente.

Tabla 6-4. Datos de ensayo de las probetas procedentes del laminado n=16.

n=16 / Primera grieta		
Probeta	Deformación Media	Tensión Media 90 (MPa)
19	0,00407967	35,64685
20	0,004294505	37,52686
21	0,004126285	36,05841
22	0,004193225	36,6421
<b>Total</b>	<b>0,004172644</b>	<b>36,46175583</b>

n=16 / Segunda Grieta		
Probeta	Deformación Media	Tensión Media 90 (MPa)
19	0,006214	54,37252236
20	0,005986	52,37752154
21	0,00612	53,55002202
22	0,005692	49,80502048
<b>Total</b>	<b>0,005999721</b>	<b>52,49758198</b>



En la tabla 6-5 se presentan las mediciones de las delaminaciones de la primera grieta cuando aparece la segunda grieta. Es por ello, que en la tabla 6-6 se representa el incremento de delaminación del primer daño para cada probeta. Aunque no es un incremento excesivo, esto explicaría la diferencia de deformación aparecida entre el primer daño y el segundo.

Tabla 6-5. Tabla de datos de delaminación de las probetas del primer daño cuando aparece el segundo daño procedentes del laminado n=16.

G12				
Probeta	19	20	21	22
LA	627,87	429,1	367,54	338,67
LB	401,94	922,61	609,67	221,8
LC	533,74	417,58	543,55	568,72
LD	581,09	350,47	865,03	953,04
$\Sigma LX [\mu m]$	2144,64	2119,76	2385,79	2082,23
DELMEDIA [mm]	0,53616	0,52994	0,5964475	0,5205575

Tabla 6-6. Incremento de delaminación del primer daño de las probetas procedentes del laminado n=16.

Probeta	19	20	21	22
$\Delta D$	0,03166	0,00591875	0,06280875	0,00595375

En la tabla 6-7 se presentan los datos de delaminación de la segunda grieta aparecida en la probeta. Si comparamos las delaminaciones entre el primer daño y el segundo, el valor 'D' del segundo daño es mayor que la 'D' del primero. Es por ello, que si se observa esta medida en la gráfica 6-1, se puede concluir que el valor de  $G_{IIC}$  y  $G_{IC}$  de delaminación están en el mismo orden. Se sabe por la mecánica de la fractura que  $G_{IIC}$  es mayor que  $G_{IC}$  y por eso, en este caso se va a despreciar el  $G_{IC}^{0^{\circ}-90^{\circ}}$ .

Tabla 6-7. Tabla de datos de delaminación del segundo daño de las probetas procedentes del laminado n=16.

G22				
Probeta	19	20	21	22
LA	827,78	442,32	638,96	803,03
LB	1139,2128	1408,72	1341,19	1292,56
LC	773,0128	385,88	477,44	1018,58
LD	708,2	1349,2306	948,833	1067,29
$\Sigma LX [\mu m]$	3448,2056	3586,1506	3406,423	4181,46
DELMEDIA [mm]	1,7241028	1,7930753	1,7032115	2,09073
D [mm]	0,4310257	0,44826883	0,42580288	0,5226825

En el caso de la segunda grieta, se encuentra en uno de los lados de cada probeta, una configuración en triángulo, capítulo 3-2. Para poder considerar este efecto se ha realizado la medición de la delaminación de la forma que se encuentra representada en la figura 6-2:

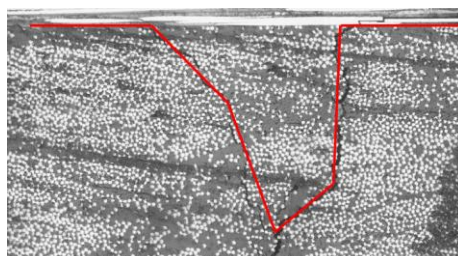


Figura 6-2. Ejemplo de la medición de la delaminación en triángulo.

Hay que recordar que todos los valores que se calculan para el parámetro DELMEDIA y el INCREMENTO, son a raíz de las suposiciones argumentadas en los capítulos 3 y 5. Estas hipótesis son:

- Modelo plano.
- Las grietas transversales y las delaminaciones avanzan uniformemente lineal por el espesor de cada probeta.

Finalmente, se aplica el balance energético de la ecuación 6-1:

Ecuación 6-1. Balance energético para daño transversal y delaminación, segunda grieta.

$$\int_{t_{90^{\circ}}} \frac{1}{2} \cdot (\sigma^{90^{\circ}} \cdot u^{90^{\circ}}(DELMEDIA)) \cdot 2 \cdot 2 \cdot dx = G_{IC}^{90^{\circ}} \cdot t_{90^{\circ}} + G_{IIC}^{0^{\circ}-90^{\circ}}(DELMEDIA + \Delta DELMEDIA)$$

Siendo:

- $t_{90^{\circ}}/2$ , corresponde a la mitad del espesor del laminado de 90 grados en unidad [mm]. Se obtiene de forma experimental.
- $\sigma^{90^{\circ}}$ , tensión del laminado de 90 grados en unidad [MPa] para el segundo daño. Se calcula mediante TGL y BEM.
- $u^{90^{\circ}}(DELMEDIA)$ , desplazamiento de los labios de la grieta transversal cuando hay delaminación en unidad [mm] para la segunda grieta. Se calcula mediante BEM.
- $DELMEDIA$ , es un valor que se calcula de forma experimental en unidad [mm] para la segunda grieta.
- $\Delta DELMEDIA$ , corresponde con el incremento de la delaminación de la primera grieta, entre la aparición de esta y la segunda grieta. Unidad [mm].

Tabla 6-8. Tabla de resultado del índice de liberación  $G_{IIC}^{0^{\circ}-90^{\circ}}$ .

n=16					
Probeta	Deformación Media	Tensión Media 90 (MPa)	Gc 90 (J/m <sup>2</sup> )	Gc 0-90 (J/m <sup>2</sup> )	GIIc 0-90 (J/m <sup>2</sup> )
19	0,006214	54,37252236			256,2634925
20	0,005986	52,37752154			231,8885828
21	0,00612	53,55002202	35,044442	160,5014529	237,9987594
22	0,005692	49,80502048			171,2517126
Total	0,005999721	52,49758198			221,8420812

La tabla 6-8 corresponde con los resultados obtenidos para un  $G_{IIC}$  de delaminación, teniendo en cuenta que se mantiene constante el  $G_{IC}$  transversal y el  $G_{IC}$  delaminación. El resultado es superior al  $G_{IC}$  de delaminación, por lo que se cumple la teoría de la mecánica de la fractura.

Como resultado final, se puede aproximar el índice de liberación de la grieta tal que:

$$G_{IIC}^{0^{\circ}-90^{\circ}} \cong 222 \text{ J/m}^2$$

## 7 CONCLUSIONES Y TRABAJO A FUTURO

El presente trabajo trata de continuar las propuestas surgidas en el trabajo [1]. Es por esta razón que van a ser útiles datos de dicho trabajo [1], así como del trabajo [2] y [3]. El objetivo por alcanzar ha sido estimar las propiedades a fractura en diferentes laminados. A continuación, se va a resumir el trabajo realizado.

En primer lugar, se han ensayado probetas pertenecientes al laminado  $[0_4, 90_8]_s$  del trabajo [1] a diferente carga y realizando un análisis al microscopio para observar posibles daños hasta la aparición del daño visible y sonoro. Es tras este análisis cuando comienza un estudio exhaustivo para sacar la mayor información posible de la grieta transversal surgida, así como de las delaminaciones en la interfase. Este estudio conlleva observar, captar imágenes y medir el daño experimentalmente.

En segundo lugar, tras el análisis, se ha continuado cargando la probeta con el mismo método, es decir a diferentes cargas y en cada una de ellas se ha realizado una inspección microscópica. Este trabajo se realiza hasta la aparición de la segunda grieta en la probeta.

Una vez realizado los ensayos de todas las probetas del laminado con  $n=16$ , se recogen todas las mediciones de las delaminaciones en la interfase. Este dato va a servir en la búsqueda de la estimación de valores de tenacidad en el laminado. Así como a la deformación a la que aparecen cada una de las grietas.

Ambos daños, primera grieta y segunda, como se puede ver en los resultados, aparecen a diferente deformación y esto se debe a la explicación del aumento de la delaminación de la primera grieta.

En tercer lugar, para obtener un valor aproximado del índice de liberación de energía para una grieta transversal en el laminado de  $90^\circ$  se ha procedido a recoger información referente a laminados con  $n < 16$ . Esto es así porque en las probetas de  $n=16$ , al aparecer la grieta transversal viene acompañada por delaminación. Para realizar un balance energético y obtener  $G_{IC}^{90}$ , ya que solo estaría la grieta transversal trabajando en modo I, se ha estudiado el laminado  $n=4$  y  $n=8$  del trabajo [2]. En el cálculo del valor de  $G_C$  transversal se ha establecido el valor resultante del laminado  $n=4$  porque  $n=8$  como se ha podido observar hay daño incipiente en la interfase  $0-90$ .

En cuarto lugar, se han usado los valores del laminado  $n=16$  y no los del laminado  $n=8$ , los de este último como se ha comentado con anterioridad, no existe una delaminación en sí sino daño incipiente. Se obtiene un valor estimado de la tasa de liberación de energía de la interfase en modo I,  $G_{IC}^{0-90}$ , ya que según el estudio de las delaminaciones de la primera grieta predomina el modo I frente al modo II.

Y, por último, los datos recogidos pertenecientes a la segunda grieta hacen que sea posible realizar un cálculo energético para poder calcular  $G_{IIIC}^{0-90}$ . Esto es así porque las delaminaciones son mayores que las de la primera grieta y tras el estudio de las delaminaciones, se desprecia  $G_{IC}^{0-90}$  calculado en la primera grieta.

Las conclusiones obtenidas son:

- 1) Los valores obtenidos son estimaciones de la tenacidad a fractura en materiales compuestos.
- 2) El método para la obtención de los diferentes índices de liberación de energía son una propuesta para hallarlos, siendo cualquier otro aceptado.
- 3) Se ha trabajado con la hipótesis de que los resultados son constantes en cada laminado, ya que son propiedades del material.

Para finalizar, pensando en trabajos futuros, sería continuar realizando estudios minuciosos para completar el rango de laminados e ir acotando los márgenes de  $G_c$  transversal y  $G_c$  delaminación. Así como la comprobación del procedimiento establecido en este trabajo y la propuesta de otro método que se ajuste a la obtención de los valores de  $G_c$ .

Asimismo, la observación del daño con mejor precisión mediante técnicas más avanzadas. Ya sea desde el paso inicial de lijado y pulido de la superficie hasta la observación del daño.



# Referencias

---

- [1] Caballos Galindo, P.M.; Velasco López, M.L. y París Carballo, F. (2019). *Estudio del daño en laminados  $[0,90n]_s$  con grandes espesores de la lámina de 90 grados*. Sevilla: Universidad de Sevilla.
- [2] Peña Manrique, M.J.; Velasco López, M.L. y Correa Montoto, E. (2019). *Efecto escala en materiales compuestos: estudio del fallo a primera lámina en laminados  $[0,90_n]_s$* . Sevilla: Universidad de Sevilla.
- [3] Peña Manrique, M.J.; Velasco López, M.L. y Correa Montoto, E. (2017). *Efecto escala en la resistencia a tracción de laminados de material compuesto*. Sevilla: Universidad de Sevilla.