

# Trabajo Fin de Grado

## Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Estudio del daño en laminados  $[0,90_n]$ s con grandes espesores de la lámina de 90 grados.

Autor: Paula María Caballos Galindo

Tutores: María Luisa Velasco López

Federico París Carballo

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

Sevilla, 2019





Trabajo Fin de Grado  
Ingeniería de las Tecnologías Industriales

# **Estudio del daño en laminados [0,90<sub>n</sub>]s con grandes espesores de la lámina de 90 grados**

Autor:

Paula María Caballos Galindo

Tutores:

María Luisa Velasco López

Federico París Carballo

Dpto. de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019



Trabajo Fin de Carrera: Estudio del daño en laminados [0,90n]s con grandes espesores de la lámina de 90 grados

Autor: Paula María Caballos Galindo

Tutores: María Luisa Velasco López

Federico París Carballo

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal



*A mis padres, mi hermano y mi hermana.*



# Agradecimientos

---

El fruto de este trabajo ha sido posible gracias al apoyo de personas que han estado conmigo desde el principio hasta el final y de personas que se han ido incorporando a lo largo de los años.

En primer lugar, agradecer y dedicar este trabajo a mis padres, por darme la oportunidad de estudiar esta maravillosa carrera y no perder nunca la esperanza. A mis hermanos, por apoyarme en los momentos duros. A mis amigas, por animarme a continuar y no tirar nunca la toalla en momentos de dificultad.

En segundo lugar, quiero agradecer a mis tutores, Federico y María Luisa, por confiar y apostar por mí, por ayudarme, guiarme y enseñarme.

Y por último y no por ello menos importante, a todas las personas que me han ayudado a que este trabajo tenga forma, Antonio Cañas, Miguel, José Ramón, Antonio Blázquez y a mis compañeros de laboratorio.

*A todos, gracias.*

*Paula.*



# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Índice</b>	<b>xi</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xiv</b>
<b>Índice de Ecuaciones</b>	<b>xvii</b>
<b>Índice de Gráficas</b>	<b>xix</b>
<b>1 Motivación e Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. <i>Concepto de material compuesto</i>	1
1.2. <i>Motivación</i>	2
1.3. <i>Objetivo del trabajo</i>	2
<b>2 Fabricación de probetas</b>	<b>3</b>
2.1. <i>Diseño de probetas</i>	3
2.2. <i>Materiales empleados</i>	3
2.2.1. Material compuesto en las probetas	3
2.2.2. Material compuesto en los tacos	4
2.3. <i>Proceso de fabricación</i>	4
2.3.1. Adimensionalización y corte del material	4
2.3.2. Apilado	5
2.3.3. Confección de una bolsa de vacío para la compactación de los laminados	6
2.3.4. Curado en autoclave	6
2.3.5. Resanado de los paneles	8
2.3.6. Preparación de los tacos de vidrio	9
2.3.7. Corte de las probetas	9
2.3.8. Trazabilidad de las probetas obtenidas	10
<b>3 Realización de ensayos. Resultados</b>	<b>11</b>
3.1. <i>Equipos y software</i>	11
3.2. <i>Procedimiento experimental</i>	12
3.3. <i>Resultados de los ensayos de tracción</i>	13
3.3.1. Tracción hasta la rotura	14
3.3.2. Tracción hasta un porcentaje de carga (sonido)	20
3.3.3. Tracción hasta la primera grieta	22
<b>4 Preparación e inspección de muestra</b>	<b>25</b>
4.1. <i>Preparación de muestras para la inspección</i>	25
4.1.1. Encapsulado de las probetas	25
4.1.2. Lijado y pulido de muestras	27
4.2. <i>Inspección al microscopio</i>	29
4.2.1. Equipos y software	29
4.2.2. Inspección de muestras y captura de imágenes	30
4.3. <i>Inspección con lupa</i>	30
4.3.1. Equipos y software	31

---

4.4. Laminado $[0_4,90_8]_S$	32
4.5. Laminado $[0_4,90_{16}]_S$	39
<b>5 Mathematicas</b>	<b>41</b>
5.1. Teoría introductoria: TGL	41
5.2. Código	47
<b>6 Modelos numéricos para simular el comportamiento de los laminados</b>	<b>48</b>
6.1. Identificación del problema	48
6.2. Introducción al BEM	48
6.3. Modelo BEM del daño transversal	50
6.3.1. Descripción del modelo	50
6.3.2. Resultados	51
6.4. Modelo BEM de la grieta de delaminación	64
6.4.1. Descripción del modelo	64
6.4.2. Resultados	64
6.5. Correlación entre predicciones y resultados experimentales	71
<b>7 Conclusiones y trabajo futuro</b>	<b>71</b>
<b>Referencias</b>	<b>74</b>
<b>Anexo A</b>	<b>76</b>
<b>Anexo B</b>	<b>82</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 2.1.- Valor nominal de las propiedades específicas AS4/8552.	4
Tabla 3.1.- Dimensiones de las probetas ensayadas hasta rotura.	15
Tabla 3.2.- Propiedades de las probetas 16-1 a 5.	15
Tabla 3.4.- Características de rigidez del panel.	17
Tabla 3.5.- Dimensiones de las probetas ensayadas hasta rotura.	17
Tabla 3.6.- Propiedades de las probetas 32-1 a 5.	18
Tabla 3.7.- Características de resistencia del panel.	19
Tabla 3.8.- Características de rigidez del panel.	20
Tabla 3.9.- Dimensiones de las probetas del laminado $[0_4,90_8]_s$ .	20
Tabla 3.10.- Dimensiones de las probetas del laminado $[0_4,90_{16}]_s$ .	23
Tabla 6.1.- Comparativa de las tensiones en BEM y TGL	49
Tabla B.1.- Propiedades capítulo 6.	82

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1.- Láminas cortadas.	5
Figura 2.2.- Cúter, espátula, escuadra y cartabón.	5
Figura 2.3.- Proceso de apilado.	5
Figura 2.4.- Proceso de fabricación de bolsa de vacío.	6
Figura 2.5.- Resanado del laminado.	8
Figura 2.6.- Máquina de corte.	8
Figura 2.7.- Proceso de unión taco-panel.	9
Figura 2.8.- Probetas ya cortadas.	9
Figura 3.1.- Máquina de ensayo a tracción Instron.	11
Figura 3.2.- Pie de rey.	12
Figura 3.3.- Mordaza utilizada en los ensayos.	12
Figura 3.4.- Extensómetro.	13
Figura 3.5.- Ventanas del programa de la máquina Instron para ensayar a tracción.	13
Figura 3.6.- Probetas para ensayar.	21
Figura 3.7.- Parte central de la probeta rota (16-9).	21
Figura 3.8.- Parte izquierda de la probeta rota (16-9).	21
Figura 3.8.- Parte derecha de la probeta rota (16-9).	21
Figura 4.1.- Productos usados para encapsular.	25
Figura 4.2.- Probetas preparadas para encapsular.	26
Figura 4.3.- Probetas encapsuladas.	26
Figura 4.4.- Máquinas de lijado y pulido junto a las soluciones a utilizar.	27
Figura 4.5.- Microscopio.	29
Figura 4.6.- Programa <i>Perfect Image</i> .	29
Figura 4.7.- Programa <i>Clara Vision 1</i> .	29
Figura 4.8.- Programa <i>Clara Vision 2</i> .	31

Figura 4.10.- (a) Trípode con la adaptación de la lupa. (b) Lupa de frente al ensayo.	32
Figura 4.11.- Probeta 16-6 ensayada.	32
Figura 4.12.- Probeta 16-7 ensayada.	32
Figura 4.13.- Probeta 16-8 ensayada.	32
Figura 4.14.- Probeta 16-10 ensayada.	33
Figura 4.15.- Fotocomposición de la probeta 16-11 ensayada.	33
Figura 4.16.- (a) Probeta 16-18 cargada. (b) Probeta 16-18 descargada.	34
Figura 4.17.- (a) Probeta 16-19 cargada. (b) Probeta 16-19 descargada.	34
Figura 4.18.- (a) Probeta 16-20 cargada. (b) Probeta 16-20 descargada.	35
Figura 4.19.- (a) Probeta 16-21 cargada. (b) Probeta 16-21 descargada.	35
Figura 4.20.- (a) Probeta 16-22 cargada. (b) Probeta 16-22 descargada.	36
Figura 4.21.- Fotocomposición de la probeta 16-18, interfase 90°-0° izquierda.	36
Figura 4.22.- Fotocomposición de la probeta 16-18, grieta transversal completa en el espesor 90°.	36
Figura 4.23.- Fotocomposición de la probeta 16-18, interfase 90°-0° derecha.	37
Figura 4.24.- Fotocomposición de la probeta 16-19, interfase 90°-0° izquierda.	37
Figura 4.25.- Fotocomposición de la probeta 16-19, grieta transversal completa en el espesor 90°.	37
Figura 4.26.- Fotocomposición de la probeta 16-19, interfase 90°-0° derecha.	37
Figura 4.27.- Fotocomposición de la probeta 16-20, interfase 90°-0° izquierda.	37
Figura 4.28.- Fotocomposición de la probeta 16-20, grieta transversal completa en el espesor 90°.	38
Figura 4.29.- Fotocomposición de la probeta 16-20, interfase 90°-0° derecha.	38
Figura 4.30.- Fotocomposición de la probeta 16-21, interfase 90°-0° izquierda.	38
Figura 4.31.- Fotocomposición de la probeta 16-21, grieta transversal completa en el espesor 90°.	38
Figura 4.32.- Fotocomposición de la probeta 16-21, interfase 90°-0° derecha.	38
Figura 4.33.- Probeta 32-1.	39
Figura 4.34.- Probeta 32-2.	39
Figura 4.35.- Probeta 32-3.1.	39
Figura 4.36.- Probeta 32-3.2.	39
Figura 4.37.- Probeta 32-4.1.	39
Figura 4.38.- Probeta 32-4.2.	39

Figura 4.39.- Probeta 32-5.	40
Figura 5.1.- Ejes de referencia.	41
Figura 5.2.- Configuración deformada.	42
Figura 5.3.- Esfuerzos internos.	43
Figura 5.4.- Configuración de las láminas.	43
Figura 6.1.- Representación del modelo BEM sin daño	49
Figura 6.1.- Representación del modelo BEM del daño transversal.	50
Figura 6.2.- Representación del modelo BEM para grieta de delaminación.	64
Figura 6.4.- Probeta $n = 32$ ensayada.	71
Figura 6.5.- Probeta $n = 16$ ensayada.	71
Figura A.1.- Solución en Mathematica <sup>®</sup> del ejemplo del libro [1].	81

# ÍNDICE DE ECUACIONES

---

Ecuación (3.1)	14
Ecuación (3.2)	14
Ecuación (3.3)	14
Ecuación (3.4)	14
Ecuación (3.5)	14
Ecuación (3.6)	14
Ecuación (3.7)	14
Ecuación (3.8)	14
Ecuación (5.1)	41
Ecuación (5.2)	41
Ecuación (5.3)	41
Ecuación (5.4)	42
Ecuación (5.4)	42
Ecuación (5.5)	42
Ecuación (5.6)	42
Ecuación (5.7)	42
Ecuación (5.8)	42
Ecuación (5.10)	43
Ecuación (5.11)	43
Ecuación (5.12)	44
Ecuación (5.13)	45
Ecuación (5.14)	45
Ecuación (5.15)	45
Ecuación (5.16)	45
Ecuación (5.17)	45

Ecuación (5.18)	45
Ecuación (5.19)	45
Ecuación (5.20)	45
Ecuación (5.21)	45
Ecuación (5.22)	45
Ecuación (5.23)	45
Ecuación (5.24)	45
Ecuación (5.25)	45
Ecuación (5.26)	45
Ecuación (5.27)	46
Ecuación (5.28)	46
Ecuación (5.29)	46
Ecuación (5.30)	46
Ecuación (5.31)	46

# ÍNDICE DE GRÁFICAS

---

Gráfica 2.1.- Representación de P-T en el proceso de curado de fibra de carbono.	7
Gráfica 2.2.- Representación de P-T en el proceso de curado de fibra de vidrio.	8
Gráfica 3.1.- Diagrama $\sigma$ - $\epsilon$ para ensayo de rotura.	15
Gráfica 3.2.- Tensión de rotura correspondiente a cada probeta.	16
Gráfica 3.3.- Módulo de Young para las probetas 1, 2, 3 laminado 16.	17
Gráfica 3.4.- Diagrama $\sigma$ - $\epsilon$ de las probetas del laminado $[0^{\circ}_4, 90^{\circ}_{16}]_S$ .	18
Gráfica 3.5.- Tensión a rotura de las probetas correspondientes al laminado $n = 32$ .	19
Gráfica 3.6.- Módulo de Young de cada probeta ensayada.	19
Gráfica 3.7.- $\sigma$ -cruzeta de las probetas 16-6, 7, 8, 9, 10.	22
Gráfica 3.8.- Diagrama $\sigma$ - $\epsilon$ de las probetas 16-11, 12, 13, 14, 15 del laminado $[0_4, 90_8]_S$	23
Gráfica 3.9.- Diagrama $\sigma$ - $\epsilon$ de las probetas 16-18, 21, 22 del laminado $[0_4, 90_8]_S$	24
Gráfica 3.10.- Diagrama $\sigma$ - $\epsilon$ comparativa de las probetas 16- 11, 12, 13, 14, 15, 18, 21, 22.	24
Gráfica 6.1.- Deformada del modelo $t_{90^{\circ}} = 0.5$ mm y $a = 0.47$ mm.	51
Gráfica 6.2.- Detalle de la grieta transversal de la deformada $t_{90^{\circ}} = 0.5$ mm y $a = 0.47$ mm.	51
Gráfica 6.3.- $\sigma$ -CS del modelo $t_{90^{\circ}} = 0.5$ mm.	52
Gráfica 6.4.- $\tau$ -CS del modelo $t_{90^{\circ}} = 0.5$ mm.	52
Gráfica 6.5.- G-a del modelo $t_{90^{\circ}} = 0.5$ mm, grieta transversal.	53
Gráfica 6.6.- Deformada del modelo $t_{90^{\circ}} = 3$ mm y $a = 2.8$ mm.	53
Gráfica 6.7.- Detalle de la grieta transversal de la deformada $t_{90^{\circ}} = 3$ mm y $a = 2.8$ mm.	54
Gráfica 6.8.- $\sigma$ -CS del modelo $t_{90^{\circ}} = 3$ mm.	54
Gráfica 6.9.- $\tau$ -CS del modelo $t_{90^{\circ}} = 3$ mm.	55
Gráfica 6.10.- G-a del modelo $t_{90^{\circ}} = 3$ mm, grieta transversal.	55
Gráfica 6.11.- G-a comparativa entre $t_{90^{\circ}} = 0.5$ y 3 mm.	56
Gráfica 6.12.- $\sigma$ -CS comparativa entre $n = 8, 16, 32$ .	56
Gráfica 6.13.- $\tau$ -CS comparativa entre $n = 8, 16, 32$ .	57
Gráfica 6.14.- $\sigma$ -CS $n = 8$ .	57
Gráfica 6.15.- $\tau$ - CS $n = 8$ .	58

Gráfica 6.16.- $\sigma$ -CS n = 16.	58
Gráfica 6.17.- $\tau$ - CS n = 16.	59
Gráfica 6.18.- $\sigma$ -CS n = 32.	59
Gráfica 6.19.- $\tau$ - CS n = 32.	60
Gráfica 20.- $\sigma$ -CS detalle de la comparativa n = 8, 16, 32 de la gráfica 6.12.	60
Gráfica 6.21.- $\sigma$ -CS distancia fija de 0.15 mm.	61
Gráfica 6.22.- $\sigma$ -CS distancia fija de 0.1 mm.	61
Gráfica 6.23.- $\sigma$ -CS distancia fija de 0.05 mm.	62
Gráfica 6.24.- $\tau$ -CS distancia fija de 0.15 mm.	62
Gráfica 6.25.- $\tau$ -CS distancia fija de 0.1 mm.	63
Gráfica 6.26.- $\tau$ -CS distancia fija de 0.05 mm.	63
Gráfica 6.27.- G, GI, GII-a del modelo n = 8.	65
Gráfica 6.28.- G, GI, GII-a del modelo n = 16.	65
Gráfica 6.29.- G, GI, GII-a del modelo n = 32.	66
Gráfica 6.30.- G-a para n = 8, 16, 32.	66
Gráfica 6.31.- Deformada del modelo n = 8.	67
Gráfica 6.32.- Detalle de la burbuja en la configuración deformada del modelo n = 8.	67
Gráfica 6.33.- Deformada del modelo n = 16.	68
Gráfica 6.34.- Detalle de la burbuja de la configuración deformada del modelo n = 16.	68
Gráfica 6.35.- Deformada del modelo n = 32.	69
Gráfica 6.36.- Detalle de la burbuja en la configuración deformada del modelo n = 32.	69
Gráfica 6.37.- Comparación de burbujas para n = 8, 16, 32. configuración indeformada.	70
Gráfica 6.38.- Comparación de la diferencia en valor absoluto de los desplazamientos entre los labios de la grieta de delaminación para n = 8, 16, 32.	70





# 1 MOTIVACIÓN E INTRODUCCIÓN

---

Las necesidades del ser humano hacen que avance de forma rápida cualquier ámbito de estudio, y así es en la disposición de soluciones tecnológicas. Estas soluciones son cada vez más exigentes y más innovadoras. En los últimos años, se ha intensificado el uso de nuevos materiales con mejores prestaciones. A raíz de esta idea, surgen los llamados materiales compuestos. El objetivo principal de estos materiales es obtener unas características mejores que las propiedades que poseen sus constituyentes por separado.

En este capítulo se va a desarrollar una breve descripción del concepto de material compuesto y características, el motivo de interés por realizar aportaciones a esta línea de investigación y el objetivo principal del presente proyecto.

## 1.1 Concepto de material compuesto y características

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. Tiene como objetivo tanto el obtener propiedades que no pueden ser alcanzadas por ninguno de los constituyentes actuando aisladamente, como aunar las propiedades individuales de dichos constituyentes en un solo material [1].

Las ventajas de este tipo de material son:

- Alta relación resistencia/peso.
- Elevada rigidez.
- Alta resistencia a la fatiga.
- Alta resistencia a la corrosión.
- Alta resistencia dieléctrica.
- Alta flexibilidad.
- Mejoran las superficies aerodinámicas.
- Posibilidad de construir formas más o menos complejas.
- Excelentes propiedades mecánicas.
- Facilidad de fabricación con una alta variedad de acabados.
- Estabilidad dimensional.

Pero existen también dificultades en estos materiales:

- En la etapa de diseño de piezas de materiales compuestos, las herramientas de cálculo existentes no son tan conocidas ni están tan ampliamente extendidas como ocurre para el diseño de piezas metálicas.
- El coste de la materia prima de estos materiales suele ser elevado.
- En algunos casos, existen peligros para la salud en los procesos de fabricación de ciertos materiales compuestos.
- En la mayoría de las ocasiones, falta información sobre el comportamiento mecánico final que tendrá la pieza fabricada con material compuesto.

El material compuesto con el que se va a trabajar en este proyecto está formado por fibras de carbono y resina epoxi.

La resina epoxi es una matriz termoestable, por lo tanto, está caracterizada por estar formadas por cadenas reticuladas que hacen que la estructura adquiera una disposición permanente, provocando que la reacción sea irreversible y el polímero no pueda reciclarse. También, necesita un proceso de curado para alcanzar su estructura reticulada. El epoxi es el material más usado como matriz en altas prestaciones, con una temperatura máxima de uso en torno a los 170°C.

En cuanto a las fibras de carbono como refuerzo, éstas están constituida por finos filamentos de carbono de 5-10  $\mu\text{m}$  de diámetro, donde cada fibra de carbono se forma con la unión de miles de filamentos de carbono. La principal característica de la fibra de carbono es su alta resistencia y rigidez. Sus propiedades mecánicas y su baja densidad hacen que sea un material de gran aplicación.

## 1.2 Motivación

En el 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, se estudia y se trabaja el material compuesto reforzado con fibra de carbono. La investigación del comportamiento de estos materiales está siendo en los últimos años, el objetivo principal de estudio por las ventajas que aportan en aplicaciones ingenieriles.

El nacimiento de estos nuevos materiales hace que sea necesario establecer unas leyes que permitan definir su comportamiento y predecir el fallo. A pesar del avance que se ha seguido en estos últimos años, desde criterios que surgen a partir del comportamiento de los materiales metálicos hasta criterios con un alto grado de dificultad en los que se tienen en cuenta la aportación por separado de cada componente, es decir, matriz y fibra, no hay una propuesta de criterio concluyente. Por esta razón, sigue siendo una oportunidad de investigación en el que se encuadra este trabajo. El inconveniente de la predicción del fallo de estos materiales está causado por la heterogeneidad y la anisotropía, el número de láminas en el laminado, la orientación y la secuencia de apilado de dichas láminas, las delaminaciones, las condiciones en las que se encuentra, etc. Por ello, el problema de los mecanismos de fallo de estos materiales vienen determinado por la microestructura a diferentes escalas y a la interacción entre ellas.

Este trabajo está centrado en un análisis de evolución y evaluación del daño para dos laminados con diferente número de láminas transversales, pero con una secuencia de apilado similar.

## 1.3 Objetivo del trabajo

El objetivo de este trabajo es profundizar en el efecto escala, que se refiere al cambio de resistencia observado en las láminas de material compuesto, relacionado con el espesor de la lámina 90° y la orientación de las láminas adyacentes. En este trabajo se estudia dicho efecto desde el fallo transversal a tracción, es decir, un daño producido en las láminas de 90° sometido a una carga de tracción. También se estudia el fallo en la interfase entre los laminados de 90°-0° ante carga a tracción. Para estos estudios se fabrican dos laminados *cross ply*, constituidos por láminas de 90° y 0° con respecto a la dirección de la carga, la única diferencia entre ambos laminados es la variación de espesor en el laminado de 90°.

El trabajo está basado en un análisis experimental, en el cual se preparan las probetas de cada laminado con el fin de ser ensayadas y posteriormente, éstas serán observadas en el microscopio y se analizarán los resultados, y en un análisis numérico, en el cual se van a estudiar los comportamientos y el efecto que producen los daños transversales y los daños en la interfase entre las láminas. Estos dos análisis intentan encontrar una relación entre lo experimental y lo numérico, así como las diferencias a nivel micromecánico para dar una explicación del efecto escala a nivel macromecánico.

## 2 FABRICACIÓN DE PROBETAS

---

A continuación, se va a desarrollar todo el proceso de fabricación de las probetas que se van a ensayar y analizar, así como la descripción del propio laminado y de las distintas máquinas utilizadas en cada etapa. Toda la actividad de fabricación ha tenido lugar en el Laboratorio de Elasticidad y Resistencia de Materiales (LERM) perteneciente y ubicado en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla.

### 2.1 Diseño de probetas

Para la realización del trabajo se han realizado dos laminados *cross ply*, esto quiere decir que están formados únicamente por láminas con orientación  $90^\circ$  y  $0^\circ$  de forma simétrica tanto geoméricamente como en propiedades. Los dos laminados fabricados se diferencian en el número de láminas centrales correspondientes a las de  $90^\circ$ . Por lo tanto, la secuencia de apilado es:

Panel A:  $[0_4/90_8]_s$

Panel B:  $[0_4/90_{16}]_s$

Las dimensiones de cada panel son de 300 mm x 500 mm. De cada panel se han adquirido 28 probetas con dimensiones de 15 mm x 155 mm, las cuales se han sacado conforme la norma UNE-EN 2561 [2]. El número de probetas obtenidas y según sus dimensiones son obtenidas teniendo en cuenta la pérdida de material durante el proceso de fabricación, como por ejemplo en las etapas de resanado y corte. Finalmente, las probetas están dispuestas de unos tacos que son adheridos como ya se explicará en posteriores apartados que mejoran el contacto entre la misma y la mordaza durante los ensayos que se van a realizar evitando posibles fallos.

### 2.2 Materiales empleados

En este apartado se va a detallar todos los materiales utilizados en las probetas y en los tacos.

#### 2.2.1 Material compuesto en las probetas

Para la fabricación del laminado se ha utilizado un rollo de pre-preg. El pre-preg es una combinación de una matriz de resina con un refuerzo de fibra unidireccional, en este caso la matriz es epoxi y la fibra es de carbono. El material preimpregnado se suministra en rollos de longitud y anchura estándar, lleva uno o dos "films" separadores que lo protegen por ambas caras y permiten una adecuada y fácil separación en condiciones ambientales al mismo tiempo que protegen al material de posibles contaminaciones. El material, al tener un componente que caduca como es la resina, tiene una vida limitada y debe conservarse bajo condiciones especiales. Así, los preimpregnados de carbono-epoxy suelen tener una vida de 360 días si se conservan en cámara frigorífica a  $-18^\circ$  y envasado en una bolsa para evitar la degradación de la resina. Todo este proceso hace que antes de utilizar el material hay que sacarlo de la cámara entre 30-45 min para que se atempere.

El pre-preg utilizado se corresponde con el designado como *AS4/8552/RC34 AW 194/300 mm (Z-19775)*, AS4 se refiere al tipo de fibra y 8552 indica el tipo de resina epoxi. A continuación, se presentan los valores nominales de las propiedades específicas del material según la norma proporcionada por el fabricante, IPS05-01-001-03.

Tabla 2.1- Valor nominal de las propiedades específicas del AS4/8552.

Propiedad	Método de testado	Unidades	Valor Nominal
Densidad de resina	ISO 1183-1 Method A	g/cm <sup>3</sup>	1.3
Densidad de fibra	ISO 10119	g/cm <sup>3</sup>	1.785
Fracción volumétrica de fibra	EN 2564	%	59
Densidad de láminas	-	g/cm <sup>3</sup>	1.59

## 2.2.2 Material compuesto en los tacos

Lo que se conoce como los tacos son paneles ya curados de material compuesto de fibra de vidrio orientada a 45° y resina epoxi.

Las medidas de estos paneles están adaptadas para que las dimensiones de las probetas estén de acuerdo con la norma UNE-EN 2561 [2].

Para que se produzca la adhesión entre los paneles de carbono-epoxi y los tacos se ha utilizado una película de adhesivo estructural 3M™Scotch-Weld™AF163-2k. Este adhesivo también se conserva a baja temperatura por lo que hay que sacarlo antes de emplearlo, aproximadamente necesita 1 hora para atemperarse.

## 2.3 Proceso de fabricación

Para la obtención de las probetas hay que seguir una serie de etapas, de las que se van a desarrollar a continuación:

- Adimensionalización y corte del material
- Apilado
- Confección de una bolsa de vacío para la compactación de los laminados
- Curado en autoclave
- Resanado de los paneles
- Preparación de los tacos de vidrio
- Corte de las probetas
- Designación de las probetas

Las cuatro primeras etapas se han desarrollado en lo que se conoce como sala limpia, ya que hay que evitar la contaminación y deterioro del material y sus características durante la fabricación. La sala limpia es una habitación con condiciones de humedad, temperatura y presión controladas.

### 2.3.1 Adimensionalización y corte del material

En esta etapa, para aprovechar lo mejor posible el material, ya que el rollo como se ha comentado anteriormente tiene una longitud y un ancho estándar (300 mm), se han cortado las láminas que componen el laminado deseado con las distintas orientaciones, utilizando así 57 metros de material, figura 2.1.

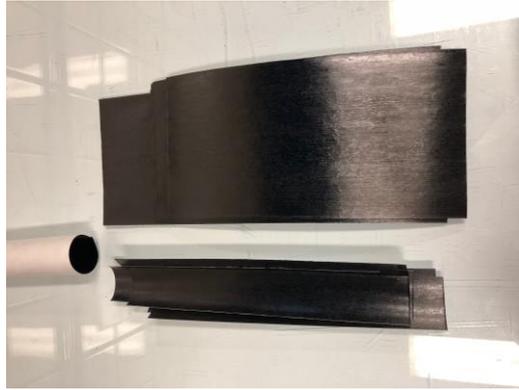


Figura 2.1.- Láminas cortadas.

Para el corte se ha utilizado un cúter y para mantener la dirección de corte el apoyo de escuadra y cartabón, figura 2.2.



Figura 2.2.- Cúter, espátula, escuadra y cartabón.

### 2.3.2 Apilado

Ya terminado el proceso de corte de las diferentes láminas, se procede al apilado de éstas según la secuencia exigida. Este proceso es realizado manualmente y de forma meticulosa, figura 2.3. En primer lugar, según un apoyo de referencia y sobre una superficie totalmente lisa, se sitúa una lámina de 90° con el papel protector y seguidamente se han ido poniendo las siguientes láminas retirando el papel protector para que se vayan pegando conjuntamente. En el proceso de adherencia entre las láminas se hace presión con una espátula de Nylon<sup>®</sup>. Cada cuatro láminas se introducen en una bolsa de vacío que hay permanentemente en la sala limpia durante 5 minutos.

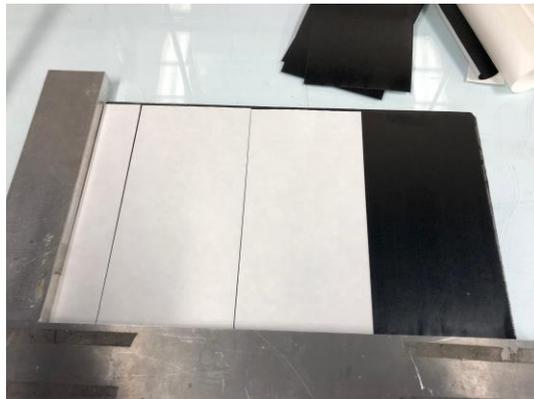


Figura 2.3.-Proceso de apilado.

### 2.3.3 Confección de una bolsa de vacío para la compactación de los laminados

Una vez realizado la etapa anterior, obtenemos los dos laminados correspondientes y para continuar con la fabricación de las probetas, estos laminados han de ser introducidos en una autoclave. Es necesario realizar una bolsa de vacío para el ciclo de curado y que los laminados estén totalmente compactados. La bolsa de vacío tiene varias funciones:

- Evitar la inclusión de aire entre láminas.
- Evitar contaminación de diferentes partículas (polvo, suciedad, humedad...).
- Proteger de las altas temperaturas sometidas en la autoclave que hace que la resina del material fluya.

Para la confección de la bolsa de vacío, figura 2.4, se necesita:

- Placa de aluminio al tamaño justo y necesario para los laminados.
- Lijar las imperfecciones de la placa y limpiar con acetona.
- Cortar dos piezas de desmoldeante (teflón) iguales y con el tamaño necesario para la bolsa.
- Colocar el desmoldeante sobre la plancha.
- Pegar las cintas de cromato con el perímetro de la bolsa, haciendo que exista solape en las esquinas.
- Compactar las cintas con la espátula.
- Colocar los laminados una vez retirado el papel protector, dejando espacio para las válvulas y para cintas de corcho.
- Rodear cada laminado con cintas de corcho para evitar que el material fluya.
- Poner el segundo desmoldeante.
- Cortar el teflón sobrante evitando que toque con el cromato.
- Cortar el airweave y colocar encima.
- Retirar el protector de las cintas de cromato.
- Situar dos válvulas.
- Proceder a colocar la bolsa de vacío con unas dimensiones superiores a la placa.
- Compactar la bolsa con el cromato con la ayuda de la espátula.
- Añadir los cabezales de las válvulas teniendo cuidado de no rasurar la bolsa.
- Compactar en vacío atendiendo que no exista ninguna fuga.



Figura 2.4.- Proceso de fabricación de bolsa de vacío.

### 2.3.4 Curado en autoclave

El curado es 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. El curado se puede producir de manera natural o puede requerir, para acelerar el proceso de polimerización, la aplicación independiente o combinada de calor y presión de autoclaves, hornos, etc.

El método utilizado en el proceso en concreto es la técnica más difundida en materiales compuestos de fibra de carbono y resina epoxi aplicado para paneles y elementos de aviones.

Este método de bolsa de vacío, presión o autoclave suele utilizar como material base los pre-preg, aunque también, se puede partir de las capas de fibras, ahora unidireccionales generalmente, impregnarlas y curarlas parcialmente. Las láminas se colocan en la superficie del molde en el orden de apilamiento y con las direcciones adecuadas para formar un laminado. Se cubren con un saco de presión para introducirlos en la autoclave a temperatura y presión adecuadas para provocar el curado final del conjunto [1].

En el laboratorio se encuentra la autoclave, que cuenta con los siguientes dispositivos:

- Cámara presurizada: vasija donde se colocan las piezas a curar.
- Dispositivo de calentamiento: aparatos que se encargan de alcanzar las temperaturas de curado dependiendo del material a curar.
- Sistema de aplicación de vacío: imprescindible en la etapa de fabricación de material compuesto. La bolsa de vacío que se ha fabricado se conecta a las tomas de vacío.
- Sistema de control de parámetros de curado: sistemas monitorizados para mantener controladas condiciones de presión y temperatura durante el proceso.
- Soporte de los moldes para su introducción en la cámara.

La autoclave se fundamenta en la consolidación de los paneles a través del movimiento de aire caliente en el interior de la cámara mediante una circulación forzada obteniendo los valores de temperaturas en equipo. Después, el proceso de enfriamiento se realiza haciendo circular agua fría por un intercambiador haciendo que se produzca una circulación de aire entre las placas forzando a disminuir la temperatura. La autoclave que se dispone en el laboratorio es el SCHOLZ BA-E44313-1.

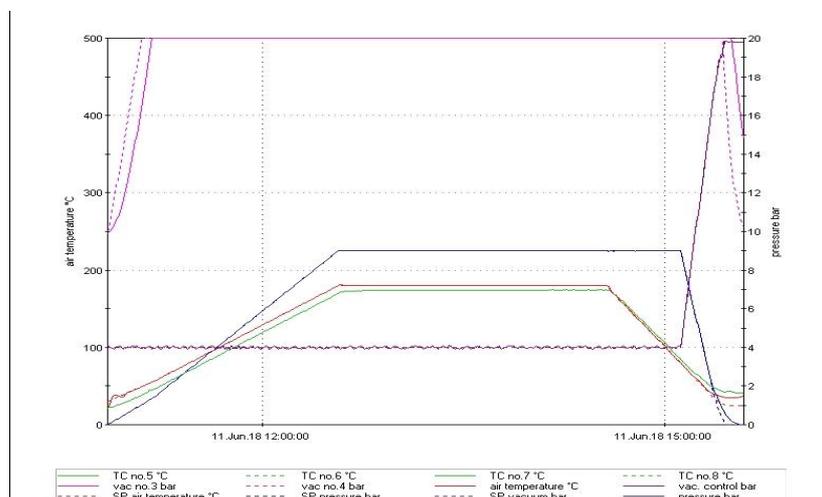
Antes de introducir la bolsa de vacío en la autoclave hay que asegurarse de que ésta no tenga ninguna pérdida. Esto se hace conectando las tomas de vacío de la bolsa a la autoclave y suministrando el vacío hasta los 0.8 bar de presión. Una vez alcanzados, se para el vacío y se espera un cierto tiempo para comprobar que no baje la presión verificando que la bolsa está libre de fugas.

El ciclo de curado que hay que aplicar está determinado y suministrado por el fabricante del material. En el caso del pre-preg se distinguen tres zonas: una pendiente ascendente inicial de temperatura y presión, un tramo constante y horizontal y por último una pendiente descendente de enfriamiento y despresurización.

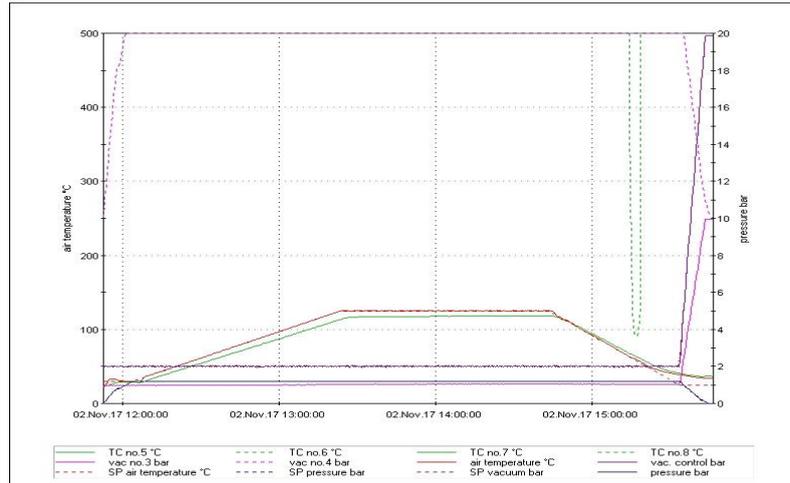
La duración del ciclo es de alrededor de 4 horas y 40 minutos.

A continuación, se presentan las gráficas con el proceso detallado seguido por la autoclave para el curado de los paneles cuyos datos son temperatura y presión.

La gráfica 2.1, se corresponderá con el proceso seguido en el primer curado que se realiza, es decir, en el curado del laminado de carbono. La gráfica 2.2, se corresponde con el proceso utilizado en el laminado con los tacos de vidrio.



Gráfica 2.1.- Representación de P-T en el proceso de curado de fibra de carbono.



Gráfica 2.2.- Representación de P-T en el proceso de curado de fibra de vacío.

### 2.3.5 Resanado de los paneles

Terminado el proceso de curado en la autoclave, se retira la bolsa de vacío fabricada anteriormente y se corta las cintas de corcho que se han pegado al laminado. Ahora se tienen los laminados ya listos para el resanado. Esta etapa consiste en eliminar los bordes de los laminados que contienen restos de corcho e imperfecciones del propio material en los bordes, figura 2.5.

Se utiliza una máquina de corte con un disco de diamante que trabaja mediante abrasión, refrigerando con agua constantemente y una mesa móvil en la que se apoya las piezas para cortar, figura 2.6. Hay que atender a la dirección de las fibras para cortar y tener en cuenta la perpendicular mediante un apoyo, ya ubicado en la propia mesa.



Figura 2.5.- Resanado del laminado.



Figura 2.6.- Máquina de corte.

### 2.3.6 Preparación de los tacos de vidrio

Obtenidos los paneles hay que colocar los tacos de vidrio en los extremos. Los tacos se obtienen de unos paneles ya curados proporcionados por el laboratorio. Se cortan en la máquina de corte las láminas necesarias con las dimensiones establecidas. En este caso las dimensiones son 60 mm x 500 mm, para que el tab de la probeta tenga 150 mm.

Antes de proceder al corte de los tacos, se ha lijado una de las caras para una mejor adhesión entre materiales, puesto que la otra cara del laminado de vidrio ya viene lijada. Una vez lijadas las caras y cortadas, se limpian con agua las distintas superficies, y para evitar restos de humedad en el panel, se secan manualmente con papel y se introducen en el horno durante 15-20 min.

Se necesita adhesivo para unir el laminado y los tacos, por lo que ha de cortarse adhesivo con dimensiones ligeramente inferiores a los tacos. Esto es muy importante, puesto que hay que evitar que el adhesivo fluya cuando se introduzca en la autoclave y garantizar la inexistencia de huecos. A continuación, se pega el adhesivo a la superficie lijada y colocándolos de forma que coincidan los bordes se aplica presión. Para una mejora unión y para que el material no fluya con la temperatura se colocó cinta adhesiva en los bordes, figura 2.7. Para finalizar, se introdujo en la autoclave realizando una nueva bolsa de vacío.



Figura 2.7.- Proceso de unión taco-panel.

### 2.3.7 Corte de las probetas

Obtenidos los paneles con los tacones de vidrio ya curados de la autoclave, el siguiente paso es el corte de las probetas. Ello se realiza en la máquina de corte ya descrita. Las probetas hay que cortarlas con unas medidas específicas [2], se ha marcado la división de las probetas teniendo en cuenta la pérdida de material que se produce al cortar, figura 2.8. Para mantener la perpendicularidad se ha utilizado escuadra y cartabón.



Figura 2.8.- Probetas ya cortadas.

### **2.3.8 Trazabilidad de las probetas obtenidas**

Consiste en asignarle un nombre o código a cada probeta de cada panel para una mejor identificación a la hora de trabajar con cada una de ellas.

La asignación se determinó con un primer número referente al número de láminas de 90° y el segundo número es una numeración ordenada dentro del panel desde el 1 al 28.

Por ejemplo: probeta 16-1 corresponde con la probeta número 1 del laminado  $[0_4, 90_8]_s$ .

# 3 REALIZACIÓN DE ENSAYOS. RESULTADOS

Los ensayos mecánicos se realizan para verificar la respuesta que presentan los materiales cuando se trabaja con ellos. Con diferentes esfuerzos mecánicos se fuerza al límite el material para poder caracterizarlo mecánicamente. Esta información es crucial en la industria para poder seleccionar de manera adecuada los materiales para diferentes servicios.

Hay que tener en cuenta que estamos trabajando con un material compuesto, esto quiere decir, que se trata de un material ortótropo. En los materiales ortótropos cobra especial importancia la contribución de los elementos que conforman el material compuesto a las propiedades finales del conjunto. En lo que respecta a los ensayos para establecer características de rigidez y resistencia estos, son en general una continuación de los que se realizan para isótropos, si bien es preciso tomar algunas precauciones que derivan de la existencia de acoplamiento entre tensiones y deformaciones normales y tangenciales [1].

En esta parte del proyecto, el objetivo es el análisis de la resistencia y rigidez del laminado, así como el daño sufrido por la aplicación de carga de tracción en la dirección perpendicular a la fibra en la parte central. El proyecto experimental sigue las siguientes pautas:

- Definir las características de rigidez y resistencia de cada laminado en la dirección de la carga. Para determinarlas se realizan ensayos de un número determinado de probetas hasta la rotura.
- Analizar los daños ocasionados para distintas pruebas en cada probeta de manera microscópica.
- Comparar resultados.

Todos los ensayos realizados han tenido lugar en el Laboratorio de Elasticidad y Resistencia de Materiales (LERM), utilizando todos los equipos, materiales y programas disponibles en dicho lugar.

## 3.1 Equipos y software

Para realizar los ensayos de las probetas en el laboratorio se han empleado varios equipos:

- **Máquina Universal de Ensayos Instron 4483 con célula de carga 15000 kg ó Máquina Universal de Ensayos Instron 4482 con célula de carga de 10000 kg.** Se han utilizado ambas máquinas según la disponibilidad.



Figura 3.1.- Máquina de ensayo a tracción Instron.

- **Extensómetro 2630-112.**
- **Ordenador con tarjeta de datos y software** de Gestión de Máquinas Universales de Ensayos Instron, *Test Control Instron Series 44 V17-6*
- **Micrófono**
- **Programa del micrófono: Audicity**

## 3.2 Procedimiento experimental

Para poder realizar los ensayos primero hay que tomar medida de las dimensiones de todas las probetas. Teniendo en cuenta que el software guarda datos de fuerza (N) en función de la apertura del extensómetro (mm). Para caracterizar la sección se han tomado medidas de espesor (h) y ancho (b) atendiendo a lo que se especifica en la norma UNE-EN 2561:1995 [2], la cual especifica que las medidas finales proceden de la media aritmética de 3 medidas: centro de la probeta y dos puntos opuestos separados una distancia de 30 mm del centro.

Para obtener las medidas se ha utilizado un pie de rey como aparece en la figura 3.2.



Figura 3.2.- Pie de rey.

Tras realizar todas las medidas y dimensiones de todas las probetas, éstas ya están dispuestas para ensayarlas. Antes de ensayar hay que seleccionar unas mordazas adecuadas a la dimensión de las probetas, puesto que si las mordazas tienen una apertura grande podría pasar que no cierren y deslizarse durante el ensayo o si son pequeñas directamente las probetas no entrarán. En este caso se van a utilizar unas mordazas con las caras interiores rugosas y planas con una apertura de 6-12 mm, figura 3.3.



Figura 3.3.- Mordaza utilizada en los ensayos.

Los pasos que hay que seguir para realizar el ensayo son:

- Calibrar y balancear la máquina.
- Colocar la probeta. Este paso es importante puesto que hay que situar la probeta de manera que las láminas de 90° estén a 90° y las de 0° a 0° frente al plano de referencia que se tome de la máquina y que coincide con la dirección de la carga. Para asegurar la ubicación de la probeta se utiliza una escuadra. Tras este paso, se debe agarrar con las mordazas girando las llaves dispuestas en la máquina de manera manual.
- Colocar el extensómetro en la probeta. El extensómetro hay que colocarlo de forma centrada en la probeta.

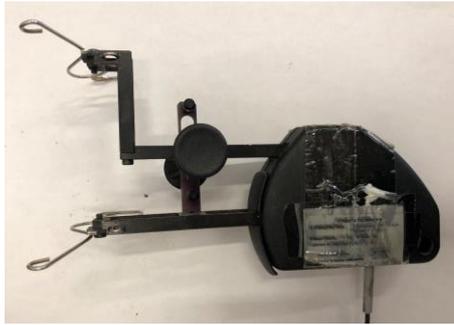


Figura 3.4.- Extensómetro.

- Conectar el programa instalado en el ordenador con la máquina mediante la Tecla 'IEE488' que se encuentra en el panel de control de la máquina.
- Abrir el programa *Test Control Instron Series 44 V17-6*.
- Rellenar los campos necesarios del programa:
  - o Tipo de ensayo
  - o Nombre
  - o Material
  - o Norma
  - o Cliente
  - o Nº probetas
  - o Mecanizado de la probeta
  - o Acondicionamiento de la probeta
- Tras el formulario anterior, aparece una segunda ventana en la que se deben introducir los datos para ensayar y dar comienzo así al ensayo.

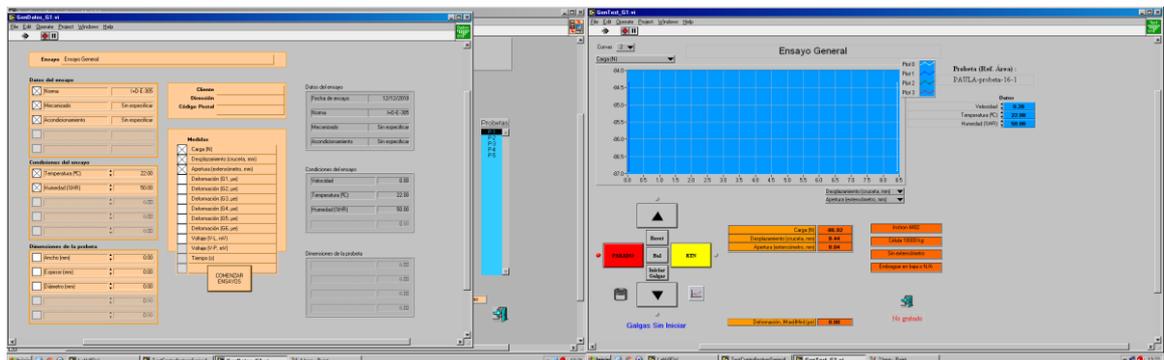


Figura 3.5.- Ventanas del programa de la máquina Instron para ensayar a tracción.

### 3.3 Resultados de los ensayos de tracción

El primer ensayo para estimar y caracterizar cada laminado, es decir, la resistencia y la rigidez, ha sido un ensayo de rotura. Después, se ha realizado un ensayo anotando todos los sonidos que se producían al aumentar la carga y un ensayo en el que sólo interesaba el primer sonido apreciable.

El programa en el que se recogen los datos de cada ensayo recopila los datos de fuerza (N) frente a la apertura del extensómetro (mm), aunque para el objeto de estudio de este trabajo es más fácil y útil hacer la comparativa de resultados para cada laminado en tensión (MPa) respecto a las deformaciones producidas en la dirección de la carga. Para ello se usan las ecuaciones:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3.2)$$

donde A es el área de la sección de la probeta,  $\Delta L$  la apertura del extensómetro desde su apertura inicial y  $L_0$  la apertura inicial de éste (50mm).

### 3.3.1 Tracción hasta la rotura

En un primer instante hay que determinar la tensión de rotura, es decir, la tensión máxima soportada antes de producirse la rotura catastrófica. Ésta es definida como:

$$\sigma_R = \frac{F_R}{A} \quad (3.3)$$

donde  $F_R$  se refiere a la fuerza que aguanta la probeta antes de la rotura.

Los laminados a estudiar muestran un comportamiento elástico lineal hasta rotura, esto hace que se pueda obtener el módulo de elasticidad de cada laminado en la dirección de la carga. El módulo de elasticidad, E, se presenta como la pendiente de la curva  $\sigma$ - $\varepsilon$ , siendo su expresión:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (3.4)$$

Para las probetas que se han ensayado a rotura se calcula la resistencia y la rigidez. En el cálculo de estas dos propiedades se hará un promedio de las probetas que se hayan ensayado. Se definen los siguientes parámetros estadísticos:

$$\text{Valor medio } \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n} \quad (3.5)$$

$$\text{Desviación típica } s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad (3.6)$$

$$\text{Coeficiente de variación } c. c. = \frac{s}{\bar{X}} \cdot 100 \quad (3.7)$$

$$\text{Error relativo } \varepsilon_R = \frac{|X_i - \bar{X}|}{\bar{X}} \quad (3.8)$$

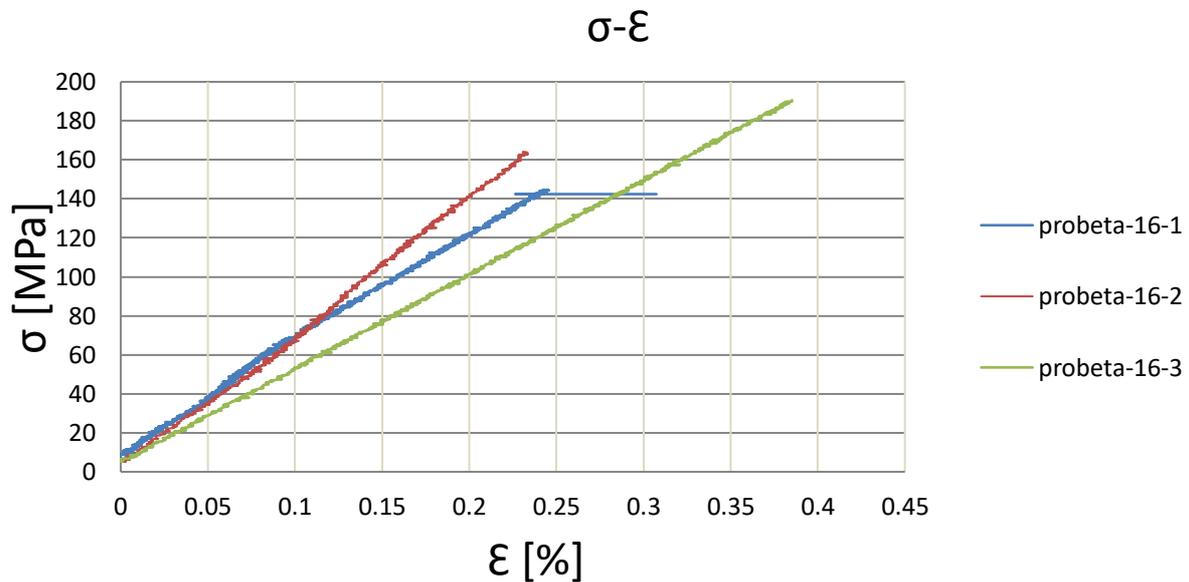
#### 3.3.1.1 Resultados obtenidos para el Panel [0<sub>4</sub>,90<sub>8</sub>]<sub>s</sub>

Para el cálculo de la tensión máxima resistida por el panel [0<sub>4</sub>,90<sub>8</sub>]<sub>s</sub> se han realizado 5 ensayos hasta la rotura, coincidiendo con las 5 primeras probetas del laminado. Las dimensiones de dichas probetas se recogen en la tabla 3.1.

Tabla 3.1.- Dimensiones de las probetas ensayadas hasta rotura.

Probeta	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )
16-1	15.17	4.58	69.48
16-2	15.17	4.56	69.21
16-3	15.14	4.54	68.75
16-4	15.13	4.54	68.74
16-5	15.12	4.56	68.98

Una vez realizados los ensayos, los datos obtenidos por cada una de las probetas corresponden con la evolución de la fuerza que se ha ido aplicando frente a la apertura del extensómetro. Con las ecuaciones desarrolladas en el apartado 3.3.1., podemos sacar el diagrama tensión-deformación y las propiedades de rigidez y resistencia.



Gráfica 3.1.- Diagrama  $\sigma$ - $\epsilon$  para ensayo a rotura.

Se han realizado cinco ensayos a rotura, pero solo se han recogido en el gráfico 3.1 los datos de las tres primeras probetas, ya que en el momento de ensayar las dos últimas, en una no se colocó el extensómetro y en el otro caso, las medidas tomadas por el extensómetro no son resultados coherentes, debido a que no se colocó correctamente el extensómetro.

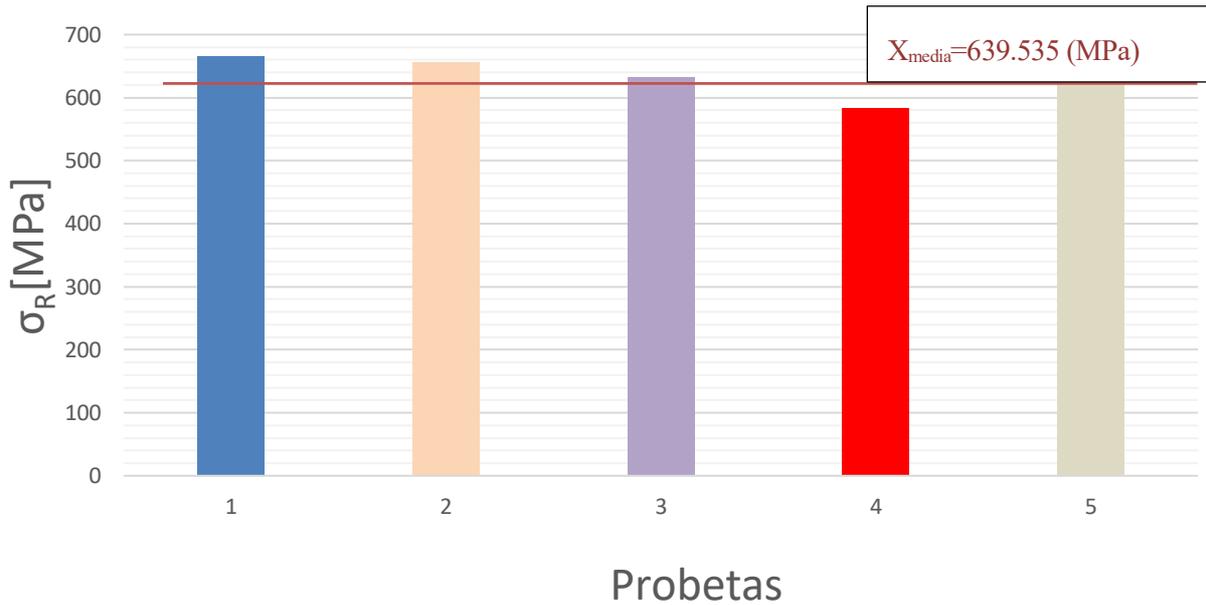
En la tabla 3.2 se recogen la fuerza máxima soportada por la probeta, la sección, la tensión de rotura y el módulo elástico.

Tabla 3.2.- Propiedades de las probetas 16-1 a 5.

Probeta	$F_{\text{máx}}$ (N)	Área (mm <sup>2</sup> )	$\sigma_R$ (MPa)	$E$ (GPa)
16-1	46234.53	69.48	665.436	62.056
16-2	45390.87	69.21	655.842	63.263
16-3	43409.25	68.75	631.407	50.679
16-4	40132.71	68.74	583.830	-
16-5	45606.69	68.98	661.158	-

Con los valores de la tabla 3.2 se aproximaron los valores medios de tensión de rotura y rigidez del panel. También, se han calculado magnitudes que ayudan a entender la dispersión que se encuentra en la curva de tensión-deformación. Se estudian los resultados de resistencia. A partir de la tensión soportada por cada

probeta se estima la media, que se considerará como la resistencia del laminado en la dirección de la carga, gráfica 3.2.



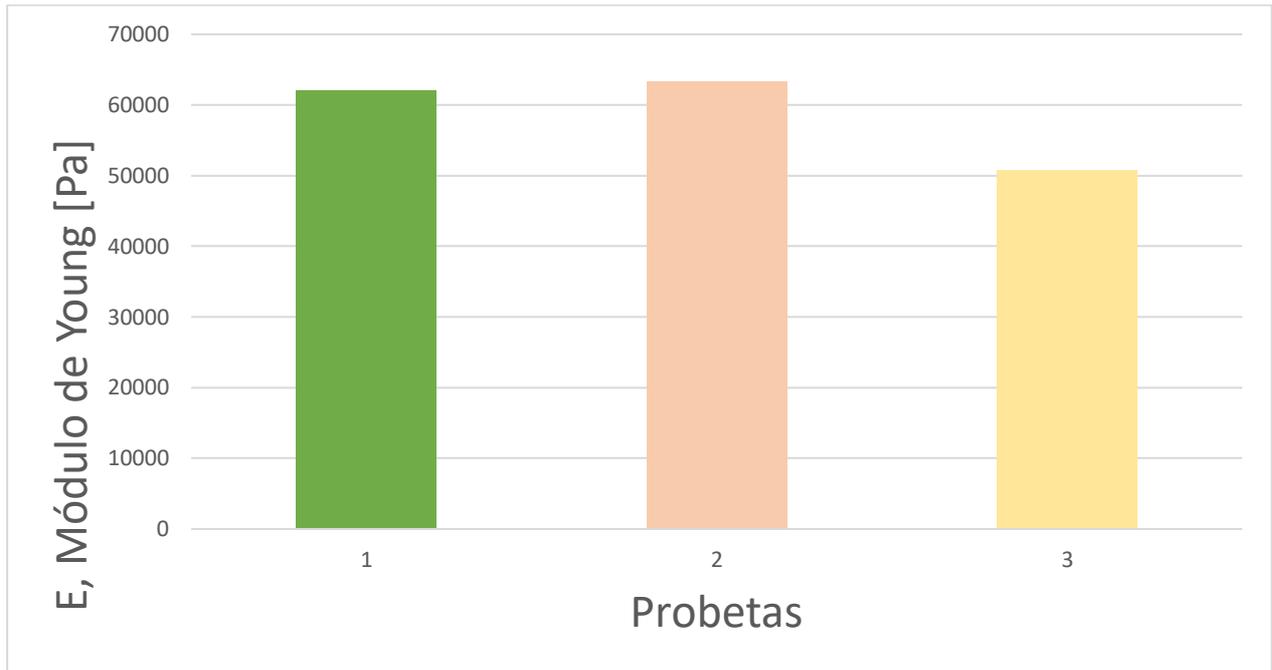
Gráfica 3.2.- Tensión de rotura correspondiente a cada probeta.

En la tabla 3.3, se presentan algunos parámetros útiles como es la desviación típica, coeficiente de variación, errores relativos respecto a la tensión máxima y mínima sacadas.

Tabla 3.3.- Características de resistencia del panel.

Resistencia	
Valor medio	6395.35 MPa
Desviación típica	338.14 MPa
Coeficiente de variación	5.287 %
Valor máximo	6658.42 MPa
Valor mínimo	5838.3 MPa
$\varepsilon_{R_{max}}$	4.114 %
$\varepsilon_{R_{min}}$	8.710 %

A continuación, se analizan las estimaciones sacadas para el módulo de Young. Se calcula como la media de los valores de los módulos elásticos obtenidos para cada probeta. El módulo elástico se puede calcular como una aproximación de todas las probetas ensayadas, no como la carga de rotura que únicamente se puede estimar con aquellas probetas que han alcanzado la rotura.



Gráfica 3.3.- Módulo de Young para las probetas 1, 2, 3 laminado 16.

Al igual que se han presentado parámetros característicos para la resistencia, se ha realizado el mismo análisis para la rigidez.

Tabla 3.4.- Características de rigidez del panel.

Rigidez	
Valor medio	5866.6 MPa
Desviación típica	6943 MPa
Coefficiente de variación	11 %
Valor máximo	6325.3 MPa
Valor mínimo	5067.9 MPa
$\varepsilon_{R_{max}}$	7.8 %
$\varepsilon_{R_{min}}$	13.6 %

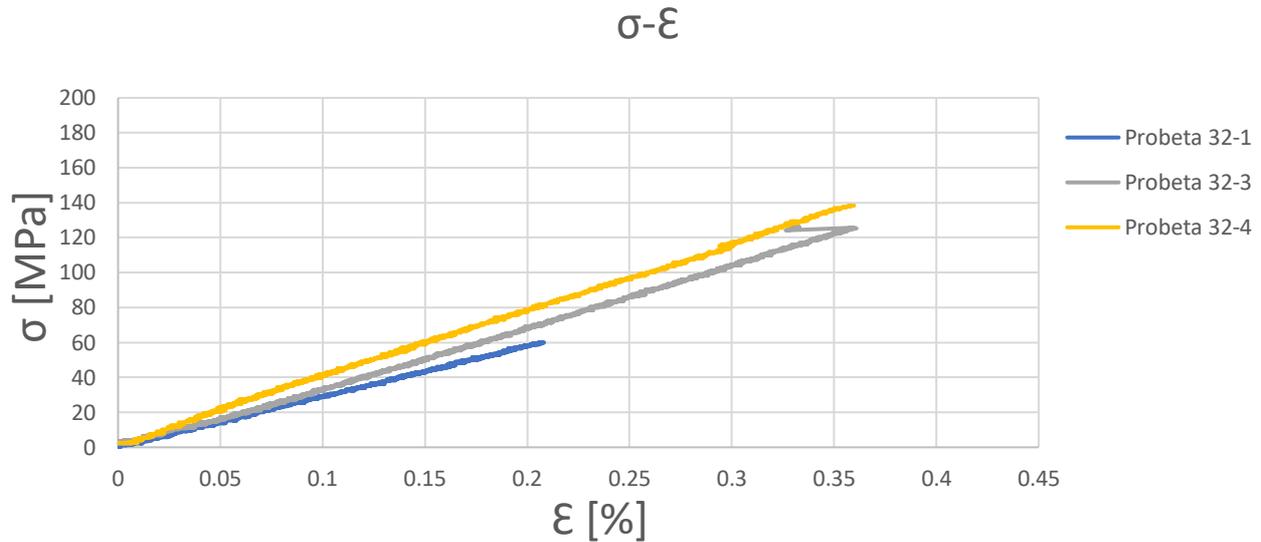
### 3.3.1.2 Resultados obtenidos para el Panel [0<sub>4</sub>,90<sub>16</sub>]<sub>s</sub>

En este caso, los resultados se han realizado del mismo modo que el laminado anterior. En la tabla 3.5, se presenta las dimensiones geométricas de las probetas del laminado [0<sub>4</sub>,90<sub>16</sub>]<sub>s</sub> que han sido ensayadas hasta la rotura.

Tabla 3.5.- Dimensiones de las probetas ensayadas hasta rotura.

Probeta	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )
32-1	15.083	7.593	114.533
32-2	15.143	7.576	114.736
32-3	15.110	7.503	113.375
32-4	15.163	7.533	114.230
32-5	15.200	7.530	114.456

A continuación, se muestra la gráfica 3.4 de tensión-deformación extraída de los datos captados en el laboratorio.



Gráfica 3.4.- Tensión-Deformación de las probetas del laminado  $[0^{\circ}_4,90^{\circ}_{16}]_s$

En la gráfica 3.4, se ha representado los resultados obtenidos al realizar ensayos de rotura a las 5 primeras probetas del laminado  $[0^{\circ}_4,90^{\circ}_{16}]_s$ , como se puede observar la probeta 32-5 no se ha representado puesto que, no se colocó el extensómetro por lo que no se tienen resultados de ésta. La probeta 32-2 los resultados obtenidos no son coherentes por la mala colocación del extensómetro.

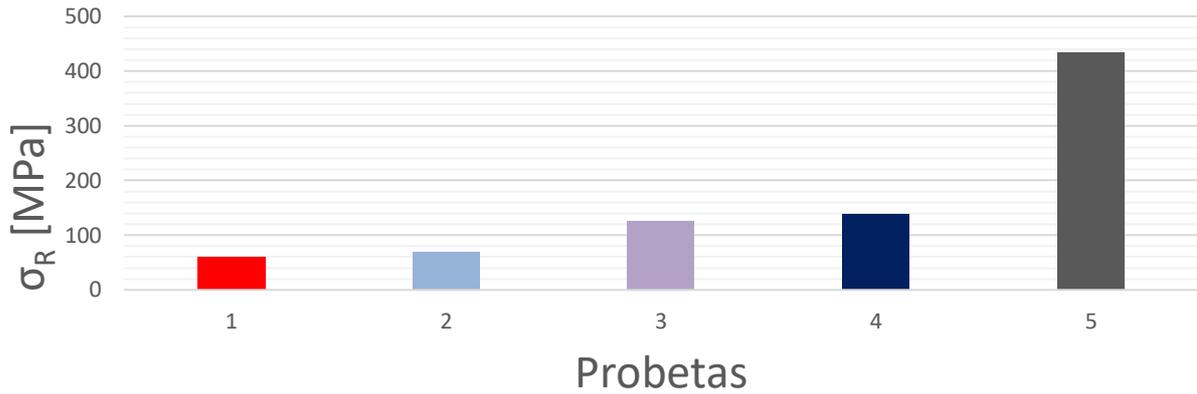
En la tabla 3.6, que se presenta a continuación, se recoge la fuerza máxima soportada por la probeta, la sección, tensión de rotura y el módulo elástico de cada probeta.

Tabla 3.6.- Propiedades de las probetas 32-1 a 5.

Probeta	$F_{\text{máx}}(\text{N})$	Área ( $\text{mm}^2$ )	$\sigma_R$ (MPa)	$E$ (GPa)
32-1	6877.791	114.533	60.051	29.749
32-2	8054.991	114.736	70.205	-
32-3	14322.6	113.375	126.329	31.482
32-4	15803.91	114.230	138.351	37.268
32-5	49697.46	114.456	434.205	-

Con estos valores se aproximaron los valores medios de tensión de rotura y rigidez del panel. También, se han calculado magnitudes que ayudan a entender la dispersión que se encuentra en la curva de tensión-deformación. Se estudian los resultados de resistencia. A partir de la tensión soportada por cada probeta se estima la media, que se considerará como la resistencia del laminado en la dirección de la carga.

La gráfica 3.5, recoge los valores de la tensión de rotura de cada lámina, teniendo en cuenta que en las 4 primeras probetas se produjo un fallo catastrófico haciendo que el ensayo no pudiera continuarse a diferencia del ensayo realizado para la probeta número 5, en la cual la carga de rotura sí es un valor coherente con lo esperado.



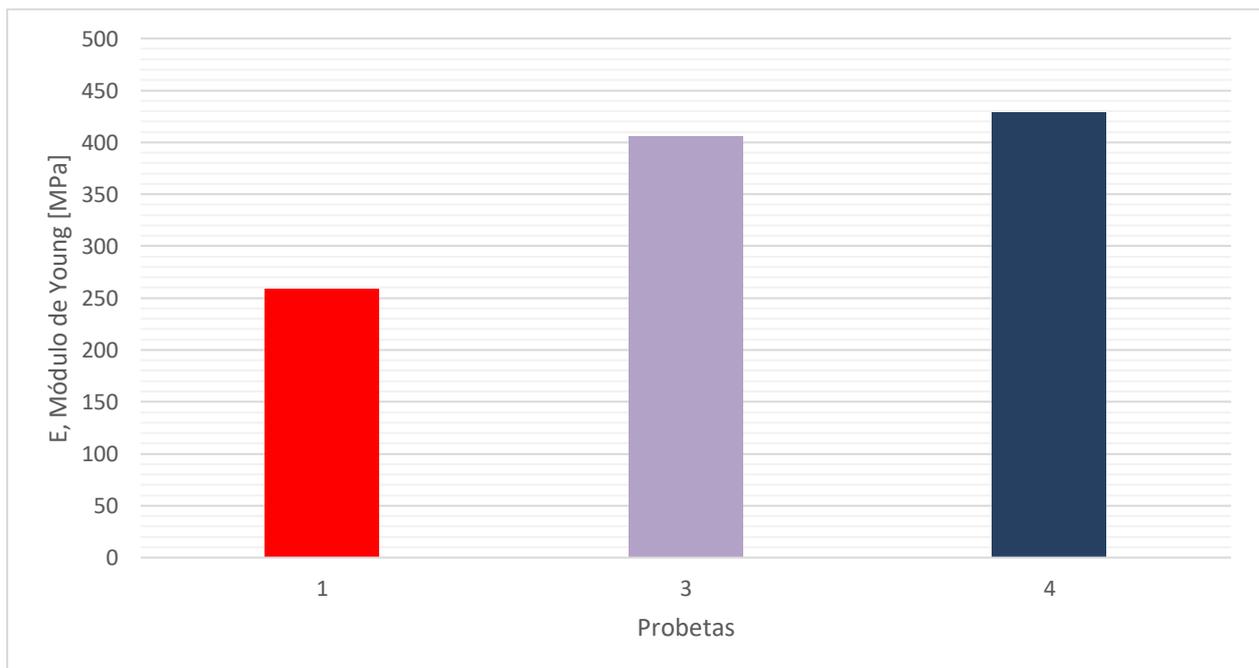
Gráfica 3.5.- Tensión a rotura de las probetas correspondientes al laminado n = 32.

En la siguiente tabla 3.7 se presentan algunos parámetros útiles como es la desviación típica y coeficiente de variación.

Tabla 3.7.- Características de resistencia del panel.

Resistencia	
Valor medio	165.828 MPa
Desviación típica	153.846 MPa
Coefficiente de variación	92.77 %
Valor máximo	434.205 MPa
Valor mínimo	60.051 MPa

Ahora se analizan las soluciones sacadas para el módulo de Young, que se calcula como la media de los valores de los módulos elásticos obtenidos para cada probeta. El módulo elástico se puede calcular como una aproximación de todas las probetas ensayadas, no como la carga de rotura que únicamente se puede estimar con aquellas probetas que han alcanzado la rotura.



Gráfica 3.6.- Módulo de Young de cada probeta ensayada.

Al igual que se han presentado parámetros característicos para la resistencia, se ha realizado el mismo análisis para la rigidez.

Tabla 3.8.- Características de rigidez del panel.

Rigidez	
Valor medio	32833 MPa
Desviación típica	3937.35 MPa
Coefficiente de variación	12 %
Valor máximo	37268 MPa
Valor mínimo	29740 MPa
$\varepsilon_{R_{max}}$	13.72 %
$\varepsilon_{R_{min}}$	9.54 %

### 3.3.1.3 Comparación de resultados de los ensayos de rotura entre los laminados

Tras analizar los datos recogidos en los ensayos de ambos laminados, se puede observar que las propiedades del primer laminado, es decir,  $[0_4,90_8]_S$  son mayores respecto al otro laminado,  $[0_4,90_{16}]_S$ . Esto, puede deberse a que la parte central del laminado tiene menos capas de  $90^\circ$ , y como ya se sabe, un material compuesto sometido a una carga en la dirección de la fibra soporta una mayor resistencia a la rotura en dicha dirección. Entonces, al tener menos láminas perpendiculares a la carga y el mismo número de laminas con la orientación de la carga, la resistencia es superior. Esto es cuando hablamos de la  $\sigma_R$ , pero si hablamos de  $F$ , el laminado correspondiente con  $n = 32$  debería aguantar más que en  $n = 16$ . De hecho, la probeta que más aguanta,  $F$ , es la probeta 32-5 (Tabla 3.6), lo que pasa es que tiene que haber otro fenómeno por el que las  $F_R$  son muy bajas, capítulo 6.

### 3.3.2 Tracción hasta un porcentaje de carga (sonido)

En este caso, se han realizado 5 ensayos con las probetas del panel correspondiente al de 16 láminas de  $90^\circ$ , es decir,  $[0_4,90_8]_S$ . En este ensayo se ha estimado la carga a la que se va a llegar, siempre inferior a la de rotura, siendo del 10% de ésta. En el mismo ensayo se han ido anotando todos los sonidos que se van registrando conforme se va aumentando la carga. Estos sonidos corresponden con fallos y defectos en las probetas, que posteriormente se observarán con el microscopio.

A continuación, tabla 3.9, se presentan las dimensiones de las probetas que se han ensayado.

Tabla 3.9.- Dimensiones de la probeta.

Probeta	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )
16-6	15.103	4.53	68.47
16-7	15.14	4.54	68.79
16-8	15.12	4.53	68.53
16-9	15.09	4.5	67.94
16-10	15.14	4.55	68.87



Figura 3.6.- Probetas para ensayar.

En el ensayo correspondiente con la probeta 16-9, se ha producido la rotura antes de finalizar el ensayo establecido. Como se pueden observar en las figuras, 3.7, 3.8 y 3.9, la probeta ha quedado destrozada.



Figura 3-7. Parte central de la probeta rota (16-9).



Figura 3-8. Parte izquierda de la probeta rota (16-9).

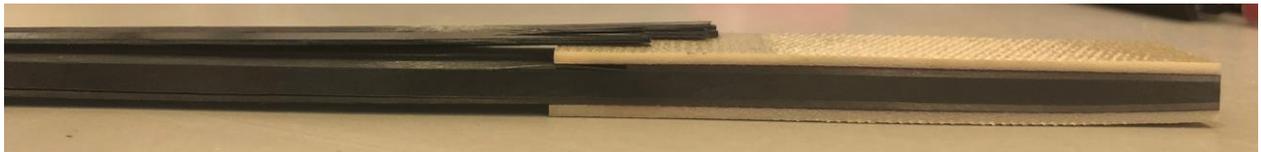
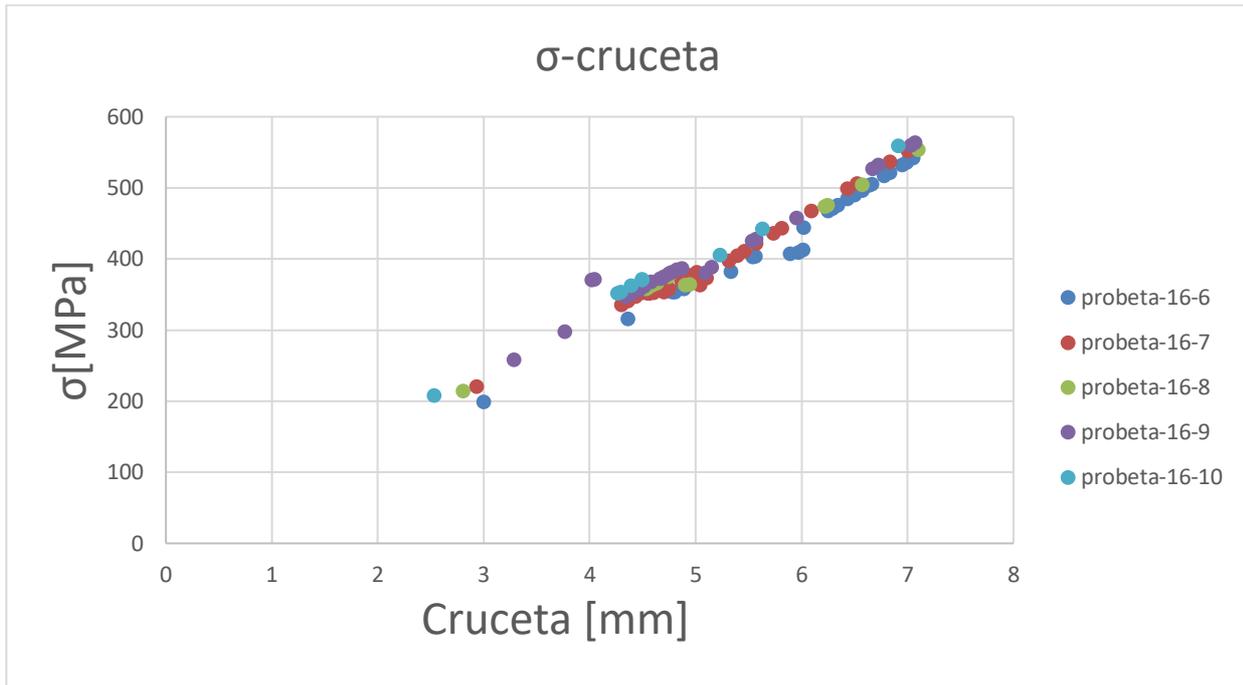


Figura 3-9. Parte derecha de la probeta rota (16-9).

Otro de los problemas, ha sido que a la hora de poner el extensómetro se ha resbalado en dos de las probetas, por lo que se ha optado por hacer una comparativa entre probetas relacionando la tensión y el paso de cruceta a cada sonido registrado. Se detectó el fallo del extensómetro cuando se observaron los datos recogidos por el programa de la máquina, ya que los resultados de tensión-deformación para cada probeta reflejaban una deformación de un 4 % y cuyas gráficas no aportaban ningún patrón aparente por lo que se decidió enfrentar tensión-cruceta. A continuación, se dispone de la gráfica 3.7 que recoge dicha información.



Gráfica 3.7.-  $\sigma$ -cruceta de las probetas 16-6, 7, 8, 9, 10.

Como se puede observar en la gráfica 3.7, se distingue un patrón de fallo en las probetas, ya que, cada punto registrado corresponde con un ruido que a simple vista se puede reflejar en grietas, despegues entre mordazas y probeta, delaminación o como ya se verá más adelante en algunos despegues a escalas microscópica.

### 3.3.3 Tracción hasta la primera grieta

En este apartado se desarrollaron 10 ensayos, que consistían en cargar la probeta hasta el primer sonido considerable, en ese momento se paraba la actividad. Las probetas que se utilizaron pertenecen al panel  $[0_4,90_8]_s$ . Estos ensayos presentaban en la parte central de cada probeta una grieta transversal visible, correspondiente con el sonido generado. Más adelante, habría que estudiar si existen más fallos o defectos en cada probeta.

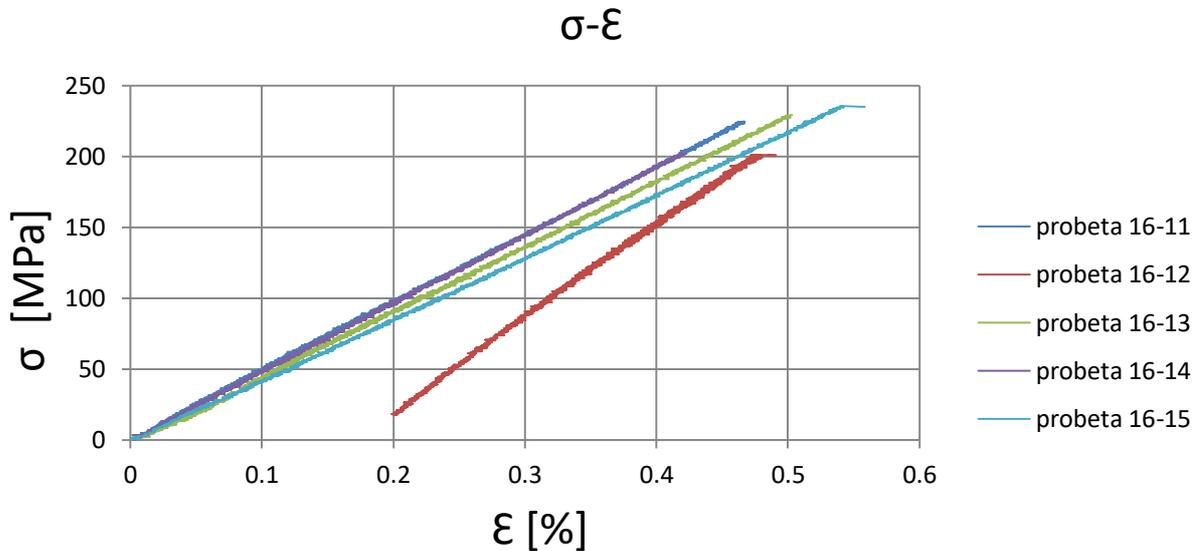
En un primer lugar, se ensayaron 5 probetas (16-11 a 15 en tabla 3.10) con la intención de observar en el microscopio a nivel micro si existían más defectos aparte de la grieta transversal que aparecía en la parte central de la probeta. Después, las siguientes 5 nuevas probetas (16-18 a 22 en tabla 3.10) se ensayaron exactamente igual, pero con una diferencia, se habían lijado y pulido de manera completa el canto de éstas. Esta nueva técnica hacía que se innovara un nuevo procedimiento no realizado hasta ahora para lijar y pulir probetas completas y conllevaba la posibilidad de ir observando lo que se iba produciendo en el mismo momento que se iba cargando la probeta. También, procedimiento novedoso hasta ahora, y que se explicará en el apartado de 'Preparación e inspección de muestras'.

A continuación, se muestran las dimensiones de las 10 probetas ensayadas en la tabla 3.10.

Tabla 3.10.- Dimensiones de la probeta.

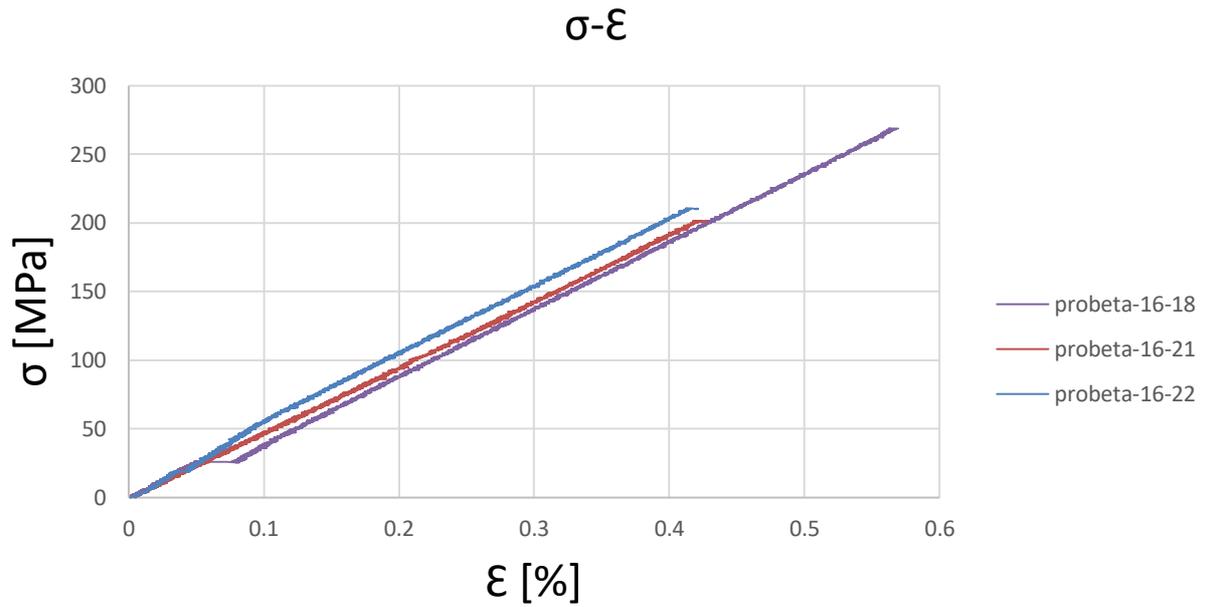
Probeta	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Área (mm <sup>2</sup> )
16-11	15.103	4.53	68.47
16-12	15.14	4.54	68.79
16-13	15.12	4.53	68.53
16-14	15.09	4.5	67.94
16-15	15.14	4.55	68.87
16-18	15.06	4.527	68.172
16-19	15.013	4.54	68.161
16-20	15.056	4.56	68.658
16-21	15.103	4.537	68.519
16-22	15.076	4.537	68.340

La gráfica 3.8, de tensión-deformación de las 5 probetas ensayadas, se observa una misma tendencia y una carga aproximada a la que aparece el primer fallo visible. Otra de las probetas se ha dejado en la gráfica correspondiente con la número 16-12 pero no puede ser comparable puesto que el extensómetro se tocó al principio del ensayo mientras este se estaba ejecutando, por una mala colocación y hace que los resultados difieran respecto a los demás.



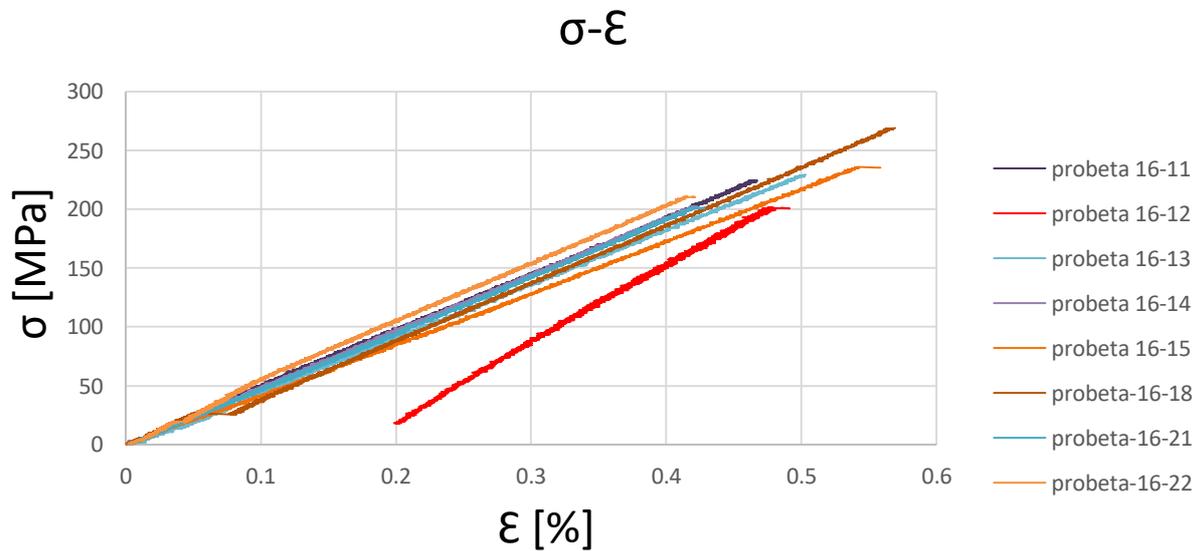
Gráfica 3.8.- Diagrama  $\sigma$ - $\epsilon$  de las probetas 16-11, 12, 13, 14, 15 del laminado  $[0_4,90_8]_s$ .

En la siguiente gráfica 3.9, se representa la tensión-deformación de las 5 probetas ensayadas (16-18 a 22). Solo se representan 3 de las probetas puesto que las otras dos han dado malos resultados por el mal uso del extensómetro.



Gráfica 3.9.- Gráfica tensión-deformación de las probetas 16-18, 21, 22 del laminado  $[0^{\circ}_4,90^{\circ}_8]_s$ .

Como podemos observar en ambas gráficas, 3.8 y 3.9, el objetivo del ensayo se confirma, en todas las probetas ensayadas, la carga y la deformación a la que se produce el primer fallo es similar. En la siguiente gráfica 3.10, se presentan los resultados de todas las probetas.



Gráfica 3.10.- Gráfica tensión-deformación comparativa de las probetas del laminado  $[0^{\circ}_4,90^{\circ}_8]_s$ .

# 4 PREPARACIÓN E INSPECCIÓN DE MUESTRAS

Finalizada la etapa de ensayos de las probetas según distintas especificaciones, continuamos con un análisis de estos ensayos. Para esta actividad se realiza observación microscópica. Con esta observación, se pretende el estudio de la estructura interna del material y los distintos fallos tras aplicar carga.

El objetivo de este capítulo es desarrollar los pasos seguidos para la preparación de muestras y su estudio.

## 4.1 Preparación de muestras para la inspección

En esta actividad existen dos partes, en primer lugar, está el encapsulado de las muestras y en segundo lugar el lijado y pulido de la muestra.

En la primera etapa, el objetivo es introducir las distintas partes de la probeta, previamente cortadas en una resina acrílica. La segunda etapa se realiza para poder trabajar la cara a inspeccionar, es decir, que ésta tenga una cara limpia para que se pueda observar la imagen detalladamente.

### 4.1.1 Encapsulado de las probetas

#### 4.1.1.1 Materiales y equipos

Para la actividad de encapsulado se necesita, figura 4.1:

- **Máquina de corte de disco de diamante.** Máquina ya utilizada con anterioridad en la fabricación de las probetas.
- **Clips de sujeción.** En nuestro caso, las muestras tienen un ancho suficiente como para sostenerse por sí solas.
- **Kit VersoCit-2.** Mezcla de un polvo y líquido cuyo resultado final es una resina acrílica que al enfriar toma la forma del recipiente.
- **Moldes FixiForm.** recipiente de polipropileno cuya base es desmontable de 40 mm de diámetro.
- **Cuchara medidora.** para calcular una cantidad exacta y óptima de VersoCit-2 Powder y VersoCit-2 Liquid.
- **Vaso desechable.** recipiente para realizar la mezcla.
- **Mezclador desechable.** utensilio de madera para mezclar el polvo y líquido en el vaso desechable.
- **Acetona o Alcohol.** utilizados para la limpieza de todos los instrumentos empleados en el proceso
- **Guantes, gafas y bata.** EPI's obligatorios para la manipulación de los productos usados en el área del laboratorio.



Figura 4.1.- Productos usados para encapsular.

#### 4.1.1.2 Procedimiento experimental

Para la preparación de muestras, en primer lugar, hay que cortar las probetas tras los ensayos, con unas medidas establecidas y que entren en el molde de encapsulado. En este caso, se ha optado por dividir la probeta en 6 trozos intentando no perder información de los daños causados en los ensayos, figura 4.2.

Cortados los trozos de las probetas con su correspondiente asignación, es decir, a cada trozo de cada probeta se le ha nombrado con una letra de la A a la F, se han introducido en el molde teniendo en cuenta la posición y el lado de la probeta que vamos a querer mirar en el microscopio. El espesor de cada trozo, es decir, el canto de la probeta es uno de los objetivos del proyecto pues queremos observar los fallos que se han producido en esa superficie. Esta superficie tiene que estar totalmente limpia y plana sobre el molde. En nuestro caso, no necesitamos los clips de sujeción puesto que el espesor de las probetas es suficiente como para que se mantengan en posición vertical por sí solas.

Una vez colocados todos los trozos, como se ha comentado anteriormente, se han introducido por orden de corte con diferentes letras de la A-F y el correspondiente número de probeta dentro del panel completo.

Se procede ahora a la elaboración de la resina que hay que introducir en cada cápsula. Esta mezcla se realiza en un vaso de mezcla y con la cuchara medidora introducimos dos cucharas de polvo del *VersoCit-2 Powder* por una cuchara de *VersoCit-2 Liquit*. Esta mezcla se remueve con la espátula de madera durante 30 segundos aproximadamente y se vierte en los moldes. Esta resina se solidifica de forma rápida por lo que hay que verterla inmediatamente después de remover. A la hora de verter la resina hay que hacer hincapié en que la inercia del líquido no mueva o levante las piezas. Para ello, se utiliza la espátula de madera haciendo presión sobre la muestra mientras se introduce la resina. Una vez lleno cada molde se deja secar al aire.

No existe un tiempo exacto para la solidificación de la resina ya que depende de la proporción líquido-polvo y las condiciones ambientales. Para un mejor acabado hemos esperado un día asegurando que estén secas totalmente.

Para la extracción de cada encapsulado se ha tenido mucho cuidado para no perder el orden de cada muestra y su identificación.

Una vez finalizado el proceso de vertido de la resina hay que limpiar con acetona todos los utensilios que se han usado y la zona de trabajo. Con los moldes hay que realizar lo mismo una vez se han retirado los encapsulados.



Figura 4.2.- Probetas preparadas para encapsular.



Figura 4.3.- Probetas encapsuladas.

## 4.1.2 Lijado y Pulido de muestras

### 4.1.2.1 Materiales y equipos

En esta tarea, el lijado y el pulido se realiza de la misma forma, variando el grano del paño utilizado. Los equipos utilizados se muestran en la figura 4.4:

- **Sistema de dosificación automático *LaboDoser de Struers***: es un sistema que suministra de manera continua, uniforme y de forma programada las distintas soluciones que se utilizan en cada etapa del proceso de pulido.
- **Lijadora y Pulidora auxiliar *LaboPol-5 con cabezal *LaboForce-1 de Struers****: con esta máquina se realizan el lijado y el pulido de tres muestras a la vez, figura 4.4. Para cada etapa, tanto de lijado como de pulido, se utilizan distintos platos con su correspondiente solución. En la misma máquina se ajusta el tiempo, la velocidad de giro y la fuerza que se ejerce a las muestras.



Figura 4.4.- Máquina de lijado y pulido juntos a las soluciones a utilizar.

Para cada proceso se emplean discos con determinadas superficies, dependiendo de si se trata de lijado o de pulido. Las diferencias entre éstas son importantes, pues el lijado lo que trata es la eliminación de material para evitar rayones y marcas profundas, y en el pulido para limpiar la cara y obtener una superficie que refleje.

Los discos son de 250 mm, misma medida en la base de la lijadora, éstos se emplean junto a su líquido correspondiente, formando una mezcla de diamantes de alto rendimiento y de lubricación.

- **Papel de lija para pulidora *SiC#320***: lija con tamaño de grano de 320  $\mu\text{m}$ .
- **Disco MD-Largo 9  $\mu\text{m}$** : disco con una distribución de diamante para una primera etapa de pulido fino con un tamaño de grano de 9  $\mu\text{m}$ . Es un disco que trae consigo una fijación magnética a la base.
- **Disco MD-Dac**: disco con fijación magnética con un tamaño de grano de 3  $\mu\text{m}$  y que posee un tejido satinado de acetato.
- **Disco MD-Nap**: tercer paño de pulido magnético hecho con pelo sintético corto. Tamaño de 1  $\mu\text{m}$ .
- **Líquido *DiaPro Allegro/Largo 9  $\mu\text{m}$*** : sirve de lubricación en la primera etapa del pulido, es decir con el disco MD-Largo.
- **Líquido *Diapro Dac 3  $\mu\text{m}$*** : se utiliza para la lubricación en la segunda etapa del pulido, es decir, con el paño MD-Dac.
- **Líquido *DiaPro Nap B1 1  $\mu\text{m}$*** : sirve de lubricante en la última etapa junto con el paño del disco MD-Nap.

### 4.1.2.2 Procedimiento experimental

A lo largo del proceso se ha ido añadiendo, eliminando y modificando las diferentes etapas del proceso de lijado y pulido, pero siempre actuando sobre todos los encapsulados para que no hubiera diferencias de planos entre ellas. En las últimas probetas ensayadas se ha optado por saltar la parte de encapsulado de muestras para realizar un lijado y un pulido de la probeta completa adaptando la máquina a las necesidades, pero siendo el proceso el mismo que en las muestras encapsuladas. La máquina de lijado y pulido para las probetas completas es la misma, como se puede ver en la figura 4.4 pero se ha adaptado un tope para poder apoyar la probeta y

manualmente hay que ejercer una cierta fuerza para que la probeta se mantenga recta en todo el proceso. Esta técnica no es tan precisa como el encapsulado, pero no se pierde información de los daños.

La actividad de lijado y pulido ha constado de cuatro etapas:

- **Lijado grueso:**

Se coloca en primer lugar una base magnética cuyo nombre es MD Gekko ya que la lija en sí no cuenta con una sujeción magnética. La lija para utilizar es la de Carburo de Silicio 320, SiC #320. La lubricación que se utiliza en este proceso es el agua que se obtiene del grifo mediante una manguera. Se colocan las muestras con el cabezal bajado teniendo en cuenta que las muestras hay que colocarlas con la parte que queremos observar al microscopio tocando la superficie de la lija, es decir la parte plana del encapsulado. Una vez situadas las muestras se baja la palanca que hay en la derecha de la máquina del cabezal para fijarla y se aprietan las distintas muestras con sus cabezales individuales que ejercen una cierta presión sobre cada una. Ahora se ajustan los parámetros referidos al tiempo, velocidades de giro del disco y la refrigeración.

En esta etapa el tiempo estimado es de unos 5 min, con una velocidad de giro de 300 rpm y la lubricación de agua.

Cuando se haya finalizado se levanta la palanca haciendo subir el cabeza y retirando los encapsulados. Hay que apartar tanto el plato magnético como la lija y secarlo todo con mucho cuidado.

- **Pulido 9  $\mu\text{m}$ :**

Se coloca el disco MD Largo 9  $\mu\text{m}$ , como se ha comentado anteriormente este plato posee sujeción magnética. Lubricamos el disco con el líquido DiaPro Allegro/Largo 9  $\mu\text{m}$ . Este líquido es vertido por el inyector que tras aplicarlo sobre el paño hay que colocarlo en el cabeza para que durante el proceso vierta de manera continua y lubrique la zona. El tiempo estimado ha sido de unos 6 minutos y una velocidad de 150 rpm. Las muestras se colocan repitiendo el mismo paso seguido en el lijado grueso. Al finalizar, hay que retirar tanto las muestras como el paño, procediendo a su adecuada limpieza.

- **Pulido 3  $\mu\text{m}$ :**

En esta etapa la colocación de las muestras y el inyector se hace igual que en las etapas anteriores. Ahora se utiliza el paño MD Dac de 3  $\mu\text{m}$  junto con el líquido DiaPro Dac 3  $\mu\text{m}$ . El tiempo aproximado es de unos 5 minutos y una velocidad de giro de 150 rpm. Tras acabar la etapa se recogen las muestras y el plato y se limpia con agua.

- **Pulido 1  $\mu\text{m}$ :**

Última etapa que sirve para darle un acabado perfecto a las muestras. Para esta etapa se utiliza el paño MD Nap 1  $\mu\text{m}$  y el líquido DiaPro Nap B1 1  $\mu\text{m}$ . Todo el proceso de colocación de muestras y del inyector se realiza igual que en las etapas anteriores. En este caso el tiempo empleado es de 5 minutos y una velocidad de giro de 150 rpm. Tras acabar se retiran las muestras con cuidado y el paño. Se procede al enjuague con agua tanto de las muestras como del disco, teniendo especial cuidado en las muestras para evitar que se ensucie la superficie a observar.

A la hora de lijar y pulir las probetas completas, los ciclos de tiempo y velocidad se han variado puesto que no se necesitaba tanta precisión como en los encapsulados. Se ha aumentado la velocidad de giro del disco disminuyendo el tiempo.

## 4.2 Inspección al microscopio

Una vez listas las muestras, es decir, aplicados los procesos de lijado y Pulido, el siguiente paso es observar al microscopio. Para esta observación se utilizan distintos aumentos, los cuales van desde x2.5-x1000. El microscopio está dispuesto con una cámara digital y esto a la vez conectado al ordenador, lo que permite observar de manera directa a través de la pantalla. A continuación, se desarrolla con detalle tanto el equipo y el software como el procedimiento experimental.

Para las probetas que se habían lijado y pulido de manera completa, se ha procedido a una inspección simultánea al ensayo y posteriormente a una inspección en el microscopio.

### 4.2.1 Equipos y software

- **Microscopio Binocular Invertido modelo EPIPHOT 200, figura 4.5:** sofisticado microscopio que permite examinar muestras con distintos aumentos, los cuales son: 2.5x, 5x, 10x, 20x, 50x,100x.



Figura 4.5.- Microscopio.

- **Cámara Infinity 1-3C-NS:** cámara fotográfica CCD para microscopía.
- **Adaptador Tv lens C-o.45x:** módulo que posibilita la conexión entre el microscopio y la cámara.
- **Programa para la observación de microscopía Perfect Image V8.01:** sistema que permite la visión de la muestra de forma instantánea en la pantalla y en el cual se pueden realizar diferentes opciones para el manejo y exposición de imágenes.

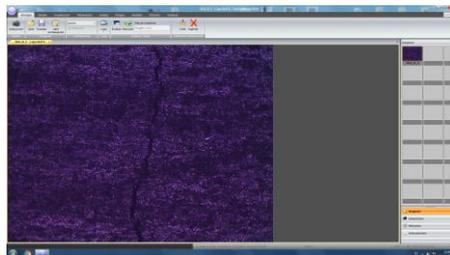


Figura 4.6.- Programa Perfect Image 1.

- **Programa observación a través de la lupa Clara Vision.**

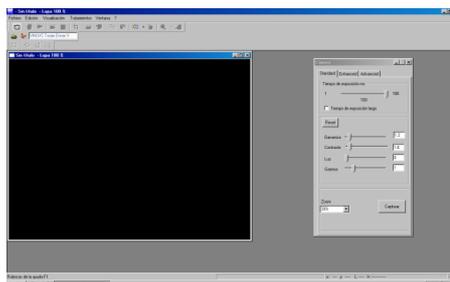


Figura 4.7.- Programa Clara Vision 2.

## 4.2.2 Inspección de muestras y captura de imágenes

Antes de comenzar la observación de las muestras debemos asegurarnos de que la superficie sobre la que se va a trabajar está completamente limpia, para ello se utiliza agua durante 30 segundos aproximadamente, secándolo con cuidado de no arañar la superficie con algodón o papel.

El siguiente paso es encender todos los equipos necesarios para la observación de las muestras, ordenador y microscopio. Abrir el programa con el que se va a trabajar y se posiciona la muestra sobre la pletina del microscopio. El microscopio cuenta con el porta objetivos con las distintas lentes ya comentadas, el cual permite con un giro suave ir cambiando al aumento con el que se desea trabajar. Para comenzar y situarse en una zona deseada y cómoda de trabajo se empieza desde el aumento más bajo y vamos aumentando según los objetivos de inspección que se necesiten. Hay que tener en cuenta que sobre cada lente hay una designación indicada como por ejemplo x2.5 pero realmente el aumento se multiplica por diez siendo realmente un aumento de 25.

La observación de las muestras se puede llevar a cabo de dos maneras, una mediante el programa sobre la pantalla del ordenador y otra por los oculares del propio microscopio. En este trabajo se va a utilizar el programa instalado junto con la cámara digital conectada al microscopio.

Ya elegido el aumento se enfoca la muestra para lograr una mejor calidad, para ello hay dos ruedas en el microscopio: una rueda interior para un enfoque macrométrico y uno exterior para un enfoque micrométrico. También se puede modificar la luz regulando la intensidad de la fuente de luz.

En el mismo programa se pueden modificar distintos parámetros de la imagen como la ganancia, el contraste, la luz o la gamma. Para toda la inspección se ha mantenido los mismos números. Tras ajustar y obtener la calidad adecuada se inicia la inspección recorriendo la muestra mediante unas ruletas que hacen avanzar o retroceder, subir o bajar el enfoque. Cuando se quiera obtener la imagen hay que pulsar sobre el icono de capturar que existe en el programa teniendo en cuenta que el programa se encuentra en el modo de adquisición. Hay que guardar las imágenes por si existiera un cierre imprevisto, además el programa no conserva imágenes si no se han guardado con anterioridad.

En la adquisición de imágenes, una de las opciones que más se ha utilizado en el proyecto es la realización de fotocomposiciones. Una fotocomposición no es más que una imagen compuesta por varias para poder crear muestra o probeta completa para poder analizar de manera general los daños como grietas. Para crear las fotocomposiciones hay que capturar varias imágenes fijando un punto de referencia para después ir montando una sobre la otra sin perder información de lo que se quiere inspeccionar.

Cuando ya tenemos las imágenes que se quieren montar en una fotocomposición, se tiene que seleccionar la pestaña Metaview en la parte derecha del programa, se selecciona el tamaño de la fotocomposición y con las imágenes abiertas se selecciona cada imagen manteniendo pulsado Ctrl, arrastrando la imagen hasta el cuadro derecho donde se ha escogido el tamaño. Tras montar todas las imágenes, se selecciona Correlación, donde aparece una ventana para realizar el montaje y obtener la fotocomposición. Cuando se hayan ajustado todas las imágenes, la fotocomposición se guarda pulsando el icono de una flecha hacia arriba, esto hace que se abra en el programa inicial como si la imagen se hubiera tomado directamente del microscopio, por lo que se guarda como el resto de las imágenes.

## 4.3 Inspección con lupa

Este método se ha desarrollado para este trabajo en concreto y consistiría en un trípode en el que se coloca la lupa de manera invertida frente a la máquina de ensayo. Esta lupa está conectada con la cámara digital que a su vez, está conectada con el ordenador y a través del programa correspondiente, se puede ir observando por pantalla lo que ocurre a una escala inferior que el microscopio pero suficiente como para ver el fallo de la probeta al ser ensayada. Este desarrollo se ha montado in situ en el área de ensayos, para como ya se ha comentado hacerlo simultáneamente, pero hay que tener mucho cuidado pues no es una maquinaria preparada para dicha función. La lupa se adapta al trípode, el cual puede regularse para establecerlo a la altura que se desee. Una vez que se ha instalado se ajusta con la ruleta que tiene la lupa incorporada a uno de sus lados y con la luz encendida se va enfocando para conseguir una buena resolución por pantalla. En la realización del

ensayo podemos observar la imagen en pantalla de lo que va ocurriendo en la probeta y observar los daños apreciables que vayan apareciendo. Es muy importante que las probetas se hayan lijado y pulido con anterioridad porque si no es así, no se observará absolutamente nada a no ser que el defecto sea apreciable a simple vista.

Este procedimiento se ha utilizado para poder observar las probetas lijadas y pulidas al completo durante el ensayo, pero posteriormente aparte de la toma de imagen en ese instante se ha hecho una inspección microscopica como se ha explicado anteriormente.

#### 4.3.1 Equipos y software

A continuación, se describen todos los utensilios utilizados en este proceso:

- **Cámara Infinity 1-3C-NS:** cámara fotográfica CCD para microscopía.
- **Adaptador *Tv lens C-o.45x*:** módulo que posibilita la conexión entre el microscopio con la cámara.
- **Programa observación a través de la lupa *Clara Vision*, figura 4.8.**

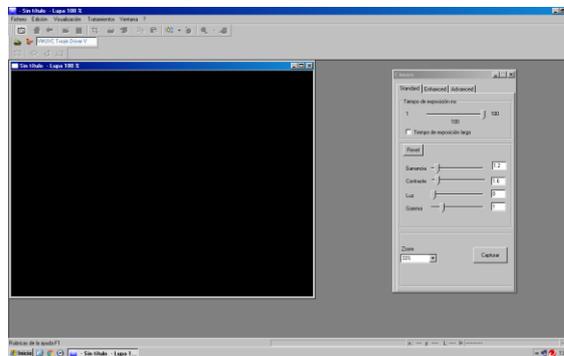


Figura 4.8.- Programa *Clara Vision*.

- **Lupa, figura 4.9.**



Figura 4.9.- Trípode preparado con la lupa acoplada frente a la máquina de tracción disponible en el laboratorio.

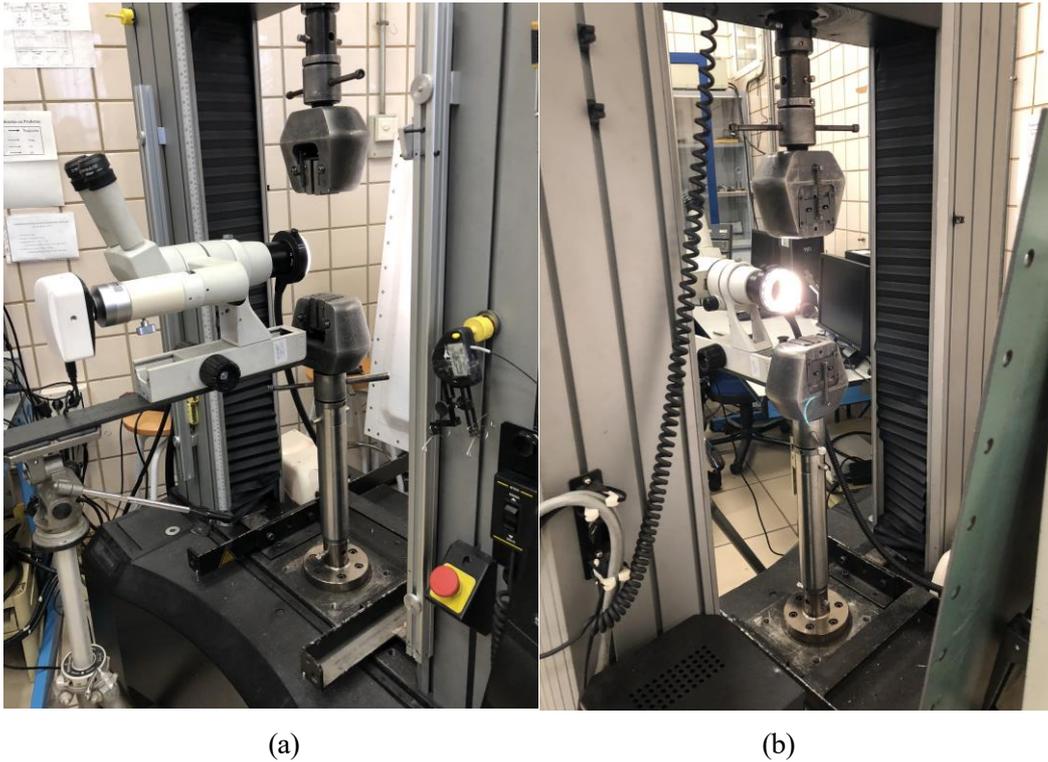


Figura 4.10.- (a) Trípode con la adaptación de la lupa. (b) lupa de frente al ensayo.

#### 4.4 Laminado $[0_4,90_8]_s$

En el laminado  $[0_4,90_8]_s$  se han hecho dos tipos de ensayos, uno a tracción hasta un porcentaje de carga de rotura anotando los diferentes sonidos correspondientes al daño en la pieza y otro, a tracción hasta la aparición de la primera grieta.

En el primer caso no se ha podido inspeccionar al microscopio, puesto que estas probetas están muy dañadas y no se pueden encapsular, y la técnica de lijado y pulido de las probetas completas aún no se había desarrollado. A continuación, se muestran fotografías de dichas probetas cuyo daño se ve a simple vista, figuras 4.11 a 4.14..



Figura 4.11.- Probeta 16-6 ensayada.



Figura 4.12.- Probeta 16-7 ensayada.



Figura 4.13.- Probeta 16-8 ensayada.



Figura 4.14.- Probeta 16-10 ensayada.

En el conjunto de las probetas anteriores faltaría la probeta 16-9, la cual, en el ensayo realizado, llega al punto de rotura quedando destrozada como se puede observar en la Figura 3.7, 3.8, 3.9 del capítulo anterior. Como podemos observar en las figuras 4.11, 4.12, 4.13, 4.14 de las probetas 16 – 6, 7, 8, 10 existen varias grietas transversales y delaminaciones entre las láminas de  $90^{\circ}$ - $0^{\circ}$ .

En la segunda tanda de ensayos, correspondiente con tracción hasta la primera grieta o el primer sonido detectable, puesto que ambos casos coincidían, y producían dicha grieta trasversal en la zona central de la probeta. Cuando se apreciaba esta grieta trasversal, el ensayo se paraba. Para este conjunto de probetas se encapsularon 5 probetas y las otras 5 fueron lijadas y pulidas al completo y observadas mientras se ensayaban.

En las probetas que se encapsularon se perdió mucha información, siendo una única probeta donde se apreciaba el daño de dicha grieta trasversal. La figura 4.15, es una fotocomposición que corresponde con la probeta 16-11, en la cual se puede observar la grieta trasversal.

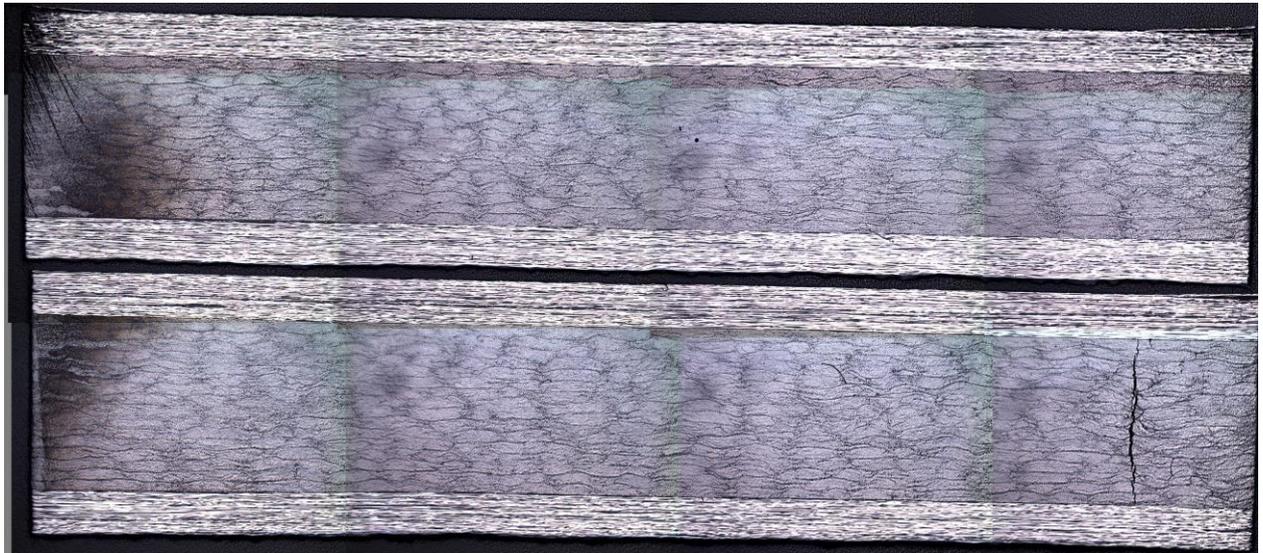


Figura 14.15.- Fotocomposición de la probeta 16-11 ensayada.

Solo en la probeta 16-11 se aprecia esa grieta trasversal que hablamos. Hay que decir, que cuando se ensayaron las demás probetas dicha grieta se podía ver a simple vista, por lo que se supone, que a la hora de encapsular se perdió esta información. Tras este problema surge la idea de la inspección al completo.

Seguidamente, se ensayaron 5 probetas más ya lijadas y pulidas, la calidad no es tan buena como las que se han encapsulado, pero es suficiente para poder observar el daño en el que estamos interesados. Para estas probetas, se hicieron capturas cuando aparecía la grieta tanto cargada como descargada. Estas imágenes están sacadas con la lupa. Después, se hicieron composiciones al microscopio a un aumento x50 en la zona afectada.

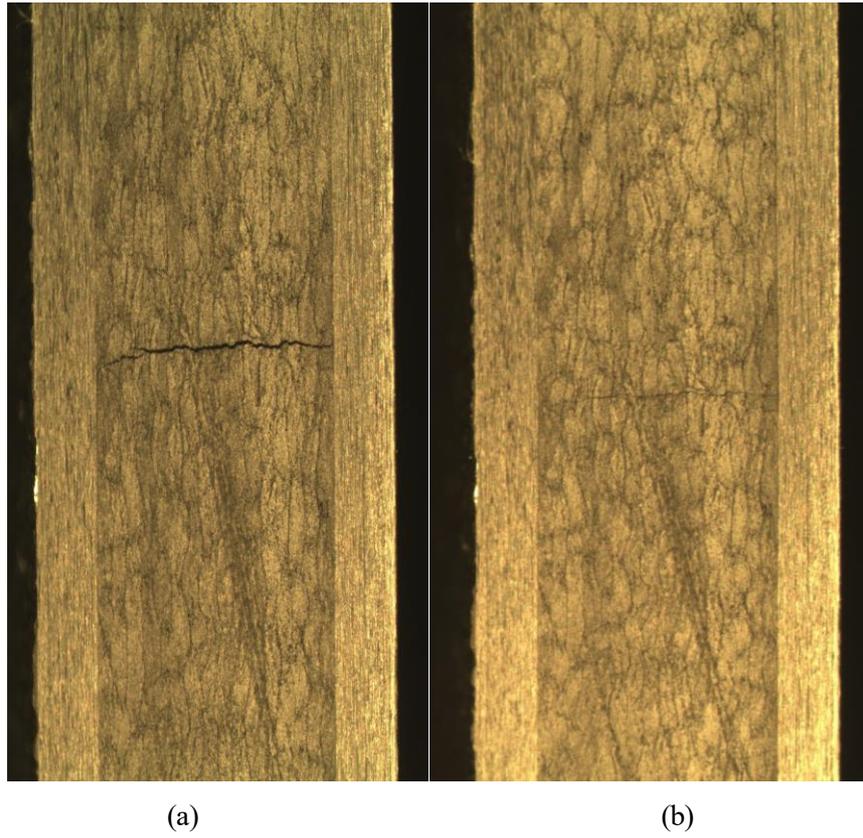


Figura 4.16.- (a) Probeta 16-18 cargada. (b) Probeta 16-18 descargada.

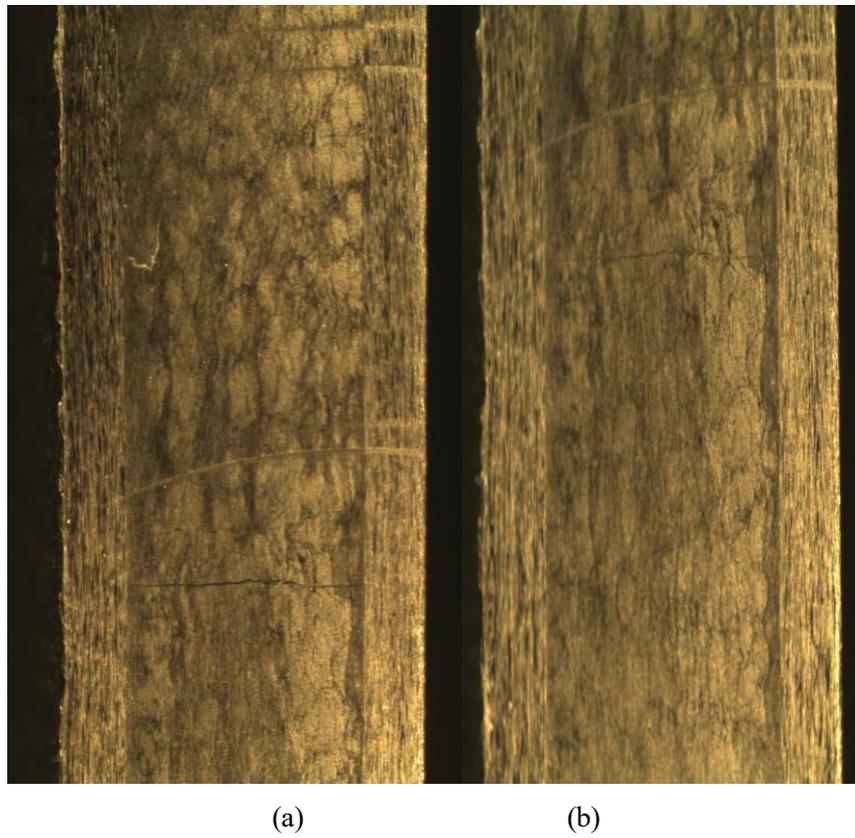
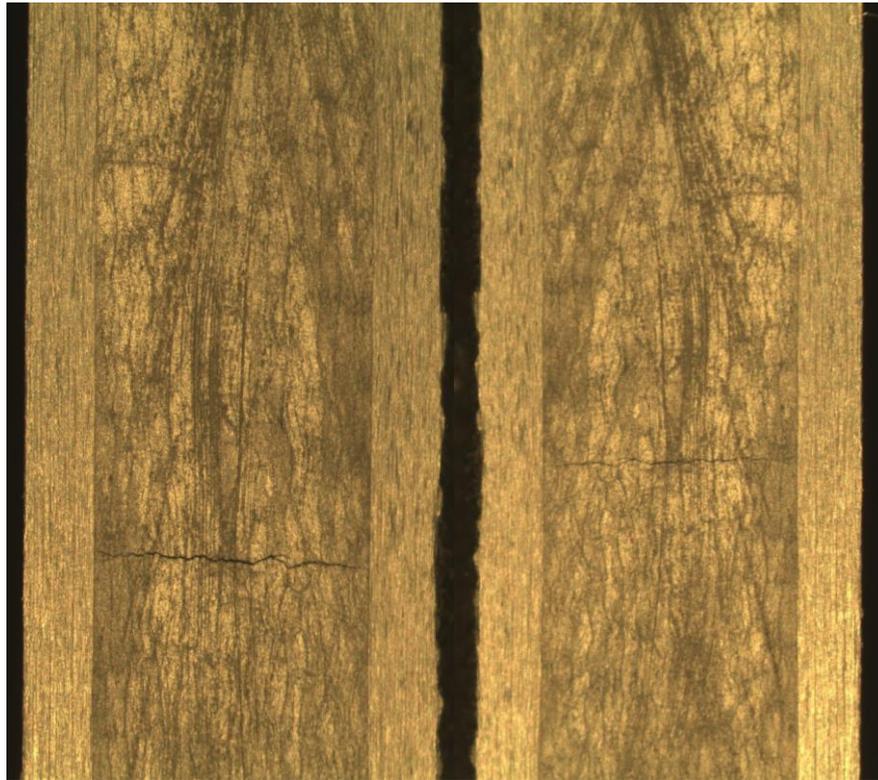


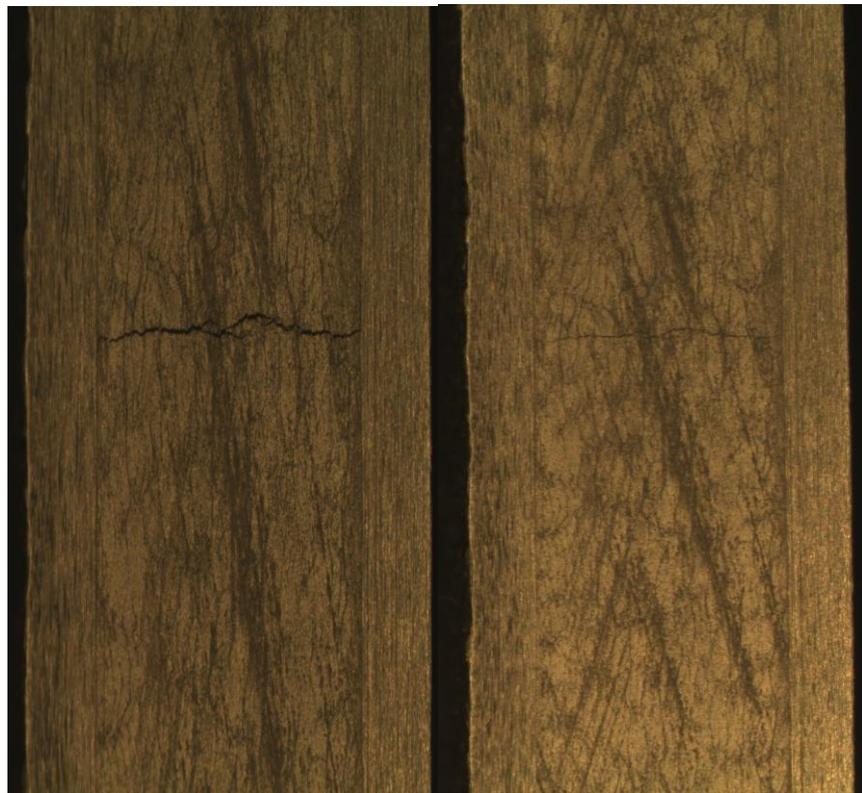
Figura 4.17.- (a) Probeta 16-19 cargada. (b) Probeta 16-19 descargada.



(a)

(b)

Figura 4.18.- (a) Probeta 16-20 cargada. (b) Probeta 16-20 descargada.



(a)

(b)

Figura 4.19.- (a) Probeta 16-21 cargada. (b) Probeta 16-21 descarga.

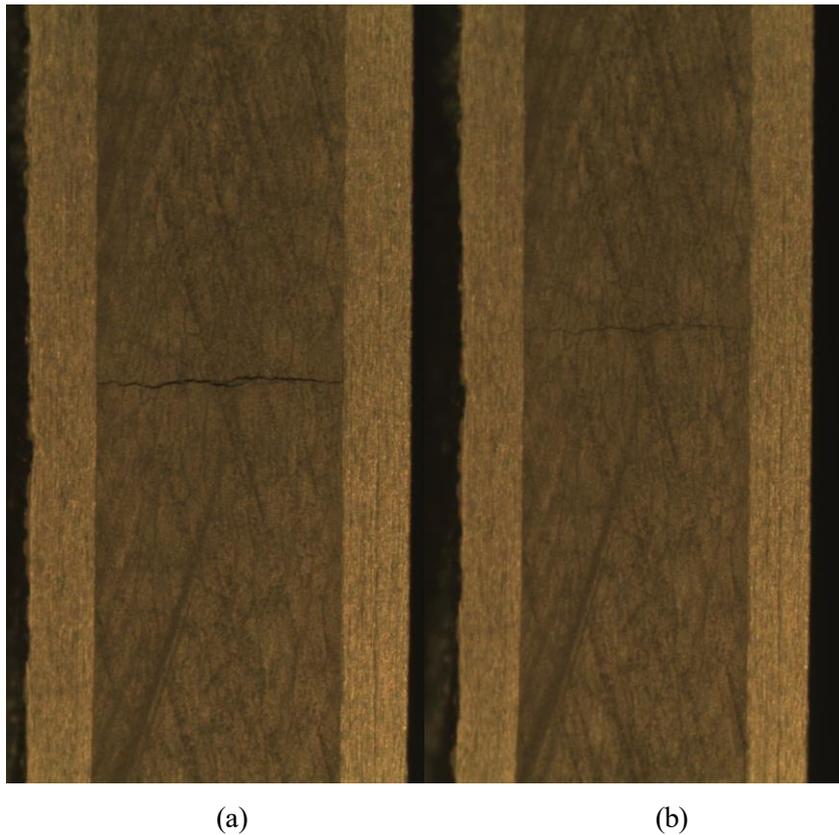


Figura 4.20.- (a) Probeta 16-22 cargada. (b) Probeta 16-22 descargada.

A continuación, las fotos que se van a mostrar son las fotocomposiciones localizadas en la zona de la grieta de las últimas probetas. Estas fotocomposiciones se van a ir presentando por una de las caras de la probeta 3 imágenes, dos de ellas coincidiría con la interfase entre el cambio de orientación del laminado y la imagen que quedaría sería la grieta originada.

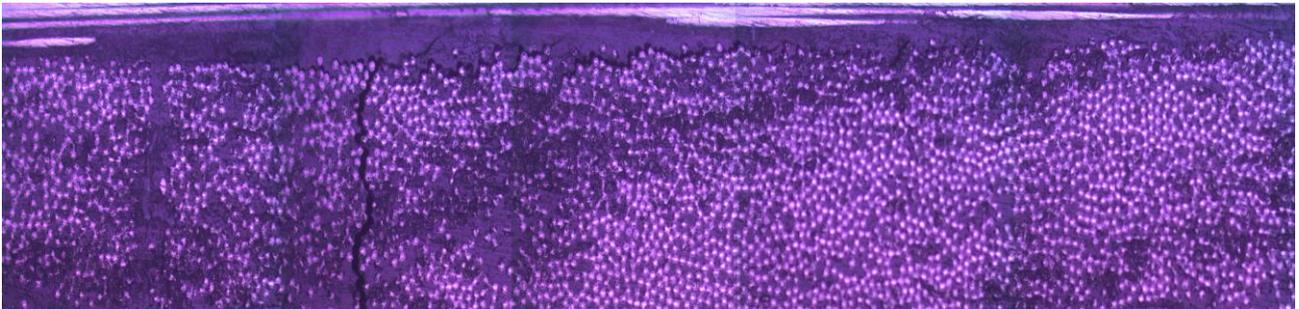


Figura 4.21.- Fotocomposición de la probeta 16-18, interfase  $90^{\circ}$ - $0^{\circ}$  izquierda.



Figura 4.22.- Fotocomposición de la probeta 16-18, grieta transversal completa en el espesor  $90^{\circ}$ .

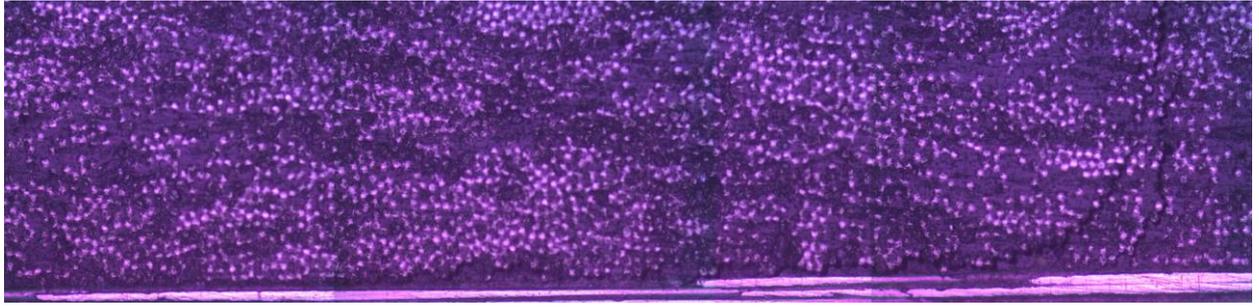


Figura 4.23.- Fotocomposición de la probeta 16-18, interfase 90°-0° derecha.

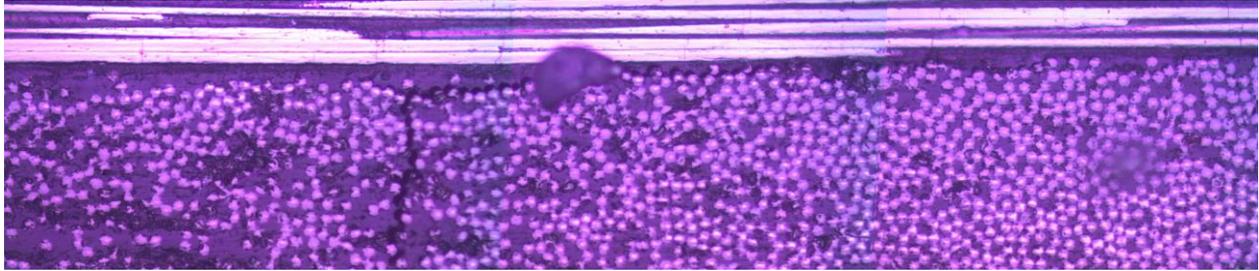


Figura 4.24.- Fotocomposición de la probeta 16-19, interfase 90°-0° izquierda.

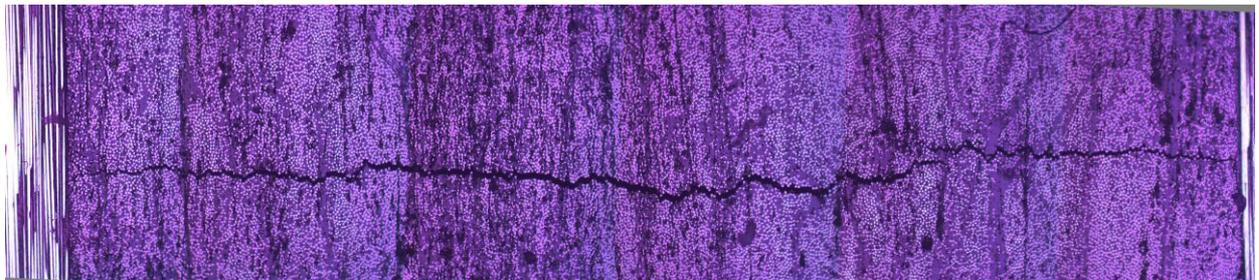


Figura 4.25.- Fotocomposición de la probeta 16-19, grieta transversal completa en el espesor de 90°.

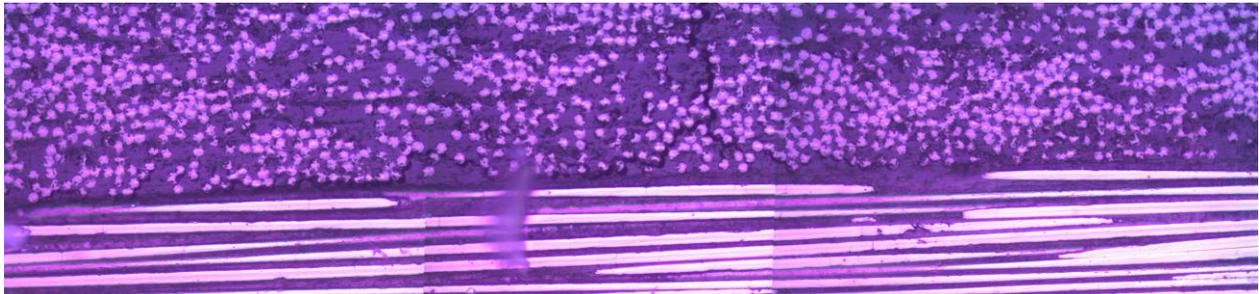


Figura 4.26.- Fotocomposición de la probeta 16-19, interfase 90°-0° derecha.

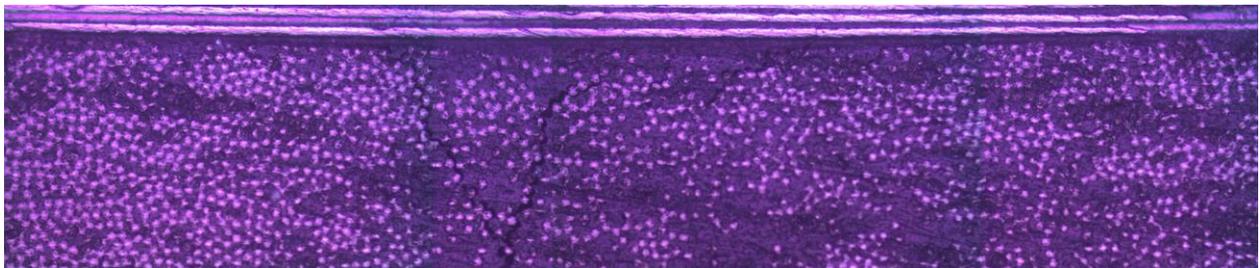


Figura 4.27.- Fotocomposición de la probeta 16-20, interfase 90°-0° izquierda.



Figura 4.28.- Fotocomposición de la probeta 16-20, grieta transversal completa en el espesor de 90°.

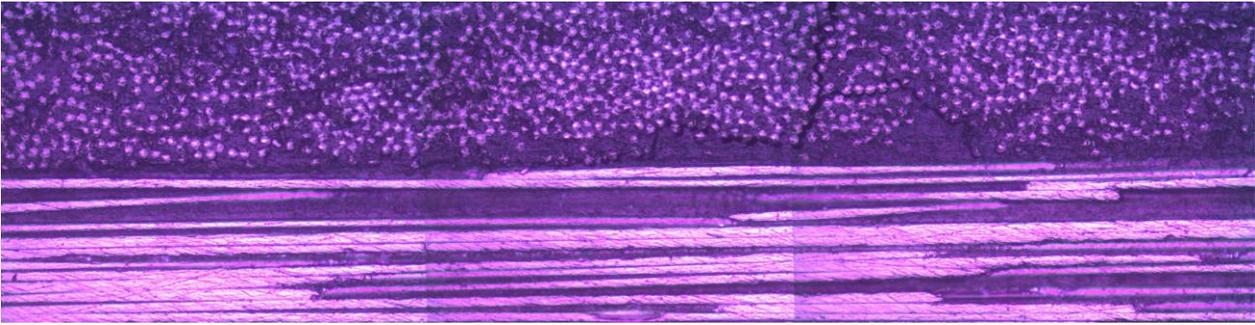


Figura 4.29.- Fotocomposición de la probeta 16-20, interfase 90°-0° derecha.

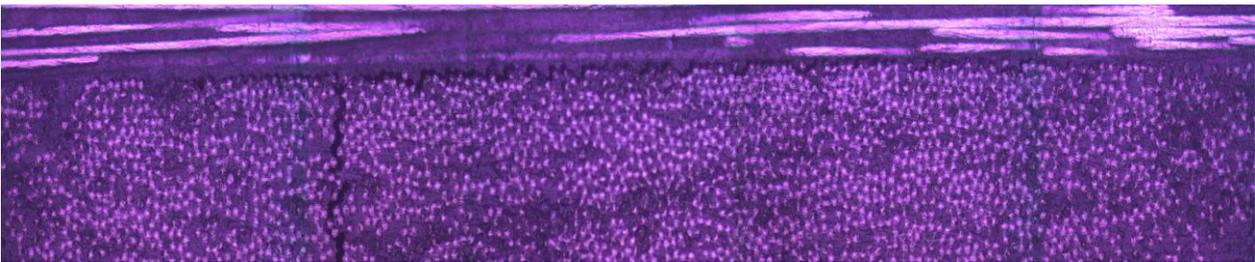


Figura 4.30.- Fotocomposición de la probeta 16-21, interfase 90°-0° izquierda.



Figura 4.31.- Fotocomposición de la probeta 16-21, grieta transversal en el espesor de 90°.

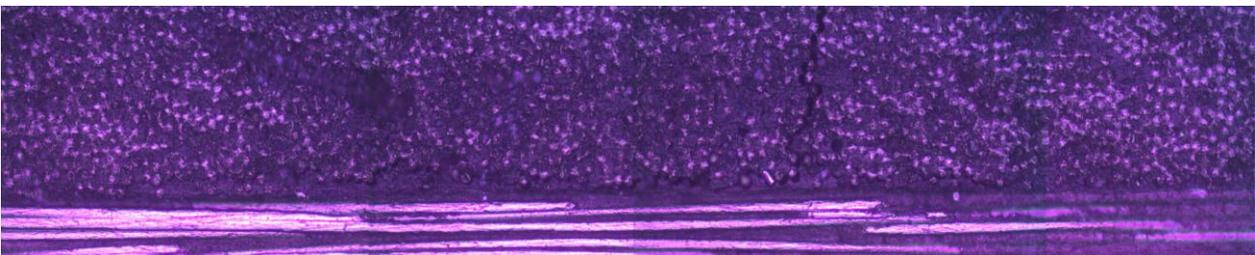


Figura 4.32.- Fotocomposición de la probeta 16-21, interfase 90°-0° derecha.

## 4.5 Laminado $[0_4,90_{16}]_s$

Con el laminado  $[0_4,90_{16}]_s$ , se hicieron los 5 ensayos correspondientes a los que se realizan para la caracterización del laminado. Los ensayos fueron asombrosos, puesto que las probetas quedaron destrozadas. Apareciendo en todas las probetas grietas y delaminación, y una rotura catastrófica en dos de ellas, probetas 32-4 y 32-5. En las figuras 4.33, 4.34, 4.35, 4.36, 4.37, 4.38 y 4.39, se muestran las probetas 32-1,2,3,4 y 5.



Figura 4.33.- Probeta 32-1.

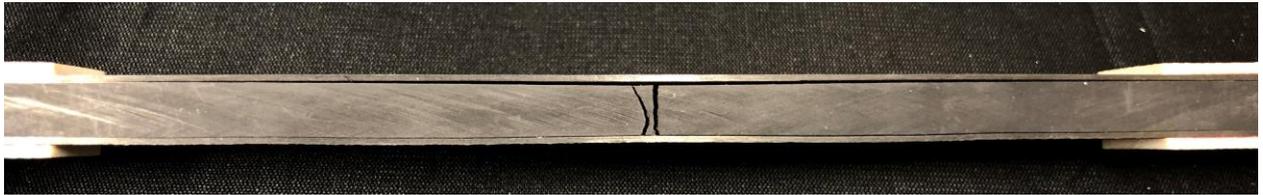


Figura 4.34.- Probeta 32-2.



Figura 4.35.- Probeta 32-3.1.



Figura 4.36.- Probeta 32-3.2.

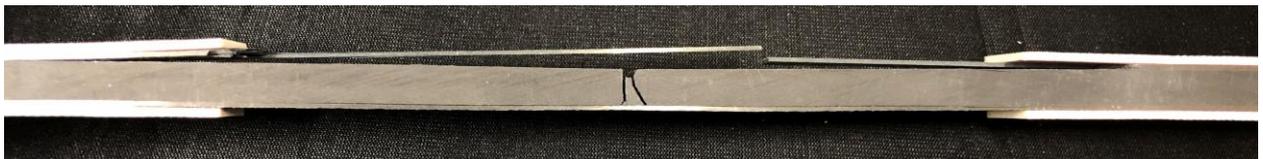


Figura 4.37.- Probeta 32-4.1.



Figura 4.38.- Probeta 32-4.2.



Figura 4.39.- Probeta 32-5.

Tras realizar estos ensayos y en base a los resultados experimentales que se pueden observar, se ha optado por realizar un estudio numérico que explique este fenómeno puesto que, no había sucedido en trabajos previos. El fin de este estudio, sería encontrar alguna explicación al hecho experimental. El capítulo 6, recoge todo este estudio numérico.

## 5 MATHEMATICAS

En este capítulo nos centramos en la aplicación de la Teoría General del Laminado implementada en un código desarrollada en un programa informático llamado *Mathematicas*. Dicho programa ha sido proporcionado por el grupo GERM. En el código se implementaba, aparte de la Teoría General del Laminado (apartado 5.1), todos los criterios por los que se rigen los materiales compuestos estudiados en el libro [1]. En este capítulo se modifican algunas variables y se suprimen otras, omitiendo los criterios que se emplean en el código inicial, que en el apartado 5.2, se explicará con detalle.

### 5.1 Teoría introductoria: TGL

El código está basado en la Teoría General de Laminados. Ésta consiste en encontrar la relación entre esfuerzos y deformaciones usando las hipótesis generales de placas delgadas (hipótesis de Kirchhoff). Se parte de la ecuación de comportamiento para la lámina que ocupa la posición  $k$  en el laminado:

$$\underline{\sigma}^k = \underline{\bar{Q}}^k \underline{\varepsilon}^k \quad (5.1)$$

Suponiendo que la adhesión entre las láminas es perfecta (desplazamientos continuos entre láminas), las hipótesis de Kirchhoff establecen que una línea perpendicular a la superficie media permanece perpendicular a la superficie media deformada, sin acortarse ni alargarse, de acuerdo con los ejes, implica:

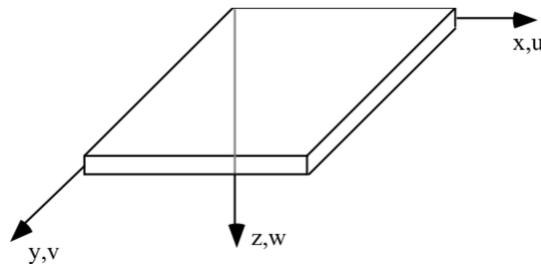


Figura 5.1.- Ejes de referencia.

$$\varepsilon_z = 0 \quad (5.2)$$

$$\gamma_{xz} = \gamma_{yz} = 0 \quad (5.3)$$

De esta forma, las configuraciones deformada e indeformada, quedan relacionadas como en la Fig.2:

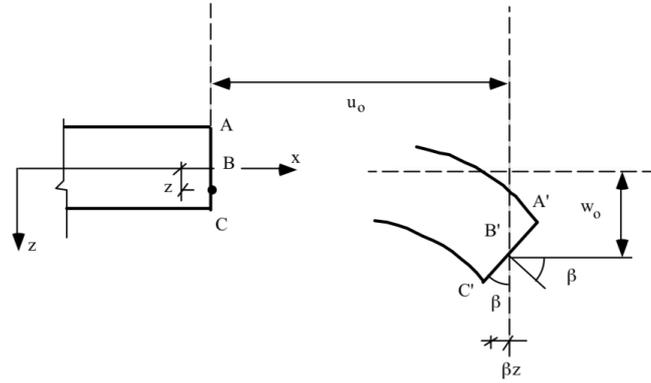


Figura 5.2.- Configuración deformada.

En esta configuración deformada, el desplazamiento de un punto genérico de coordenada  $z$ , según el eje  $x$  es:

$$u = u_0 - \beta z \quad (5.4)$$

Pero en la teoría de Kirchhoff-Love,

$$\beta = \frac{\partial w_0}{\partial x} \quad (5.5)$$

luego, quedaría:

$$u = u_0 - z \frac{\partial w_0}{\partial x} \quad (5.6)$$

Y análogamente para el eje  $y$ :

$$v = v_0 - z \frac{\partial w_0}{\partial y} \quad (5.7)$$

por lo que las deformaciones expresadas en forma vectorial:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} -\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ -\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ -2\frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} k_x^0 \\ k_y^0 \\ k_{xy}^0 \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

que implica la definición de  $\varepsilon_x^0$ ,  $\varepsilon_y^0$ ,  $\gamma_{xy}^0$ ,  $k_x^0$ ,  $k_y^0$ ,  $k_{xy}^0$ ; los tres primeros representan las deformaciones de laja (alargamientos y distorsiones) y los tres segundos las de placa (curvaturas de flexión y torsión).

La ley de comportamiento de una lámina k, quedaría entonces:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}^k = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}^k \begin{bmatrix} \varepsilon_x^o \\ \varepsilon_y^o \\ \gamma_{xy}^o \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} k_x^o \\ k_y^o \\ k_{xy}^o \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

donde z corresponde a coordenadas de la lámina k.

Sólo queda garantizada la continuidad en deformaciones, pero no en tensiones, ya que  $Q_{ij}$  puede ser diferente para cada lámina.

Introduciendo el concepto de esfuerzos internos como la resultante de tensiones, en forma de idéntica al de placas isótropas, éstos se definen como:

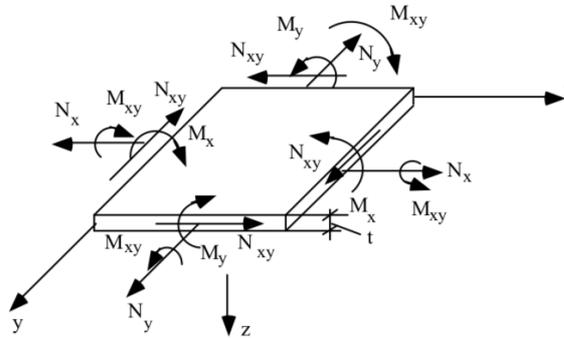


Figura 5.3.- Esfuerzos internos.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} dz = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}^k dz \quad (5.10)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} z dz = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}^k z dz \quad (5.11)$$

con la configuración de las láminas indicada en la Fig.4:

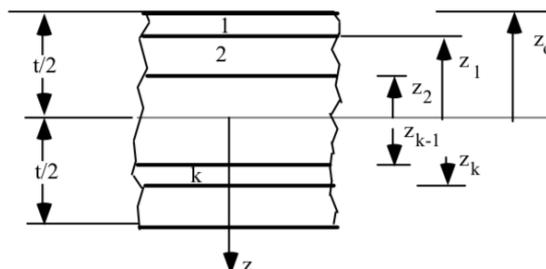


Figura 5.4.- Configuración de las láminas.

sustituyendo las ecuaciones anteriores (9) y (10) la ley  $\sigma - \varepsilon$  (8):

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^N \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}^k \left( \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \varepsilon_{xy}^0 \end{bmatrix} dz + \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} k_x^0 \\ k_y^0 \\ k_{xy}^0 \end{bmatrix} z dz \right) \quad (5.12)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^N \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}^k \left( \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \varepsilon_{xy}^0 \end{bmatrix} z dz + \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} k_x^0 \\ k_y^0 \\ k_{xy}^0 \end{bmatrix} z^2 dz \right) \quad (5.13)$$

Donde se supone que  $Q_{ij}$  es independiente de  $z$ , lo que es cierto a menos que la lámina tenga propiedades dependientes de la temperatura y haya un gradiente de temperatura en la lámina.

Dado que  $\varepsilon_x^0, \varepsilon_y^0, \gamma_{xy}^0, k_x^0, k_y^0, k_{xy}^0$  son independientes de  $z$  (valores asociados al plano medio):

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \varepsilon_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_x^0 \\ k_y^0 \\ k_{xy}^0 \end{bmatrix} \quad (5.14)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \varepsilon_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_x^0 \\ k_y^0 \\ k_{xy}^0 \end{bmatrix} \quad (5.15)$$

donde:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^N \bar{Q}_{ij}^k (z_k - z_{k-1}) \quad (5.16)$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \bar{Q}_{ij}^k (z_k^2 - z_{k-1}^2) \quad (5.17)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N \bar{Q}_{ij}^k (z_k^3 - z_{k-1}^3) \quad (5.18)$$

La presencia de  $B_{ij}$  implica acoplamiento entre efectos de laja y de placa, lo que puede en algunos casos producir configuraciones deformadas, aparentemente no previstas (solicitar con  $N_x$  y aparecer deformaciones de placas).

Hasta ahora no se ha introducido en la ley de comportamiento el hecho de que la temperatura de funcionamiento puede no ser la temperatura de curado que se corresponde con la temperatura libre de tensiones. En caso de que no coincidan, las deformaciones totales se pueden poner en la forma:

$$\varepsilon_i = S_{ij}\sigma_j + \alpha_i\Delta T \quad i,j=1,2\dots6 \quad (5.19)$$

donde  $\alpha_i$  para  $i>3$  vale cero.

La relación inversa se puede poner en la forma:

$$\sigma_i = C_{ij}(\varepsilon_j - \alpha_j\Delta T) \quad i,j=1,2\dots6 \quad (5.20)$$

$\Delta T =$  Temperatura de carga- Temperatura de curado

Expresando la ley de comportamiento termoelástica en ejes no principales, para una lámina cualquiera k:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}^k = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}^k \begin{bmatrix} \varepsilon_x - \alpha_x\Delta T \\ \varepsilon_y - \alpha_y\Delta T \\ \gamma_{xy} - \alpha_{xy}\Delta T \end{bmatrix}^k \quad (5.21)$$

donde  $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_{xy}$ :

$$\alpha_x = \alpha_1(\cos \theta)^2 + \alpha_2(\sin \theta)^2 \quad (5.22)$$

$$\alpha_y = \alpha_1(\sin \theta)^2 + \alpha_2(\cos \theta)^2 \quad (5.23)$$

$$\alpha_{xy} = 2(\alpha_1 \sin \theta \cos \theta - \alpha_2 \sin \theta \cos \theta) \quad (5.24)$$

Introduciendo la ley de comportamiento (5.21) en la expresión de los esfuerzos (5.10), se obtendría ahora:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \varepsilon_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_x^0 \\ k_y^0 \\ k_{xy}^0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} N_x^T \\ N_y^T \\ N_{xy}^T \end{bmatrix} \quad (5.25)$$

donde  $A_{ij}$  y  $B_{ij}$  tendría el mismo significado, y:

$$\begin{bmatrix} N_x^T \\ N_y^T \\ N_{xy}^T \end{bmatrix} = \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}^k \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_{xy} \end{bmatrix}^k \Delta T dz \quad (5.26)$$

y análogamente para los momentos (5.11):

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \varepsilon_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_x^0 \\ k_y^0 \\ k_{xy}^0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} M_x^T \\ M_y^T \\ M_{xy}^T \end{bmatrix} \quad (5.27)$$

donde  $D_{ij}$  tendría el mismo significado que anteriormente (5.18), y:

$$\begin{bmatrix} M_x^T \\ M_y^T \\ M_{xy}^T \end{bmatrix} = \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}^k \begin{bmatrix} \alpha_x \\ \alpha_y \\ \alpha_{xy} \end{bmatrix} \Delta T z dz \quad (5.28)$$

Naturalmente, los esfuerzos térmicos pueden ser incluidos como esfuerzos asimilables a los debidos a las cargas actuantes apareciendo unos esfuerzos equivalentes. Así:

$$\underline{N}^* = \underline{N} + \underline{N}^T = \underline{A}\varepsilon^0 + \underline{B}\varepsilon^0 \quad (5.29)$$

$$\underline{M}^* = \underline{M} + \underline{M}^T = \underline{B}\varepsilon^0 + \underline{D}\varepsilon^0 \quad (5.30)$$

que escrita en forma compacta (también la inversa):

$$\begin{bmatrix} \underline{N}^* \\ \underline{M}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A} & \underline{B} \\ \underline{B} & \underline{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon^0 \\ \varepsilon^0 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} \varepsilon^0 \\ \varepsilon^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{A}' & \underline{B}' \\ \underline{B}' & \underline{D}' \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \underline{N}^* \\ \underline{M}^* \end{bmatrix} \quad (5.31)$$

Una vez determinado  $\underline{M}^*$  y  $\underline{N}^*$  de las cargas exteriores y del estado térmico de trabajo, se calcula  $\underline{\varepsilon}^0$  y  $\underline{k}^0$  de la ecuación (5.31), y posteriormente para cada lámina  $k$  (aplicando la nueva ley de comportamiento termoelástica (5.21)), pudiéndose aplicar un criterio de fallo a dicho estado tensional para comprobar a resistencia.

Una vez presentada la Teoría General de Laminados, ésta es aplicada en el código que más adelante se va a desarrollar, el objetivo principal es conocida la carga que soporta un laminado cualquiera, obtener las tensiones soportadas por cada lámina.

En este proyecto, teniendo en cuenta que se van a tratar probetas que solo van a estar sometidas a  $N_x$ , el resto de los esfuerzos y momentos serán nulos. [1]

## 5.2 Código

El código desarrollado no es más que una modificación con el fin de obtener las tensiones del laminado según la Teoría General del Laminado (apartado 5.1). Este código tiene tres partes diferenciadas: datos de entradas (propiedades, constantes, variables...), el bloque de simulación de ensayo de tracción y los criterios de rotura para materiales compuestos [1].

En este caso se han realizado cambios en la simulación del ensayo para que el dato de entrada sea la carga a tracción a la que rompe la probeta y los datos de salida sean las distintas tensiones sufridas por cada lámina compuesta por el laminado.

En el código hay que introducir las diferentes propiedades de los laminados que intervienen, así como la orientación de las láminas, el número de láminas, espesores y si existe variaciones de temperatura que implicaría tensiones de curado. Todas estas variables están bien definidas en el código con un pequeño comentario incluyendo a que se refiere cada variable y con las unidades a las que hay que introducir los datos.

Una vez introducidos todos los parámetros necesarios para el cálculo de las tensiones, el código presentaría por pantalla tanto las tensiones, como las deformaciones y en el caso de que exista acción de la temperatura se presentan las tensiones y las deformaciones de curado.

Este código servirá en el capítulo 6 para comprobar que los resultados del modelo que se va a ejecutar en el programa basado en el Método de los Elementos de Contorno (BEM) coincide con los resultados obtenidos por la TGL

El código se encuentra en el Anexo A.

# 6 MODELOS NUMÉRICOS PARA SIMULAR EL COMPORTAMIENTO DE LOS LAMINADOS

## 6.1 Identificación del problema

Los resultados experimentales encontrados en los ensayos correspondientes a los laminados con  $n = 16$  y  $n = 32$  requieren de un estudio específico.

Así, en el caso del laminado correspondiente a  $n = 16$  se observaban daños indicativos de delaminación entre las láminas de  $0^\circ$  y  $90^\circ$  asociados a la cercanía de una grieta transversal a la interfase  $0^\circ$ - $90^\circ$  y en todo caso aparecían, como es habitual en laminados  $[0,90n]_S$ , múltiples grietas transversales, todas ellas, en menor o mayor medida, con el daño de delaminación asociado.

Ahora bien, en el caso del laminado correspondiente a  $n = 32$ , la aparición de la primera grieta transversal conllevaba la aparición de un daño de delaminación de carácter catastrófico que implicaba la completa separación de las láminas de  $0^\circ$  y  $90^\circ$  e impedía la aparición de sucesivas grietas transversales.

Las razones de esta diferencia cualitativa deben estar gobernada por algún fenómeno asociado a la interfase entre las láminas de  $0^\circ$  y  $90^\circ$  que en este apartado se pretende estudiar.

Así, en primer lugar, en el apartado 6.3 se va a estudiar cómo la aparición del efecto Cook-Gordon (la detención de la grieta transversal cuando se aproxima a la interfase  $0^\circ$ - $90^\circ$ , al ponerse de manifiesto la presencia de un material, lámina de  $0$  grados, de una rigidez muy superior a la del material, lámina de  $90$  grados, en que la grieta se está propagando), se ve afectado por el problema en estudio. En este sentido, lo que se pretende es ver cómo las tensiones normales y tangenciales a la interfase entre las láminas de  $0$  y  $90$  grados se ven afectadas, en valor y en extensión a lo largo de la interfase, por el espesor de la lámina de  $90$  grados, es decir por el valor de  $n$ .

En segundo lugar, apartado 6.4 se va a estudiar la caracterización de un posible daño de delaminación entre las láminas de  $0$  y  $90$  grados, en función del espesor de la lámina de  $90$  grados. Para ello se realizará un modelo mesomecánico en el que ambas láminas se representan como sólidos homogéneos, lo que hace que el daño, la grieta de delaminación, aparezca como una grieta entre materiales disimilares, siendo necesario el uso de la Mecánica de la Fractura de Grietas de interfase.

## 6.2 Introducción al BEM

La situación bajo consideración en los ensayos de laboratorio se va a simular, como es habitual, por un modelo plano de tensión plana, dado que esa es la situación que aparece en el plano de observación durante el ensayo, en el laboratorio.

La naturaleza del problema a estudiar, en relación con las dos cuestiones explicadas en el apartado anterior, requiere de la determinación precisa de tensiones y desplazamientos en el entorno de fondos de grieta entre materiales similares (grieta transversal) y disimilares (daño o grieta de delaminación), siempre en el contorno

del problema bajo estudio. Ello conduce a la elección de Método de los Elementos de Contorno (Boundary Element Method: BEM) de cuyas características generales pueden verse en París y Cañas [3].

El problema bajo consideración en este trabajo ya ha sido, en otro contexto, usado en un estudio anterior de París et al [4, 5]. Se usará el mismo programa, requiriéndose sólo la discretización de los contornos de las láminas de 0° y 90° involucradas en el modelo. El programa permite, mediante un procedimiento incremental-iterativo (dependiendo del problema) que se generen las separaciones entre los labios de la grieta, así como, en su caso, zonas de contacto entre dichos labios.

En este estudio las láminas de 0° y 90° se representan mediante materiales homogéneos equivalentes, la de 90° con características isotrópicas en el plano de representación en el modelo y la de 0° con características ortótropas. Se entiende que esta representación debe poder arrojar luz sobre el objeto de estudio de este capítulo, ya revisado en el apartado 6.1, sin necesidad de recurrir a modelos no homogéneos, con representación de las fases fibra y matriz.

Antes de comenzar los dos estudios de trabajo, es decir, los modelos BEM tanto del daño transversal como del daño de delaminación en los capítulos 6.3 y 6.4 respectivamente, se va a simular un modelo sin ningún daño, figura 6.1. Con este modelo se pretende comprobar que los resultados obtenidos por la TGL, capítulo 5, coinciden con los resultados obtenidos por el BEM.

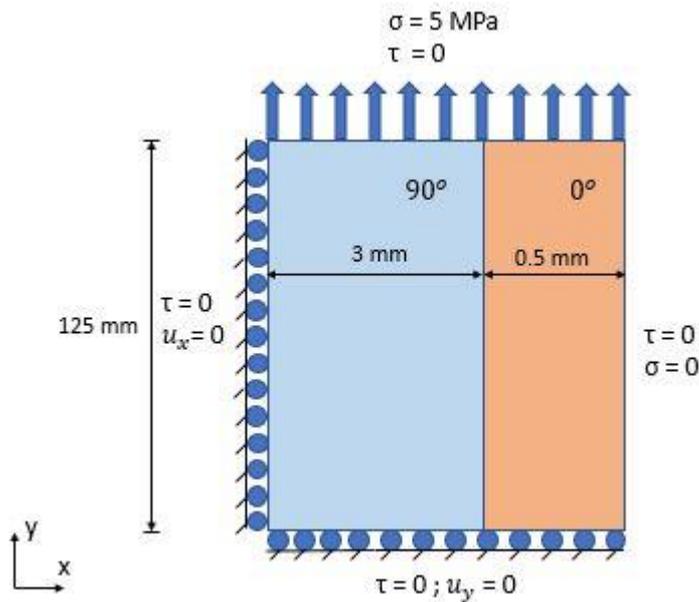


Figura 6.1.- Representación del modelo BEM sin daño.

La tabla 6.1 se hace una comparativa de los resultados en tensiones en la dirección y, es decir,  $T_y$ , que da cada uno de los programas.

Tabla 6.1.- Comparativa de las tensiones en BEM y TGL.

	BEM	TGL
Lámina 90°, $T_y$ [MPa]	1.6281	1.6259
Lámina 0°, $T_y$ [MPa]	25.2424	25.2445

Como se puede observar los resultados son prácticamente los mismos, por lo que se puede confirmar que ambos problemas están bien definidos y podemos proceder a simular los modelos objeto de estudio de este trabajo.

## 6.3 Modelo BEM del daño transversal

### 6.3.1 Descripción del modelo

En este apartado nos centramos en el estudio de los efectos que produce una grieta transversal en un modelo compuesto por un espesor  $t_{90}$  variable y un espesor fijo en las láminas de  $0^\circ$ . Con este modelo queremos simular de forma numérica lo que se realiza experimentalmente en el laboratorio cuando ensayamos una probeta a tracción.

Como podemos ver en la figura 6.2, se detalla el problema modelado con las condiciones de contorno que se han aplicado, tanto de simetría como en tensiones, así como las medidas anotadas. En la parte superior derecha las condiciones de tensión y desplazamiento que se indican corresponden con la simulación de las mordazas en el ensayo de tracción. Como se verá en los siguientes apartados, la influencia de esta simulación no influye en los resultados puesto que se cumple el Principio de Saint-Venant. Nótese que hay escalas diferentes en direcciones vertical y horizontal, así como un parámetro llamado CS que recorre la longitud de la interfase entre las láminas.

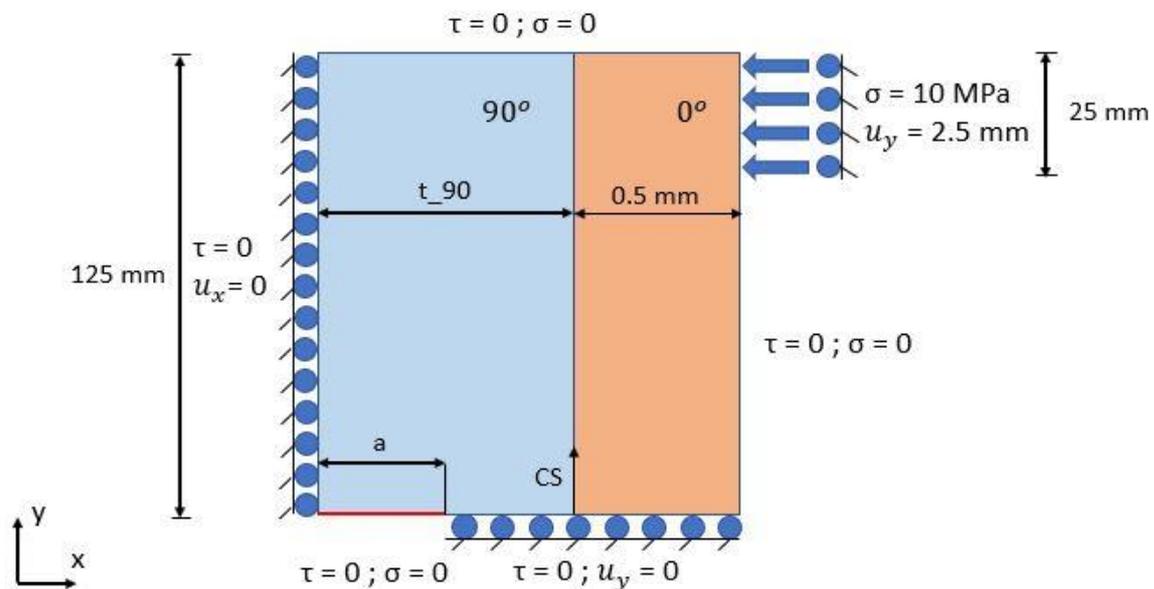


Figura 6.2- Representación del modelo BEM del daño transversal.

Las variables que aparecen en la figura anterior, es decir, 'a' y ' $t_{90}$ ' van a ir tomando diferentes valores a lo largo del apartado que se irán indicando cada vez que se utilicen.

En primer lugar, se han realizado dos estudios diferentes en el que cambia el valor  $t_{90}$ , siendo uno de ellos  $t_{90} = 3$  mm y otro de  $t_{90} = 0.5$  mm. En cada uno de estos problemas se ha realizado un análisis con diferentes tamaños de grieta, es decir, variando el parámetro 'a'.

Una vez, que se obtuvieron conclusiones a partir del análisis de los problemas comentados anteriormente, para poder comparar resultados se realizaron 3 modelos diferentes en los que cambiaba n, siendo ésta variable el número de láminas de  $90^\circ$ . En nuestro caso se utilizaron  $n = 8, 16, 32$  que corresponden con  $t_{90} = 0.75, 1.5, 3$  mm. El objetivo de este segundo trabajo es que para poder comparar los resultados entre cada modelo se han realizado 3 problemas por cada n, haciendo que cada tamaño de grieta correspondiera a una distancia fija entre el fondo de grieta y la interfase  $90^\circ-0^\circ$ . Para ello se van a realizar distancias fijas: 0.15, 0.10, 0.05 mm.

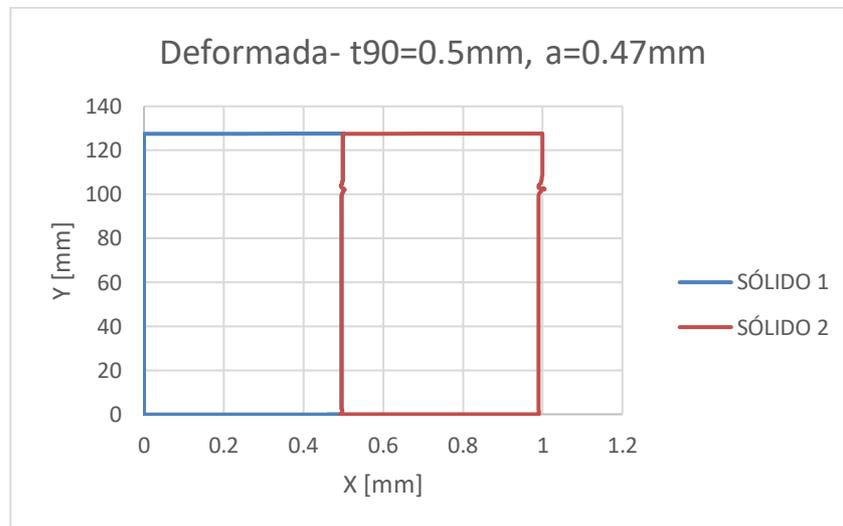
### 6.3.2 Resultados

Como se ha comentado en el apartado anterior, nos centramos en el efecto de una grieta transversal en el laminado de 90° haciendo dos estudios diferentes.

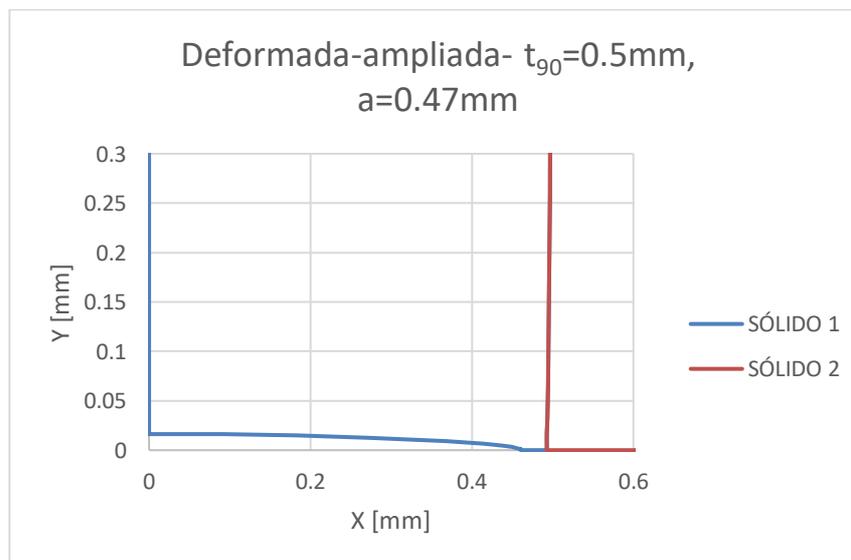
#### PRIMER ESTUDIO: $t_{90^\circ}$ fijo.

En primer lugar, vamos a analizar el problema modelado con  $t_{90^\circ} = 0.5$  mm. Las gráficas 6.1 y 6.2 corresponden con un ejemplo sacado del análisis en que el tamaño de grieta es  $a = 0.47$  mm. La primera de las gráficas es la deformada al completo del modelo con dicha grieta transversal. Puesto que no se aprecia bien la deformada, se ha ampliado para poder observar la grieta transversal abierta en la segunda imagen. Como se puede ver, aparecen una serie de perturbaciones en la deformada que correspondería con el efecto simulador de las mordazas, que como se ha explicado en el apartado 6.3.1, no influyen en los cálculos ya que se cumple el Principio de Saint-Venant.

Cuando en la leyenda de las gráficas que se van a incluir aparezca SÓLIDO 1 y SÓLIDO 2 se referirá al laminado de 90° y 0° respectivamente.

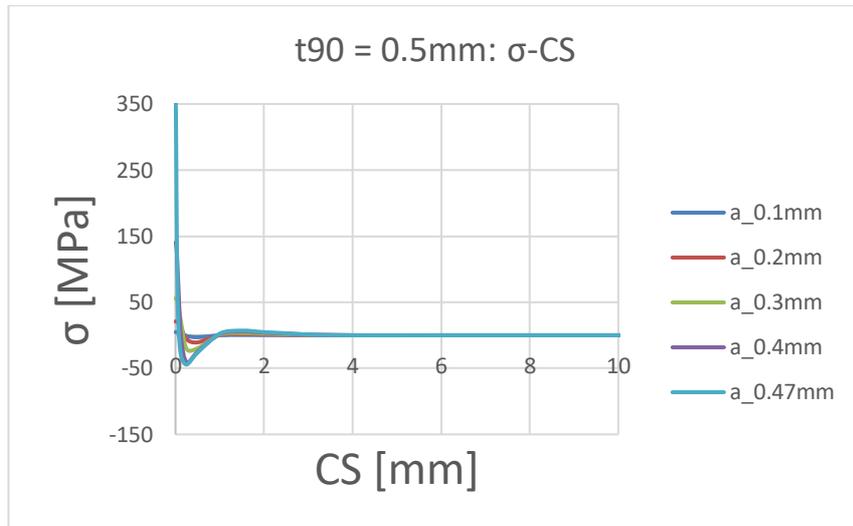


Gráfica 6.1.- Deformada del modelo  $t_{90^\circ} = 0.5$  mm y  $a = 0.47$  mm



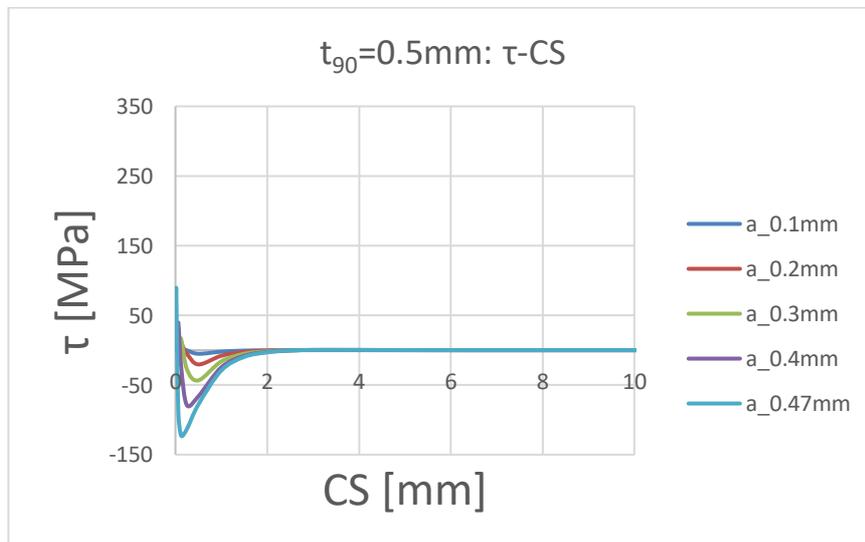
Gráfica 6.2.- Detalle de la grieta de la deformada  $t_{90^\circ} = 0.5$  mm y  $a = 0.47$  mm

A continuación, se representa la evolución de las tensiones normales, gráfica 6.3, y tangenciales, gráfica 6.4, conforme la grieta transversal se abre, a lo largo de la interfase entre  $90^{\circ}$ - $0^{\circ}$ .



Gráfica 6.3.-  $\sigma$ -CS del modelo  $t_{90} = 0.5$  mm.

En la gráfica 6.3 anterior se enfrenta la tensión normal frente a CS. Como se puede observar, la tensión normal es muy alta a tracción para un tamaño de grieta muy próximo a la interfase que decae, produciendo compresiones, que tiene un efecto en la interfase que se extiende tendiendo a cero en torno a los 5 mm respecto a la longitud total de la probeta ( $L = 125$  mm). Estas tensiones, tanto para tracción como para compresión aumentan cuando el fondo de la grieta transversal se acerca a la interfase.

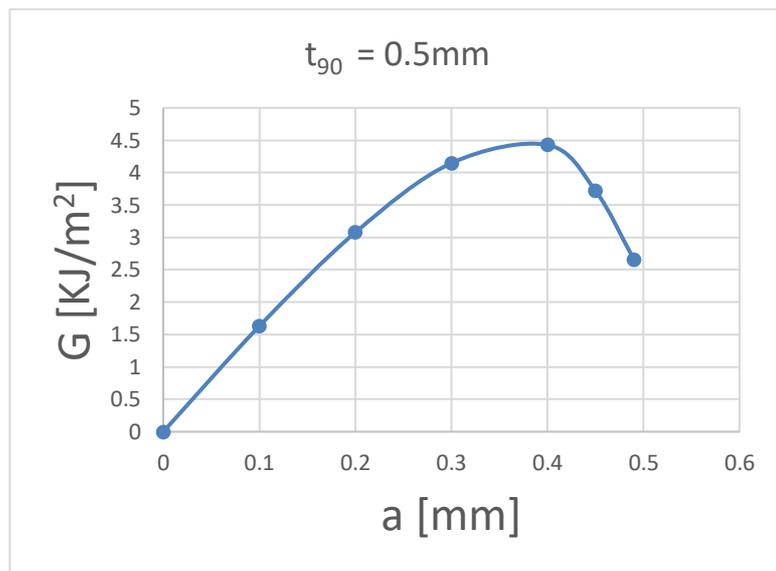


Gráfica 6.4.-  $\tau$ -CS del modelo  $t_{90} = 0.5$  mm.

En la gráfica 6.4, se han representado las tensiones tangenciales frente a CS, en ella podemos observar que inicialmente se producen tensiones positivas pero que decaen produciendo un valor negativo de  $\tau$  en los inicios de la interfase. Dichas tensiones tienen valores más altos conforme el fondo de grieta se va acercando a la interfase  $90^{\circ}$ - $0^{\circ}$ , como pasaba con  $\sigma$ . Como se ha comentado anteriormente, el efecto de estas tensiones tiende a cero estabilizándose y produciendo una zona afectada de unos 5 mm respecto a la longitud total de la probeta.

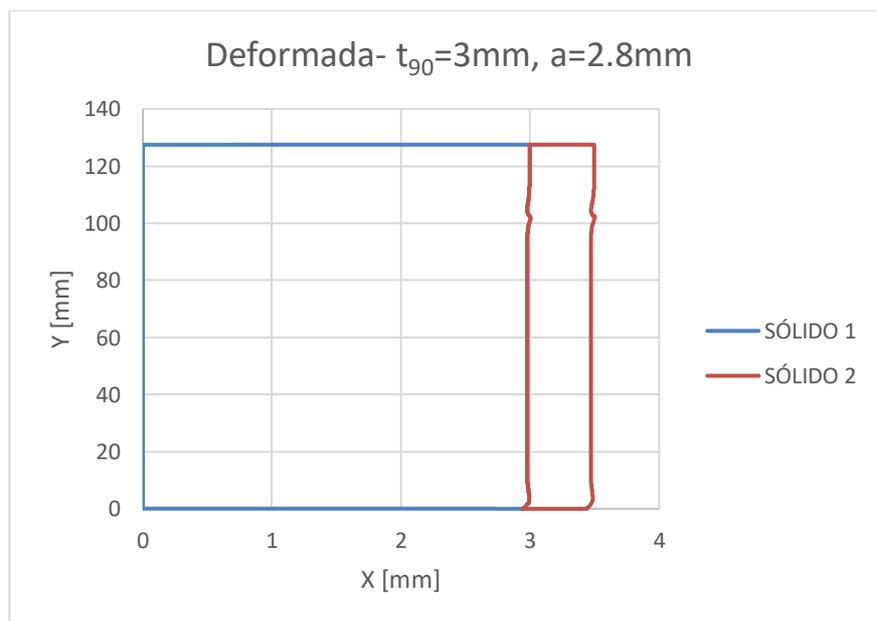
Una vez realizado el estudio de la influencia de las tensiones a lo largo de la interfase, se han obtenido resultados de los valores de  $G$  de la grieta transversal, este parámetro corresponde al índice de liberación de energía para el crecimiento de la grieta. En la gráfica se enfrenta  $G$  frente a 'a'. Para su cálculo se han tomado diferentes tamaños de grieta que se corresponden con los valores que se han utilizado para el análisis de tensiones comentado anteriormente.

Como podemos observar en la gráfica 6.5, conforme la grieta va creciendo la tasa de liberación de energía va aumentando hasta que el fondo de grieta se encuentra aproximadamente a 0.1 mm respecto la interfase y cae tendiendo a cero. Esto indicaría que en una vez que  $G$  alcance el valor de  $G_c$  se producirá un crecimiento inestable que se transforma en estable al acercarse a la interfase  $90^\circ-0^\circ$ , que requiere un incremento de carga para ser alcanzado.

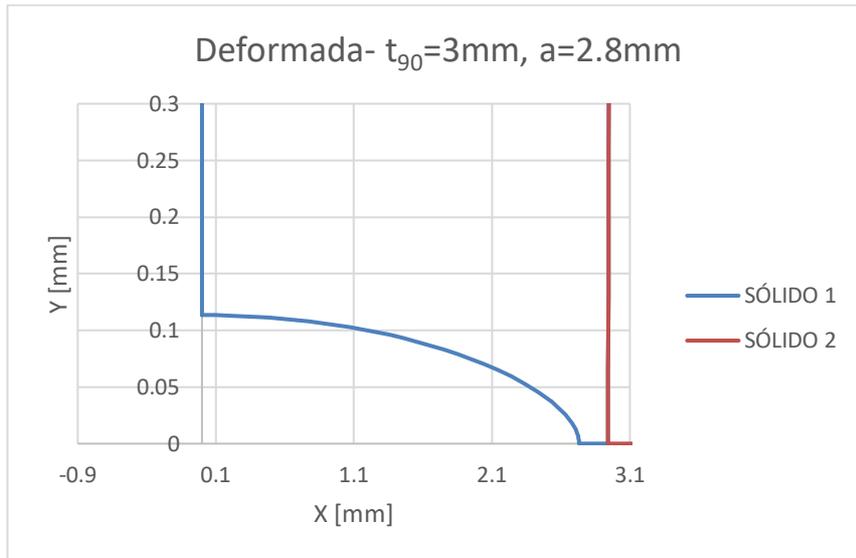


Gráfica 6.5.- G-a del modelo  $t_{90} = 0.5$  mm, grieta transversal.

A continuación, se presenta el mismo estudio para el caso de  $t_{90} = 3$  mm. Las siguientes dos gráficas, 6.6 y 6.7, se corresponden con la deformación del modelo completo y el detalle de la abertura de la grieta transversal respectivamente.

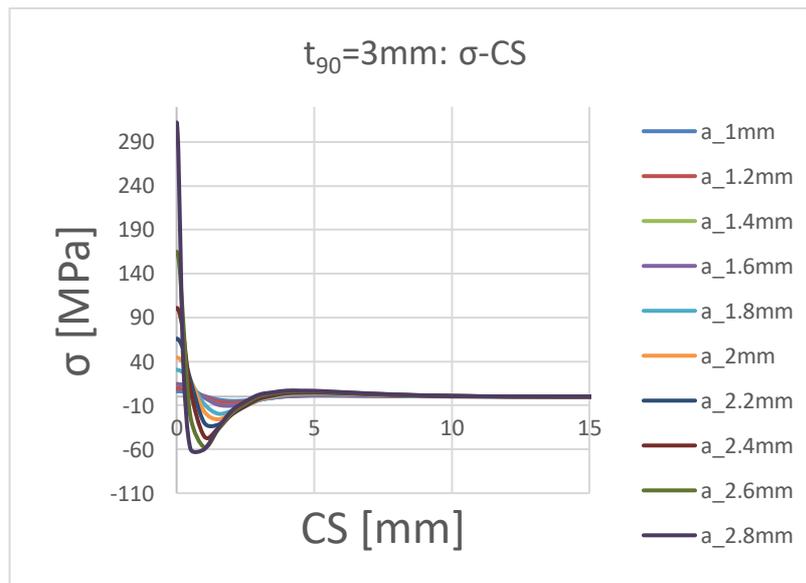


Gráfica 6.6.- Deformada del modelo  $t_{90} = 3$  mm y  $a = 2.8$  mm.



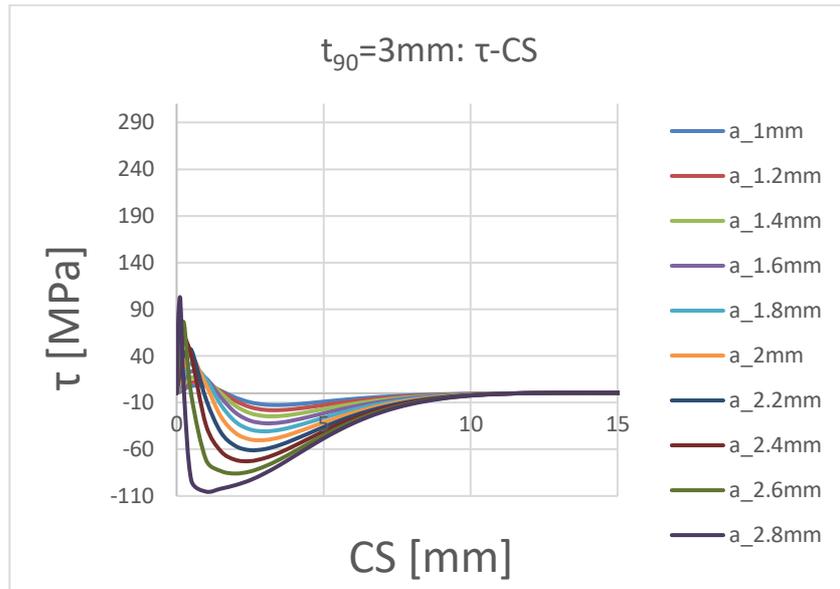
Gráfica 6.7.- Detalle de la grieta transversal de la deformada  $t_{90^\circ} = 3$  mm y  $a = 2.8$  mm.

El estudio de tensiones normales y tangenciales frente al parámetro CS se presenta a continuación.



Gráfica 6.8.-  $\sigma$ -CS del modelo  $t_{90^\circ} = 3$  mm.

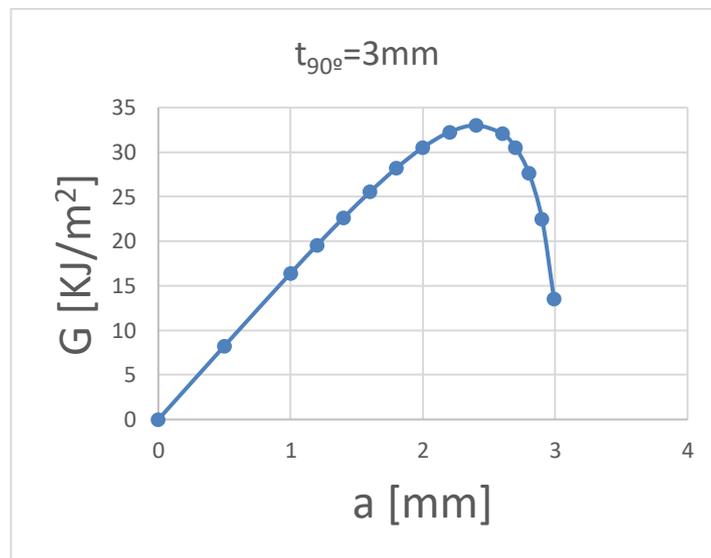
Como se puede observar en la gráfica 6.8, se representan las tensiones normales respecto a CS. De dicha gráfica podemos afirmar que, similarmente al caso anterior, a mayor tamaño de grieta transversal, es decir, cuando el fondo de grieta está acercándose a la interfase  $90^\circ-0^\circ$  se producen mayores tensiones normales, tanto de tracción inicialmente como de compresión subiendo de nuevo de forma levemente produciendo tensiones de tracción de un valor tan pequeño que se va estabilizando con CS tendiendo a cero. La zona afectada en la interfase se corresponde aproximadamente con unos 10 mm respecto a la longitud total de la probeta.



Gráfica 6.9.-  $\tau$ -CS del modelo  $t_{90^\circ} = 3$  mm.

Para las tensiones tangenciales, es decir, para la gráfica 6.9 anterior, se produce un análisis similar al de las tensiones normales explicado anteriormente. En este caso las tangenciales parten de cero aumentando en una extensión de CS muy pequeña, pero siendo el pico de tensión mayor cuanto mayor tamaño de grieta y cayendo a tensiones negativas, ampliando el efecto que provocan en la interfase mientras tienden a cero.

Más adelante se revisan las tensiones normales y tangenciales de forma más detallada para confirmar que se produce lo explicado anteriormente.

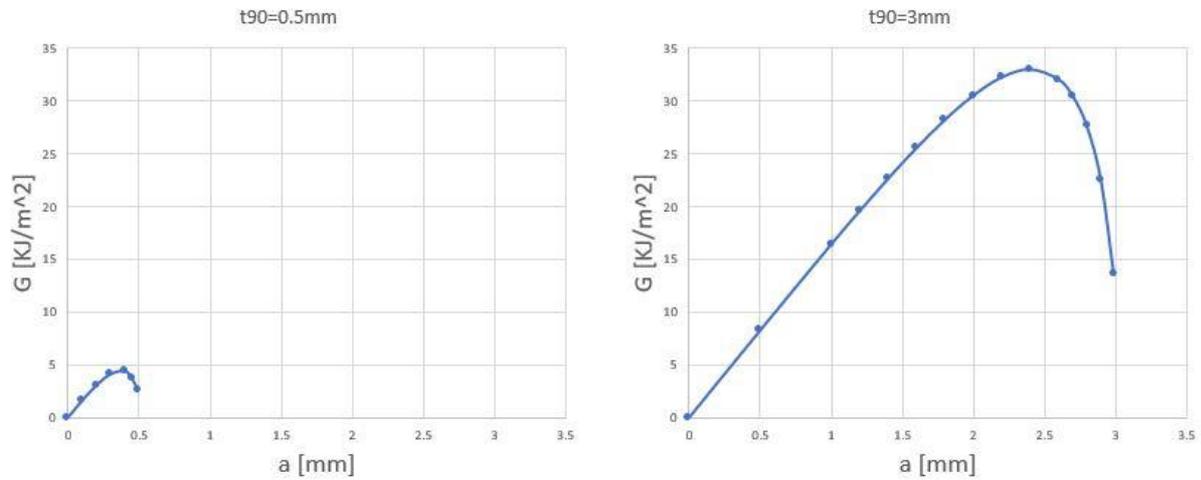


Gráfica 6.10.- G-a del modelo  $t_{90^\circ} = 3$  mm, grieta transversal.

Una vez más, se ha realizado el estudio de G en la grieta transversal para el  $t_{90^\circ} = 3$  mm. Como se puede observar, gráfica 6.10, cuando el fondo de grieta va acercándose a la interfase hasta una distancia aproximada de unos 0.57 mm respecto a esta, la G va aumentando, pero decae hasta cero cuando la grieta alcanza el valor de  $t_{90^\circ} = 3$  mm.

En resumen y comparando los resultados obtenidos podemos llegar a la conclusión de que cuando aumenta el espesor de  $t_{90^\circ}$  o el valor de n, siendo éste el número de láminas de  $90^\circ$ , van aumentando las tensiones tanto normales como tangenciales, así como el efecto que provocan en la interfase, aumentando la zona afectada en ésta. Así mismo, dentro de cada  $t_{90^\circ}$  como ya se ha descrito, conforme la grieta va creciendo las tensiones y el efecto provocado en la interfase aumentan también. Además, podemos afirmar según los datos numéricos obtenidos en el cálculo de G, que a mayor espesor los valores de ésta son mucho más altos. Para comprobar

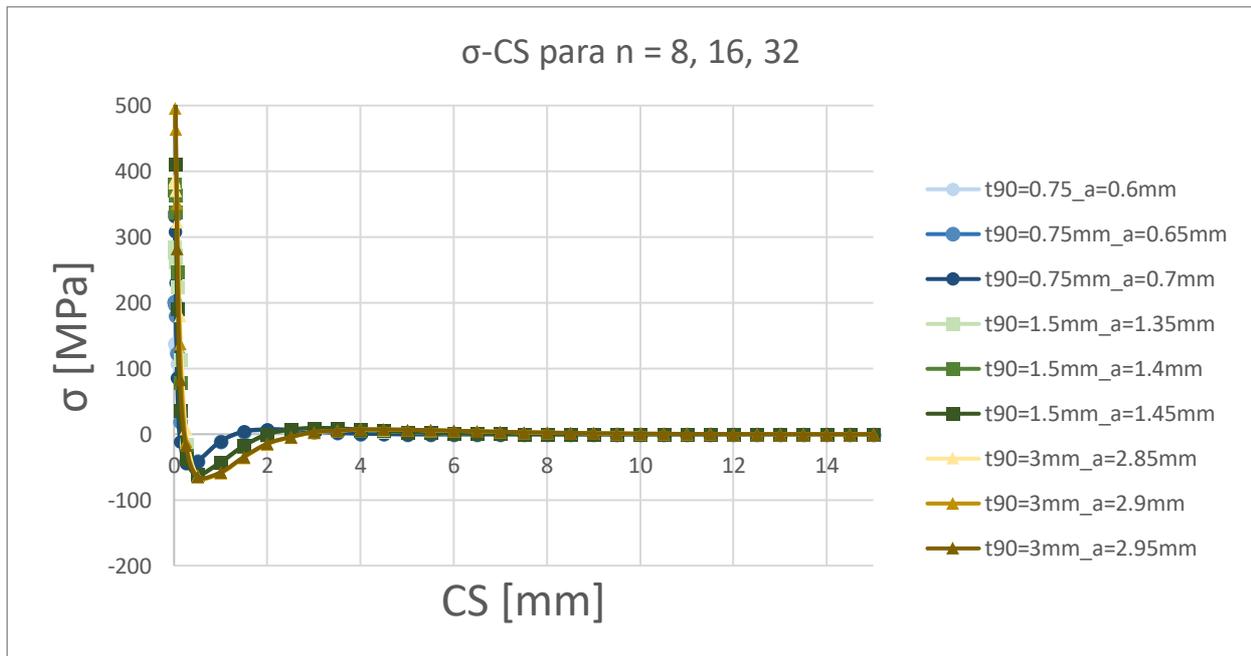
esta afirmación podemos observar las siguientes gráficas 6.11.



Gráfica 6.11.- G-a comparativa entre  $t_{90} = 0.5$  y 3 mm.

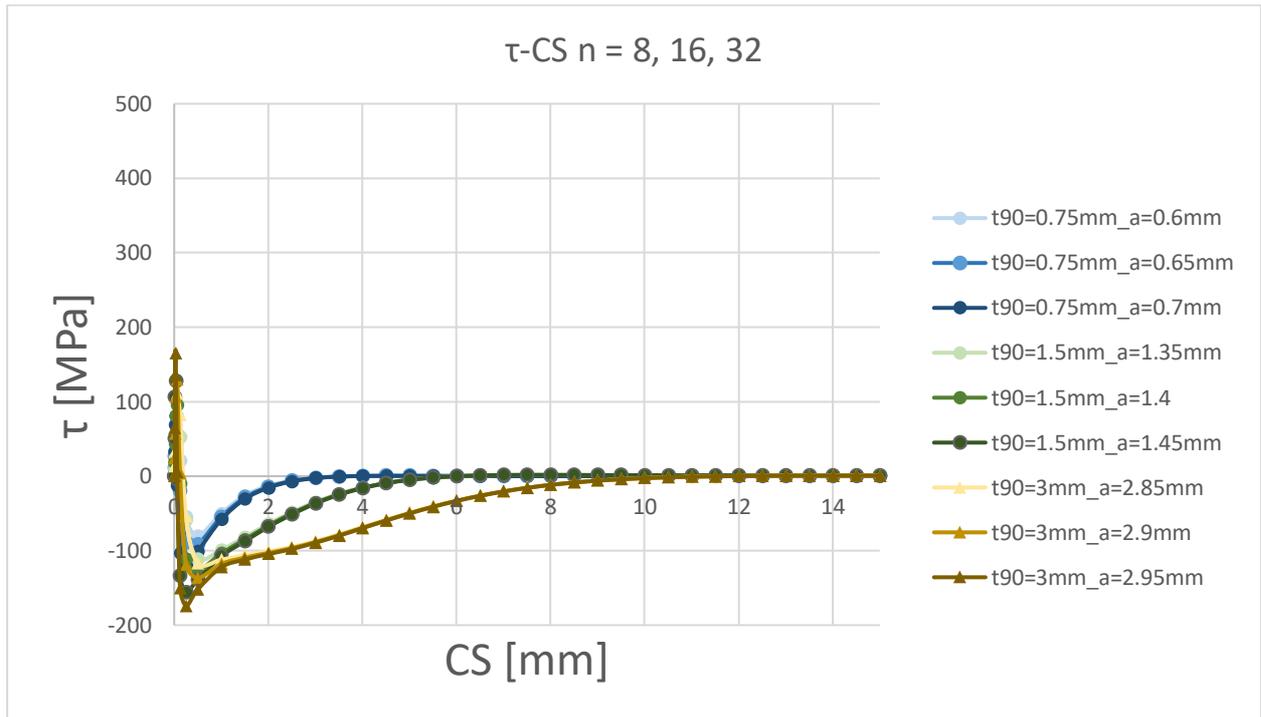
**SEGUNDO ESTUDIO: influencia de  $t_{90}$ .**

Para corroborar lo comentado y para tener mayor exactitud a la hora de comparar los resultados, se han analizado tres modelos para diferentes valores de n. Estos problemas van a usarse posteriormente para el estudio de la grieta en la interfase. Se han optado por  $n=8,16,32$  que corresponden respectivamente a  $t_{90}=0.75, 1.5, 3$  mm.



Gráfica 6.12.-  $\sigma$ -CS comparativa entre  $n = 8, 16, 32$ .

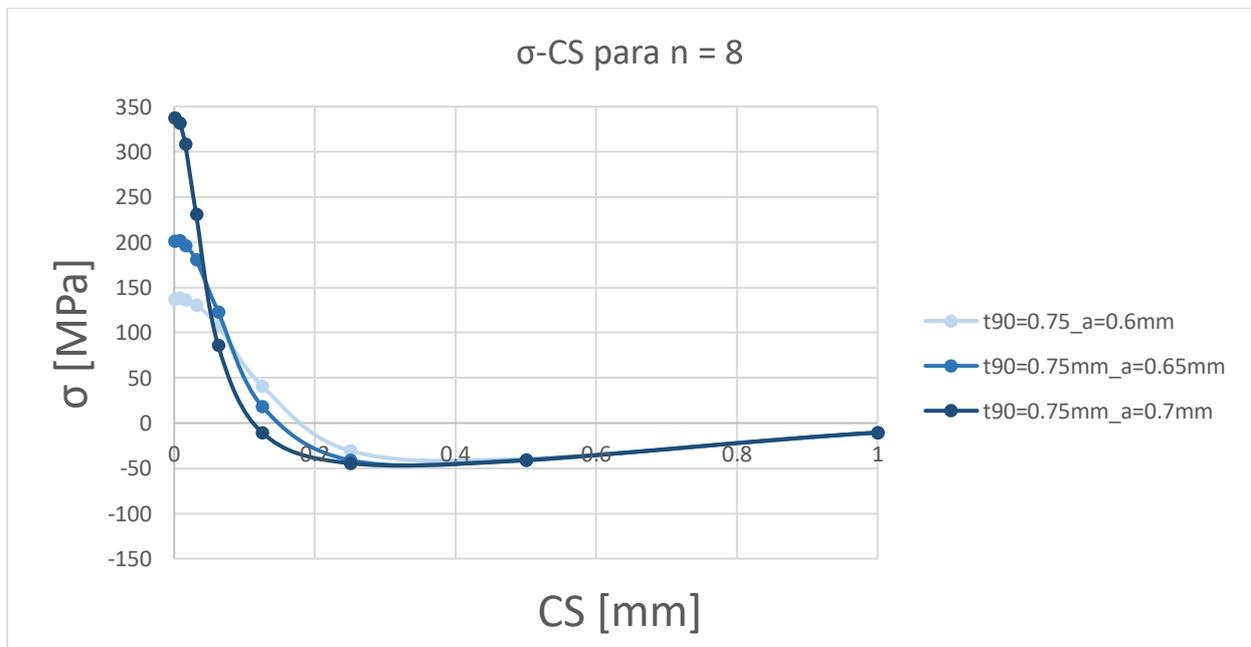
La gráfica 6.12, corresponde con la tensión normal frente a CS, en ella se comparan los 3 problemas de distinto espesor de  $t_{90}$ , junto con sus 3 tamaños de grietas, correspondientes a una distancia fija desde la interfase hasta el fondo de grieta, Como se puede observar, las tensiones normales ya sean de tracción como de compresión son mayores al aumentar  $t_{90}$ .



Gráfica 6.13.-  $\tau$ - CS comparativa entre  $n = 8, 16, 32$ .

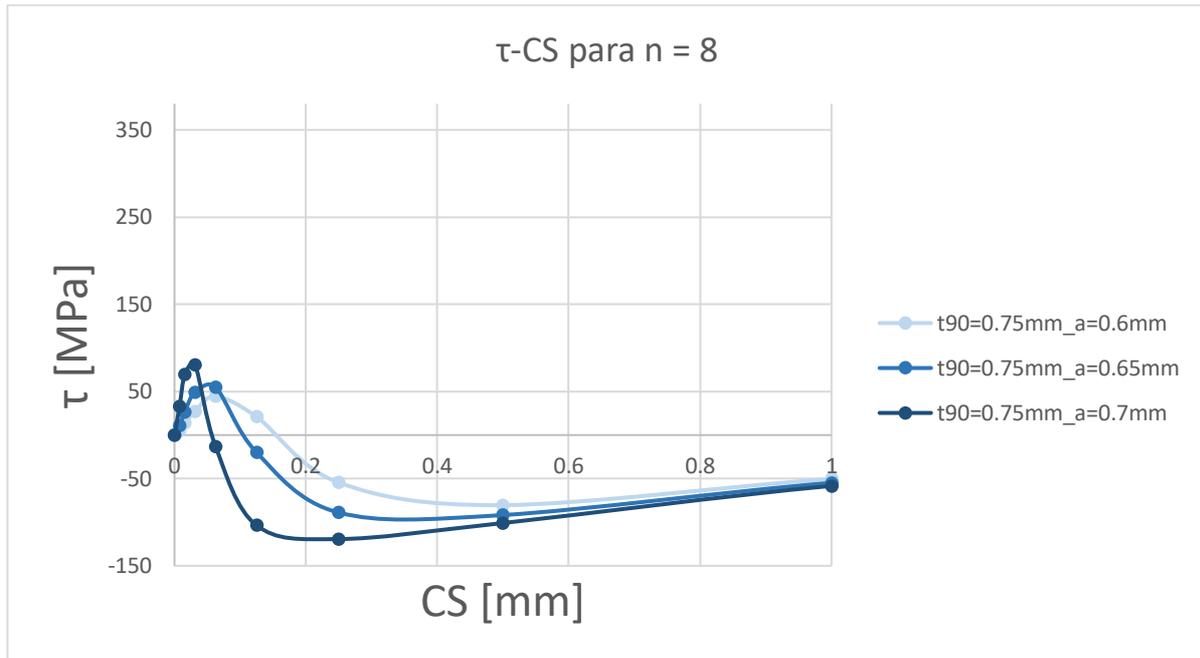
En la gráfica 6.13, se representan las tensiones tangenciales frente a CS para las diferentes  $n$  y para cada una de ellas, los diferentes tamaños de grieta. Dicha gráfica presenta el comportamiento de las tensiones tangenciales en la interfase  $90^\circ-0^\circ$ .

A continuación, se van a representar las gráficas para las diferentes  $n$  de manera individual, tanto las tensiones normales como las tensiones tangenciales frente al parámetro CS.



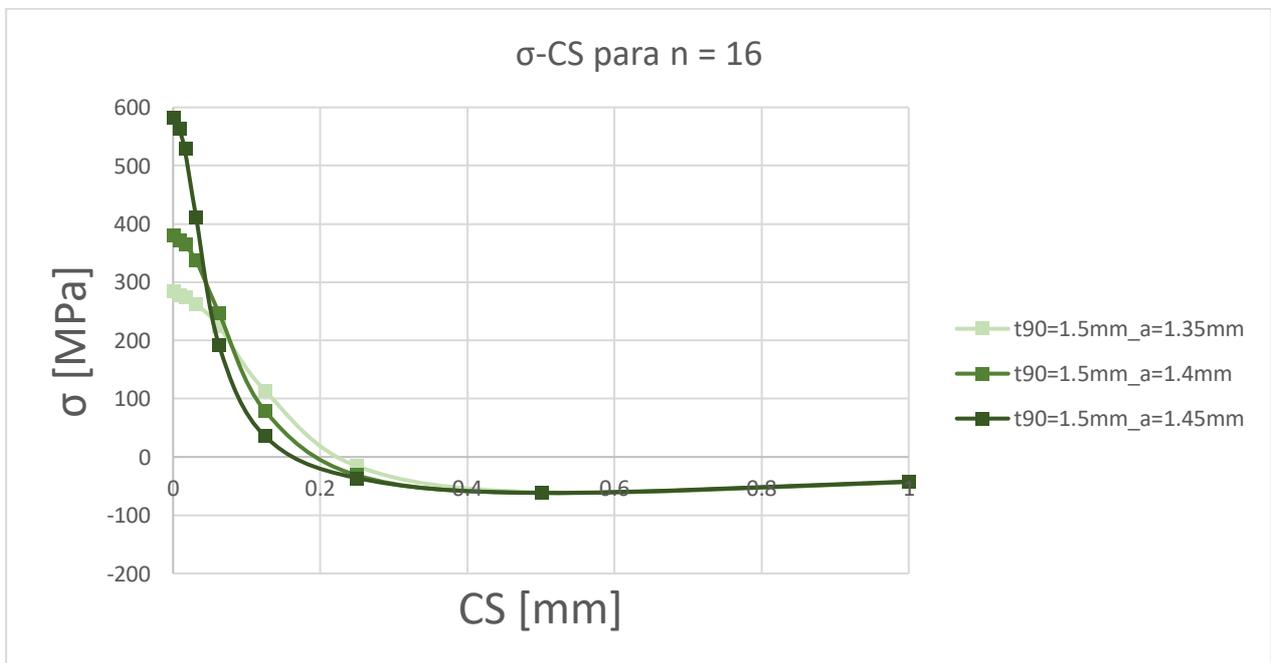
Gráfica 6.14.-  $\sigma$ -CS  $n = 8$ .

En la gráfica 6.14 se observa que cuando el fondo de grieta se va aproximando a la interfase  $90^\circ-0^\circ$ , las tensiones, tanto de tracción como de compresión, y la pendiente son mayores. Lo mismo sucedería con las tensiones tangenciales, que se representan en la gráfica 6.15.

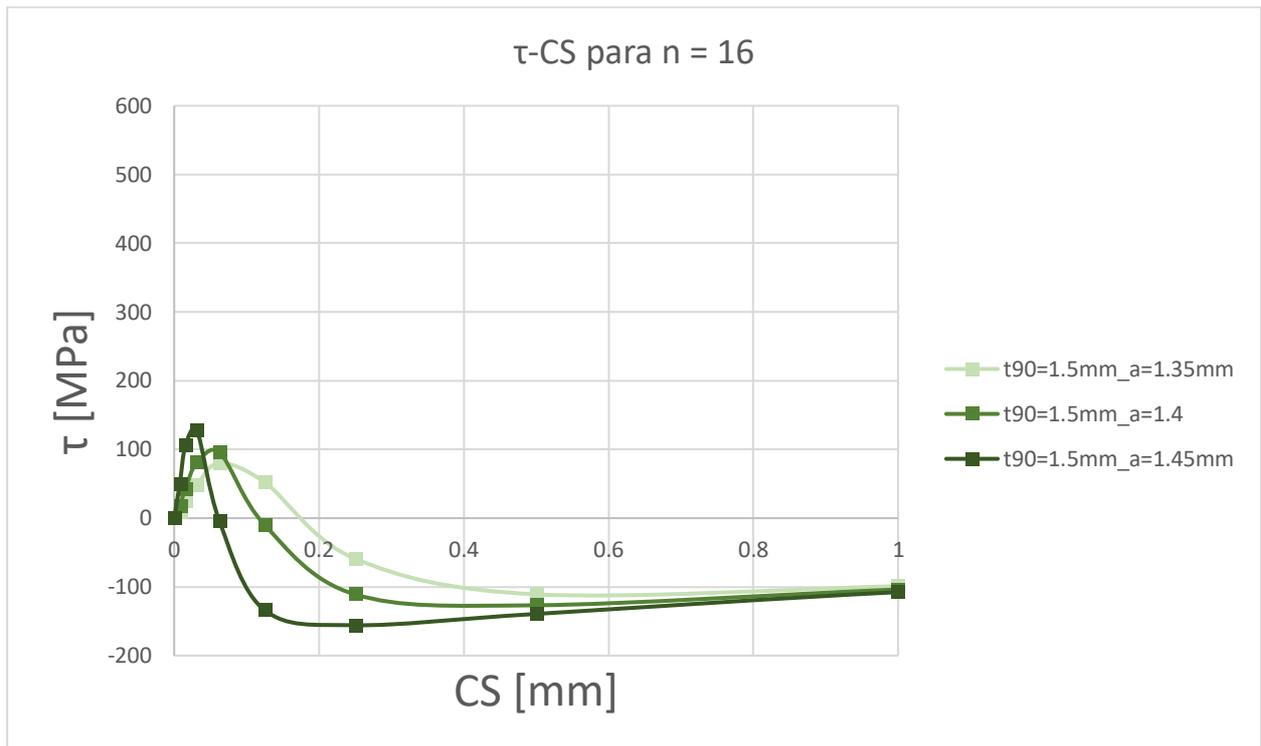


Gráfica 6.15.- τ-CS entre n = 8.

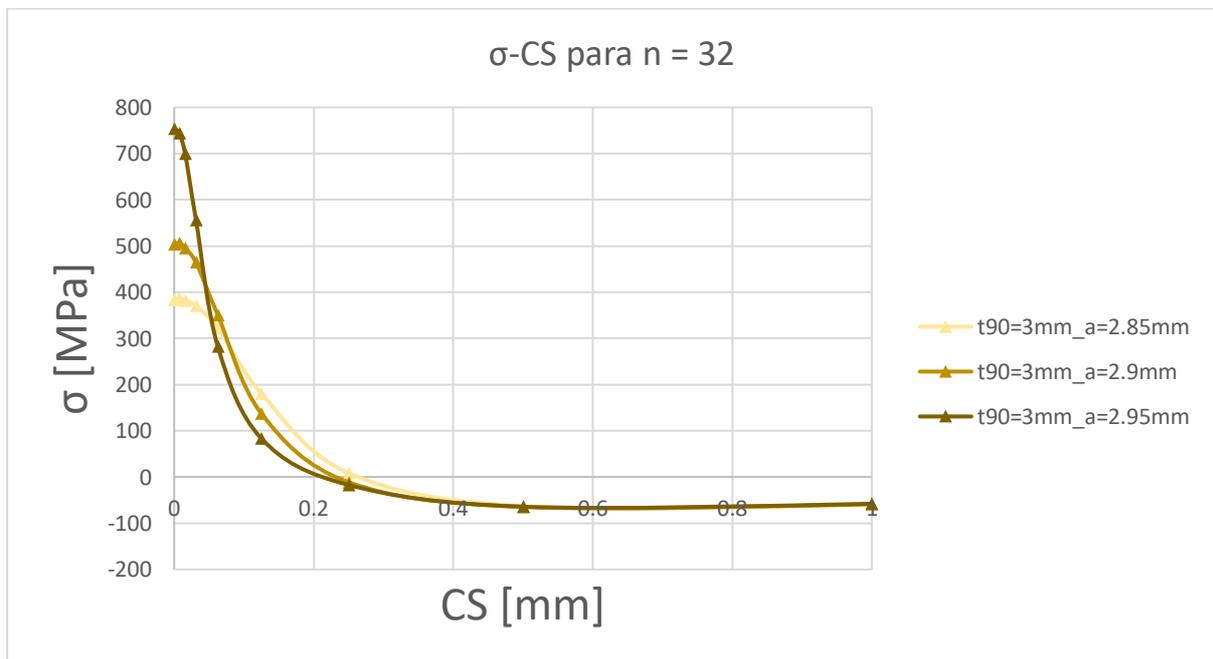
Lo mismo sucede con n = 16, es decir, las tensiones son mayores conforme el fondo de grieta se aproxima a la interfase 90°-0°. Se puede observar en las gráficas 6.16 y 6.17.



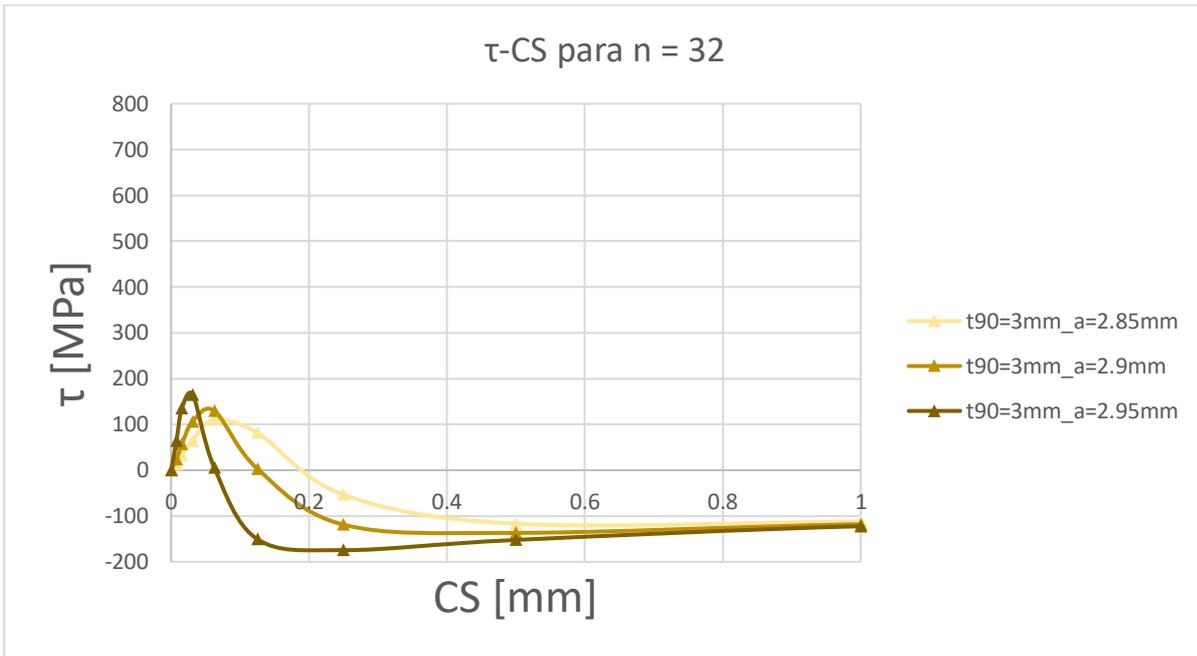
Gráfica 6.16.- σ-CS n = 16.



Gráfica 6.17.- τ-CS n = 16.



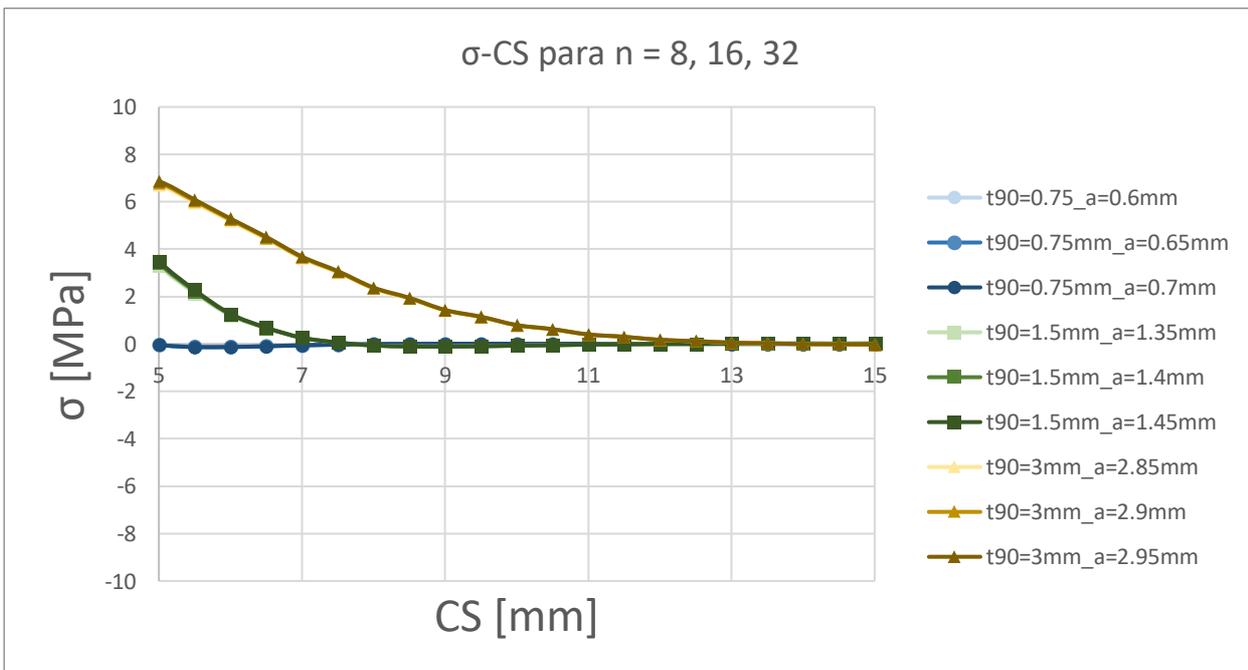
Gráfica 6.18.- σ-CS n = 32.



Gráfica 6.19.- τ-CS n = 32.

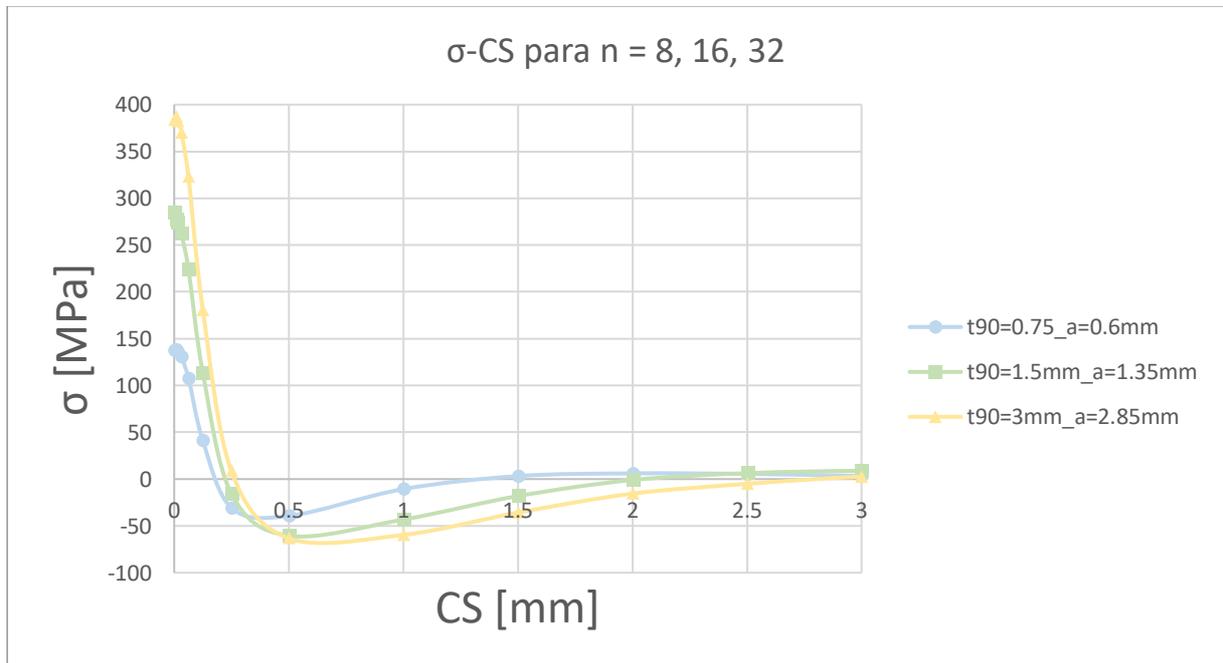
Para n = 32 no hay excepción, como se muestra en las gráficas 6.18 y 6.19, correspondientes a la tensión normal frente a CS y a la tensión tangencial frente a CS, respectivamente, las tensiones son mayores conforme la grieta transversal se va abriendo y se va acercando a la interfase 90°-0°.

A continuación, en la gráfica 6.20, se representa en detalle la gráfica 6.12 para poder observar que la zona afectada por las tensiones en la interfase se extiende a medida que t<sub>90</sub> crece.

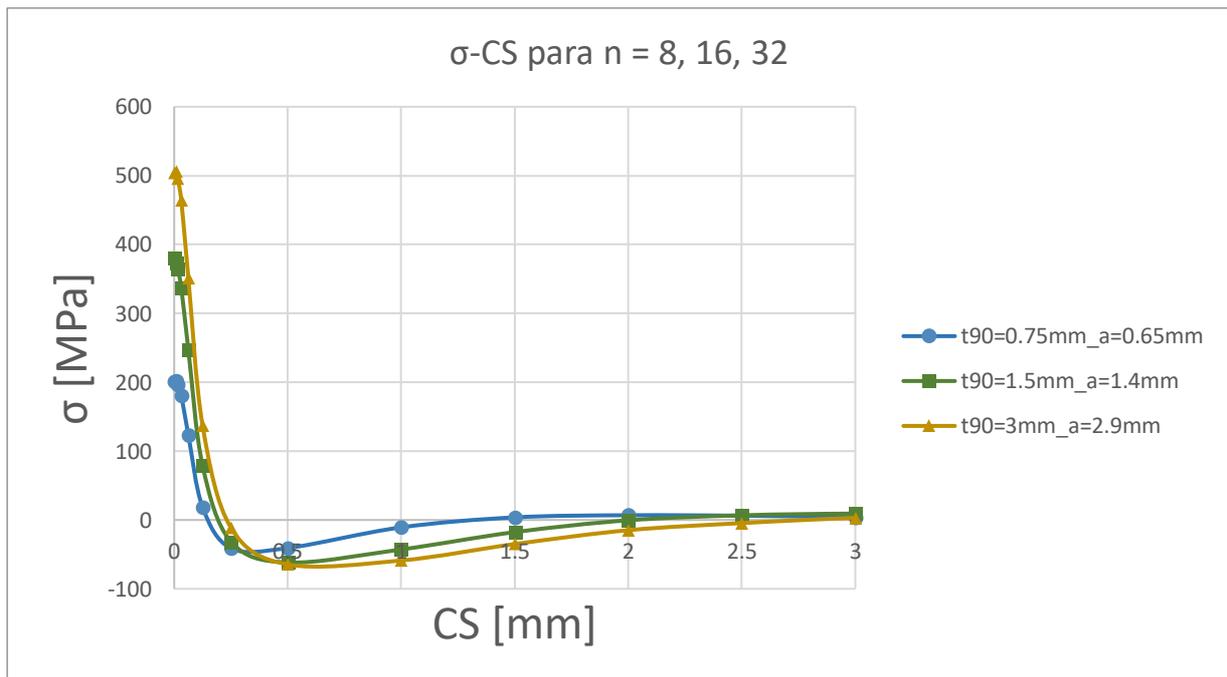


Gráfica 6.20.- σ-CS detalle de la comparativa n = 8, 16, 32 de la gráfica 6.12.

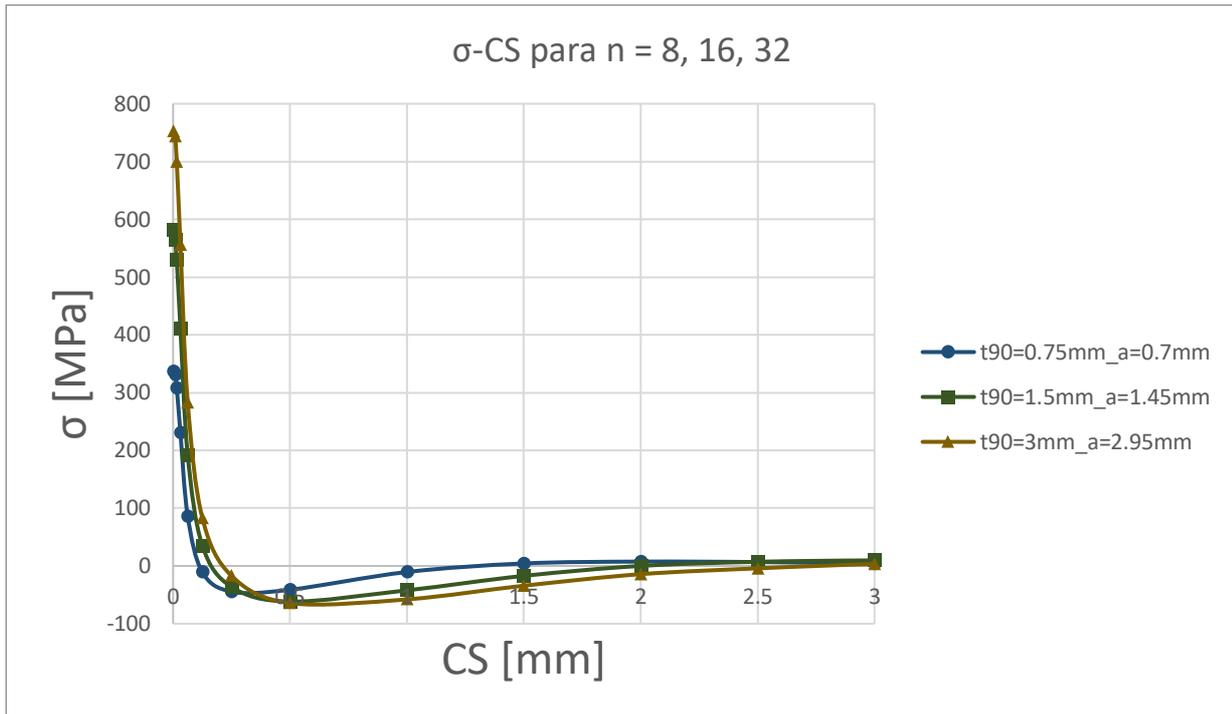
Ahora se van a representar las gráficas de  $\sigma$ -CS y  $\tau$ -CS para las diferentes  $n$ , los tamaños de grieta correspondientes con la distancia fija asignada entre el fondo de grieta y la interfase  $90^\circ$ - $0^\circ$ .



Gráfica 6.21.-  $\sigma$ -CS distancia fija de 0.15 mm.

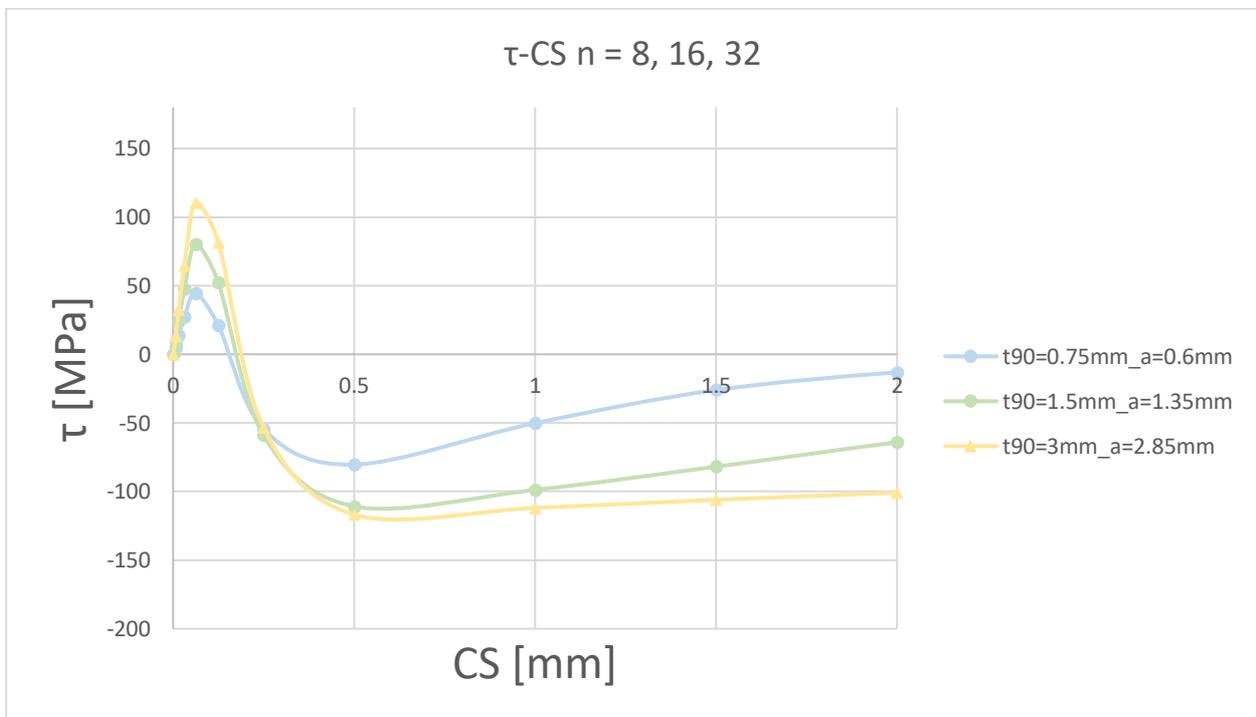


Gráfica 6.22.-  $\sigma$ -CS distancia fija de 0.1 mm.

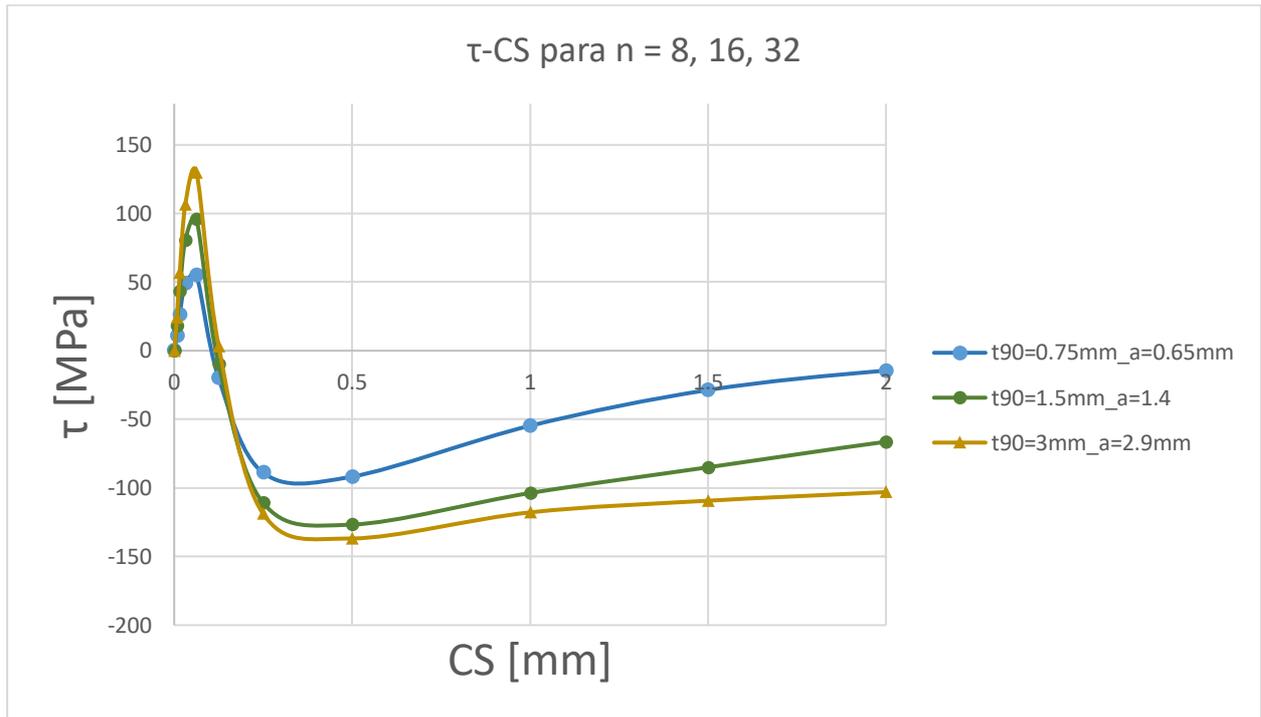


Gráfica 6.23.-  $\sigma$ -CS distancia fija de 0.05 mm.

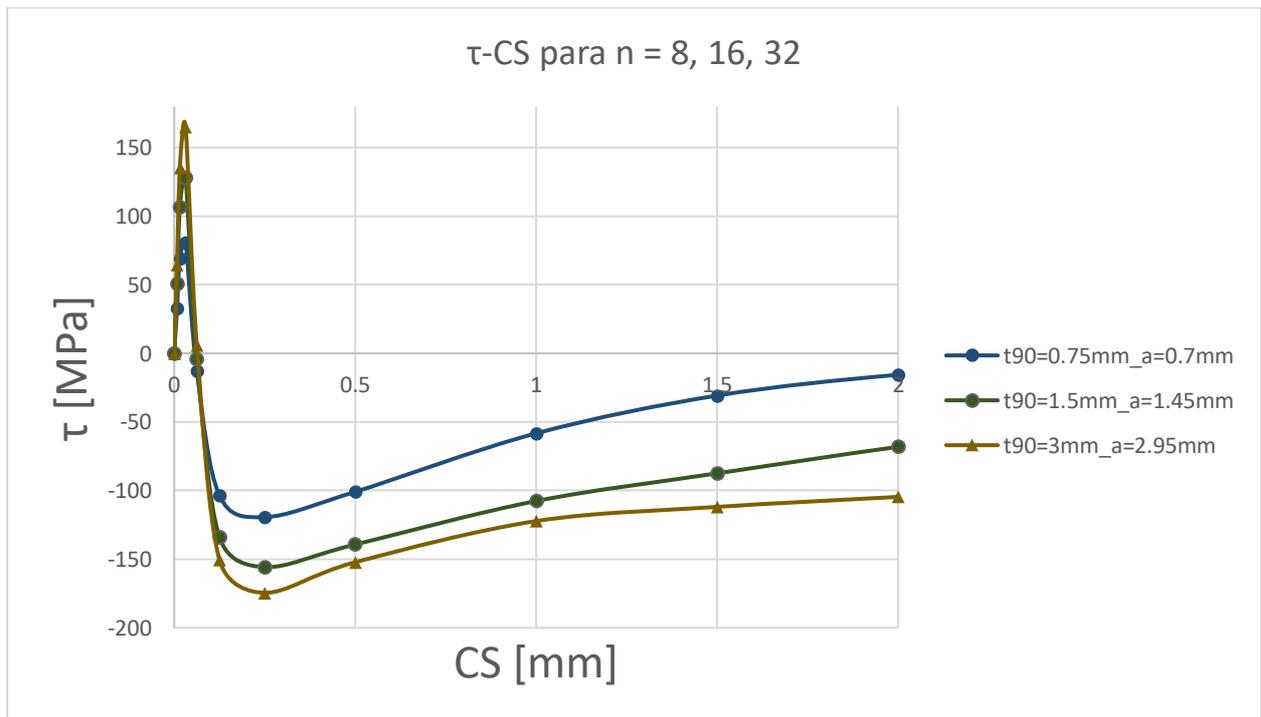
Como se puede observar en todas las gráficas, 6.21, 6.22, 6.23, las curvas siguen la misma tendencia lo único que cambia es el valor de las tensiones, y como ya se ha dicho anteriormente, en cada gráfica con una distancia del fondo de grieta a la separación  $90^{\circ}$ - $0^{\circ}$  fija, las tensiones suben con  $t_{90}$ .



Gráfica 6.24.-  $\tau$ -CS distancia fija de 0.15 mm.



Gráfica 6.25.- τ-CS distancia fija de 0.1 mm.



Gráfica 6.26.- τ-CS distancia fija para 0.05 mm.

Lo mismo sucede con las tensiones tangenciales, como se puede ver en las gráficas 6.24, 6.25 y 6.26, mayores tensiones conforme la distancia fija, es decir, el fondo de grieta está más cerca de la interfase 90°-0°.

En resumen, las tensiones normales y tangenciales aumentan conforme la grieta transversal se acerca a la interfase entre las láminas de 90° y 0° y a medida que  $t_{90}$  es mayor. También se ha visto que el cambio de tensiones positivas a negativas se produce con pendientes mayores y que la zona afectada en la interfase también lo es.

## 6.4 Modelo BEM de la grieta de delaminación

### 6.4.1 Descripción del modelo

A continuación, se presenta el modelo que estudia el comportamiento y el efecto que provocaría una grieta de delaminación en la interfase  $90^\circ$ - $0^\circ$ . La figura 6.3 contiene el modelo que se ha ejecutado junto con las condiciones de contorno, tanto de simetría como en tensiones y las distintas medidas. El modelo es similar al utilizado en el apartado anterior, lo único que cambia es que ahora la grieta transversal está abierta completamente y se ha iniciado una grieta de delaminación. El valor que va a ir tomando el tamaño de la grieta objeto de estudio viene determinado por la variable 'd'.

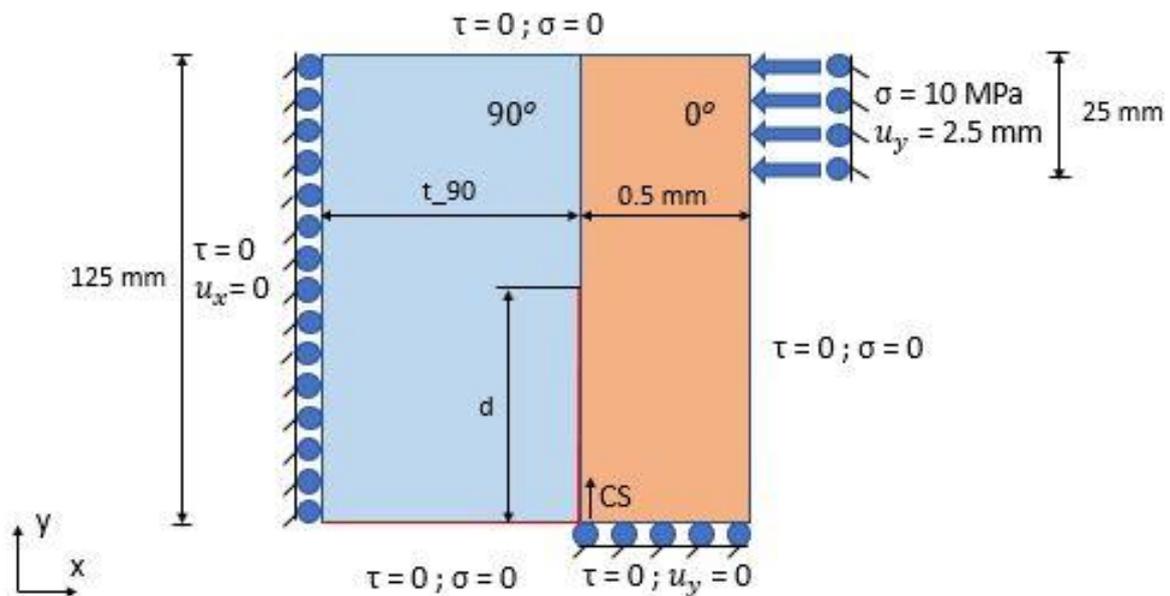
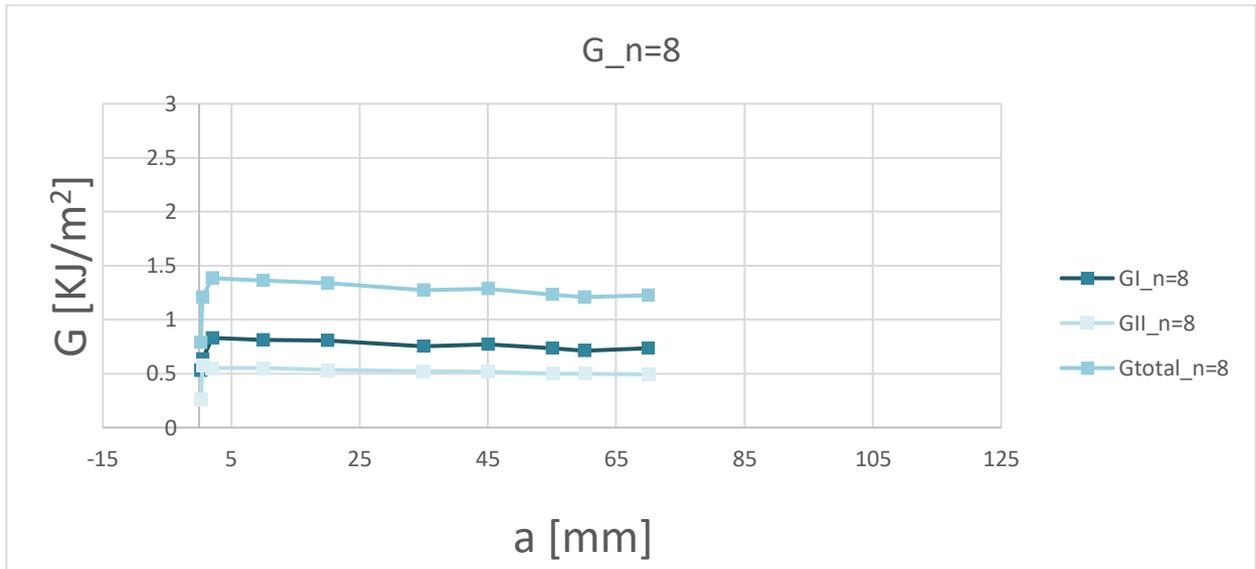


Figura 6.3.- Representación del modelo BEM para grieta de delaminación.

En este caso se van a realizar 3 modelos que se corresponden con distintos  $n$  y dentro de cada caso se ha realizado el análisis para varios puntos a lo largo de la interfase. El objetivo principal es el cálculo de  $G$  en cada caso. Los 3 modelos corresponden con  $n = 8, 16, 32$ , siendo los mismos valores de  $n$  que se han tomado en el apartado anterior.

### 6.4.2 Resultados

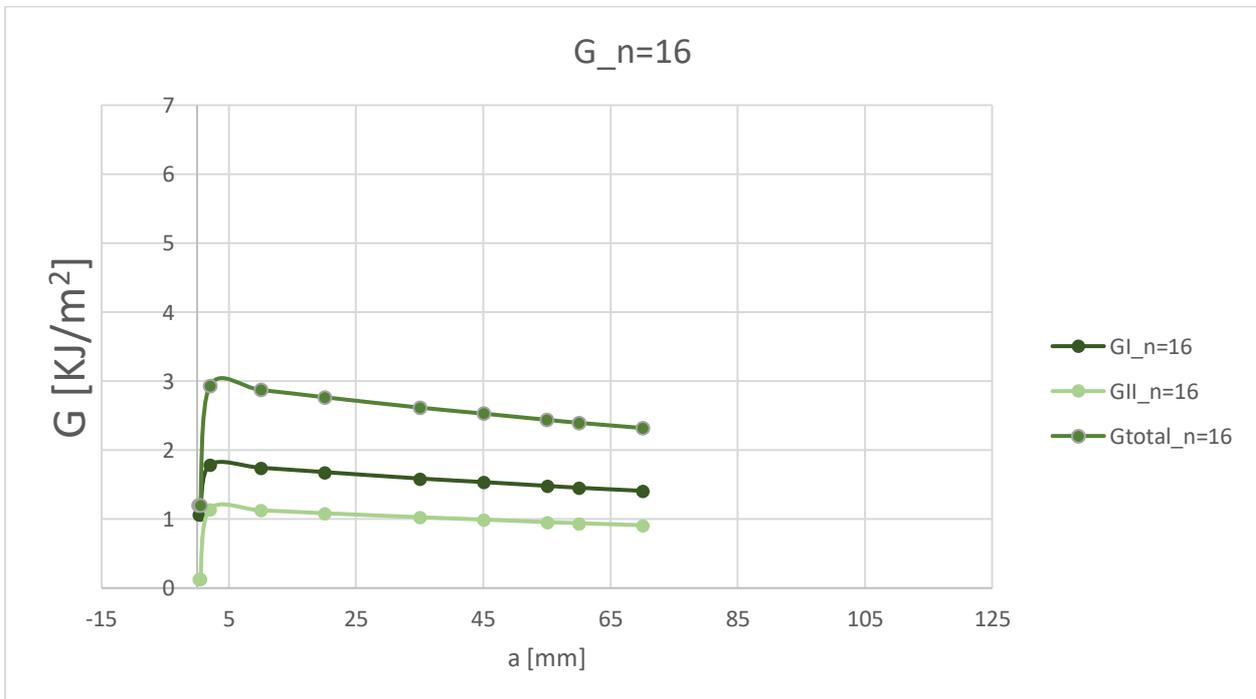
En primer lugar, se presentan las gráficas de la evolución de  $G$  a lo largo de la grieta de delaminación para los 3 problemas ( $n = 8, 16, 32$ ). Como consecuencia de las condiciones de contorno aplicadas, así como por la influencia de una grieta transversal abierta completamente, por la disposición de las láminas ( $90^\circ$  y  $0^\circ$ ) y el efecto Poisson, la grieta de delaminación crecerá en modo mixto, modo I y modo II.



Gráfica 6.27- G, GI, GII-a del modelo n = 8.

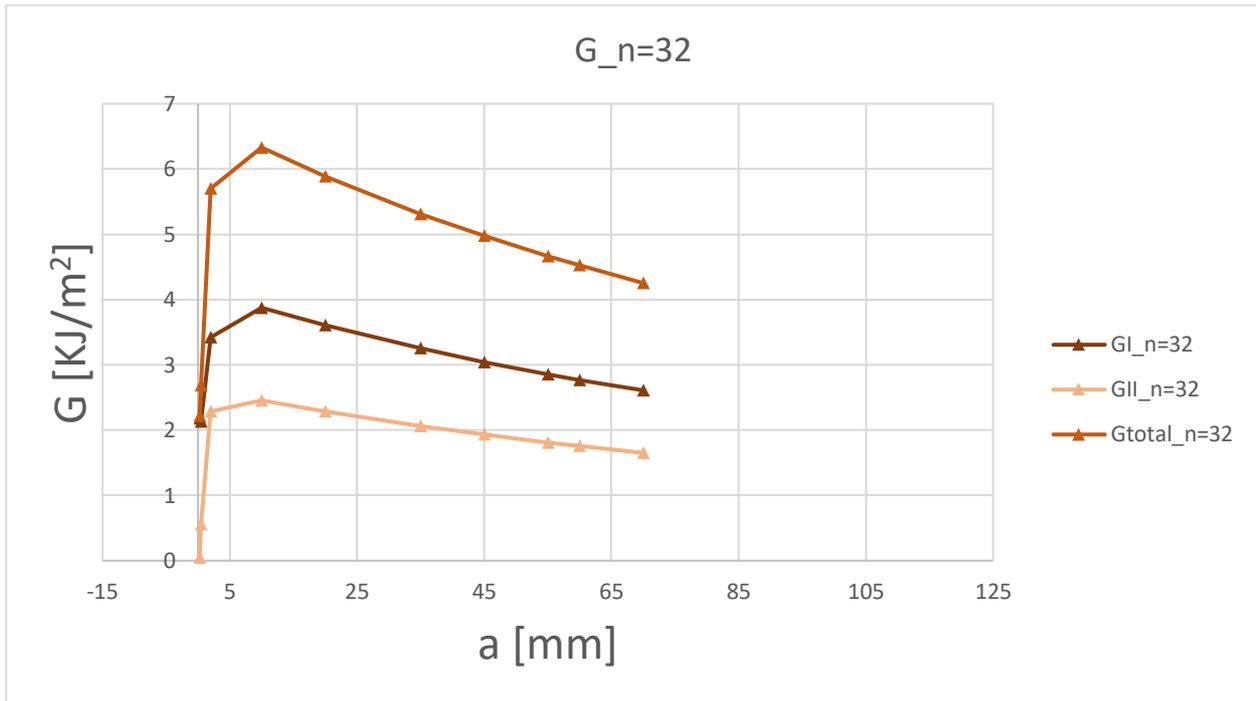
La gráfica 6.27 representa la energía liberada por la grieta de delaminación cuando  $n = 8$ , lo que significa que el espesor es  $t_{90^\circ} = 0.75$  mm. Como se puede observar, la GII es menor que GI y que al alcanzar un valor de  $G_{total} = 1.4$  KJ/m<sup>2</sup> con la abertura de la grieta este valor va decayendo con una pendiente tan leve que se podía decir que se mantiene prácticamente constante.

A continuación, la siguiente gráfica 6.28 representa los valores de G para  $n = 16$ , es decir, un  $t_{90^\circ} = 1.5$  mm. Al igual que el caso anterior, tomando los mismos puntos de evaluación, GII es menor que GI y siguiendo la misma evaluación. Se alcanza el máximo valor al comienzo de la grieta siendo éste aproximadamente de 3 KJ/m<sup>2</sup> y que va disminuyendo progresivamente desde dicho valor.



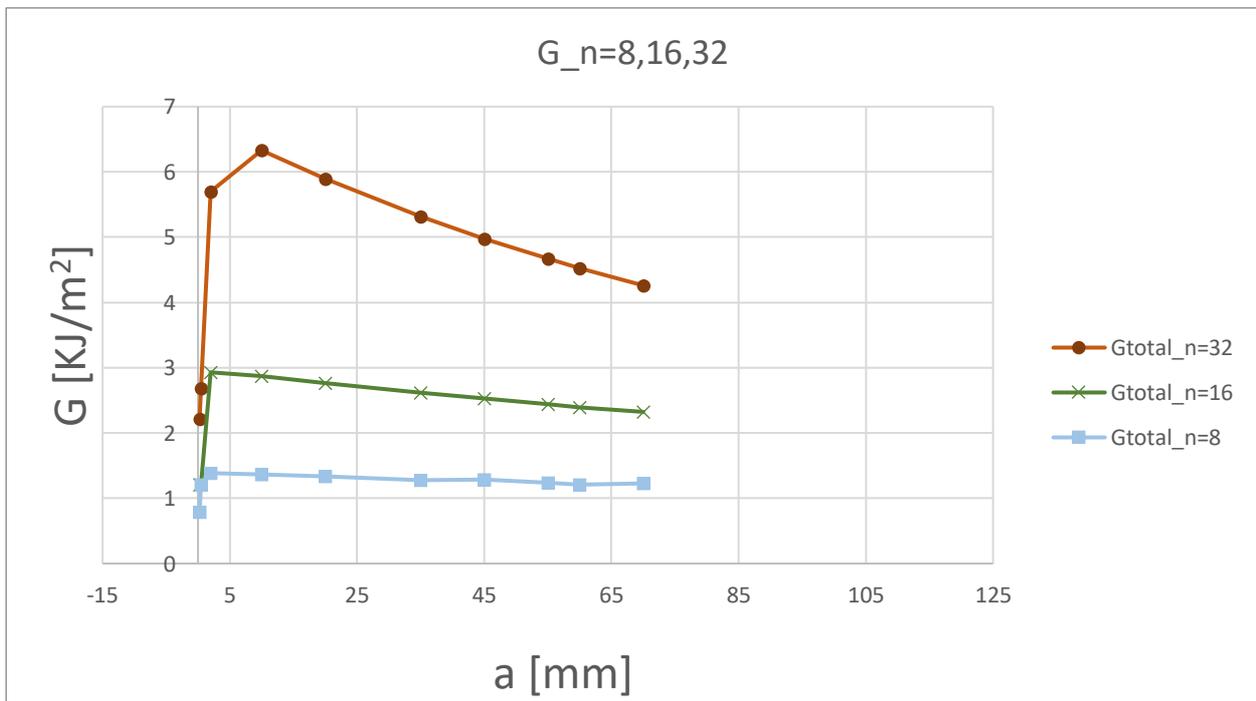
Gráfica 6.28- G, GI, GII-a del modelo n = 16.

En la gráfica 6.29 al igual que en las dos gráficas anteriores, se representa la evolución de la tasa de liberación de energía en crecimiento de una grieta de delaminación frente a los distintos tamaños de grieta en la interfase  $90^\circ-0^\circ$ . Este caso se correspondería con  $n = 32$ , es decir,  $t_{90^\circ} = 3$  mm. Se observa que GII es menor que GI con una evolución similar, como se ha explicado para los dos casos anteriores. En este modelo el máximo valor alcanzado por  $G_{total}$  es aproximadamente 6.3 KJ/m<sup>2</sup> en torno a un tamaño de grieta de 10 mm frente a los 125 mm que compone la interfase. Además, la  $G_{total}$  cae con una pendiente mayor respecto a los casos  $n = 8$  y 16.



Gráfica 6.29- G, GI, GII-a del modelo  $n = 32$ .

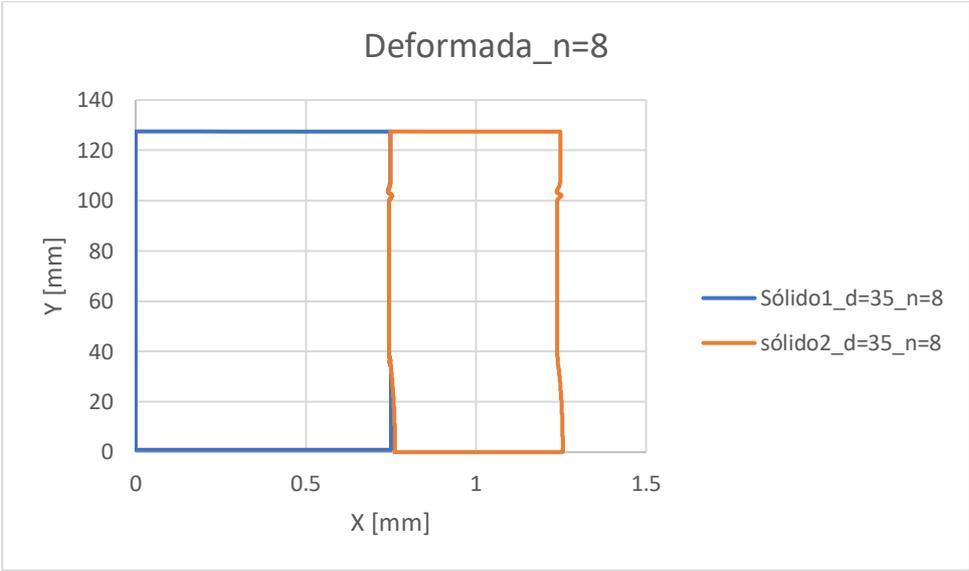
En la siguiente gráfica 6.30, se han comparado las evoluciones de  $G$  frente a los distintos tamaños de grieta estudiados para cada  $n$ , siendo los valores de ésta: 8, 16, 32.



Gráfica 6.30- G-a para  $n = 8, 16, 32$ .

Como podemos ver el valor de  $G$ , tasa de liberación de energía en el crecimiento de una grieta, es mayor conforme el valor de  $n$  aumenta. Asimismo, las pendientes asociadas a cada  $n$  van disminuyendo con este parámetro llegando a ser aproximadamente constante. Este estudio nos llevaría a confirmar que a mayor espesor del laminado de  $90^\circ$  se puede producir, dado el valor de  $G$  que se puede alcanzar, un daño catastrófico como el observado en los experimentos con  $n = 32$ .

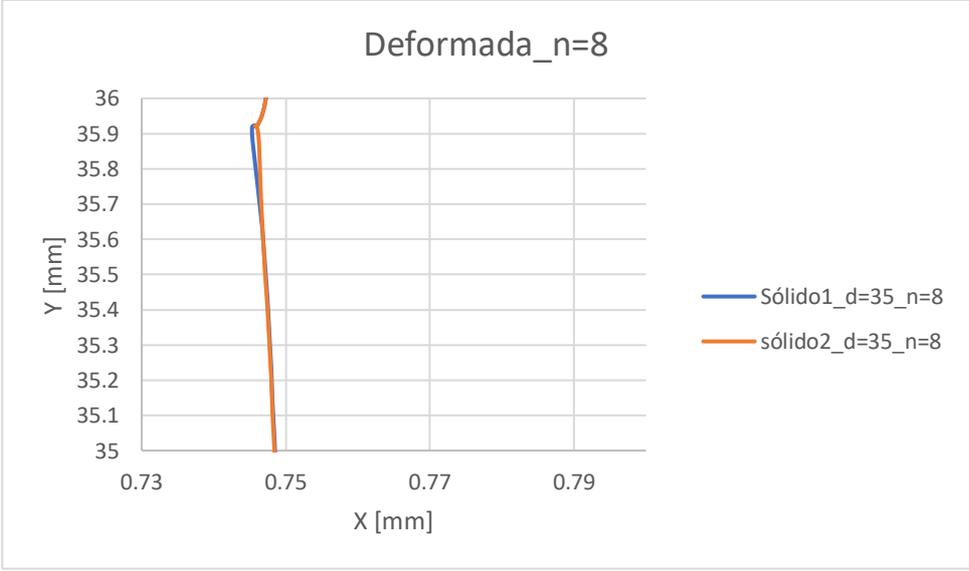
Ahora se presenta una comparación entre las deformadas entre las distintas  $n = 8, 16, 32$  y para ello hemos tomado el mismo punto de análisis, este punto es referido al tamaño de grieta de delaminación  $d = 35$  mm.



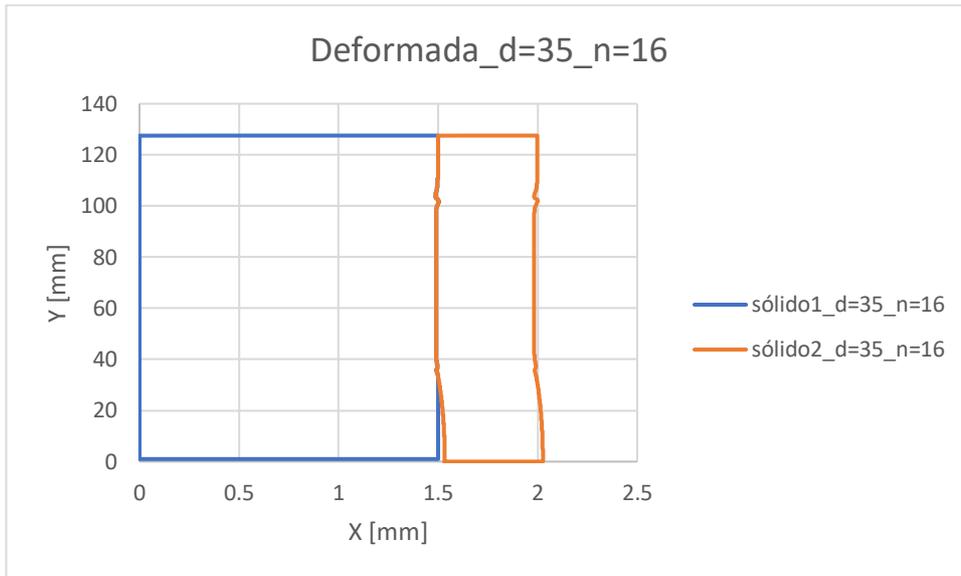
Gráfica 6.31- Deformada del modelo  $n = 8$ .

La gráfica 6.31, presenta la deformada del modelo  $n = 8$ . Se puede ver que en la parte superior del modelo aparece una cierta perturbación que corresponde con el efecto de las condiciones de tensiones y desplazamientos que se han aplicado en esa zona, figura 6.2, y esto simula las mordazas que se emplean en el ensayo de tracción en el laboratorio. Esta perturbación está aplicada para todos los modelos, como se comenta en el apartado 6.3.1.

A continuación, la gráfica 6.32, es el detalle del fondo de grieta de delaminación. En ella podemos ver cómo existe una pequeña burbuja justo en la punta de grieta que tiene una longitud aproximada de unos 0.3 mm y una zona de contacto entre los labios de la grieta.

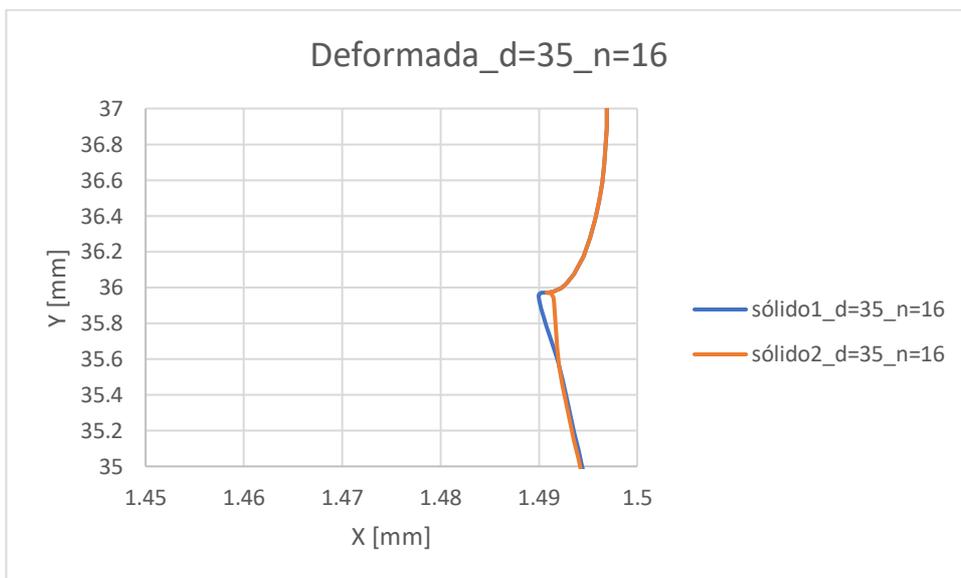


Gráfica 6.32- Detalle de la burbuja en la configuración deformada del modelo  $n = 8$ .



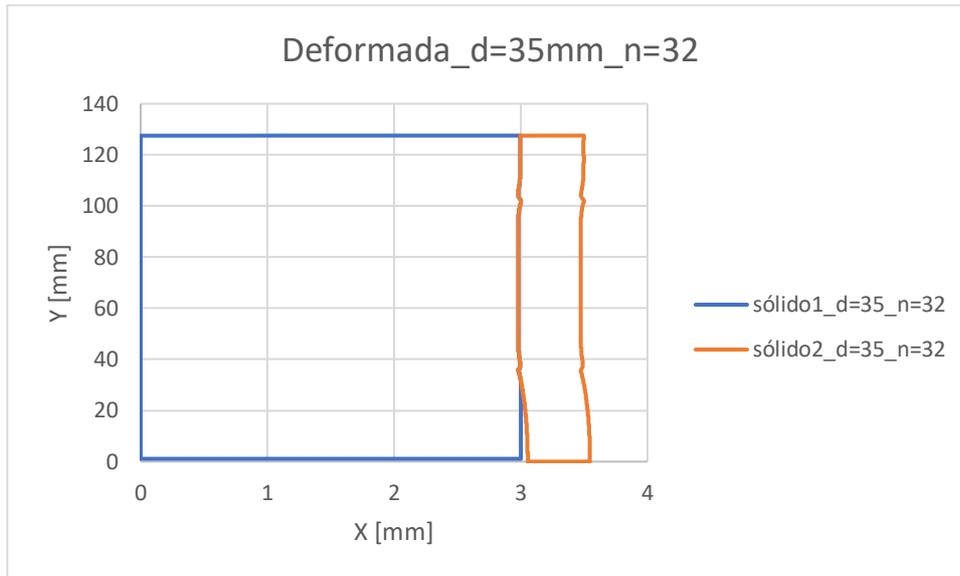
Gráfica 6.33- Deformada del modelo n = 16.

En la gráfica 6.33, al igual que en el caso de  $n = 8$ , se ha representado la deformada para  $n = 16$ . La deformada presenta una apreciable abertura en la grieta respecto al modelo anterior. En la gráfica 6.34, nuevamente se ha detallado esa burbuja de la que se ha hablado anteriormente y de una zona de contacto entre labios.

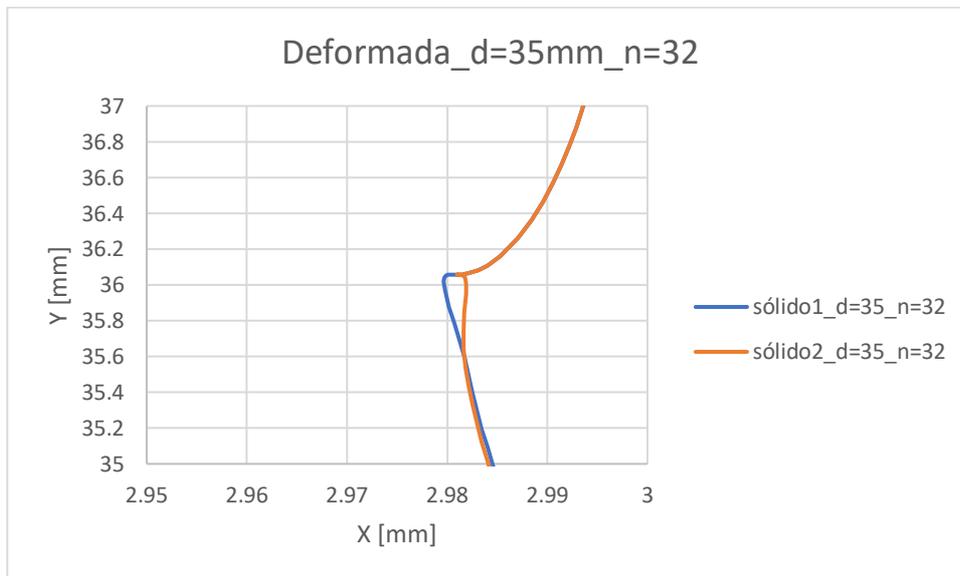


Gráfica 6.34- Detalle de la burbuja de la configuración deformada del modelo n = 16.

Y para finalizar se ha hecho también la deformada para  $n = 32$ , gráfica 6.35 En la siguiente gráfica 6.36, se presenta el detalle del fondo de grieta donde se puede ver la burbuja que se forma y la zona de contacto en la interfase. Apparently se puede decir que la burbuja para  $n = 32$  es más grande que las del resto de casos estudiados.

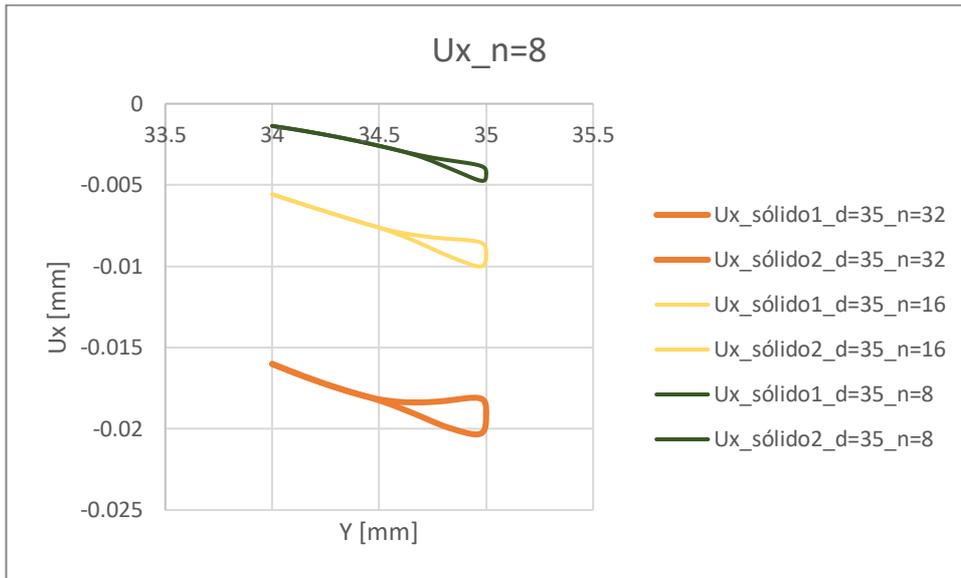


Gráfica 6.35- Deformada del modelo n = 32.



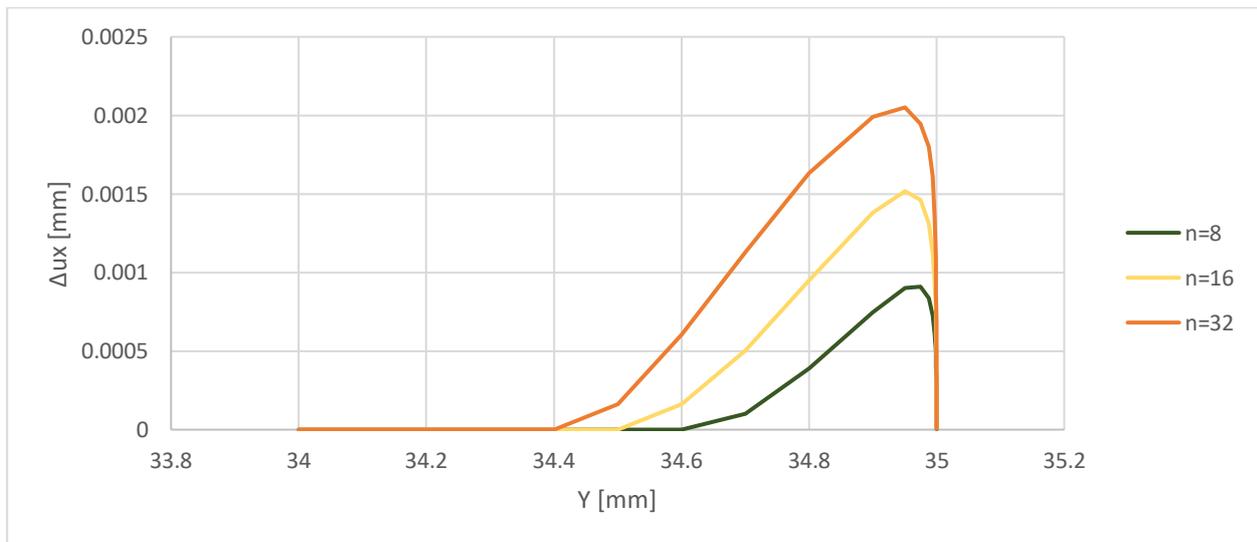
Gráfica 6.36- Detalle de la burbuja en la configuración deformada del modelo n = 32.

Como ya se ha comentado, la burbuja de  $n = 32$  se aprecia algo más grande que para los otros problemas. En cualquier caso, a continuación, se ha realizado una comparación del tamaño de la burbuja para cada  $n$ . La gráfica 6.37, representa la burbuja que se crea en el fondo de grieta para cada  $n = 8, 16, 32$ . Se puede ver que, a mayor  $n$ , mayor tamaño de burbuja creada.



Gráfica 6.37- Comparación de burbujas para n = 8, 16, 32. Para la configuración indeformada.

También, se han querido representar los desplazamientos de los labios de la grieta de delaminación, puesto que se quiere confirmar que a mayor n mayores son dichos desplazamientos. La gráfica 6.38, que se presenta a continuación muestra la diferencia entre los desplazamientos de los labios del daño de delaminación frente a la coordenada y que corresponde con la interfase. La gráfica confirma que, a mayor n, mayores son los desplazamientos de los laminados en la abertura de la grieta.



Gráfica 6.38.- Comparación de la diferencia en valor absoluto de los desplazamientos entre los labios de la grieta de delaminación para n = 8, 16, 32.

Para concluir y reuniendo toda la información recopilada en el capítulo, se llega a la conclusión, que ya se ha ido reafirmando a lo largo de los apartados, que a mayores espesores (mayor número de láminas de 90°) todos los parámetros indicados del daño de delaminación aumentan: G, tamaño de la burbuja y apertura de los labios de esta.

## 6.5 Correlación entre predicciones y resultados experimentales

En este apartado, se van a comparar los estudios numéricos que han simulado los resultados experimentales. Como ya se ha comentado en apartados anteriores, el objetivo del estudio numérico surge como consecuencia de los ensayos realizados en el laboratorio.

El comienzo del análisis trata de simular el efecto de una grieta transversal en el laminado de  $90^\circ$  y para ello se realizan varios modelos con diferentes espesores y tamaños de grieta. El resultado de esto es que cuando  $n$  sube las tensiones de la interfase  $90^\circ-0^\circ$  suben y la zona afectada también es mayor. Además, hay que tener en cuenta que, para cada  $n$ , al aumentar el daño transversal, ello también genera mayores tensiones y zona afectada. Todo esto es solo un indicativo favorable a lo que pasa experimentalmente, porque lo que realmente domina es  $G$ . Como se ha podido observar,  $G$  también aumenta cuando  $n$  aumenta. Esto explicaría los resultados experimentales entre los laminados que se han ensayado.

Como podemos observar en la figura 6.4, que corresponde con el panel  $[0^4_4, 90^8_{16}]_S$ , es decir donde  $n = 32$ , existe grieta transversal y una inevitable delaminación entre los laminados de  $90^\circ$  y  $0^\circ$ .



Figura 6.4.- Probeta n=32 ensayada.

En cambio, en las probetas ensayadas del panel  $[0^4_4, 90^8_8]_S$  se puede observar grieta transversal a simple vista pero que contiene delaminaciones claramente observables cuando se inspeccionan al microscopio. Esto quiere decir que la  $G_c$  de la interfase  $90^\circ-0^\circ$  es menor que la  $G$  obtenida para  $n = 16$ . La figura 7.5, pertenece a una de las probetas del laminado  $n = 16$ .



Figura 6.5.- Probeta n=16 ensayada.

Los resultados obtenidos con las probetas  $n = 16, 32$ , con fallos claramente identificables y asociables a una delaminación entre las láminas de  $0$  y  $90$  grados, abren la posibilidad de considerar este ensayo como una manera de obtener parámetros del laminado que pueden ser utilizados en un modelo mesomecánico del mismo.

Así, en los dos casos estudiados en los que se ha observado grietas de delaminación, es evidente que se está produciendo que las predicciones de los valores de  $G$  obtenidos por el modelo están por encima de un valor nominal de  $G_c$  de la interfase entre las láminas de  $0^\circ$  y  $90^\circ$ , lo que apunta a la necesidad de ir disminuyendo el valor de  $n$  para detectar donde se produce el cambio de comportamiento, es decir no aparición de daño aparente asociado a la delaminación, para poder determinar así el valor aparente de la tenacidad a fractura de la interfase,  $G_c$ .

## 7 CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En primer lugar, se va a proceder a resumir lo que se ha hecho en este trabajo y para ello se va a dividir el mismo en 5 partes: 1) fabricación, 2) ensayos mecánicos, 3) inspección de los laminados, 4) modelos numéricos realizados, y 5) la generación de un programa que implementa la TGL.

- 1) En primer lugar, para poder desarrollar la parte experimental se han tenido que fabricar los distintos laminados objeto de estudio. En nuestro caso  $[0_4, 90_8]_s$  y  $[0_4, 90_{16}]_s$ . Tras obtener los laminados se han cortado las probetas según la norma correspondiente.
- 2) Seguidamente, se han realizado 5 ensayos para cada laminado con el objetivo de obtener las propiedades de cada uno de ellos. Después, se ensayaron las probetas del panel  $[0_4, 90_8]_s$  para distintos casos, es decir, para obtener un patrón entre el sonido que genera un daño mientras se está aplicando carga hasta un cierto porcentaje de la carga de rotura y la aparición de una grieta transversal visible a simple vista y que genera un sonido detectable. El tratamiento equivalente de las probetas del laminado  $[0_4, 90_{16}]_s$  puso de manifiesto un comportamiento diferente, involucrando un daño explosivo para bajo nivel de carga, lo que requirió un estudio numérico del problema, que se trata más adelante.
- 3) Una vez realizados los ensayos se pasa a la inspección de los daños, que por las razones indicadas solo se pudo hacer para el laminado  $[0_4, 90_8]_s$ . Para la inspección se necesita preparar las probetas. En primer lugar, se decidió encapsular las probetas con el procedimiento establecido en el laboratorio de corte de probetas, preparación de mezcla para la cápsula, lijado y pulido de la misma. Seguidamente se procede a una inspección en el microscopio a distintos aumentos tomando capturas y realizando fotocomposiciones. Tras observar que se había perdido información con este método se desarrolló una nueva técnica de lijado y pulido para probetas completas. Esta nueva técnica permitía que a la hora de ensayar se pudieran llevar a cabo observaciones in situ. Para dicha observación también se tuvo que montar todo un equipamiento de lupa y luces, así como un nuevo programa en el ordenador para que fuera posible la captura de imágenes.
- 4) A causa de lo que se ha comentado anteriormente con respecto a la rotura prematura y catastrófica de las probetas correspondientes al panel  $[0_4, 90_{16}]_s$ , se decidió realizar un estudio numérico del mismo (y naturalmente también del  $[0_4, 90_8]_s$ , para poder comparar ambas situaciones). El estudio se realizó con el programa MECAS (basado en el Método de los Elementos de Contorno, MEC) y ejecutado en PECAS, simulando dos situaciones temporalmente diferentes.

La primera corresponde a la primera fase del daño, es decir a la configuración del laminado con una grieta transversal que se detiene cerca de la interfase entre las láminas de 0 y 90 grados y se pretende ver el efecto que tiene el daño transversal y el espesor de la lámina de 90 grados en el estado tensional en la interfase entre las láminas de 0 y 90 grados, con la idea de asociar dicho estado tensional a la aparición de daño entre las interfaces de las láminas.

La segunda situación corresponde a una fase posterior del daño en la que se supone que la grieta transversal ya ha alcanzado la interfase entre las láminas de 0 y 90 grados y se ha simulado la presencia de una grieta de delaminación. En este caso se pretende ver cómo es la evolución de dicha grieta de delaminación en función de la secuencia de apilado de los dos laminados en estudio, es decir en función del espesor de la lámina de 90 grados.

Cada situación es estudiada para diferentes espesores de la lámina de 90 grados (diferentes valores de  $n$ ) y para diferentes tamaños de la grieta involucrada en cada situación (transversal en la primera, de delaminación en la segunda). Una vez obtenidas las predicciones de los modelos, estas se han comparado con las evidencias experimentales para obtener una explicación de las mismas.

- 5) Para finalizar, se modificó un código proporcionado por el departamento, que contenía la TGL y los criterios de rotura. El nuevo código está implementado en el programa Mathematica<sup>®</sup>, y en esta versión se elimina la parte de los criterios y se modifican ciertos parámetros de entrada y salida para que ahora el programa reciba la carga a la que se va a someter el laminado devolviendo resultados en tensiones y deformaciones.

Con todo el trabajo realizado, se llega a las siguientes conclusiones:

- a) El laminado  $[0_4, 90_8]_s$  experimenta un comportamiento convencional, similar al de otros laminados con una secuencia de apilado similar, pero con valores menores del espesor de la lámina de 90 grados, es decir valores menores de  $n$ . Básicamente puede observarse la aparición de un daño transversal asimilable a una grieta que ocupa la casi totalidad del espesor de la lámina de 90, pudiendo conllevar unido un daño que asociamos en términos generales a delaminaciones entre las láminas. Esto es fácilmente audible y puede ir precedido de daños aislados consistentes en despegues entre fibra y matriz.
- b) El laminado  $[0_4, 90_{16}]_s$ , experimenta un comportamiento radicalmente diferente. Hay una rotura prematura y catastrófica que involucra la aparición de un daño completo transversal y delaminación generalizada entre las láminas de 0 y 90 grados. Todo ello a un nivel bajo de la carga aplicada. Lo observado ha requerido la realización de un estudio numérico de este laminado, y de los similares con  $n = 8$ , con objeto de poder comparar los diferentes comportamientos experimentales observados.
- c) El estudio numérico ha puesto de manifiesto:
  - c1) En lo que se refiere al daño transversal exclusivamente, las tensiones normales y tangenciales en la interfase entre las láminas de 0 y 90 grados crecen a medida que el fondo de la grieta transversal se acerca a la interfase (esto es conocido) y también crecen con el espesor de la lámina de 90 grados (con  $n$ ), lo que hace más plausible la aparición de daño asociado a delaminación a medida que el espesor de la lámina de 90 grados crece, lo que está totalmente de acuerdo con lo observado experimentalmente, haciendo más plausible la aparición de daño asociado a delaminación en el laminado  $[0_4, 90_{16}]_s$  que en el  $[0_4, 90_8]_s$ . En congruencia con todo ello, el valor de la zona afectada por estas tensiones interlaminares es mayor también en el caso del laminado  $[0_4, 90_{16}]_s$  que en el del laminado  $[0_4, 90_8]_s$ , es decir aumenta con el espesor de la lámina de 90 grados.
  - c2) En lo que se refiere a la progresión del daño de delaminación, el estudio llevado a cabo muestra que una vez que tenemos daño en la interfase entre las láminas, la capacidad de liberar energía (el valor de  $G$ ) aumenta a medida que el espesor de la lámina de 90 lo hace, lo que está en consonancia también con lo observado experimentalmente. El fundamento de esto puede buscarse en la mayor apertura de los labios de la grieta de delaminación cuando la grieta se propaga a medida que  $t_{90}$  aumenta. El valor de  $G$ , la capacidad de liberar energía, se mantiene razonablemente constante (en todo caso no tiende a cero de forma inmediata una vez que hay daño de delaminación) para diferentes valores de la longitud del daño de delaminación lo que justifica la aparición del daño catastrófico en el laminado  $[0_4, 90_{16}]_s$ , por haberse superado el valor de  $G_C$  en toda la longitud de la interfase entre las láminas de 0 y 90 grados.

Para finalizar, pensando en trabajos futuros, uno de ellos podría ser la importancia de completar el estudio que se ha realizado para otros valores de  $n$ , de rango inferior al estudiado en este trabajo. Esta propuesta sería interesante puesto que conocer el comportamiento en un amplio rango permitiría predecir el comportamiento de laminados fabricados con láminas ultradelgadas, siempre realizando un trabajo de correlación entre las predicciones numéricas y las observaciones experimentales. Todo ello en la línea de que en este tipo de laminados fabricados con láminas ultradelgadas, no solo se retrasaría la aparición de daño transversal sino que, lo que es más importante, se inhibiría la aparición de daño asociado a delaminación, que es un daño mucho más negativo desde el punto de vista de comportamiento en servicio de un laminado. Esta idea formaría parte de un gran desarrollo en el tema de uso de láminas ultradelgadas, para su implementación en la industria.

Asimismo, a raíz del cálculo de  $G$  para la grieta que simula el daño de delaminación, surge la propuesta de usar estos ensayos para generar un procedimiento para determinar  $G_C$  de la interfase entre láminas. Habría que realizar ensayos con diferentes valores de  $n$  y correlacionar las predicciones de  $G$  con los resultados experimentales para obtener una estimación del valor nominal de la tenacidad a fractura de la interfase entre las láminas de 0 y 90 grados.

Por último, como se ha detallado en la parte de preparación de las muestras y la inspección de estas, se han desarrollado para el proyecto varias técnicas para el lijado y pulido de probetas al completo y la observación simultánea del ensayo. Para las situaciones estudiadas estas técnicas han sido suficientes, pero en todo caso podrían mejorarse para proyectos futuros pues permiten obtener mucha más información y más resultados de los ensayos que se practican.

---

## REFERENCIAS

---

- [1] París F., Cañas J., Marín , 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.
- [2] AENOR, «Material aeroespacial, Plásticos reforzados con fibra de carbono, Estratificados unidireccionales, ensayo de tracción paralelamente a la dirección de la fibra.» Norma Española, 1996.
- [3] París, F. y Cañas, J. (1997). The Boundary Element Method, Fundamentals and Applications, Oxford University Press.
- [4] París, F., Blázquez, A., McCartney, L.N y Mantic, V. Characterization and evolution of matrix and interface related damage in  $[0/90]_s$  laminates under tension. Part I: Numerical predictions. *Composites Science and Technology* 70 (2010) 1168-1175
- [5] París, F., Blázquez, A., McCartney, L.N y Barroso, A. Characterization and evolution of matrix and interface related damage in  $[0/90]_s$  laminates under tension. Part II: Experimental evidence. *Composites Science and Technology* 70 (7), 1176-1183



# ANEXO A

En este anexo se incluye el código completo con la implementación de la TGL descrita en el capítulo 5. El código viene detallado con unidades y con la descripción referente a cada parámetro a introducir. En el código ya viene implementado los datos utilizados para la comprobación de resultados con el BEM, que se realiza en el capítulo 6.

(\* Simulacion de ensayo de traccion en laminados \*)  
 (\* Evaluacion de \ la carga de rotura (Modelo de daño progresivo) \*)  
 (\* Unidades: Ctes \ de rigidez en GPa, de resistencia en MPa\*)

material = "Laminado N° ";  
 nlam = 3; (\* N° de láminas que componen el laminado del cuál se van a \ calcular las predicciones de los criterios\*)

ang = Table[0, {nlam}];  
 esp = Table[0, {nlam}];  
 Xt = Table[0, {nlam}];  
 Yt = Table[0, {nlam}];  
 St = Table[0, {nlam}];  
 Xc = Table[0, {nlam}];  
 Yc = Table[0, {nlam}];  
 E110 = Table[0, {nlam}];  
 E220 = Table[0, {nlam}];  
 G120 = Table[0, {nlam}];  
 Nu120 = Table[0, {nlam}];  
 Nu210 = Table[0, {nlam}];  
 E11 = Table[0, {nlam}];  
 E22 = Table[0, {nlam}];  
 G12 = Table[0, {nlam}];  
 Nu12 = Table[0, {nlam}];

Nu21 = Table[0, {nlam}];  
 fd = Table[0, {nlam}];  
 fdfibra = Table[0, {nlam}];  
 tipofallo = Table[0, {nlam}];  
 tipofallodefinitivo = Table[0, {nlam}];  
 (\* fdnu=Table[0,{nlam}];\*)  
 alf1 = Table[0, {nlam}];  
 alf2 = Table[0, {nlam}];  
 (\* espesores en mm \*)  
 t = 0.5  
 esp = {t, t\*12, t};  
 (\* angulos en grados \*)  
 ang = {0, 90, 0};  
 (\* resistencias en MPa \*)  
 Xt = {2225, 2225, 2225};  
 Yt = {61, 61, 61};  
 St = {108.85, 108.85, 108.85};  
 Xc = {1300, 1300, 1300};  
 Yc = {245, 245, 245};  
 axil = 0.000035(\*unidades en GPa\*);

Do[  
 Xt[[jm]] = Xt[[jm]]/1000;  
 Yt[[jm]] = Yt[[jm]]/1000;  
 St[[jm]] = St[[jm]]/1000;  
 Xc[[jm]] = Xc[[jm]]/1000;  
 Yc[[jm]] = Yc[[jm]]/1000;  
 , {jm, 1, nlam}];

```
(* propiedades en GPa *)
E110 = {135, 135, 135};
E220 = {8.75, 8.75, 8.75};
G120 = {4.75, 4.75, 4.75};
Nu120 = {0.3, 0.3, 0.3};
Do[
  Nu210[[jm]] =
  Nu120[[jm]]*E220[[jm]]/E110[[jm]];
  esp[[jm]] = esp[[jm]]/1000.; (*espesor en m*)
  , {jm, 1, nlam}];
alf1 = {1.94*10^-6, 1.94*10^-6, 1.94*10^-6};
alf2 = {6.33*10^-6, 6.33*10^-6, 6.33*10^-6};
inct = 0;

(*Simulacion de un ensayo de traccion en laminados
Condiciones: Vector de Esfuerzos (N,0,0,0,0,0)*)

Print["Calculo de propiedades del laminado: ",
material];
Print[];
Print["N° de laminas...", nlam];

Print["Propiedades Nominales (GPa y MPa) :"];
Print[" "];
Print["Lamina   E11[GPa]   E22[GPa]   Nu12
G12[GPa]"];
Do[
  Print[im, "      ", E110[[im]], "      ",
E220[[im]], "      ", Nu120[[im]], "      ",
G120[[im]]];
  , {im, 1, nlam}];

E11 = E110;
E22 = E220;
G12 = G120;
Nu12 = Nu120;
Nu21 = Nu210;
z = Table[0, {nlam + 1}];
esptotal = 0.0;
```

```
(*espesor total, tabla de z*)
Do[
  esptotal = esptotal + esp[[im]];
  , {im, 1, nlam}];
z[[1]] = -esptotal/2.;
Do[
  z[[im]] = z[[im - 1]] + esp[[im - 1]];
  , {im, 2, nlam + 1}];
Print["Espesor Total ", esptotal*1000., " mm."];
Print["tabla espesores", z*1000., "mm"];

Do[
  (*sale no un error pero que algo falla y no sé si es
{ik,1,
100} pero el programa va bien*)

qr = Table[0, {nlam}, {3}, {3}];
a = Table[0, {3}, {3}];
b = Table[0, {3}, {3}];
d = Table[0, {3}, {3}];
mc = Table[0, {6}, {6}];
alf = Table[0, {3}];

(*Cálculo de matriz Qr en GPa*)
Do[
  E11[[im]] = E110[[im]];
  Nu12[[im]] = Nu120[[im]];
  E22[[im]] = E220[[im]];
  G12[[im]] = G120[[im]];
  Nu21[[im]] = Nu210[[im]];

disc = 1 - Nu12[[im]]*Nu21[[im]];
cs = Cos[ang[[im]]*Pi/180.];
sn = Sin[ang[[im]]*Pi/180.];
q11 = E11[[im]]/disc;
q12 = Nu21[[im]]*E11[[im]]/disc;
q22 = E22[[im]]/disc;
```

```

q66 = G12[[im]];
qr[[im, 1, 1]] =
  q11*cs^4 + 2*sn^2*cs^2*(q12 + 2*q66) +
  q22*sn^4;
qr[[im, 2, 2]] =
  q11*sn^4 + 2*sn^2*cs^2*(q12 + 2*q66) +
  q22*cs^4;
qr[[im, 1, 2]] =
  sn^2*cs^2*(q11 + q22 - 4*q66) + q12*(sn^4 +
  cs^4);
qr[[im, 3, 3]] =
  sn^2*cs^2*(q11 + q22 - 2*q12 - 2*q66) +
  q66*(sn^4 + cs^4);
qr[[im, 1,
  3]] = (q11 - q12 - 2*q66)*sn*cs^3 + (q12 - q22
  + 2*q66)*cs*sn^3;
qr[[im, 2,
  3]] = (q11 - q12 - 2*q66)*cs*sn^3 + (q12 - q22
  + 2*q66)*sn*cs^3;
qr[[im, 2, 1]] = qr[[im, 1, 2]];
qr[[im, 3, 1]] = qr[[im, 1, 3]];
qr[[im, 3, 2]] = qr[[im, 2, 3]];
, {im, 1, nlam}];

```

(\*cálculo de las matrices abbd\*)

```

Do[
  Do[
    a[[jm, k]] = 0.0;
    b[[jm, k]] = 0.0;
    d[[jm, k]] = 0.0;
    Do[
      a[[jm, k]] =
        a[[jm, k]] + qr[[im, jm, k]]*(z[[im + 1]] -
        z[[im]]);
      b[[jm, k]] =
        b[[jm, k]] +
        0.5*N[qr[[im, jm, k]]*N[(z[[im + 1]]^2 -
        z[[im]]^2)];
    ]
  ]

```

```

d[[jm, k]] =
  d[[jm, k]] + qr[[im, jm, k]]*(z[[im + 1]]^3 -
  z[[im]]^3)/3.;
, {im, 1, nlam}];
, {k, 1, 3}];
, {jm, 1, 3}];

```

(\*matriz ABBD\*)

```

Do[
  Do[
    mc[[jm, k]] = a[[jm, k]];
    mc[[jm, k + 3]] = b[[jm, k]];
    mc[[jm + 3, k]] = b[[jm, k]];
    mc[[jm + 3, k + 3]] = d[[jm, k]];
    , {k, 1, 3}];
    , {jm, 1, 3}];
  ]

```

(\*inversa de ABBD\*)

```

mr = Inverse[N[mc]];

```

```

def0 = Table[0, {6}];

```

```

def = Table[0, {6}];

```

```

esf = Table[0, {6}];

```

(\*esf={N,0,0,0,0};nuestro dato es la carga aplicada: axil\*)

```

esf = {axil, 0, 0, 0, 0, 0};

```

```

def0 = mr.esf;

```

```

def0 = Table[0, {6}];

```

```

esft = Table[0, {6}];

```

```

deft = Table[0, {3}];

```

```

];

```

```

Do[

```

```

  cs = Cos[ang[[im]]*Pi/180.];

```

```

sn = Sin[ang[[im]]*Pi/180.];
alf[[1]] = alf1[[im]]*cs^2 + alf2[[im]]*sn^2;
alf[[2]] = alf1[[im]]*sn^2 + alf2[[im]]*cs^2;
alf[[3]] = 2*sn*cs*(alf1[[im]] - alf2[[im]]);
(*alf[[3]]=2*sn*cs*(alf2[[im]]-alf1[[im]]);*)

esft[[1]] =
  esft[[1]] + (qr[[im, 1, 1]]*alf[[1]] + qr[[im, 1,
2]]*alf[[2]]
  + qr[[im, 1, 3]]*alf[[3]])*inct*(z[[im + 1]] -
z[[im]]);
  esft[[2]] =
  esft[[2]] + (qr[[im, 2, 1]]*alf[[1]] + qr[[im, 2,
2]]*alf[[2]]
  + qr[[im, 2, 3]]*alf[[3]])*inct*(z[[im + 1]] -
z[[im]]);
  esft[[3]] =
  esft[[3]] + (qr[[im, 3, 1]]*alf[[1]] + qr[[im, 3,
2]]*alf[[2]]
  + qr[[im, 3, 3]]*alf[[3]])*inct*(z[[im + 1]] -
z[[im]]);
  esft[[4]] =
  esft[[4]] + (qr[[im, 1, 1]]*alf[[1]] + qr[[im, 1,
2]]*alf[[2]]
  + qr[[im, 1, 3]]*alf[[3]])*
  inct*0.5*(z[[im + 1]]^2 - z[[im]]^2);
  esft[[5]] =
  esft[[5]] + (qr[[im, 2, 1]]*alf[[1]] + qr[[im, 2,
2]]*alf[[2]]
  + qr[[im, 2, 3]]*alf[[3]])*
  inct*0.5*(z[[im + 1]]^2 - z[[im]]^2);
  esft[[6]] =
  esft[[6]] + (qr[[im, 3, 1]]*alf[[1]] + qr[[im, 3,
2]]*alf[[2]]
  + qr[[im, 3, 3]]*alf[[3]])*
  inct*0.5*(z[[im + 1]]^2 - z[[im]]^2);
, {im, 1, nlam};

Print["Esfuerzos curado :", N[esft], "GPa"];

deft0 = mr.esft;

```

```

Print["def de curado", N[deft0]];
Print["deformaciones sin curado", N[deft0]];

defttotal = def0 + def0;

Print["deformaciones totales", N[defttotal]];
(*estos esfuertz no sé cuales son*)

Print["Esfuerzos :", N[mc.defttotal], "GPa"];

(*---Calculo de tensiones---***)

giro = Table[0, {3}, {3}];
sc = Table[0, {3}];
spi = Table[0, {3}];
sct = Table[0, {3}];
spit = Table[0, {3}];
tension = Table[0, {3}];

Do[

  cs = Cos[ang[[jm]]*Pi/180.];
  sn = Sin[ang[[jm]]*Pi/180.];
  giro[[1, 1]] = cs^2;
  giro[[1, 2]] = sn^2;
  giro[[1, 3]] = 2*sn*cs;
  giro[[2, 1]] = sn^2;
  giro[[2, 2]] = cs^2;
  giro[[2, 3]] = -2*sn*cs;
  giro[[3, 1]] = -sn*cs;
  giro[[3, 2]] = sn*cs;
  giro[[3, 3]] = cs^2 - sn^2;

  def[[1]] = def0[[1]] + 0.5*(z[[jm]] + z[[jm +
1]])*def0[[4]];
  def[[2]] = def0[[2]] + 0.5*(z[[jm]] + z[[jm +
1]])*def0[[5]];
  def[[3]] = def0[[3]] + 0.5*(z[[jm]] + z[[jm +
1]])*def0[[6]];

```

```

sc[[1]] =
qr[[jm, 1, 1]]*def[[1]] + qr[[jm, 1, 2]]*def[[2]] +
qr[[jm, 1, 3]]*def[[3]];
sc[[2]] =
qr[[jm, 2, 1]]*def[[1]] + qr[[jm, 2, 2]]*def[[2]] +
qr[[jm, 2, 3]]*def[[3]];
sc[[3]] =
qr[[jm, 3, 1]]*def[[1]] + qr[[jm, 3, 2]]*def[[2]] +
qr[[jm, 3, 3]]*def[[3]];
spi = giro.sc;

(*Print[jm, " Ejes x y ", N[sc]; *)

Print[jm, " Tens(Ejes12) ", N[spi], "GPa"];

alf[[1]] = alf1[[jm]]*cs^2 + alf2[[jm]]*sn^2;
alf[[2]] = alf1[[jm]]*sn^2 + alf2[[jm]]*cs^2;
alf[[3]] = 2*sn*cs*(alf1[[jm]] - alf2[[jm]]);
(*alf[[3]]=2*(alf2[[jm]]*sn*cs-
alf1[[jm]]*sn*cs);*)
cur = 1;

deft[[1]] = (deft0[[1]] + 0.5*(z[[jm]] + z[[jm +
1]])*deft0[[4]] -
inct*alf[[1]])*cur;
deft[[2]] = (deft0[[2]] +
0.5*(z[[jm]] + z[[jm + 1]])*deft0[[5]] -
inct*alf[[2]])*cur;

deft[[3]] = (deft0[[3]] +
0.5*(z[[jm]] + z[[jm + 1]])*deft0[[6]] -
inct*alf[[3]])*cur;

sct[[1]] =
qr[[jm, 1, 1]]*deft[[1]] + qr[[jm, 1, 2]]*deft[[2]]
+
qr[[jm, 1, 3]]*deft[[3]];
sct[[2]] =
qr[[jm, 2, 1]]*deft[[1]] + qr[[jm, 2, 2]]*deft[[2]]
+
qr[[jm, 2, 3]]*deft[[3]];
sct[[3]] =
qr[[jm, 3, 1]]*deft[[1]] + qr[[jm, 3, 2]]*deft[[2]]
+
qr[[jm, 3, 3]]*deft[[3]];
spit = N[giro.sct];

Print[jm, "tenscurado(ejes12)", N[spit], "GPa"];

tension[[1]] = spi[[1]] + spit[[1]];
tension[[2]] = spi[[2]] + spit[[2]];
tension[[3]] = spi[[3]] + spit[[3]];

Print[jm, "tensiontotal", N[tension[jm]], "GPa"];

, {jm, 1, nlam}];

```

Calculo de propiedades del laminado: Laminado N°

N° de laminas...3

Propiedades Nominales (GPa y MPa) :

Lamina	E11[GPa]	E22[GPa]	Nu12	G12[GPa]
1	135	8.75	0.3	4.75
2	135	8.75	0.3	4.75
3	135	8.75	0.3	4.75

Espesor Total 7. mm.

tabla espesores{-3.5, -3., 3., 3.5}mm

Esfuerzos curado :{0., 0., 0., 0., 0., 0.}GPa

def de curado{0., 0., 0., 0., 0., 0.}

deformaciones sin curado{0.000185987, -4.17406×10<sup>-6</sup>, -1.159×10<sup>-21</sup>, 3.14961×10<sup>-18</sup>, -1.65492×10<sup>-19</sup>, 9.97265×10<sup>-35</sup>}

deformaciones totales{0.000185987, -4.17406×10<sup>-6</sup>, -1.159×10<sup>-21</sup>, 3.14961×10<sup>-18</sup>, -1.65492×10<sup>-19</sup>, 9.97265×10<sup>-35</sup>}

Esfuerzos :{0.000035, -1.68026×10<sup>-38</sup>, -1.17549×10<sup>-38</sup>, 6.15585×10<sup>-40</sup>, 1.35914×10<sup>-56</sup>, -1.01958×10<sup>-56</sup>}GPa

1 Tens (Ejes12) {0.0252445, 0.000454343, -5.50526×10<sup>-21</sup>}GPa

1tenscurado(ejes12) {0., 0., 0.}GPa

1tensiontotal{0.0252445, 0.000454343, -5.50526×10<sup>-21</sup>}[1.]GPa

2 Tens (Ejes12) {-0.0000757238, 0.00162591, -1.05113×10<sup>-19</sup>}GPa

2tenscurado(ejes12) {0., 0., 0.}GPa

2tensiontotal{-0.0000757238, 0.00162591, -1.05113×10<sup>-19</sup>}[2.]GPa

3 Tens (Ejes12) {0.0252445, 0.000454343, -5.50526×10<sup>-21</sup>}GPa

3tenscurado(ejes12) {0., 0., 0.}GPa

3tensiontotal{0.0252445, 0.000454343, -5.50526×10<sup>-21</sup>}[3.]GPa

Figura A.1.- Solución en Mathematica® del ejemplo del libro [1].

# ANEXO B

En este anexo B, se muestra las propiedades utilizadas en el capítulo 6.

Tabla B.1.- Propiedades capítulo 6

	SÓLIDO 1	SÓLIDO 2
E [MPa]	8750.	0.135e06
	8750.	8750.
	0.135e06	8750.
N	0.3	0.4
	0.19e-01	0.4
	0.19e-01	0.3
G [MPa]	4750.	7500.
	7500.	7500
	7500.	3365.