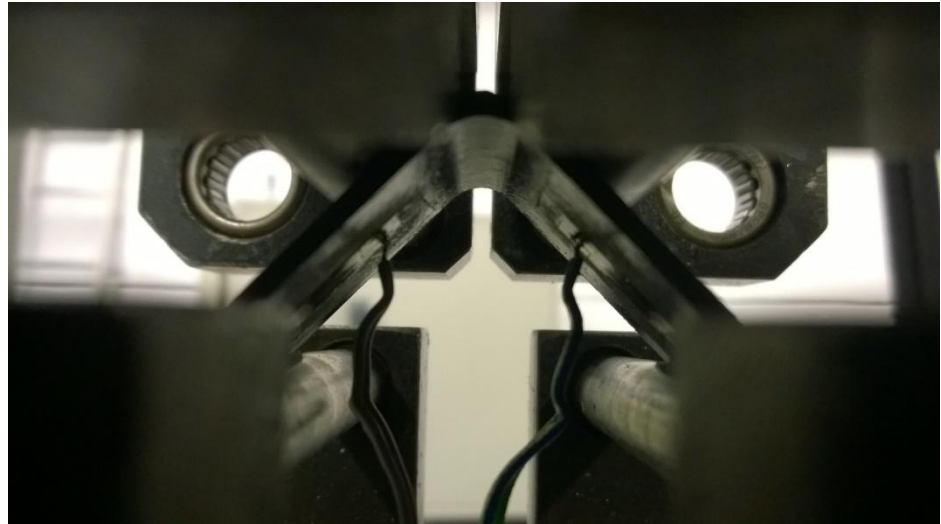


Trabajo de Fin de Grado
**Grado en Ingeniería de las Tecnologías
Industriales**



Fabricación y ensayo de probetas ILTS

Autor: Luis Ramírez López

Tutores: Dr. Enrique Graciani Díaz

Dr. Jesús Justo Estebaranz

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



Grado en Ingeniería de las Tecnologías
Industriales

Trabajo de Fin de Grado

Fabricación y ensayo de probetas ILTS

Autor:

Luis Ramírez López

Tutores:

Enrique Graciani Díaz – Profesor Titular

Jesús Justo Estebaranz – Profesor Ayudante Doctor

Dep. Mecánica de medios continuos y Teoría de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2015

Trabajo de Fin de Grado: Fabricación y ensayo de probetas ILTS.

Autor: Luis Ramírez López

Tutores: Dr. Enrique Graciani Díaz

Dr. Jesús Justo Estebaranz

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2015

El secretario del tribunal

Resumen

En este trabajo se tratan ensayos sobre probetas ILTS, los cuales consisten en ensayos de flexión en cuatro puntos sobre probetas en forma de L. El material a ensayar se trata de un laminado de material compuesto, concretamente matriz epoxi reforzada con fibra de carbono. Se realizan varios ensayos, para distintas configuraciones de laminados, con el objetivo de comparar los distintos resultados obtenidos durante la realización de los mismos. Para ello seguimos las directrices de unas normas específicas, las cuales se desarrollarán más adelante.

Además, previamente a la realización de estos ensayos, iremos superando distintos apartados y aspectos sumamente necesarios, como son la caracterización del material a emplear, los parámetros elásticos que rigen el comportamiento de los distintos laminados a usar y las distintas herramientas, utensilios y dispositivos que se utilizarán durante los ensayos.

Añadir que todas las operaciones previas a la realización de los ensayos sobre las probetas ILTS se realizan en el Laboratorio de Elasticidad y Resistencia de Materiales (LERM), perteneciente al departamento de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras, y más concretamente a la rama de Elasticidad y Resistencia de Materiales. Dicho laboratorio se sitúa en el T-6 del complejo de Talleres y Laboratorios de la ETSI de Sevilla. Las operaciones realizadas son las siguientes: fabricación de los distintos laminados, fabricación e instrumentación de las probetas, ensayos sobre las distintas probetas y obtención de resultados de dichos ensayos. Sin embargo, los ensayos de las ILTS se deben realizar en las dependencias de la empresa TEAMS, spin off de dicho laboratorio, ya que es donde se encuentra el útil necesario para la realización de los mismos.

Índice

1. Introducción y objetivos	17
2. Caracterización del material	20
2.1. Descripción general	20
2.2. Fabricación de las probetas	21
2.3. Fabricación de la bolsa de vacío y curado en autoclave	22
2.4. Mecanizado de las probetas y pegado de los tacones	24
2.5. Ensayos de caracterización	26
2.5.1. Ensayo de tracción con fibras a 0°	26
2.5.2. Ensayo de tracción con fibras a 90°	30
2.5.3. Ensayo sobre laminados equiangulares $\pm 45^{\circ}$	32
2.6. Discusión de resultados	34
3. Fabricación de los laminados angulares	35
4. Fabricación e instrumentación de las probetas	39
4.1. Fabricación de las probetas ILTS	39
4.2. Fabricación de las probetas planas	41
4.3. Instrumentación de las probetas ILTS	45
4.4. Instrumentación de las probetas planas	49
5. Ensayo de las probetas planas	52
5.1. Predicción de rigideces según TGL	52
5.2. Ensayo de tracción	55
5.3. Ensayo de compresión	59
5.4. Ensayo de flexión	64
6. Ensayo de las probetas ILTS	71
7. Conclusiones y desarrollos futuros	102
8. Referencias bibliográficas	104

Índice de figuras

1. Introducción y objetivos

Figura 1.1. Pirámide de ensayos [2] 18

2. Caracterización del material

Figura 2.2-1. Corte de láminas (1) 21

Figura 2.2-2. Corte de láminas (2) 21

Figura 2.2-3. Láminas a $\pm 45^\circ$ 22

Figura 2.2-4. Laminación con la ayuda de un secador 22

Figura 2.2-5. Laminación mediante espátula de teflón 22

Figura 2.3-1. Fabricación del molde 23

Figura 2.3-2. Configuración del molde en autoclave 23

Figura 2.3-3. Display de control del autoclave 23

Figura 2.3-4. Autoclave ya listo para empezar el curado 23

Figura 2.3-5. Vista de la autoclave antes de cerrarlo y empezar el ciclo de curado 24

Figura 2.4-1. Sierra de abrasión del LERM 24

Figura 2.4-2. Proceso de pegado de los tacones 24

Figura 2.4-3. Prensa de platos calientes 25

Figura 2.4-4. Paneles con los tacones ya pegados 25

Figura 2.4-5. Probetas $\pm 45^\circ$ 25

Figura 2.4-6. Probetas 0° 25

Figura 2.4-7. Medición de las dimensiones de las probetas con un calibre 25

Figura 2.5.1-1. Colocación de banda extensométrica (1) 26

Figura 2.5.1-2. Colocación de banda extensométrica (2) 26

Figura 2.5.1-3. Utensilios usados para la instrumentación 27

Figura 2.5.1-4. Soldador de estaño 27

Figura 2.5.1-5. Detalle de la soldadura (1) 27

Figura 2.5.1-6. Detalle de la soldadura (2) 27

Figura 2.5.1-7. Ensayo de tracción de probetas a 0° 28

Figura 2.5.1-8. Puente Wheatstone para medir deformaciones 28

Figura 2.5.2-1. Ensayo de tracción de probetas a 90° 30

Figura 2.5.2-2. Colocación de la probeta en la máquina de tracción 30

Figura 2.5.2-3. Probetas a 90° tras el ensayo de tracción 31

Figura 2.5.3-1. Compensación de efectos tangenciales al aplicar tracción	32
Figura 2.5.3-2. Ensayo de tracción en las probetas a $\pm 45^\circ$ (1)	32
Figura 2.5.3-3. Ensayo de tracción en las probetas a $\pm 45^\circ$ (2)	32

3. Fabricación de de los laminados angulares

Figura 3-1. Ilustración para la mejor comprensión de las medidas a tomar	35
Figura 3-2. Molde usado para la laminación de las ILTS	36
Figura 3-3. Lijado del molde	36
Figura 3-4. Laminación de los paneles de las ILTS (1)	36
Figura 3-5. Laminación de los paneles de las ILTS (2)	36
Figura 3-6. Colocación de la capa de airwave y las tomas de vacío	37
Figura 3-7. Colocación de la bolsa de vacío	37
Figura 3-8. Molde ya preparado para el proceso de curado en autoclave	37
Figura 3-9. Paneles curvados para las ILTS tras el proceso de curado en autoclave	38
Figura 3-10. Paneles planos tras el proceso de curado en autoclave	38

4. Fabricación e instrumentación de las probetas

Figura 4.1-1. Corte de las probetas ILTS	39
Figura 4.1-2. Probetas ILTS tras el proceso de corte	39
Figura 4.1-3. Medidas a tomar según la AITM 1-0069	40
Figura 4.1-4. Medida de las probetas ILTS con calibre	40
Figura 4.2-1. Dimensiones de la probeta a compresión según la norma AITM 1-0008	41
Figura 4.2-1. Corte de las probetas planas	42
Figura 4.2-2. Probetas a flexión ya cortadas	42
Figura 4.2-3. Probetas a compresión ya cortadas	42
Figura 4.2-4. Panales a tracción ya cortados	42
Figura 4.2-5. Probetas a compresión con los tacones	43
Figura 4.2-6. Probetas a tracción, ya cortadas, y con los tacones pegados	43
Figura 4.3-1. Posición de las bandas extensométricas (1)	45
Figura 4.3-2. Posición de las bandas extensométricas (2)	45
Figura 4.3-3. Lijado de la superficie a colocar la galga	46
Figura 4.3-4. Marcado de la cruceta sobre la superficie lijada	46
Figura 4.3-5. Resultado del pegado de bandas en las ILTS (1)	46
Figura 4.3-6. Resultado del pegado de bandas en las ILTS (2)	47
Figura 4.3-7. Resultado del pegado de bandas en las ILTS (3)	47

Figura 4.3-8. Resultado final de instrumentación sobre las ILTS (1)	48
Figura 4.3-9. Resultado final de instrumentación sobre las ILTS (2)	48
Figura 4.3-10. Resultado final de instrumentación sobre las ILTS (3)	48
Figura 4.4-1. Marcado del span de las probetas a compresión	49
Figura 4.4-2. Pegado de las bandas extensométricas en las probetas a flexión	49
Figura 4.4-3. Pegado de las bandas en las probetas a tracción	50
Figura 4.4-4. Pegado de las bandas en las probetas a compresión	50
Figura 4.4-5. Detalle de la soldadura del cable a las conexiones de la galga	50
Figura 4.4-6. Probetas a tracción ya instrumentadas	50
Figura 4.4-7. Probetas a compresión ya instrumentadas	51
Figura 4.4-8. Probetas a flexión ya instrumentadas	51

5. Ensayo de las probetas planas

Figura 5.1-1. Distancia de las láminas al plano medio del laminado	53
Figura 5.2-2. Obtención del Módulo Elástico según la norma ASTM D-3039	55
Figura 5.2-1. Ensayo de las probetas a tracción	56
Figura 5.2-2. Puente de Wheatstone para medir las deformaciones	56
Figura 5.3-1. Cálculo del Módulo Elástico a compresión según la norma AITM 1-0008	60
Figura 5.3-2. Puente de Wheatstone con el que se medirán las deformaciones	60
Figura 5.3-3. Colocación de la probeta de compresión	60
Figura 5.3-4. Detalle de las mordazas usadas para el ensayo a compresión	61
Figura 5.4-1. Configuración del ensayo de flexión en tres puntos	64
Figura 5.4-2. Utillaje empleado para la flexión en tres puntos	65
Figura 5.4-3. Diagrama de fletores para flexión en tres puntos	66
Figura 5.4-4. Perspectiva del ensayo de flexión en tres puntos	66
Figura 5.4-5. Puente de Wheatstone con el que nuevamente se medirán las deformaciones	66
Figura 5.4-6. Gráfica Carga-Deformaciones para la probeta T1-F1	67
Figura 5.4-7. Gráfica Carga-Deformaciones para la probeta T1-F2	68
Figura 5.4-8. Gráfica Carga-Deformaciones para la probeta T2-F1	69
Figura 5.4-9. Gráfica Carga-Deformaciones para la probeta T2-F2	70

6. Ensayo de las probetas ILTS

Figura 6-1. Curva típica Carga-Desplazamiento de laminados unidireccionales	71
Figura 6-2. Alzado del ensayo ILTS donde se describen algunas dimensiones y parámetros	73
Figura 6-3. Utillaje para la realización del ensayo ILTS	75

Figura 6-4. Vista para aclarar la disposición de los rodillos con respecto a la probeta	75
Figura 6-5. Medidas de la distancia entre rodillos según algunas dimensiones relativas al ensayo	75
Figura 6-6. Esquema de la posición de los rodillos con respecto a la zona curvada	76
Figura 6-7. Vista lateral del ensayo ILTS (1)	77
Figura 6-8. Vista lateral del ensayo ILTS (2)	77
Figura 6-9. Imagen frontal del ensayo ILTS	77
Figura 6-10. Detalle interior del ensayo ILTS	78
Figura 6-11. Vista frontal del ensayo de la T2-1	79
Figura 6-12. Detalle interior del ensayo de la T2-1	79
Figura 6-13. Vista lateral del ensayo de la T2-1 (1)	79
Figura 6-14. Vista lateral del ensayo de la T2-1 (2)	79
Figura 6-15. Curva P- δ del ensayo ILTS de la T2-1	80
Figura 6-16. Curva típica Carga-Desplazamiento de laminados multidireccionales	81
Figura 6-17. Datos de las bandas extensométricas en la T2-1	82
Figura 6-18. Detalle de la zona curvada tras el ensayo de la T2-1	83
Figura 6-19. Vista frontal del ensayo de la T1-1	84
Figura 6-20. Detalle interior del ensayo de la T1-1	84
Figura 6-21. Vista lateral del ensayo de la T1-1 (1)	84
Figura 6-22. Vista lateral del ensayo de la T1-1 (2)	84
Figura 6-23. Curva P- δ del ensayo ILTS de la T1-1	85
Figura 6-24. Detalle de la zona curvada tras el ensayo de la T1-1	86
Figura 6-25. Datos de las bandas extensométricas en la T1-1	87
Figura 6-26. Nueva disposición de las bandas extensométricas para las T1-2 y T2-2	88
Figura 6-27. Detalle de la soldadura de los cables a las nuevas galgas	88
Figura 6-28. Vista frontal del ensayo de la T2-2	88
Figura 6-29. Detalle interior del ensayo de la T2-2	88
Figura 6-30. Vista lateral del ensayo de la T2-2 (1)	88
Figura 6-31. Vista lateral del ensayo de la T2-2 (2)	88
Figura 6-32. Curva P- δ del ensayo ILTS de la T2-2	89
Figura 6-33. Detalle de la zona curvada tras el ensayo de la T2-2	90
Figura 6-34. Datos de las bandas extensométricas en la T2-2	91
Figura 6-35. Vista frontal del ensayo de la T1-2	91
Figura 6-36. Detalle interior del ensayo de la T1-2	91

Figura 6-37. Vista lateral del ensayo de la T1-2 (1)	92
Figura 6-38. Vista lateral del ensayo de la T1-2 (2)	92
Figura 6-39. Curva P- δ del ensayo ILTS de la T1-2	92
Figura 6-40. Detalle de la zona curvada tras el ensayo de la T1-2	94
Figura 6-41. Datos de las bandas extensométricas en la T1-2	95
Figura 6-42. Vista frontal del ensayo de la T2-3	95
Figura 6-43. Detalle interior del ensayo de la T2-3	95
Figura 6-44. Vista lateral del ensayo de la T2-3 (1)	96
Figura 6-45. Vista lateral del ensayo de la T2-3 (2)	96
Figura 6-46. Curva P- δ del ensayo ILTS de la T2-3	96
Figura 6-47. Detalle de la zona curvada tras el ensayo de la T2-3	98
Figura 6-48. Vista frontal del ensayo de la T1-3	98
Figura 6-49. Detalle interior del ensayo de la T1-3	98
Figura 6-50. Vista lateral del ensayo de la T1-3 (1)	99
Figura 6-51. Vista lateral del ensayo de la T1-3 (2)	99
Figura 6-52. Curva P- δ del ensayo ILTS de la T1-3	99
Figura 6-53. Detalle de la zona curvada tras el ensayo de la T1-3	101

Índice de tablas

2. Caracterización del material

Tabla 2.2-1. Dimensiones recomendadas para las probetas a 0° y 90°	20
Tabla 2.5.1-1. Medidas tomadas en la probetas a 0°	27
Tabla 2.5.1-2. Resultados del ensayo de tracción de probetas a 0°	27/28
Tabla 2.5.1-3. E_{11} obtenido para cada probeta	28
Tabla 2.5.1-4. ν_{12} obtenido para cada probeta	29
Tabla 2.5.2-1. Medidas de las probetas a 90°	30
Tabla 2.5.2-2. Resultados del ensayo de tracción de las probetas a 90°	30
Tabla 2.5.3-1. Medidas de las probetas a $\pm 45^\circ$	32
Tabla 2.5.3-2. Resultados de los ensayos sobre las probetas a $\pm 45^\circ$	32
Tabla 2.5.3-3. G_{12} obtenido para cada probeta	33

3. Fabricación de los laminados angulares

Tabla 3-1. Medidas recomendadas para las probetas ILTS según la norma AITM 1-0069	34
---	----

4. Fabricación e instrumentación de las probetas

Tabla 4.1-1. Medidas de la probetas Tipo 1	39
Tabla 4.1-2. Medidas de las probetas Tipo 2	39
Tabla 4.2-1. Medidas recomendadas de las probetas según las normas ASTM D-3039 y AITM 1-0008	40
Tabla 4.2-2. Medidas de las probetas a tracción	43
Tabla 4.2-3. Medidas de las probetas a compresión	43
Tabla 4.2-4. Medidas de las probetas a flexión	43

5. Ensayo de las probetas planas

Tabla 5.2-1. Resultados de los ensayos a tracción del Tipo 1	56
Tabla 5.2-2. Resultados de los ensayos a tracción del Tipo 2	57
Tabla 5.3-1. Resultados de los ensayos a compresión del Tipo 1	61
Tabla 5.3-2. Resultados de los ensayos a compresión del Tipo 2	62
Tabla 5.4-1. Resultados obtenidos para la probeta T1-F1	66
Tabla 5.4-2. Resultados obtenidos para la probeta T1-F2	67
Tabla 5.4-3. Resultados obtenidos para la probeta T2-F1	68
Tabla 5.4-4. Resultados obtenidos para la probeta T2-F2	69

6. Ensayo de las probetas ILTS

Tabla 6-1. Medidas de la probeta T1-1	78
Tabla 6-2. Medidas de la probeta T2-1	83
Tabla 6-3. Medidas de la probeta T2-2	88
Tabla 6-4. Medidas de la probeta T1-2	91
Tabla 6-5. Medidas de la probeta T2-3	95
Tabla 6-6. Medidas de la probeta T1-3	98

1. Introducción y objetivos:

El uso de materiales compuestos, concretamente de matriz epoxi reforzada con fibra de carbono, en los últimos años ha ido creciendo de manera considerable debido a las siguientes ventajas que presentan:

- Alta resistencia mecánica y alta rigidez
- Resistencia a la corrosión
- Bajo peso
- Aislamiento térmico y acústico
- Resistencia a la abrasión
- Inmune, aparentemente, a efectos de fatiga

Estas propiedades, sobre todo la relación resistencia-peso, hacen que los materiales compuestos estén siendo incluidos de forma muy extensa en componentes estructurales de todo tipo, más comúnmente en estructuras de aeronaves y en la industria del automóvil, entre otros. Sin embargo, presenta varios inconvenientes. Dos de los más característicos son su alto coste, especialmente aquellos que contienen fibras de carbono, y su proceso de fabricación, que si bien puede parecer sencillo a priori, presenta fases, como el proceso de curado en autoclave, que limitan bastante la producción en masa de estos materiales, debido a lo largo y costoso que puede resultar su fabricación.

Otro aspecto a tener en cuenta, y que, en muchos casos, puede resultar limitante, es el complejo estado de carga a que está sometido el material. Éste se presenta, comúnmente, en forma de laminados, los cuales, debido a esta característica, son no homogéneos y anisótropos, más concretamente ortótropos, encontrándose en cada una de las láminas tres planos de simetría elástica. Por ello, se debe recurrir a modelos de diseño más complejos como es la Teoría General de Laminados. Como se puede ver, lejos quedan las similitudes con materiales metálicos, como por ejemplo acero o aluminio, los cuales, al poder considerarse de manera bastante acertada homogéneos e isótropos, están sometidos a estados de carga más sencillos.

Es por este último motivo, el complejo estado tensional, por lo que se deben realizar múltiples ensayos con objeto de caracterizar el material antes de poder diseñar y fabricar cualquier componente. En concreto, el objeto de este proyecto se centra en realizar ensayos de flexión en cuatro puntos sobre dos series de probetas ILTS (probeta en forma de L formada por láminas de material compuesto) con el fin principal de obtener la resistencia interlaminar de dichas probetas, así como una curva Carga-Desplazamiento típica de estos ensayos. Este ensayo se sitúa en el contexto de calificación del material, en la base de la pirámide de ensayos (**Figura 1.1**), y su principal objetivo es, como se acaba de decir, estimar la resistencia interlaminar con vistas a intentar comprender y prevenir con mayor detalle la rotura por *unfolding*, es decir, la rotura debida a cargas interlaminares.

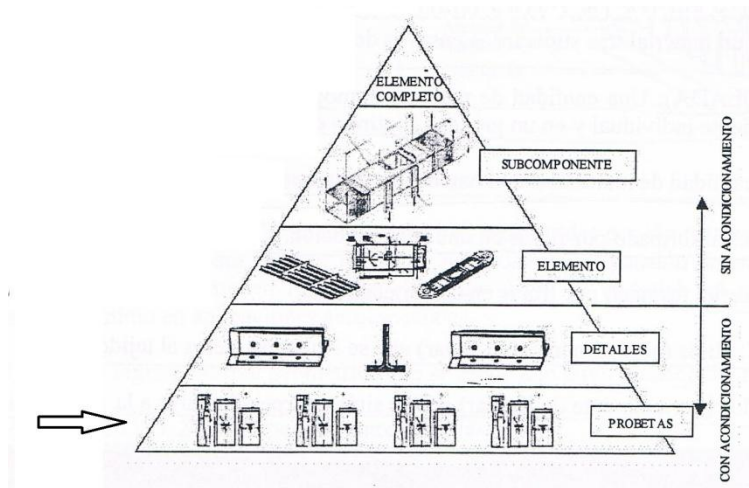


Figura 1.1. Pirámide de ensayos [2]

Una vez ya se han explicado, a rasgos generales, el motivo y el contexto de la realización de este trabajo, consistente, además de en la realización de los ensayos en las probetas ILTS, en la obtención de resultados con objeto de comparar y validar modelos analíticos y numéricos del citado ensayo, además de la fabricación y ensayo de panales planos del mismo material con objeto de caracterizar más profundamente el material. Por consiguiente, el trabajo constará de las siguientes etapas:

- **Caracterización del material:**

Para el material seleccionado se fabricarán las probetas necesarias para llevar a cabo la caracterización de las propiedades elásticas del mismo.

- **Fabricación de los laminados angulares:**

Para las dos secuencias de apilado seleccionadas se fabricarán dos laminados angulares. Las dimensiones de dichos laminados deberán ser suficientes para que de la parte curva se extraigan las probetas para el ensayo ILTS y de la parte plana se extraigan probetas planas para efectuar ensayos de caracterización de los laminados.

- **Fabricación e instrumentación de las probetas:**

Una vez fabricados los laminados angulares, se cortarán las probetas. Una vez cortadas se prestará especial atención a la medida de las características geométricas de las mismas, siendo de especial importancia medir con precisión el ángulo que forman los dos lados de la L en las probetas ILTS.

- **Ensayo de las probetas planas:**

Se ensayarán a tracción, compresión y flexión. Para cada ensayo habrá al menos dos probetas. En primer lugar, debe hacerse una estimación de los resultados que se deberían obtener del ensayo. Una vez ensayada la primera probeta, se verificará que los resultados coinciden con las predicciones. Si los resultados no coinciden razonablemente con las predicciones se instrumentarán (en la medida de lo posible) las probetas restantes con bandas extensométricas con objeto de ayudar a la futura correlación entre los resultados de los modelos con los resultados experimentales.

- **Ensayo de las probetas ILTS:**

Al igual que en los ensayos anteriores, previamente a la realización del ensayo se dispondrá de una estimación de los resultados que se deberían obtener. Una vez ensayada la primera probeta, se verificará que los resultados coinciden con las predicciones. Si los resultados no coinciden razonablemente con las predicciones se instrumentarán las probetas restantes con bandas extensométricas con objeto de ayudar a la futura correlación entre los resultados de los modelos con los resultados experimentales. Para la realización de estos ensayos se seguirán las directrices marcadas por dos normas:

ASTM D-6415

AITM 1-0069

Por lo tanto, los objetivos principales de este trabajo no son otros que caracterizar el material con el que se fabricarán los distintos tipos de laminado, una vez caracterizado fabricar las probetas ILTS y las probetas planas de acuerdo con el material ya caracterizado, para, finalmente, realizar los ensayos sobre las probetas curvadas y obtener de ellos, principalmente, dos resultados:

- 1) La resistencia interlaminar y la *Curved Beam Strength* (CBS)
- 2) La curva Carga-Desplazamiento

Una vez presentado el procedimiento y el guión que se va a seguir durante la ejecución del trabajo se puede comenzar con la realización de este proyecto, el cual comienza, como no podía ser de otra manera, con la caracterización del material.

2. Caracterización del material:

2.1 Descripción general:

Antes de fabricar los paneles que formarían posteriormente las probetas a ensayar para la caracterización del material, cabría hacer un breve comentario acerca del material que se va a usar. Este consiste en un material compuesto de matriz polimérica reforzada con fibras, concretamente de matriz epoxi reforzada con fibras de carbono. Se suministra en forma de pre-preg y el fabricante es HEXCEL Composites, así como su temperatura de almacenaje recomendada es de -18°C . A continuación se muestran algunos datos facilitados en la etiqueta de la bobina de pre-preg:

- **Fabricante:**
HEXCEL
- **Códigos identificativos:**
027692J
HexPly® M21E/34%/UD194/IMA-12K/300 ATL
- **Número de Lote:**
81212N11
- **Número de bobina:**
8347N107G
- **Cantidad:**
266 ML ; 79,80 m²
- **Temperatura de almacenaje:**
 -18°C

Este es el material que se va a manejar durante toda la realización de este trabajo, del que se obtienen las distintas láminas que forman los laminados de los que, a su vez, saldrán las probetas, tantos de tipo ILTS como planas.

Cabe destacar el trato que se ha hecho del material a lo largo de toda la fase de fabricación, siempre conservando la bobina de pre-preg a la temperatura específica y salvaguardándola en todo momento de la humedad. Para adaptar el uso de dicha bobina con el fin de cortar las distintas láminas que forman los laminados se debe extraer la bobina una hora antes del arcón congelador, el cual se encuentra a -18°C . Una vez que transcurre una hora, aproximadamente, el material ya está listo para ser manejado sin ningún tipo de problema. Siempre es importante, en la medida de lo posible, la utilización de guantes a la hora de manejar el material en la zona limpia del laboratorio habilitada para ello, ya que así se minimiza la inclusión de partículas en las láminas durante las fases de corte y de apilado.

En primer lugar, es necesario caracterizar el material para conocer los valores reales de E_{11} , E_{22} , ν_{12} y G_{12} , que pueden diferir de los ofrecidos por el fabricante. Estos valores son:

- E_{11} : Módulo elástico en la dirección de las fibras.
- E_{22} : Módulo elástico en la dirección perpendicular a las fibras.
- ν_{12} : Coeficiente de Poisson.
- G_{12} : Módulo de cizalladura.

Para obtener dichas propiedades se deben realizar los ensayos pertinentes de acuerdo a las siguientes normas y decisiones tomadas con los tutores. Los ensayos a realizar son los siguientes:

- Tracción: ensayos con fibra orientada según la dirección de la carga y según la dirección perpendicular a la misma.
 - Norma ASTM D-3039
 - Norma UNE EN 2561
- Tracción: ensayos sobre laminados equiangulares con fibra orientada a $\pm 45^\circ$
 - Norma ASTM D-3518.
 - En este caso se eligió el ensayo sobre laminados equiangulares a $\pm 45^\circ$ por acuerdo con el profesor Jesús Justo, ya que la obtención de resultados es más sencilla que en el ensayo "Off-Axis", que era la otra alternativa que se manejó.

2.2 Fabricación de las probetas:

Antes de poder realizar los ensayos se han fabricado las probetas a ensayar. Para ello se ha usado el pre-preg facilitado en el laboratorio, cortando el rollo (**Figuras 2.2-1 y 2.2-2**) en las láminas que hacen falta para posteriormente fabricar los paneles de donde se obtendrán las probetas.



Figura 2.2-1. Corte de láminas (1)

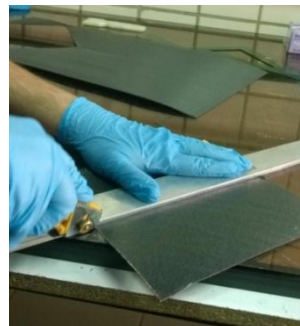


Figura 2.2-2. Corte de láminas (2)

Según la norma ASTM D-3039 las dimensiones recomendadas de las probetas a 0° y 90° , así como de los tacones de fibra de vidrio a usar, son las mostradas en la **Tabla 2.2-1**.

Orientación de las fibras	Ancho (mm)	Longitud (mm)	Espesor (mm)	Longitud del tacón (mm)	Espesor del tacón (mm)
0°	15	250	1	56	1,5
90°	25	175	2	25	1,5

Tabla 2.2-1. Dimensiones recomendadas para las probetas a 0° y 90° (ASTM D-3039)

Además, según la norma mencionada, el número mínimo de ensayos a realizar para cada tipo de probeta será de 5, es decir, 5 ensayos con las fibras orientadas a 0° y 5 con orientación a 90° . Se supondrá un espesor de lámina de $0,25\text{ mm}$ cada una, así para fabricar el panel de las probetas a 0° se tendrán que cortar 4 láminas y para el panel de probetas a 90° serán 8 láminas.

Para las probetas a $\pm 45^\circ$ se fabrica un panel (**Figura 2.2-3**) de tal manera que la longitud y el espesor sean iguales que las probetas de 0° , es decir, 250 mm y 1 mm (4 láminas) respectivamente, y el ancho sea un número intermedio entre las de 0° y 90° , por lo que 20 mm será suficiente para dicha medida.



Figura 2.2-3. Láminas a $\pm 45^\circ$

Una vez cortadas las láminas, se procede a una primera compactación inicial de las mismas, con objeto de facilitar su manejo de cara a fabricar el molde a introducir en el autoclave. Para ello se usa un secador convencional para reducir la viscosidad de la resina y se incide sobre las láminas a pegar con una espátula de nailon (**Figuras 2.2-4 y 2.2-5**). Se repite esta operación de lámina en lámina, empezando por las dos primeras, hasta que se finaliza de compactar primariamente el panel. A continuación se empieza con el siguiente panel, y así hasta haber acabado con los tres paneles.



Figura 2.2-4. Laminación con la ayuda de un secador

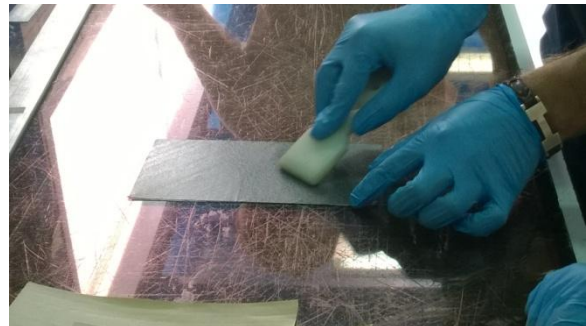


Figura 2.2-5. Laminación mediante espátula de nailon

Una vez que ya se han cortado y compactado las láminas para dar forma a los tres paneles, se procede a la construcción de la bolsa de vacío y posterior curado en autoclave de los paneles.

2.3 Elaboración de la bolsa de vacío y curado en autoclave:

Para el curado de los paneles se usa un molde abierto consistente en una placa plana de metal. El procedimiento es el siguiente:

- Se coloca un cuadrado de teflón fino con la superficie suficiente para que quepan los tres paneles.
- Se ubican los paneles y se rodean con cinta de corcho en todo su perímetro (**Figura 2.3-1**).
- Se cubre todo con una capa de nailon.

- Se cubre de nuevo el conjunto, pero esta vez con tejido aireador para asegurar que el vacío sea efectivo.
- Se coloca en todo el perímetro de la placa metálica la cinta adhesiva sellante.
- Seguidamente se ponen las válvulas donde irá conectada el conducto por el cual se extraerá el aire presente en la bolsa.
- Finalmente, se coloca la bolsa, de teflón grueso, con mucho cuidado para que no haya escapes por la cinta adhesiva. Para asegurar esto último, se repasan todos los bordes, con especial atención en las esquinas, con la espátula de nailon.

Ya se ha fabricado la bolsa para los tres paneles (**Figura 2.3-2**), de donde se obtendrán las probetas de caracterización del material, y, por consiguiente, se procede a preparar el autoclave para el curado de los paneles.

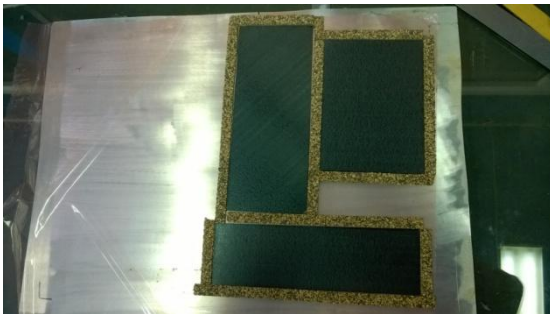


Figura 2.3-1. Fabricación de la bolsa de vacío



Figura 2.3-2. Configuración del molde en autoclave

Ahora ya se procede a introducir el molde en el autoclave, pero antes de ponerlo en marcha se debe comprobar que la bolsa de vacío se ha hecho de manera correcta. Para ello se conectan las válvulas a un depósito que va a hacer el vacío en la bolsa, manteniendo la presión de dicho depósito a $0,8 \text{ MPa}$. Para comprobar que se hace el vacío de forma correcta, se vigila que la presión se mantenga constante, comprobando que no varía durante 15-20 segundos en el display del cuadro de mandos del autoclave (**Figura 2.3-3**). Una vez comprobado que el vacío es efectivo, se introduce el molde en el autoclave (**Figuras 2.3-4 y 2.3-5**) y se deja curar según el ciclo de curado facilitado por el fabricante.



Figura 2.3-3. Display de control del autoclave



Figura 2.3-4. Autoclave ya listo para empezar el curado

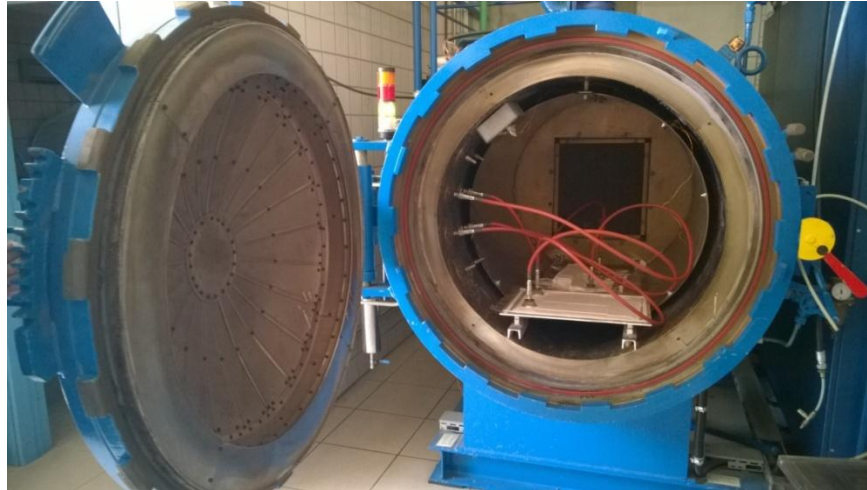


Figura 2.3-5. Vista del autoclave antes de cerrarlo y empezar el ciclo de curado

2.4 Mecanizado de los paneles y pegado de los tacones:

Una vez terminado el procedimiento de curado de los paneles, se procede a su extracción del molde. Una vez extraídos se procede a su resanado, es decir, al corte del material sobrante en los bordes. Esto se debe a que la resina tiende a fluir hacia el exterior del panel, creándose un reborde que se tiene que cortar. Una vez cortados los bordes, así como los tacones a pegar en los paneles, empleando una sierra de disco de diamante (**Figura 2.4-1**), se procede al pegado de los tacones.



Figura 2.4-1. Sierra de abrasión del LERM



Figura 2.4-2. Proceso de pegado de los tacones

La medida de los tacones será de 40 *mm* de ancho.

Lo primero a realizar es lijar bien la superficie donde van a ir pegados los tacones al panel. Una vez se haya lijado, se limpia bien la zona de trabajo, así como los paneles, empleando acetona. Posteriormente, se cortan a medida los tacones de fibra de vidrio, con la sierra, y el adhesivo, con el cúter. Finalmente, antes de proceder al curado del adhesivo entre los tacones y los paneles, se pega una cinta de alta temperatura en los paneles, lo más próxima posible a los

tacones, para facilitar la posterior extracción de adhesivo y resina sobrantes que fluyan hacia el exterior. Todo esto se puede apreciar en la **Figura 2.4-2**.

A continuación se introducen los paneles junto con los tacones muy cuidadosamente en la prensa de platos calientes (**Figura 2.4-3**), y se procede a curar la resina y el adhesivo de los tacones a una temperatura de 120°C y a una fuerza de presión de 10 kN durante 90 minutos.

Terminado este proceso, ya se han obtenido los paneles con los tacones de fibra de vidrio pegados (**Figura 2.4-4**).

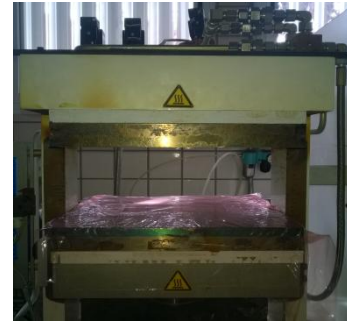


Figura 2.4-3. Prensa de platos calientes

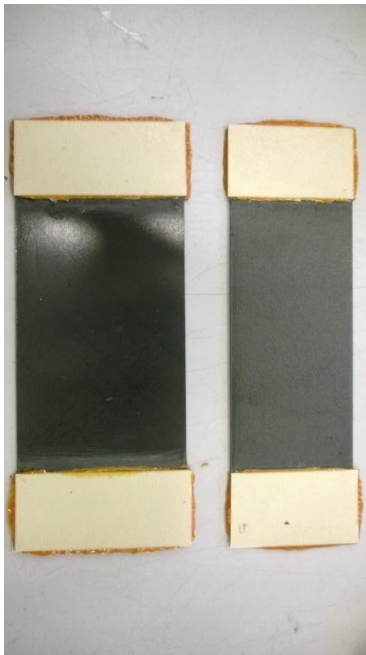


Figura 2.4-4. Paneles con los tacones ya pegados

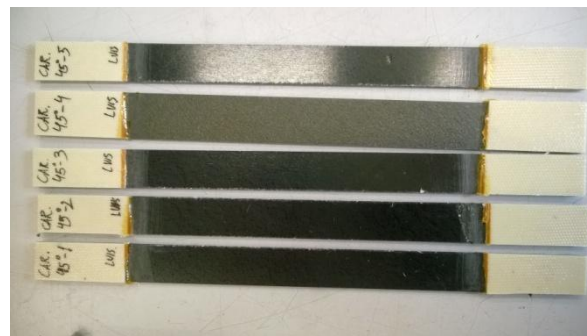


Figura 2.4-5. Probetas $\pm 45^{\circ}$

Ya se puede proceder a cortar los paneles para obtener las probetas a ensayar. De nuevo se emplea la sierra para cortar los paneles según las medidas establecidas en la norma, obteniéndose unas probetas tal y como se puede observar en las **Figuras 2.4-5** y **2.4-6**.

Posteriormente se procede al ensayo de las probetas, para lo cual se deberán tomar previamente las medidas de las mismas con la ayuda de un calibre (**Figura 2.4-7**).

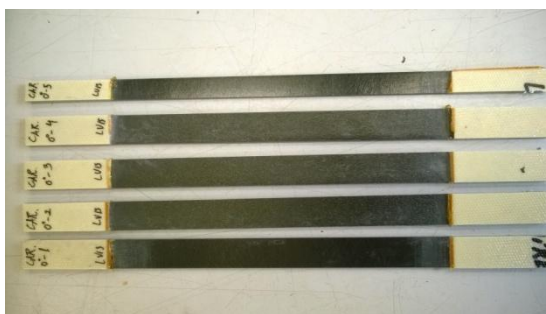


Figura 2.4-6. Probetas 0°

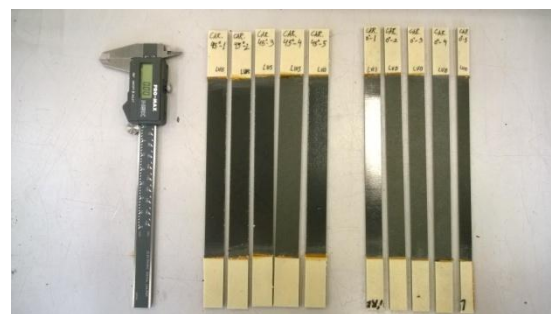


Figura 2.4-7. Medición de las dimensiones de las probetas con un calibre

2.5 Ensayos de caracterización:

2.5.1 Ensayo de tracción con fibras a 0°:

Lo que se pretende con este ensayo es obtener el Módulo elástico en la dirección de las fibras, E_{11} , así como el Coeficiente de Poisson, ν_{12} . Según la norma ASTM D-3039, el Coeficiente de Poisson se podría obtener también del ensayo de tracción con fibras a 90°, que sería en ese caso ν_{21} , ya que la matriz de rigidez del laminado es simétrica y ambos coeficientes son equivalentes por la siguiente relación:

$$\frac{\nu_{12}}{E_{11}} = \frac{\nu_{21}}{E_{22}}; \quad (1)$$

Pero es mejor obtener este coeficiente, ν_{12} , por dos razones:

- El valor obtenido en el ensayo con las fibras a 0° tiene menor dispersión.
- En el ensayo con las fibras a 90° el modo de fallo podría ser otro distinto al deseado, como la rotura por una interfase fibra-matriz defectuosa, y el error en la medida de ν_{21} podría ser mayor.

Para medir ambos coeficientes se debe hacer uso de bandas extensométricas, ya que es necesario medir la deformación en la dirección de aplicación de la carga (ϵ_{11}) y en la dirección perpendicular (ϵ_{22}). Para ello, se han pegado bandas extensométricas en las cinco probetas, con las fibras orientadas a 0°, del tipo 1-XY31-3/120. El procedimiento para pegar las bandas es el siguiente:

- Primero se lija la superficie donde va a ir pegada la banda, para asegurar una superficie libre de rugosidades y que garantice un buen pegado.
- En segundo lugar se limpia la superficie lijada con acetona, con objeto de eliminar toda partícula residual que pueda dificultar el pegado.
- Seguidamente se marca la probeta con una herramienta de precisión, con objeto de señalar el punto medio de la misma de la manera más precisa posible.
- Se procede al pegado de la banda. Pero antes, mediante una cinta adhesiva convencional, se coloca la banda sobre la posición correcta donde debería ir (**Figuras 2.5.1-1 y 2.5.1-2**).



Figura 2.5.1-1. Colocación de banda extensométrica (1)

Figura 2.5.1-2. Colocación de banda extensométrica (2)

- Finalmente, se aplica un catalizador en las superficies a pegar y se emplea el pegamento para adherir la banda a la probeta.

Una vez pegadas las bandas, para poder obtener información de las mismas y, posteriormente, procesar los datos mediante un Puente de Wheatstone, se deben soldar unos cables a los contactos de las bandas. El procedimiento seguido es el siguiente (**Figura 2.5.1-3**):

- Primero, se cogen y cortan los trozos de cables que se necesiten mediante unos alicates y un pelacables.
- Seguidamente se decapan y estañan las puntas de los cables que irán soldadas, con objeto de mejorar y facilitar la soldadura.
- A continuación se limpian y se decapan los contactos de la banda mediante un lápiz de fibra de vidrio y un decapante tipo rotulador, respectivamente.



Figura 2.5.1-3. Utensilios usados para la instrumentación



Figura 2.5.1-4. Soldador de estaño

- Finalmente, mediante un soldador de estaño (**Figura 2.5.1-4**), se sueldan las puntas del cable a los contactos, como se puede ver en la **Figura 2.5.1-5**.

Con el fin de proteger y asegurar la soldadura, se recubre toda la zona de la banda extensométrica con cinta adhesiva convencional (**Figura 2.5.1-6**).



Figura 2.5.1-5. Detalle de la soldadura (1)



Figura 2.5.1-6. Detalle de la soldadura (2)

Ahora ya estamos en condiciones de realizar el ensayo de tracción (**Figura 2.5.1-7**). Para medir las dos propiedades que se deben obtener de este ensayo, E_{11} y ν_{12} , se van a medir cinco puntos por cada probeta, sin llegar a la rotura, de tal manera que en cada punto se medirá la carga, la deformación en la dirección de aplicación de la carga y la deformación en la dirección transversal a la misma. La primera de ellas, la carga, se tomará directamente de la máquina de ensayo, mientras que las otras dos, ϵ_{11} y ϵ_{22} , se tomarán del puente de Wheatstone (**Figura 2.5.1-8**) facilitado para ello. Los resultados obtenidos en los ensayos se pueden apreciar en la **Tabla 2.5.1-2**.



Figura 2.5.1-7. Ensayo de tracción de probetas a 0° **Figura 2.5.1-8.** Puente Wheatstone para medir deformaciones

Antes de realizar los ensayos se tuvieron que tomar las medidas de las probetas, las cuales se pueden apreciar en la **Tabla 2.5.1-1**. Para obtener las medidas en general, el método utilizado es el siguiente. Para las medidas de anchura y espesor se toman 3 medidas de cada por cada probeta. Esto es, para el ancho se mide en el centro de la probeta, en la parte inferior media y en la parte superior media. Y lo mismo para el espesor de las probetas. Una vez tomadas, se realiza la media para las medidas de anchura y espesor en cada probeta, y ese valor es el que finalmente se considerará de referencia para aproximar el área de la sección de la probeta.

MEDIDAS 0°		
Nº Probeta	Espesor (mm)	Ancho (mm)
1	0,82	13,99
2	0,8	13,93
3	0,8	13,93
4	0,79	13,98
5	0,78	10,18

Tabla 2.5.1-1. Medidas tomadas en la probetas a 0°

Los resultados de los ensayos de tracción con las probetas cuyas fibras están orientadas a 0° se muestran en la **Tabla 2.5.1-2**.

PROBETA 1			PROBETA 2			PROBETA 3		
Carga (kg)	ϵ_{11} ($\mu\epsilon$)	ϵ_{22} ($\mu\epsilon$)	Carga (kg)	ϵ_{11} ($\mu\epsilon$)	ϵ_{22} ($\mu\epsilon$)	Carga (kg)	ϵ_{11} ($\mu\epsilon$)	ϵ_{22} ($\mu\epsilon$)
50	255	-103	50	258	-104	50	325	-166
100	540	-199	100	584	-205	100	601	-273
150	830	-290	150	864	-302	150	912	-370
200	1120	-399	200	1200	-410	200	1221	-481
250	1400	-500	250	1452	-502	250	1488	-591

PROBETA 4			PROBETA 5		
Carga (kg)	ε_{11} ($\mu\varepsilon$)	ε_{22} ($\mu\varepsilon$)	Carga (kg)	ε_{11} ($\mu\varepsilon$)	ε_{22} ($\mu\varepsilon$)
50	315	-122	50	397	-162
100	625	-228	100	811	-285
150	931	-341	150	1237	-410
200	1220	-430	200	1637	-521
250	1543	-550	250	2062	-635

Tabla 2.5.1-2. Resultados del ensayo de tracción de probetas a 0°

Con las medidas de las probetas y los resultados del ensayo, ya se pueden procesar los datos obtenidos para calcular E_{11} y ν_{12} . Primero, para calcular E_{11} se sigue el siguiente procedimiento:

- Se calcula la tensión para cada punto en cada probeta, dividiendo la carga por el área de la sección transversal de la probeta.
- Con la tensión, y con la medida de ε_{11} obtenida, ya se puede calcular el E_{11} en cada punto.

$$E_{11} = \frac{\Delta\sigma_{11}}{\Delta\varepsilon_{11}}; \quad (2)$$

- Finalmente, con los cinco resultados de E_{11} obtenidos para cada uno de los cinco puntos se realiza un promedio y se obtendría así el E_{11} de dicha probeta. En la **Tabla 2.5.1-3** se pueden observar los resultados de cada probeta.

RESULTADOS E_{11}	
Nº Probeta	E_{11} (GPa)
1	158,22
2	153,33
3	148,01
4	146,54
5	154,64

Tabla 2.5.1-3. E_{11} obtenido para cada probeta

- Una vez obtenidos los E_{11} de cada probeta, se realiza la media de las mismas y se obtendría así el E_{11} .

Módulo elástico longitudinal: $E_{11} = 152,15 \text{ GPa}$

Ahora se procede a calcular el Coeficiente de Poisson, ν_{12} , para lo cual se sigue el siguiente procedimiento:

- Con las medidas de ε_{11} y ε_{22} se calcula ν_{12} en cada uno de los cinco puntos medidos en cada probeta, mediante la siguiente expresión:

$$\nu_{12} = -\frac{\Delta\varepsilon_{22}}{\Delta\varepsilon_{11}}; \quad (3)$$

- A partir de los valores de ν_{12} obtenidos para cada medida, se hace el promedio de los cinco valores obtenidos en cada probeta, y así se obtendría el valor de ν_{12} de cada probeta (**Tabla 2.5.1-4**).

RESULTADOS ν_{12}	
Nº Probeta	ν_{12}
1	0,37
2	0,36
3	0,43
4	0,37
5	0,34

Tabla 2.5.1-4. ν_{12} obtenido para cada probeta

- Finalmente, para obtener el ν_{12} se realiza un promedio entre los ν_{12} de cada probeta, resultando un Coeficiente de Poisson igual a:

$$\text{Coeficiente de Poisson: } \nu_{12} = 0,37$$

2.5.2 Ensayo de tracción con fibras a 90°:

De este ensayo se pretende obtener el Módulo elástico en dirección transversal a las fibras, E_{22} , según la norma ASTM D-3039. Por lo que solo hará falta un extensómetro que mida la deformación en la dirección de aplicación de la carga (**Figura 2.5.2-1**). Al colocar la probeta (**Figura 2.5.2-2**) es muy importante garantizar un correcto alineamiento, ya que un defecto del mismo podría traducirse en una rotura prematura de la probeta.



Figura 2.5.2-1. Ensayo de tracción de probetas a 90°



Figura 2.5.2-2. Colocación de la probeta en la máquina de tracción

Para obtener las medidas el método utilizado es el siguiente. Para las medidas de anchura y espesor se toman 3 medidas de cada por cada probeta. Esto es, para el ancho se mide en el

centro de la probeta, en la parte inferior media y en la parte superior media. Y lo mismo para el espesor de las probetas. Una vez tomadas, se realiza la media para las medidas de anchura y espesor en cada probeta, y ese valor es el que finalmente se considera de referencia para aproximar el área de la sección de la probeta.

Las medidas obtenidas para las cinco probetas de este ensayo han sido las mostradas en la **Tabla 2.5.2-1**.

MEDIDAS 90°		
Nº Probeta	Espesor (mm)	Ancho (mm)
1	1,9	20,07
2	1,88	19,92
3	1,89	19,84
4	1,92	19,92
5	1,9	20,04

Tabla 2.5.2-1. Medidas de las probetas a 90°

Los resultados obtenidos en el ensayo de tracción son mostrados en la **Tabla 2.5.2-2**.

RESULTADOS 90°		
Nº Probeta	Módulo Young (MPa)	Resistencia (MPa)
1	8636,71	44,07
2	9082,61	50,01
3	8506,23	41,94
4	8613,95	43,58
5	8863,62	47,92

Tabla 2.5.2-2. Resultados del ensayo de tracción de las probetas a 90°

Como se quiere obtener E_{22} , se toma la media de los cinco valores obtenidos. Por lo tanto:

$$\text{Módulo elástico transversal: } E_{22} = 8,74 \text{ GPa}$$

En la **Figura 2.5.2-3** se pueden observar tres probetas después de haber sido ensayadas, produciéndose su rotura en la zona próxima a los tacones.



Figura 2.5.2-3. Probetas a 90° tras el ensayo de tracción

2.5.3 Ensayos sobre laminados equiangulares $\pm 45^\circ$:

El último de los ensayos de caracterización a realizar tiene como objetivo calcular el Módulo de cizalladura G_{12} . Para ello ensayaremos laminados equiangulares $\pm 45^\circ$, según la norma ASTM D-3518. De los numerosos ensayos que existen para calcular el G_{12} , se descartaron todos menos dos: el ensayo "Off-Axis" y el de laminados $\pm 45^\circ$. Finalmente se decidió realizar este último por sencillez a la hora de obtener los resultados. El por qué de su sencillez, como se puede observar en la **Figura 2.5.3-1**, es porque el hecho de usar un laminado simétrico equiangular garantiza que los efectos de acoplamiento entre efectos normales y tangenciales se ven compensados por la simetría del laminado.

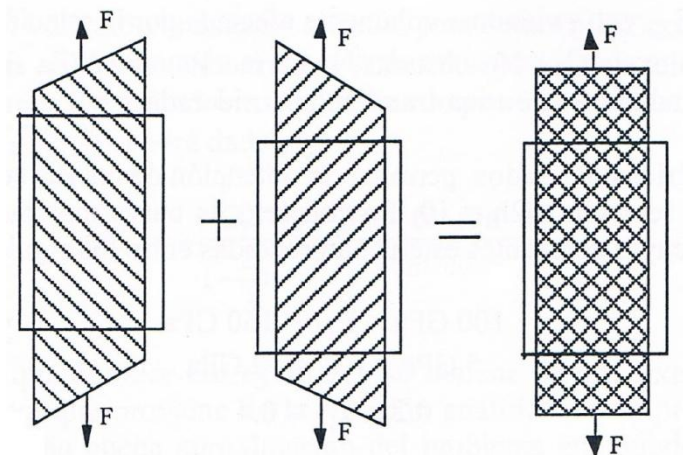


Figura 2.5.3-1. Compensación de efectos tangenciales al aplicar tracción [2]

Otras de las ventajas que presenta este método, y que comparte con el "Off-Axis", es la sencillez del ensayo en sí, ya que únicamente consiste en un ensayo de tracción (**Figuras 2.5.3-2 y 2.5.3-3**).



Figura 2.5.3-2. Ensayo de tracción en las probetas a $\pm 45^\circ$ (1)



Figura 2.5.3-3. Ensayo de tracción en las probetas a $\pm 45^\circ$ (2)

Para calcular G_{12} se debe medir la deformación en la dirección de aplicación de la carga y en dirección perpendicular, ya que la deformación tangencial, necesaria para calcular G_{12} , se obtiene de restar a la primera (ε_{xx}) la segunda (ε_{yy}). Esto, junto a la tensión, que se calcula como el cociente de la carga aplicada y la sección de la probeta, permite calcular G_{12} .

$$\left. \begin{aligned} \gamma_{12} &= \varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy} \\ \sigma_{12} &= \frac{F}{A} \end{aligned} \right\} \longrightarrow G_{12} = \frac{\sigma_{12}}{\gamma_{12}} \quad (4)$$

Ahora que ya se sabe cómo calcular G_{12} , se procede a su obtención. Antes de realizar el ensayo, se deben medir las dimensiones de las probetas. Para ello el procedimiento es el mismo que el descrito para los dos ensayos anteriores. Dichas medidas se pueden ver en la **Tabla 2.5.3-1**.

MEDIDAS $\pm 45^\circ$		
Nº Probeta	Espesor (mm)	Ancho (mm)
1	0,82	17,27
2	0,84	17,32
3	0,84	17,44
4	0,79	20,69
5	0,85	17,36

Tabla 2.5.3-1. Medidas de las probetas a $\pm 45^\circ$

Los resultados del ensayo, en el cual no se llega a la rotura de las probetas en ningún momento, se muestran en la **Tabla 2.5.3-2**.

PROBETA 1			PROBETA 2			PROBETA 3		
Carga (kg)	ε_{xx} ($\mu\varepsilon$)	ε_{yy} ($\mu\varepsilon$)	Carga (kg)	ε_{xx} ($\mu\varepsilon$)	ε_{yy} ($\mu\varepsilon$)	Carga (kg)	ε_{xx} ($\mu\varepsilon$)	ε_{yy} ($\mu\varepsilon$)
50	1600	-1354	20	422	-325	20	414	-312
100	3630	-3159	40	1092	-851	40	1116	-838
120	4971	-4434	60	1820	-1435	60	1859	-1411
150	7232	-6861	80	2667	-2137	80	2682	-2084
			100	3626	-2953	100	3638	-2870
PROBETA 4			PROBETA 5					
Carga (kg)	ε_{xx} ($\mu\varepsilon$)	ε_{yy} ($\mu\varepsilon$)	Carga (kg)	ε_{xx} ($\mu\varepsilon$)	ε_{yy} ($\mu\varepsilon$)			
20	360	-246	20	423	-301			
50	1234	-890	40	1115	-824			
60	1574	-1134	60	1856	-1409			
80	2230	-1651	80	2676	-2074			
100	2945	-2241	100	3620	-2869			

Tabla 2.5.3-2. Resultados de los ensayos sobre las probetas a $\pm 45^\circ$

Mencionar que las medidas de las deformaciones ε_{xx} y ε_{yy} se han obtenido nuevamente con un puente de Wheatstone (**Figura 2.5.1-8**).

Con las medidas de las probetas y los resultados del ensayo, ya estamos en condiciones de calcular G_{12} . Nuevamente, se toman cinco puntos de medida de deformaciones y carga para cada probeta, para así poder hacer promedio en cada probeta. Para ello se sigue el siguiente procedimiento:

- Se mide para cada punto la carga y las deformaciones.
- Con los valores obtenidos se calculan σ_{12} y γ_{12} para cada punto, y finalmente se obtiene G_{12} para cada medida.
- Con el G_{12} en cada punto, se hace promedio de los cinco valores, y así obtendríamos el G_{12} de cada probeta (**Tabla 2.5.3-3**).

RESULTADOS G_{12}	
Nº Probeta	G_{12} (GPa)
1	10,62
2	9,65
3	9,61
4	10,95
5	9,61

Tabla 2.5.3-3. G_{12} obtenido para cada probeta

- Finalmente, se hace promedio para obtener el G_{12} , que resulta ser:

$$\text{Módulo de cizalladura: } G_{12} = 10,089 \text{ GPa}$$

2.6 Discusión de resultados:

Ahora se comparan los valores de las propiedades del material obtenidos en los ensayos con valores orientativos de las mismas proporcionados en las normas, con el fin de dar validez a los resultados obtenidos.

Según la norma ASTM D-3039 para ensayos de tracción con fibra a 0° y 90° , los resultados orientativos de E_{11} y E_{22} , según un promedio de los resultados obtenidos de ensayos realizados por distintos laboratorios, son los siguientes:

$$E_{11}^{Norma} = 162,51 \text{ GPa} ; E_{22}^{Norma} = 8,96 \text{ GPa}$$

Ambos valores con una dispersión menor, en promedio, de 2,22 %.

Los valores obtenidos en nuestros ensayos son los siguientes:

$$E_{11}^{Ensayos} = 152,15 \text{ GPa} ; E_{22}^{Ensayos} = 8,74 \text{ GPa}$$

Con una dispersión de E_{11} y E_{22} de 2,56% y 2,11%, respectivamente.

De los valores de G_{12} y ν_{12} no se han encontrado valores de referencia en las normas. Por lo tanto, se puede considerar que los resultados obtenidos son razonables, en comparación con los resultados expuestos en la norma arriba mencionada.

3. Fabricación de los laminados angulares:

Una vez caracterizado el material con el que se van a fabricar las probetas ILTS, se procede a fabricar los laminados angulares de donde saldrán dichas probetas.

Se fabricarán dos laminados, con diferentes configuraciones, secuencias de apilado y número de láminas cada uno. El diseño de dichos parámetros corrió a cargo Juan Manuel González Cantero bajo la supervisión de Enrique Graciani y la posterior aprobación de Jesús Justo. La secuencia de apilado de las láminas se muestra a continuación para los dos tipos de probeta:

- **Tipo 1:** [45/0/0/0/-45]_s
- **Tipo 2:** [45/0/0/-45/90/45/0]_s

El primer paso en el diseño de dichos laminados es ver qué dimensiones deberían de tener para que de ellos se puedan obtener las probetas con las dimensiones apropiadas para que el ensayo tenga validez. Para ello se han seguido las directrices y recomendaciones de las normas AITM 1-0069 y ASTM D-6415, aunque realmente se ha tomado la norma de Airbus, la primera, como la de referencia, ya que en ella se especifican con más detalle las dimensiones de las probetas, siendo las que se van a fabricar muy similares a las descritas en dicha norma.

Las dimensiones de las probetas se muestran en la **Tabla 3-1**, con la ilustración de lo que significan cada una de ellas en la **Figura 3-1**.

t (mm)	w (mm)	Ri (mm)	α (°)	L (mm)
$2 < t < 4$	25	5	90	65

Tabla 3-1. Medidas recomendadas para las probetas ILTS según la norma AITM 1-0069

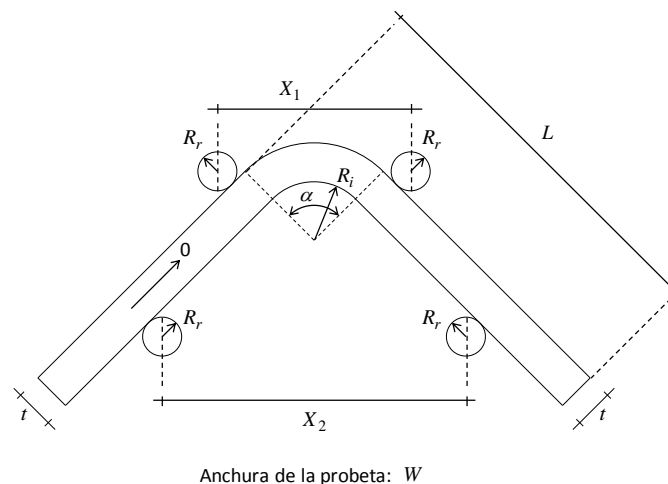


Figura 3-1. Ilustración para la mejor comprensión de las medidas a tomar

Una vez definidas las dimensiones de las probetas, unido al número mínimo de especímenes a ensayar, que según la norma serán 5, se procede a diseñar los paneles y a cortar las diferentes láminas que lo constituirán. Primero se trazan las líneas que definen las láminas sobre el rollo de pre-preg facilitado, para posteriormente cortar dichas láminas, tal y como se mostró en las **Figuras 2.2-1** y **2.2-2**. Seguidamente se apilarán las láminas sobre el molde, con una capa de

teflón fino entre ambas que actuará de antiadherente. Cabe hacer una mención especial al molde que se va a emplear, ya que se trata de un trozo de viga en L de acero (**Figura 3-2**), el cual tuvo que ser mecanizado para obtener el radio interior especificado por la norma ($R_i = 5\text{ mm}$). Además tuvo que someterse a un proceso de fresado y lijado para eliminar las rugosidades que presentaba en su superficie, tal y como se muestra en la **Figura 3-3**.



Figura 3-2. Molde usado para la laminación de las ILTS



Figura 3-3. Lijado del molde

Siguiendo con la descripción de la laminación, las láminas han sido apiladas sobre el molde (**Figura 3-4** y **Figura 3-5**) con la ayuda de un secador y una espátula de nailon, lo primero para reducir viscosidad de la resina y lo segundo para alisar lo máximo posible los laminados antes de fabricar la bolsa de vacío. Ambas técnicas ya fueron mostradas en las **Figuras 2.2-4** y **2.2-5**, respectivamente.

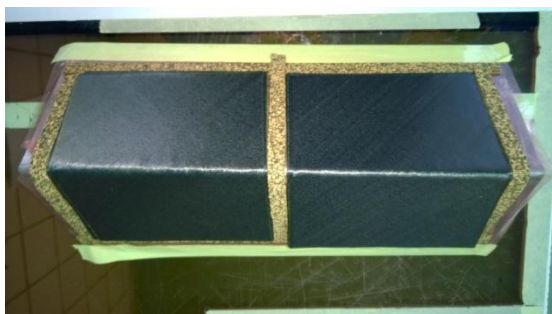


Figura 3-4. Laminación de los paneles de las ILTS (1)



Figura 3-5. Laminación de los paneles de las ILTS (2)

Como se puede ver en las figura arriba mostradas, también se dispuso una cinta de corcho perimetral a sendos laminados, con el objetivo de contener la resina una vez que ésta fluya durante el proceso de curado en autoclave.

Seguidamente se colocó una capa de *airwave* sobre los laminados y bajo las tomas de vacío (**Figura 3-6**), con objeto de que la succión a realizar en el autoclave resulte efectiva.



Figura 3-6. Colocación de la capa de airwave y de las tomas de vacío

Finalmente, para acabar con la construcción del molde, se fijará el mismo con la colocación de una bolsa de vacío, de teflón grueso, tal y como se puede observar en la **Figura 3-7**. Al ser la geometría del molde singular, se pensó en colocar las tomas de vacío sobre una de las caras posteriores de la viga en L. La adhesión de la bolsa al molde se realizará mediante una cinta adhesiva sellante de cromato. El resultado se puede ver en la **Figura 3-8**.



Figura 3-7. Colocación de la bolsa de vacío



Figura 3-8. Molde ya preparado para el proceso de curado en autoclave

Mencionar que para ésta parte se preveía fabricar los paneles un poco más largos por uno de sus brazos, con el objetivo de obtener de esa zona unas probetas planas sobre las que realizar los ensayos de caracterización de tracción, compresión y flexión previos a los ensayos de las probetas ILTS. Ante la imposibilidad de realizar este alargamiento, ya que la viga de mayor brazo (la empleada realmente) no daba suficiente longitud para realizar dicho alargamiento, se han fabricado paralelamente unos paneles con la misma configuración que los paneles de las probetas ILTS. El proceso de fabricación de estos laminados es idéntico al empleado para las probetas de caracterización del material, ya que se ha usado un molde plano de aluminio. Como las condiciones de curado serán las mismas para ambos moldes, entonces se prevé que los ensayos de caracterización sobre los laminados planos serán igualmente válidos.

Una vez que ya hemos fabricado el molde de las probetas ILTS, se procede a introducir ambos moldes en el autoclave para unas condiciones iguales al ciclo descrito en el capítulo 2. El resultado se puede ver en las siguientes imágenes: paneles para las probetas ILTS en la **Figura 3-9** y paneles para las probetas planas en la **Figura 3-10**.

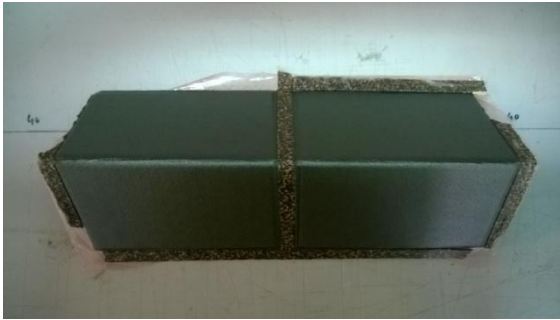


Figura 3-9. Paneles curvados para las ILTS tras el proceso de curado en autoclave

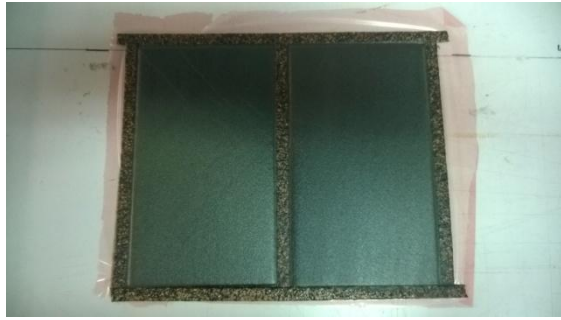


Figura 3-10. Paneles planos tras el proceso de curado en autoclave

4. Fabricación e instrumentación de las probetas:

4.1 Fabricación de las probetas ILTS:

Una vez ya se han fabricado los paneles, se procede a cortar éstos en lo que serán las probetas a ensayar según la norma AITM 1-0069. Las medidas recomendadas por dicha norma se mostraron en la **Tabla 3-1**.

Una vez conocidas las dimensiones de las probetas ILTS, se puede proceder al corte de las mismas mediante una sierra circular especial para cortar laminados de fibra de carbono, la cual ejerce abrasión sobre la zona a cortar. Esta operación se puede ver en la **Figura 4.1-1**, observándose en la **Figura 4.1-2** las probetas ILTS ya cortadas (a la izquierda las 5 de mayor espesor, las de Tipo 2, y a la derecha las otras 5, de Tipo 1).



Figura 4.1-1. Corte de las probetas ILTS



Figura 4.1-2. Probetas ILTS tras el proceso de corte

Después del proceso de corte, se procede a repasar los bordes de las probetas con un papel de lija de grano fino, con objeto de eliminar restos de fibras y rebabas que podrían ser peligrosas a la hora de manejar dichas probetas.

Con las probetas ya listas, se realizan las medidas de las dimensiones exigidas por la norma de Airbus, definiéndose a continuación los parámetros que la AITM 1-0069 considera imprescindibles (ver **Figura 4.1-3**):

- w_1 – Ancho a la mitad de la zona plana 1
- w_2 – Ancho en la zona curvada
- w_3 – Ancho a la mitad de la zona plana 2
- t_1, t_4 – Espesor a la mitad de la zona plana 1
- t_2, t_5 – Espesor a la mitad de la zona curvada
- t_3, t_6 – Espesor a la mitad de la zona plana 2
- α_1, α_2 – Ángulo recto formado por las dos zonas planas, a ambos lados de la probeta

Definidos dichos parámetros, las medidas para cada probeta, realizadas mediante un calibre (Figura 4.1-4), de cada tipo, se muestran en la **Tabla 4.1-1** para las probetas de Tipo 1, de menor espesor, y en la **Tabla 4.1-2** para las probetas de Tipo 2.

Medidas Probetas finas (Tipo 1)											
nº	w1 (mm)	w2 (mm)	w3 (mm)	t1 (mm)	t2 (mm)	t3 (mm)	t4 (mm)	t5 (mm)	t6 (mm)	$\alpha 1(^{\circ})$	$\alpha 2(^{\circ})$
1	27,07	27,02	27,1	1,95	2,05	1,97	1,95	2,2	1,97	89	88,5
2	27,24	27,23	27,22	1,95	1,93	1,95	1,94	1,98	1,97	89	88,5
3	27,1	27,07	27,09	1,96	2,08	1,95	1,93	2,13	1,96	88	88
4	26,48	26,71	26,79	2,01	1,97	1,94	1,96	1,98	1,95	88,5	88,5
5	27,23	27,13	27,05	1,93	1,97	1,96	1,95	1,95	1,97	89	89

Tabla 4.1-1. Medidas de las probetas Tipo 1

Medidas Probetas gruesas (Tipo 2)											
nº	w1 (mm)	w2 (mm)	w3 (mm)	t1 (mm)	t2 (mm)	t3 (mm)	t4 (mm)	t5 (mm)	t6 (mm)	$\alpha 1(^{\circ})$	$\alpha 2(^{\circ})$
1	27,02	27,06	27,2	2,68	2,75	2,7	2,69	2,7	2,66	88,5	88,5
2	27,23	27,18	27,14	2,67	2,64	2,71	2,71	2,65	2,72	88,5	88
3	27,02	27	27,06	2,67	2,64	2,69	2,71	2,72	2,72	89	88,5
4	26,98	27	27,06	2,68	2,73	2,69	2,69	2,75	2,7	88,5	88,5
5	26,57	26,58	26,9	2,7	2,84	2,7	2,66	2,72	2,71	88,5	88

Tabla 4.1-2. Medidas de las probetas Tipo 2

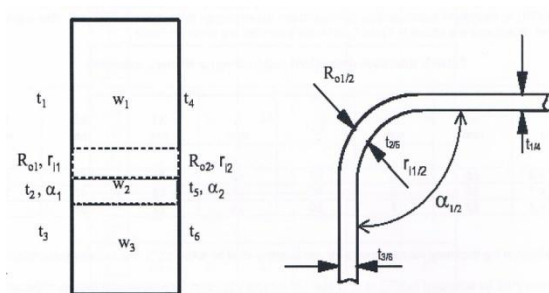


Figura 4.1-3. Medidas a tomar según la AITM 1-0069



Figura 4.1-4. Medida de las probetas ILTS con calibre

Como se puede observar en las medidas realizadas, los ángulos $\alpha 1$ y $\alpha 2$ son correctos según la norma, ya que se contemplaba un ángulo mínimo de 87° , siendo el mínimo ángulo medido de 88° . El hecho de no haber obtenido un ángulo exacto de 90° se debe al “springback” producido tras el enfriamiento de los paneles una vez que terminó el proceso de curado en autoclave.

4.2 Fabricación de las probetas planas:

Para la fabricación de las probetas planas a ensayar a tracción y a compresión se van a seguir las recomendaciones de las normas ASTM D-3039 y AITM 1-0008, respectivamente. Para las probetas que se van a ensayar a flexión se van a tomar unas medidas de tal forma que la longitud de las mismas sea igual al máximo permitido en el útil, es decir, 250 mm, y el ancho de las probetas se ha estimado que sea igual o aproximado a 20 mm. Dicho esto, las medidas de referencia para fabricar las probetas se muestran en la **Tabla 4.2-1**.

Tipo probeta	Longitud (mm)	Anchura (mm)
Tracción	250	15
Compresión	142	22
Flexión	250	20

Tabla 4.2-1. Medidas recomendadas de las probetas según las normas ASTM D-3039 y AITM 1-0008

En la siguiente imagen, **Figura 4.2-1**, se puede apreciar con claridad cómo se ha dimensionado dicha probeta.

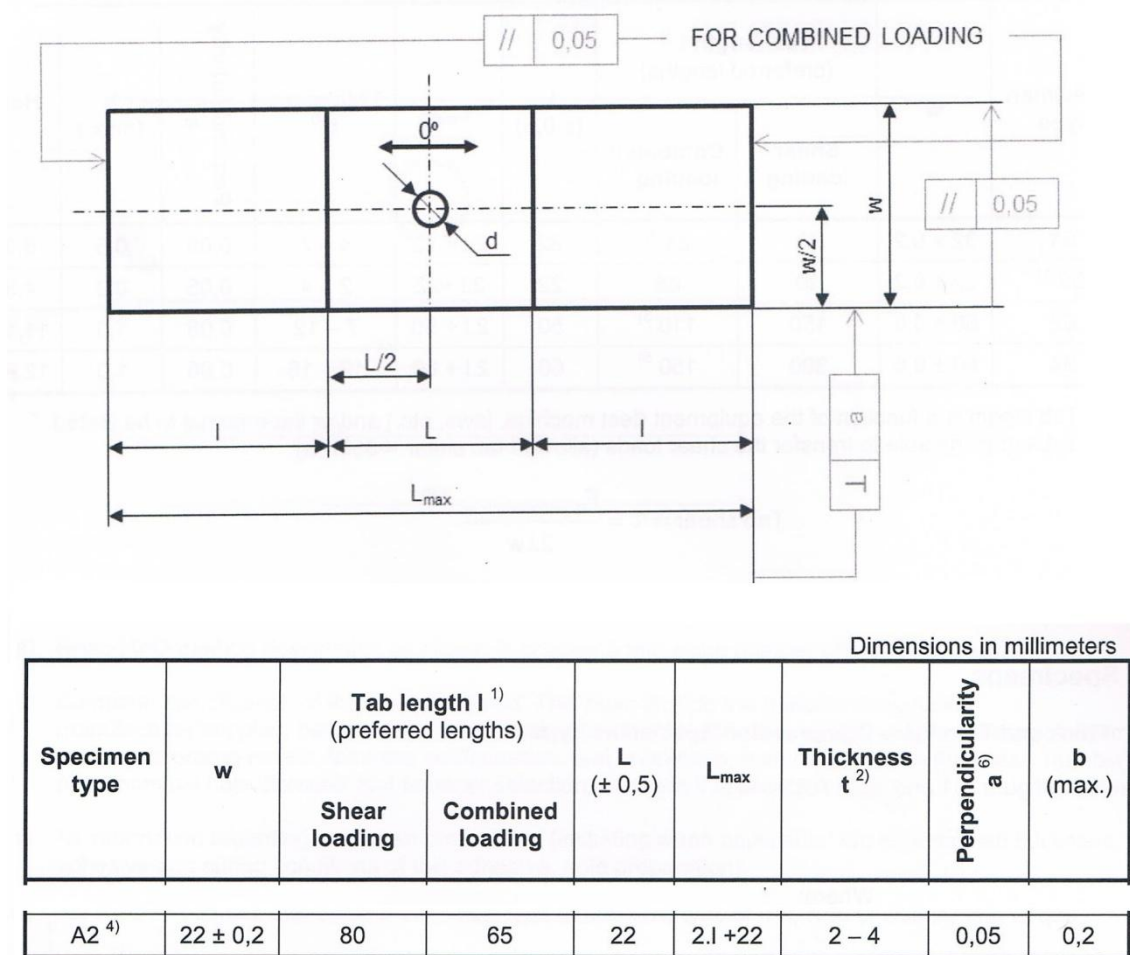


Figura 4.2-1. Dimensiones de la probeta a compresión según la norma AITM 1-0008

Decididas ya las medidas que se usarán para las probetas, se procede a cortar los paneles mediante una sierra especial de corte abrasivo (**Figura 4.2-1**), la misma que la utilizada en procesos anteriores. Los cortes de los paneles se han hecho por probetas individualmente,

excepto en las probetas a tracción que se han hecho por pares, y no por grupos como sería lo aconsejable, para obtener una mayor precisión a la hora de cortar los tacones. Esto podría traer problemas a la hora de curar el adhesivo para pegar los tacones, como se verá a continuación. Por su parte, las probetas a flexión (**Figura 4.2-2**) no necesitan tacones para poder realizar el ensayo.



Figura 4.2-1. Corte de las probetas planas



Figura 4.2-2. Probetas a flexión ya cortadas

Con las probetas cortadas, se procede a lijar los bordes de las mismas para eliminar cualquier rebaba o restos de fibras que podrían ser peligrosos a la hora de manejar las probetas. A continuación, a las probetas de tracción y compresión se les hará un lijado superficial en las zonas de pegado de los tacones por ambas caras (**Figura 4.2-3** y **Figura 4.2-4**) con objeto de favorecer el pegado entre probeta y tacones mediante una capa de adhesivo.

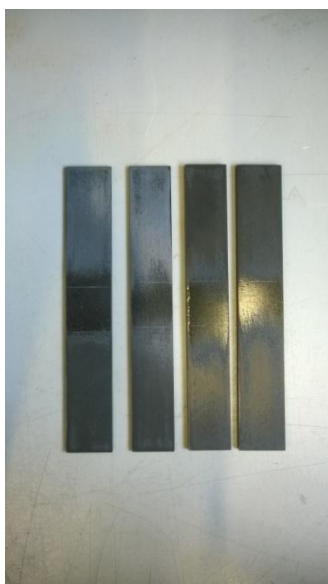


Figura 4.2-3. Probetas a compresión ya cortadas



Figura 4.2-4. Paneles a tracción ya cortados

Ahora ya se pueden pegar los tacones a las probetas. Para ello se cortan dichos tacones a medida, con especial atención al *span* (espacio entre tacones) necesario de las probetas de compresión, igual a 22 mm (se aprecian las ralladuras hechas en las mismas en la **Figura 4.2-3**). Con los tacones obtenidos se cortan los trozos de adhesivo con las mismas medidas, y con objeto de tener una buena sujeción antes de introducir las probetas en el autoclave se aplicará alrededor del conjunto tacón-adhesivo-probeta una capa de cinta adhesiva de alta temperatura. Además, ésta última se aplicará en los bordes interiores de los tacones, sobre la probeta, para facilitar la extracción del exceso de adhesivo que fluye hacia el interior del *span*, crucial en las probetas de compresión. Una vez realizadas estas operaciones, se procede a introducir las probetas en el autoclave, previa realización de una bolsa de vacío convencional para las mismas, para un ciclo especial de adhesivo. El resultado se puede ver en la **Figura 4.2-5** y la **Figura 4.2-6**.

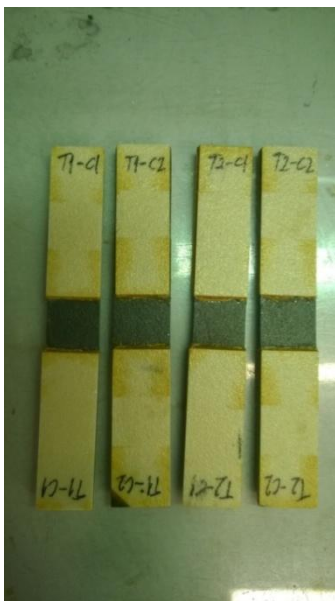


Figura 4.2-5. Probetas a compresión con los tacones



Figura 4.2-6. Probetas a tracción, ya cortadas, y con los tacones pegados

Con las probetas ya obtenidas y listas para ensayar, a falta de su instrumentación, se procede a medir las mismas mediante un calibre. Las medidas para las probetas de tracción, compresión y flexión se pueden ver en la **Tabla 4.2-2**, **Tabla 4.2-3** y **Tabla 4.2-4**, respectivamente.

Para comprender mejor el contenido de las tablas, se aclarará a continuación el significado de cada una de las medidas:

- w1 – Anchura en la mitad superior de la probeta.
- w2 – Anchura en la mitad de la probeta.
- w3 – Anchura en la mitad inferior de la probeta.
- t1 – Espesor en la mitad superior de la probeta.
- t2 – Espesor en la mitad de la probeta.
- t3 – Espesor en la mitad inferior de la probeta.
- T1 – Tipo 1, menor espesor.
- T2 – Tipo 2, mayor espesor.

Probetas ensayo TRACCIÓN						
Nº probeta	w1 (mm)	w2 (mm)	w3 (mm)	t1 (mm)	t2 (mm)	t3 (mm)
T1-1	13,74	13,98	14,19	1,9	1,9	1,91
T1-2	15,45	15,49	15,46	1,95	1,92	1,95
T2-1	15,45	15,29	15,19	2,67	2,66	2,68
T2-2	14,25	14,37	14,42	2,65	2,63	2,64

Tabla 4.2-2. Medidas de las probetas a tracción

Probetas ensayo COMPRESION						
Nº probeta	w1 (mm)	w2 (mm)	w3 (mm)	t1 (mm)	t2 (mm)	t3 (mm)
T1-1	20,73	20,7	20,68	1,84	1,91	1,88
T1-2	22,62	22,56	22,53	1,93	1,95	1,96
T2-1	20,71	20,69	20,66	2,73	2,73	2,71
T2-2	22,44	22,44	22,47	2,66	2,67	2,69

Tabla 4.2-3. Medidas de las probetas a compresión

Probetas ensayo FLEXION						
Nº probeta	w1 (mm)	w2 (mm)	w3 (mm)	t1 (mm)	t2 (mm)	t3 (mm)
T1-1	19,11	19,02	19,01	1,94	1,94	1,93
T1-2	20,96	20,9	20,87	1,92	1,94	1,95
T2-1	18,96	19,03	19,1	2,71	2,69	2,66
T2-2	20,65	20,73	20,76	2,7	2,71	2,68

Tabla 4.2-4. Medidas de las probetas a flexión

Una vez obtenidas las medidas y pegados los tacones en aquellas probetas en las que era necesario, ya se pueden instrumentar las probetas con bandas extensométricas y, posteriormente, realizar los ensayos correspondientes.

4.3 Instrumentación de las probetas ILTS:

Para las probetas ILTS que ya se han fabricado, resulta ahora esencial su instrumentación mediante bandas extensométricas para poder medir las deformaciones que se producirán en éstas durante su ensayo. Estas bandas extensométricas se colocarán en ambas caras de cada brazo de la probeta, de tal manera que se evitará cualquier contacto de las mismas con los rodillos durante la realización del ensayo. El principal motivo de la utilización de las galgas, ya que en el ensayo solo interesarán la fuerza aplicada y el desplazamiento de los rodillos superiores, por lo que, a priori, no serán necesarias, no es otro que medir las deformaciones en zonas, en teoría, cuyo comportamiento se asemeja bastante al de una barra, es decir, en las zonas entre rodillos y alejadas de los mismos. En definitiva, zonas de la probeta donde su comportamiento pueda ser fácilmente caracterizado. Otro objetivo de su utilización es el poder comparar las medidas de deformación y carga aplicada en las zonas anteriormente descritas de la probeta con un modelo de la misma probeta en elementos finitos.

Por lo tanto, se puede deducir de lo anteriormente descrito, que el uso de las bandas extensométricas tiene como objetivo, única y exclusivamente, la comparación de resultados experimentales con resultados teóricos, ya que, según los resultados a obtener del ensayo, su uso sería innecesario.

Se procede ahora a la descripción del proceso que se ha seguido para instrumentar las probetas ILTS. En primer lugar, decir que las bandas se han pegado en las siguientes zonas de la probeta:

- Las dos bandas de las caras interiores se han situado a un 25% de la longitud del brazo, aproximadamente, contando a partir del extremo donde se encuentra el radio interior de la probeta (**Figura 4.3-1**).
- Y las otras dos bandas, que irán colocadas en las caras superiores, se han situado en la zona media de dichas caras (**Figura 4.3-2**).

En las siguientes imágenes se pueden ver claramente la posición de dichas bandas:



Figura 4.3-1. Posición de las bandas extensométricas (1) **Figura 4.3-2.** Posición de las bandas extensométricas (2)

Ahora se procede a describir el proceso de pegado de las bandas y, posteriormente, la soldadura de los cables a las mismas. Comencemos:

- Antes de poder pegar las bandas extensométricas, se deben lijar bien las superficies donde irán éstas, con objeto de que el pegado sea efectivo (**Figura 4.3-3**). Tras esta

operación se limpian adecuadamente dichas superficies con acetona para que no queden restos de partículas que puedan dificultar la operación.

- Con las superficies ya lijadas, se marcan mediante una herramienta de precisión unas crucetas en dichas superficies (**Figura 4.3-4**), sobre las que irán las bandas.



Figura 4.3-3. Lijado de la superficie a colocar la galga



Figura 4.3-4. Marcado de la cruceta sobre la superficie lijada

- A continuación, se coloca con sumo cuidado la banda con cinta adhesiva convencional sobre la superficie correspondiente, haciendo coincidir las marcas de los extremos de la banda con las líneas de la cruceta.
- Se le aplica un catalizador a las superficies a unir, y, finalmente, se vierte pegamento sobre las mismas, siempre en su justa medida.
- Finalmente, tras dejar un tiempo suficiente de secado del pegamento, se procede a retirar la cinta adhesiva, con sumo cuidado, ya que de lo contrario la banda podría ser despegada.

A continuación se pueden ver algunas imágenes del resultado de la operación recién descrita (**Figuras 4.3-5 a 4.3-7**):



Figura 4.3-5. Resultado del pegado de bandas en las ILTS (1)



Figura 4.3-6. Resultado del pegado de bandas en las ILTS (2)

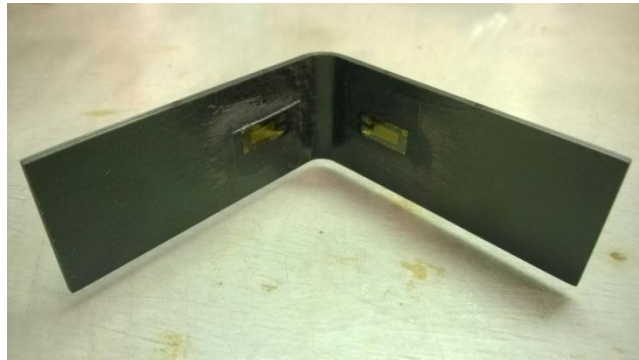


Figura 4.3-7. Resultado del pegado de bandas en las ILTS (3)

Por último, para terminar con la instrumentación de las probetas, se explica el procedimiento de soldadura de los cables, que irán conectados al puente de Wheatstone, con las conexiones de las bandas extensométricas.

- Se cortan los cables a la medida deseada, y se pelan los extremos de los mismos con la longitud necesaria para que las conexiones puedan realizarse sin problemas.
- Se aplica un decapante sobre el extremo del cable que irá soldado, con objeto de limpiar la superficie del mismo.
- Seguidamente se estaña este extremo para asegurar, más adelante, que la soldadura sea efectiva entre el cable y las conexiones de la banda extensométrica.
- A continuación, se lijan y se limpian las conexiones de la banda.
- Se aplican sendas gotas de estaño sobre las conexiones ya limpias.
- Y, finalmente, mediante el soldador de estaño que se ha ido usando en capítulos anteriores (ver **Figura 2.5.1-4***), se unen los extremos del cable con los conectores de la banda extensométrica.

Igualmente, las herramientas y los equipos utilizados para instrumentar las probetas ILTS se pueden ver en la **Figura 2.5.1-3.*

Con esto, ya se tienen instrumentadas las probetas ILTS, por lo que ya estarían preparadas para realizarse los ensayos sobre ellas. Los resultados pueden verse en las **Figuras 4.3-8 a 4.3-10**.



Figura 4.3-8. Resultado final de instrumentación sobre las ILTS (1)

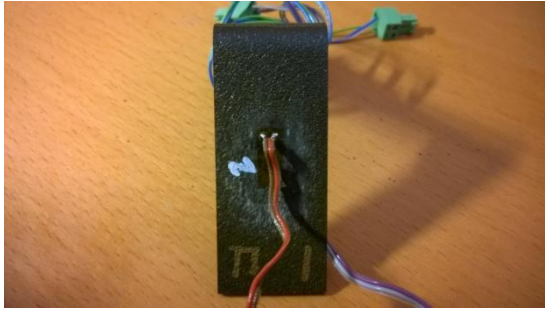


Figura 4.3-9. Resultado final de instrumentación sobre las ILTS (2)



Figura 4.3-10. Resultado final de instrumentación sobre las ILTS (3)

4.4 Instrumentación de las probetas planas:

Con las probetas planas obtenidas, las que se usarán para los ensayos previos de tracción, compresión y flexión, se realizará ahora la instrumentación de las mismas. Esto consistirá en, primero, pegar las bandas extensométricas en las zonas adecuadas, dependiendo de cada probeta; y, segundo y último, soldar los cables en los conectores de las bandas extensométricas. De esta manera ya tendríamos instrumentadas las probetas y solo quedaría realizar los ensayos.

El primer paso a realizar, como ya se ha dicho, es el pegado de las bandas extensométricas, el cual consiste en los siguientes pasos:

- Se lija la superficie de la probeta donde irá pegada la banda, con objeto de facilitar su adhesión.
- Tras limpiar la zona lijada con acetona apropiadamente, se procede a marcar una cruzeta en dicha superficie sobre la que deberá ir colocada la banda, de la forma más precisa posible. Esto se realizará con una herramienta de precisión, tal y como se muestra en la **Figura 4.4-1**.

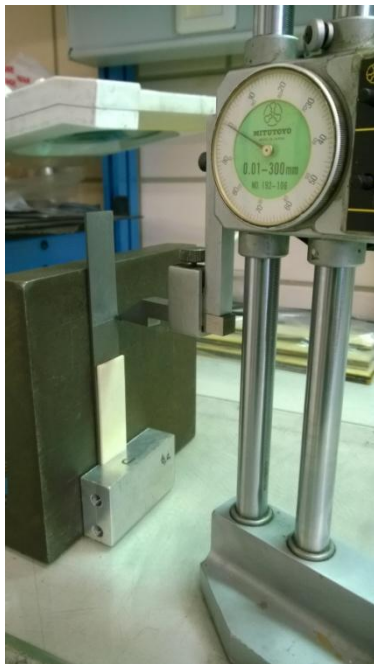


Figura 4.4-1. Marcado del *span* de las probetas a compresión

- Se coloca la banda extensométrica sobre la marca realizada, con la ayuda de cinta adhesiva convencional.
- Se aplica un catalizador sobre las superficies de la banda y de la probeta que irán pegadas, para acelerar el proceso de pegado.
- Finalmente, se aplica el pegamento sobre las superficies a pegar y se realiza presión para que el contacto sea lo mejor posible.



Figura 4.4-2. Pegado de las bandas extensométricas en las probetas a flexión

El resultado del pegado de las bandas extensométricas para las probetas de flexión, tracción y compresión se pueden ver en la **Figura 4.4-2**, **Figura 4.4-3** y **Figura 4.4-4**, respectivamente.



Figura 4.4-3. Pegado de las bandas en las probetas a tracción

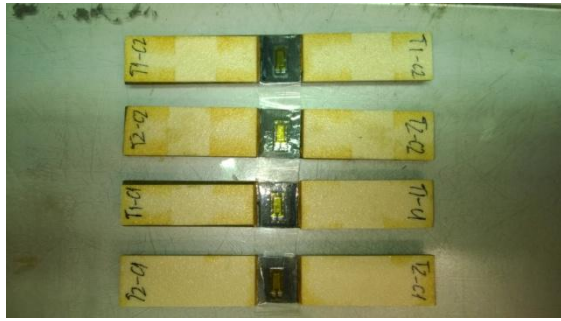


Figura 4.4-4. Pegado de las bandas en las probetas a compresión

El segundo paso, y el último, para instrumentar las probetas planas, será soldar los cables en los conectores de las bandas extensométricas mediante un soldador de estaño convencional, como ya se mostró en la **Figura 2.5.1-4**. El proceso a seguir es el siguiente:

- Se cortan los trozos de cable a la medida adecuada, pelándose los mismos por ambos extremos para poder realizar las conexiones pertinentes.
- Se aplica una película de decapante sobre el extremo del cable más corto, con objeto de limpiar éste de impurezas.
- Se estaña dicho extremo del cable para favorecer la posterior conexión con la banda extensométrica.
- Se colocan sobre las conexiones de las bandas unos puntos de estaño, con la ayuda del soldador de estaño, con el fin de asegurar que la unión entre cable y banda sea adecuada y suficiente.
- Finalmente, usando de nuevo el soldador de estaño, se une el extremo del cable estañado con las conexiones preparadas a tal fin (**Figura 4.4-5**).



Figura 4.4-5. Detalle de la soldadura del cable a las conexiones de la galga



Figura 4.4-6. Probetas a tracción ya instrumentadas

Ya se tienen las probetas planas instrumentadas y listas para ensayar. El resultado final del proceso de instrumentación lo podemos ver para las probetas de tracción, compresión y flexión en la **Figura 4.4-6**, **Figura 4.4-7** y **Figura 4.4-8**, respectivamente.

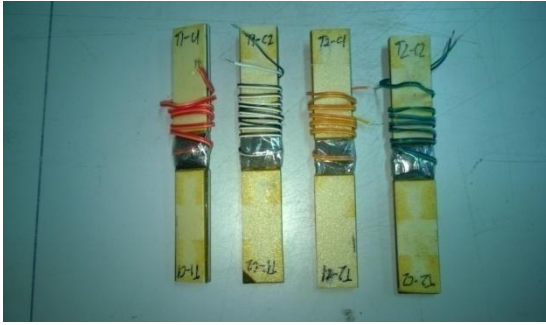


Figura 4.4-7. Probetas a compresión ya instrumentadas

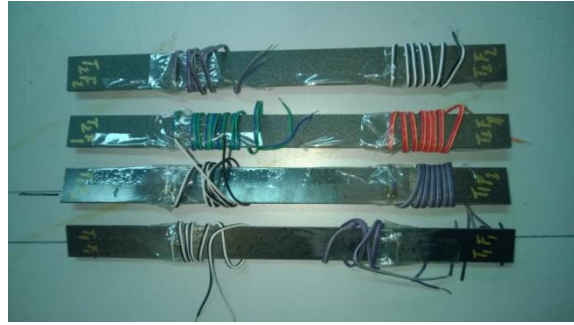


Figura 4.4-8. Probetas a flexión ya instrumentadas

5. Ensayo de las probetas planas:

Tras la fabricación de las probetas planas, y su posterior instrumentación, se procede a realizar los ensayos sobre las mismas. El principal objetivo de estos ensayos es caracterizar los laminados fabricados y obtener de ellos las propiedades que definen el comportamiento mecánico de los mismos. Se prestará especial atención a las rigideces del laminado con la intención de introducir los valores de dichas propiedades obtenidas en los ensayos, es decir, las reales, en unos modelos de elementos finitos, que no son objeto de éste trabajo, pero sí han sido tenidos en cuenta a la hora de diseñar los laminados y decidir qué tipo de ensayos realizar. También es importante saber, aunque ya se puede intuir del principal objetivo de estos ensayos, descrito anteriormente, que las probetas no se llevarán a rotura en ningún caso, siendo las rigideces el objeto esencial, por lo que con vistas a poder repetir los ensayos, es vital que dichas probetas no sean llevadas a estados límites de carga.

Antes de realizar los ensayos de tracción, es pertinente hacer una estimación teórica de cuánto tendría que resultar la rigidez longitudinal del laminado. Dicho cálculo se ha realizado, siguiendo la Teoría General de Laminados (TGL a partir de ahora), para estimar el valor que debería dar E_{xx} en los ensayos de tracción, y también de compresión, ya que, aparentemente, ambos valores deberían ser idénticos.

5.1 Predicción de rigideces según la TGL:

Considérese un laminado con un número k de láminas. Según la TGL, la ley de comportamiento de una lámina k se rige por la expresión:

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}^k \cdot \left[\begin{bmatrix} \varepsilon_x^o \\ \varepsilon_y^o \\ \gamma_{xy}^o \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} k_x^o \\ k_y^o \\ k_{xy}^o \end{bmatrix} \right]; \quad (5)$$

Siendo $\varepsilon_x^o, \varepsilon_y^o, \gamma_{xy}^o$ las deformaciones de laja (alargamientos y distorsiones), y k_x^o, k_y^o, k_{xy}^o las deformaciones de placa (curvaturas de flexión y torsión). La variable z corresponde a la coordenada que mide la distancia al plano medio del laminado de las distintas láminas k .

Antes de seguir, se definen los términos \bar{Q}_{ij} , que son los términos que definen la rigidez para cada lámina. Éstos surgen a su vez de las rigideces de dichas láminas en ejes de ortotropía, los Q_{ij} .

- Términos Q_{ij} :

$$Q_{11} = \frac{E_{11}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad ; \quad Q_{22} = \frac{E_{22}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad ; \quad Q_{12} = \frac{\nu_{21}E_{11}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} = \frac{\nu_{12}E_{22}}{1 - \nu_{12}\nu_{21}} \quad ;$$

$$Q_{66} = G_{12}; \quad (6)$$

- Términos \bar{Q}_{ij} :

$$\bar{Q}_{11} = Q_{11} (\cos \theta)^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})(\sin \theta)^2 (\cos \theta)^2 + Q_{22} (\sin \theta)^4$$

$$\begin{aligned}\bar{Q}_{12} &= (Q_{11} + Q_{22} - 4Q_{66})(\sin \theta)^2(\cos \theta)^2 + Q_{12}((\sin \theta)^4 + (\cos \theta)^4) \\ \bar{Q}_{22} &= Q_{11}(\sin \theta)^4 + 2(Q_{12} + 2Q_{66})(\sin \theta)^2(\cos \theta)^2 + Q_{22}(\cos \theta)^4 \\ \bar{Q}_{16} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})\sin \theta(\cos \theta)^3 + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})(\sin \theta)^3 \cos \theta \\ \bar{Q}_{26} &= (Q_{11} - Q_{12} - 2Q_{66})\cos \theta(\sin \theta)^3 + (Q_{12} - Q_{22} + 2Q_{66})(\cos \theta)^3 \sin \theta \\ \bar{Q}_{66} &= (Q_{11} + Q_{22} - 2Q_{12} - 2Q_{66})(\sin \theta)^2(\cos \theta)^2 + Q_{66}((\sin \theta)^4 + (\cos \theta)^4); \quad (7)\end{aligned}$$

Siendo θ el ángulo que forma la lámina en el laminado.

Si se introduce el concepto de esfuerzos internos como la resultante de tensiones, éstos se definen como:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-t/2}^{t/2} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} dz = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} dz; \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-t/2}^{t/2} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} z dz = \sum_{k=1}^N \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} z dz; \quad (9)$$

Y la configuración de las láminas, con distancias según el plano medio del laminado, de acuerdo con la siguiente imagen (**Figura 5.1-1**).

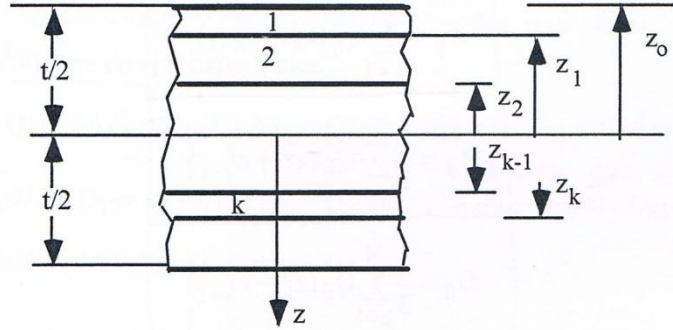


Figura 5.1-1. Distancia de las láminas al plano medio del laminado [2]

Sustituyendo las expresiones anteriores según lo definido en la ley de comportamiento de cada lámina, se obtiene lo siguiente:

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^N \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix}^k \left(\int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^o \\ \varepsilon_y^o \\ \gamma_{xy}^o \end{bmatrix} dz + \int_{z_{k-1}}^{z_k} \begin{bmatrix} k_x^o \\ k_y^o \\ k_{xy}^o \end{bmatrix} z dz \right); \quad (10)$$

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

Donde, como se puede observar, Q_{ij} es independiente de z .

Haciendo las integrales en z y agrupando términos con las rigideces de cada lámina en ejes cualesquiera, se define:

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

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_x^o \\ \varepsilon_y^o \\ \gamma_{xy}^o \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_x^o \\ k_y^o \\ k_{xy}^o \end{bmatrix}; \quad (13)$$

Donde:

- A: Rigidez de laja

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^N \bar{Q}_{ij}^k (z_k - z_{k-1}); \quad (14)$$

- B: Acoplamiento entre efectos de laja-placa

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^N \bar{Q}_{ij}^k (z_k^2 - z_{k-1}^2); \quad (15)$$

- D: Rigidez de placa

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^N \bar{Q}_{ij}^k (z_k^3 - z_{k-1}^3); \quad (16)$$

Una vez definidas las matrices de rigidez que contendrán las propiedades de nuestros laminados, se procede a calcularlas para las dos configuraciones de laminados que se han definido. Los cálculos han sido realizados mediante el programa MatLab. Antes de continuar, se puede decir que, como se trata de dos laminados simétricos, el acoplamiento entre efectos de laja-placa será nulo, es decir, $B_{ij} = 0$.

- **Tipo 1:** [45/0/0/0/-45]_s

- Espesor de la probeta: $t_{T1} = 1.92 \text{ mm}$

$$A_{T1} = \begin{bmatrix} 112.92 & 14.79 & -1.85 \\ 14.79 & 26.19 & -1.85 \\ -1.85 & -1.85 & 21.62 \end{bmatrix} t_{T1} \quad ; \quad D_{T1} = \begin{bmatrix} 8.60 & 1.46 & 1.45 \\ 1.46 & 2.53 & 1.45 \\ 1.45 & 1.45 & 2.032 \end{bmatrix} t_{T1}^3; \quad (17)$$

- **Tipo 2:** [45/0/0/-45/90/45/0]_s

- Espesor de la probeta: $t_{T2} = 2.66 \text{ mm}$

$$A_{T2} = \begin{bmatrix} 89.38 & 14.79 & -5.16 \\ 15.61 & 26.19 & -5.16 \\ -5.16 & -5.16 & 22.44 \end{bmatrix} t_{T2} \quad ; \quad D_{T2} = \begin{bmatrix} 7.91 & 1.47 & 0.73 \\ 1.47 & 2.53 & 0.73 \\ 0.73 & 0.73 & 2.038 \end{bmatrix} t_{T2}^3; \quad (18)$$

5.2 Ensayo de tracción:

El objetivo de este ensayo será el de obtener el Módulo elástico en la dirección de aplicación de la carga, E_{xx} , y el Coeficiente de Poisson, ν_{xy} . Es por ello que, a la hora de instrumentar las probetas, se colocarán unas bandas extensométricas del tipo XY31, que miden la deformación longitudinal y transversal en un mismo punto, por lo que se pueden obtener los parámetros descritos anteriormente. En la **Figura 5.2-1** se puede ver una ilustración de cómo se realiza dicho ensayo.

Estos ensayos de tracción se realizarán según la norma ASTM D-3039, de ahí que las dimensiones de las probetas hayan sido obtenidas según las recomendaciones descritas en la misma, que se pueden apreciar en la **Tabla 4.2-1**.

Las medidas del Módulo elástico y del Coeficiente de Poisson se realizarán según las recomendaciones de la norma. Es decir, para ambas propiedades se realizarán los siguientes cálculos, respectivamente:

- Módulo de Young: E_{xx}

$$E_{xx} = \frac{\Delta\sigma_x}{\Delta\varepsilon_{xx}} ; (19) \text{ (ver Figura 5.2 - 2)}$$

- Coeficiente de Poisson: ν_{xy}

$$\nu_{xy} = -\frac{\Delta\varepsilon_t}{\Delta\varepsilon_l} ; (20) \quad ; \quad \text{siendo; } \varepsilon_l = \varepsilon_{xx} \quad , \quad \varepsilon_t = \varepsilon_{yy}$$

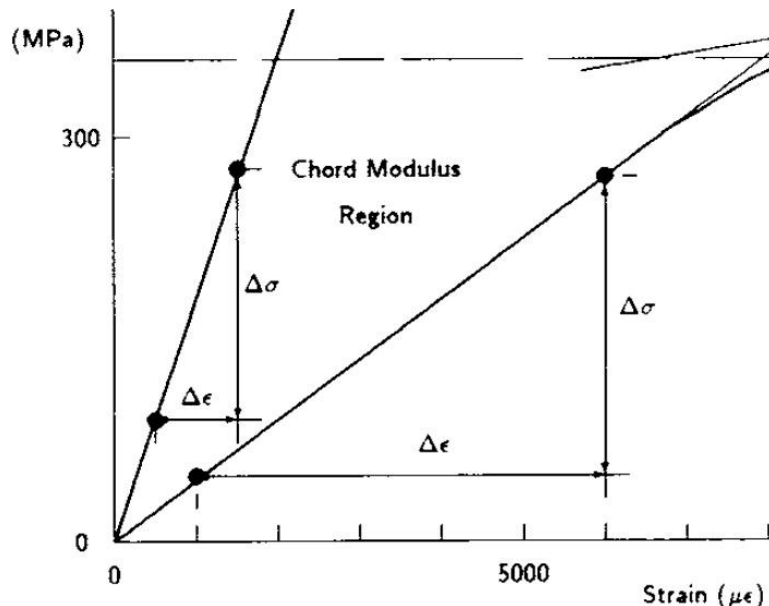


Figura 5.2-2. Obtención del Módulo Elástico según la norma ASTM D-3039

Para realizar dichos cálculos, antes se deben medir la tensión y la deformación para una carga aplicada sobre la probeta. La carga se aplicará mediante una máquina de ensayo de tracción, y se medirá con la célula de carga usada en los ensayos, que en nuestro caso será de 5 kN, ya que la medida que nos dé será más precisa para cargas bajas, como es nuestro caso (no se superarán los 2,4 kN de carga, aproximadamente). Por otro lado, las deformaciones se

medirán mediante un puente de Wheatstone convencional (**Figura 5.2-2**). Entonces, el procedimiento a seguir es el siguiente: para cada carga aplicada, de 0,2 en 0,2 kN, aproximadamente, se detiene la máquina de tracción y se miran las medidas marcadas por el puente de Wheatstone, en este caso ϵ_{xx} y ϵ_{yy} .



Figura 5.2-1. Ensayo de las probetas a tracción



Figura 5.2-2. Puente de Wheatstone para medir las deformaciones

Antes de mostrar los resultados del ensayo, es oportuno aclarar la nomenclatura de las probetas usadas y nombradas para cada ensayo, mostrándose a continuación algunos ejemplos sin que se siga ningún orden concreto:

- T1-T1: Laminado Tipo 1, Probeta a ensayar a tracción número 1.
- T2-C2: Laminado Tipo 2, Probeta a ensayar a compresión número 2.
- T1-F2: Laminado Tipo 1, Probeta a ensayar a flexión número 2.

A continuación se muestran las medidas realizadas para las probetas, encontrándose en las tablas la carga introducida a tracción y las deformaciones longitudinales y transversales.

Primero se mostrarán los resultados de las probetas del Tipo 1 (recordemos que es la configuración de menor espesor) y a continuación las del Tipo 2. Lo mismo se hará a la hora de mostrar los resultados obtenidos en los otros dos ensayos, los de compresión y los de flexión.

- **Tipo 1:**

Las medidas de carga introducida y deformaciones para las dos probetas del Tipo 1 sometidas a tracción se muestran en la **Tabla 5.2-1**.

Tracción T1-T1			Tracción T1-T2		
carga (kg)	ϵ_{xx} ($\mu\epsilon$)	ϵ_{yy} ($\mu\epsilon$)	carga (kg)	ϵ_{xx} ($\mu\epsilon$)	ϵ_{yy} ($\mu\epsilon$)
20*	65	-52	20	71	-72
40	125	-97	40	121	-110
60	185	-142	60	170	-146
80	256	-192	80	242	-195
100	321	-235	100	308	-245
120	385	-285	120	361	-294
140	453	-335	140	430	-343
160	522	-378	160	499	-391
180	590	-423	180	557	-439
200	661	-481	200	629	-491
220	730	-520	220	698	-543
240	792	-582	240	771	-591

Tabla 5.2-1. Resultados de los ensayos a tracción del Tipo 1

*Las celdas en rojo no han sido tenidas en cuenta a la hora de realizar los cálculos.

Ahora que ya se tienen las medidas del ensayo de tracción para las probetas del Tipo 1, ya se pueden realizar los cálculos del Módulo elástico y el Coeficiente de Poisson, según las expresiones facilitadas para ello anteriormente. Dichos cálculos se acompañarán de las medidas de la sección de las probetas, ya que lo que de verdad nos interesa es la tensión producida en las probetas de cara a calcular, principalmente, el E_{xx} .

Tipo 1, probeta 1 (T1-T1):

- Medidas:
 - Ancho (w): $w = 13,97 \text{ mm}$
 - Espesor (t): $t = 1,90 \text{ mm}$
- Resultados ensayo:
 - Módulo de elasticidad longitudinal (E_{xx}): $E_{xx}^{T1-T1} = 113,55 \text{ GPa}$
 - Coeficiente de Poisson (ν_{xy}): $\nu_{xy}^{T1-T1} = 0,70$

Tipo 1, probeta 2 (T1-T2):

- Medidas:
 - Ancho (w): $w = 15,47 \text{ mm}$
 - Espesor (t): $t = 1,94 \text{ mm}$
- Resultados ensayo:
 - Módulo de elasticidad longitudinal (E_{xx}): $E_{xx}^{T1-T2} = 108,60 \text{ GPa}$
 - Coeficiente de Poisson (ν_{xy}): $\nu_{xy}^{T1-T2} = 0,75$

Finalmente, el resultado final se muestra como la media de los resultados para ambas probetas:

Módulo elástico longitudinal (Tipo 1): $E_{xx}^{T1} = 111,075 \text{ GPa}$

Coeficiente de Poisson (Tipo 1): $\nu_{xy}^{T1} = 0,725$

• **Tipo 2:**

Las medidas de carga introducida y deformaciones para las dos probetas del Tipo 2 sometidas a tracción se muestran en la **Tabla 5.2-2**.

Tracción T2-T1			Tracción T2-T2		
carga (kg)	ϵ_{xx} ($\mu\epsilon$)	ϵ_{yy} ($\mu\epsilon$)	carga (kg)	ϵ_{xx} ($\mu\epsilon$)	ϵ_{yy} ($\mu\epsilon$)
20	75	-10	20	60	-19
40	134	-22	40	116	-35
60	190	-33	60	170	-53
80	249	-43	80	230	-72
100	302	-57	100	284	-93
120	361	-72	120	352	-118
140	421	-86	140	411	-138
160	479	-99	160	475	-160
180	540	-115	180	524	-180
200	597	-129	200	586	-204
220	656	-147	220	643	-227
240	718	-164	240	715	-255

Tabla 5.2-2. Resultados de los ensayos a tracción del Tipo 2

Al igual que se ha hecho para las probetas de Tipo 1, con las medidas del ensayo de tracción ya disponibles, se procede a calcular el Módulo de Young y el Coeficiente de Poisson para las probetas de Tipo 2. De nuevo, los resultados se acompañan de las medidas de la sección de la probeta para así poder calcular la tensión aplicada en cada momento. Los resultados se muestran a continuación:

Tipo 2, probeta 1 (T2-T1):

- Medidas:
 - Ancho (w): $w = 15,31 \text{ mm}$
 - Espesor (t): $t = 2,67 \text{ mm}$
- Resultados ensayo:
 - Módulo de elasticidad longitudinal (E_{xx}): $E_{xx}^{T2-T1} = 84,33 \text{ GPa}$
 - Coeficiente de Poisson (ν_{xy}): $\nu_{xy}^{T2-T1} = 0,24$

Tipo 2, probeta 2 (T2-T2):

- Medidas:
 - Ancho (w): $w = 14,35 \text{ mm}$
 - Espesor (t): $t = 2,64 \text{ mm}$
- Resultados ensayo:
 - Módulo de elasticidad longitudinal (E_{xx}): $E_{xx}^{T2-T2} = 91,23 \text{ GPa}$
 - Coeficiente de Poisson (ν_{xy}): $\nu_{xy}^{T2-T2} = 0,36$

Finalmente, al igual que se hizo para los resultados de las probetas de Tipo 1, se realiza un promedio para los resultados obtenidos, resultando ser las propiedades obtenidas para el laminado de Tipo 2 las siguientes:

Módulo elástico longitudinal (Tipo 2): $E_{xx}^{T2} = 87,78 \text{ GPa}$

Coficiente de Poisson (Tipo 2): $\nu_{xy}^{T2} = 0,30$

Con los cálculos ya realizados, es pertinente ahora realizar una comparación entre las rigideces teóricas que se han calculado según la TGL, y las rigideces obtenidas de los ensayos de tracción. También se hará un cálculo del error relativo cometido entre el resultado del ensayo y el teórico.

Del **Tipo 1**, la comparación entre dichas rigideces es la siguiente:

$$E_{xx}^{T1-TGL} = 112,92 \text{ GPa} \quad ; \quad E_{xx}^{T1} = 111,075 \text{ GPa}$$

Y el error relativo cometido en el resultado obtenido de los ensayos:

$$\text{Error}_{rel}^{T1}(\%) = \frac{|E_{xx}^{T1-TGL} - E_{xx}^{T1}|}{E_{xx}^{T1-TGL}} \cdot 100 = 1,63 \%$$

Y del **Tipo 2**:

$$E_{xx}^{T2-TGL} = 89,38 \text{ GPa} \quad ; \quad E_{xx}^{T2} = 87,78 \text{ GPa}$$

Con un error relativo:

$$\text{Error}_{rel}^{T2}(\%) = \frac{|E_{xx}^{T2-TGL} - E_{xx}^{T2}|}{E_{xx}^{T2-TGL}} \cdot 100 = 1,79 \%$$

Por tanto, se puede considerar que los resultados obtenidos en los ensayos de tracción son bastante precisos y válidos, si los comparamos, como hemos hecho, con el resultado teórico aportado por la TGL.

5.3 Ensayo de compresión:

El objetivo de este ensayo es obtener el Módulo elástico a compresión de los laminados fabricados. Para ello se van a ensayar cuatro probetas, dos por cada tipo de laminado (Tipo 1 para las finas, y Tipo 2 para las gruesas) y de los resultados obtenidos al término de realizar los ensayos se calculará dicha rigidez a compresión.

Estos ensayos se han realizado de acuerdo a la norma AITM 1-0008, de Airbus, relativa a ensayos de compresión sobre plásticos reforzados con fibras, como es nuestro caso. En dicha norma se especifican las dimensiones recomendadas a aplicar sobre las probetas, que, como ya sabemos de apartados anteriores, para nuestras probetas han sido tomadas siguiendo fielmente dichas indicaciones. Estas dimensiones se pueden ver en la **Tabla 4.2-1** y, para una mejor comprensión de las mismas, en la **Figura 4.2-1**.

El cálculo a realizar en este apartado es el Módulo Elástico a compresión que, según la norma de Airbus, se debe realizar de la siguiente manera:

$$E_{xx}^c = \frac{\Delta P}{w \cdot t_n \cdot \Delta \varepsilon_x}; \quad (21)$$

Siendo:

- w : ancho de la probeta
- t_n : espesor de la probeta

- ΔP : Incremento de la carga aplicada (por ello es necesario dividir por la sección de la probeta, para obtener la tensión)

De forma gráfica, el cálculo que la norma sugiere que se realice sería tal y como se muestra en la **Figura 5.3-1**.

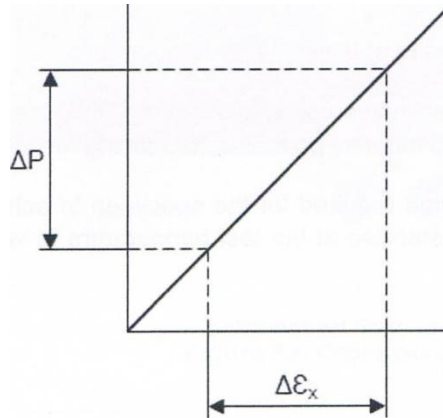


Figura 5.3-1. Cálculo del Módulo Elástico a compresión según la norma AITM 1-0008

Una vez definida la norma según la cual se realizarán los ensayos, las dimensiones de las probetas, basadas también en dicha norma, y el cálculo que se debe hacer, se procede a realizar el ensayo sin más preámbulos, tal y como se muestra en la **Figura 5.3-1**. Para realizar el mismo se dispone de una máquina de ensayo de tracción, que en este caso actuará a compresión, y un puente de Wheatstone (**Figura 5.3-2**) que nos dará la medida de la deformación de la banda extensométrica colocada a tal efecto en la zona de *span* de la probeta, la cual se puede apreciar en la **Figura 5.3-3**.



Figura 5.3-2. Puente de Wheatstone con el que se medirán las deformaciones



Figura 5.3-3. Colocación de la probeta de compresión

Una peculiaridad a la hora de realizar estos ensayos es el tipo de mordazas empleadas. En nuestro caso se han usado, como se puede observar en la ya mencionada **Figura 5.3-4**, las mordazas convencionales en forma de cuña, las mismas que se usarían en el ensayo de

tracción, por dos motivos. El primero de ellos es la sencillez y versatilidad del ensayo, ya que la longitud de los tacones fue diseñada para la longitud de dichas mordazas y, además, éstas mismas son las usadas para ensayar a tracción, por lo que no habría que desmontarlas. El segundo motivo, el que realmente da validez al uso de estas mordazas, es la baja carga que se va a introducir (no se superarán los 250 kg) y la baja velocidad a la que se aplicará. Una mención a este tipo de mordazas la podemos ver en las páginas 9, 10 y 11 de la AITM 1-0008.

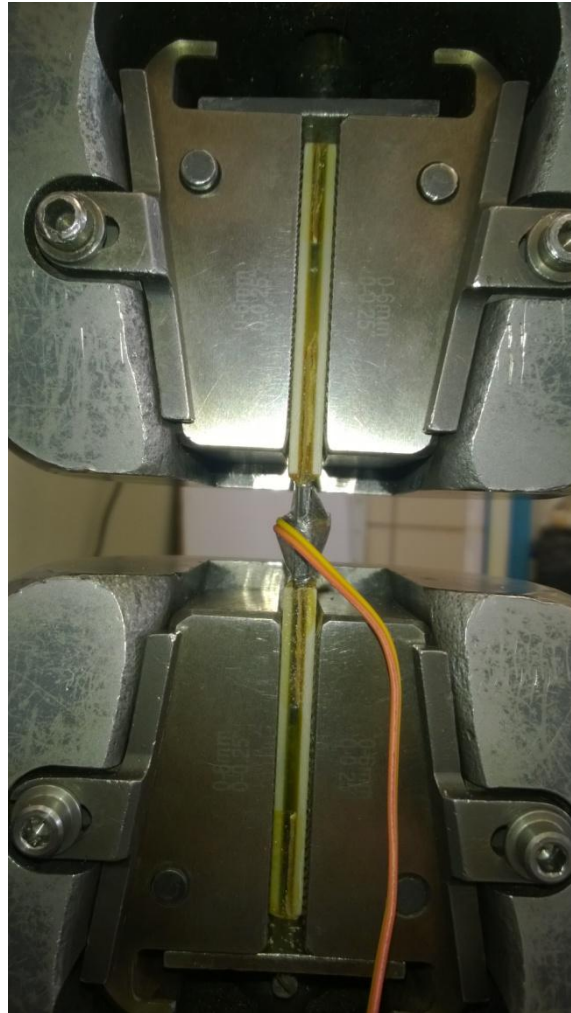


Figura 5.3-4. Detalle de las mordazas usadas para el ensayo a compresión

Seguidamente se van a mostrar los resultados de las medidas de carga y deformación registradas tras la realización de dichos ensayos. Al igual que para los ensayos a tracción, primero se darán los resultados de las probetas de Tipo 1, y, posteriormente, las de Tipo 2.

- **Tipo 1:**

Las medidas de carga introducida y deformación para las dos probetas del Tipo 1 sometidas a compresión se muestran en la **Tabla 5.3-1**.

Compresión T1-C1		Compresión T1-C2	
carga (kg)	ϵ_{xx} ($\mu\epsilon$)	carga (kg)	ϵ_{xx} ($\mu\epsilon$)
20	36	20	31
40	81	40	71
60	129	60	111
80	177	80	160
100	231	100	205
120	283	120	246
140	332	140	296
160	384	160	339
180	428	180	384
200	479	200	427
220	520	220	466
240	575	240	514

Tabla 5.3-1. Resultados de los ensayos a compresión del Tipo 1

Ahora se procede al cálculo del Módulo de elasticidad a compresión para cada probeta. Estos cálculos irán acompañados de las medidas del ancho y el espesor de cada probeta, necesarios para obtener el E_{xx}^c según la norma. Una vez obtenidas dichas rigideces para cada probeta de cada tipo, se hará la media entre las dos calculadas de cada laminado y ese cálculo se tomará como el valor final del Módulo Elástico a compresión del laminado.

Tipo 1, probeta 1 (T1-C1):

- Medidas:
 - Ancho (w): $w = 20,70 \text{ mm}$
 - Espesor (t): $t = 1,88 \text{ mm}$
- Resultados ensayo:
 - Módulo de elasticidad longitudinal (E_{xx}): $E_{xx}^{c.T1-C1} = 107,080 \text{ GPa}$

Tipo 1, probeta 2 (T1-C2):

- Medidas:
 - Ancho (w): $w = 22,57 \text{ mm}$
 - Espesor (t): $t = 1,95 \text{ mm}$
- Resultados ensayo:
 - Módulo de elasticidad longitudinal (E_{xx}): $E_{xx}^{c.T1-C2} = 105,32 \text{ GPa}$

La media de ambos valores se muestra a continuación:

$$\text{Módulo elástico a compresión (Tipo 1): } E_{xx}^{c.T1} = 106,20 \text{ GPa}$$

• **Tipo 2:**

Las medidas de carga introducida y deformación para las dos probetas del Tipo 2 sometidas a compresión se muestran en la **Tabla 5.3-2**.

Compresión T2-C1		Compresión T2-C2	
carga (kg)	ϵ_{xx} ($\mu\epsilon$)	carga (kg)	ϵ_{xx} ($\mu\epsilon$)
20	48	20	52
40	87	40	62
60	124	60	77
80	164	80	107
100	206	100	145
120	243	120	195
140	285	140	220
160	319	160	263
180	358	180	300
200	397	200	345
220	431	220	379
240	476	240	417

Tabla 5.3-2. Resultados de los ensayos a compresión del Tipo 2

Al igual que en las probetas del Tipo 1, se procede ahora al cálculo del Módulo elástico a compresión para cada probeta. Junto con este cálculo se facilitarán las medidas de la sección de la probeta para poder realizar dicho cálculo, según la norma AITM 1-0008. De nuevo, se volverá a hacer la media entre ambos valores obtenidos, de tal manera que el resultado final calculado será el considerado como rigidez longitudinal del laminado de Tipo 2.

Tipo 2, probeta 1 (T2-C1):

- Medidas:
 - Ancho (w): $w = 20,69 \text{ mm}$
 - Espesor (t): $t = 2,72 \text{ mm}$
- Resultados ensayo:
 - Módulo de elasticidad longitudinal (E_{xx}): $E_{xx}^{c.T2-C1} = 93,11 \text{ GPa}$

Tipo 2, probeta 2 (T2-C2):

- Medidas:
 - Ancho (w): $w = 14,35 \text{ mm}$
 - Espesor (t): $t = 2,64 \text{ mm}$
- Resultados ensayo:
 - Módulo de elasticidad longitudinal (E_{xx}): $E_{xx}^{c.T2-C2} = 92,29 \text{ GPa}$

La media de ambos valores se muestra a continuación:

$$\text{Módulo elástico a compresión (Tipo 2): } E_{xx}^{c.T2} = 92,70 \text{ GPa}$$

De nuevo será pertinente hacer una comparación de los resultados obtenidos con los calculados según la TGL, que, como ya se dijo en el apartado anterior, deberán ser razonablemente parecidos.

Del **Tipo 1**, la comparación entre dichas rigideces es la siguiente:

$$E_{xx}^{T1-TGL} = 112,92 \text{ GPa} \quad ; \quad E_{xx}^{c.T1} = 106,20 \text{ GPa}$$

Y el error relativo cometido en el resultado obtenido de los ensayos:

$$\text{Error}_{rel}^{c.T1} (\%) = \frac{|E_{xx}^{T1-TGL} - E_{xx}^{c.T1}|}{E_{xx}^{T1-TGL}} \cdot 100 = 5,95 \%$$

Y del **Tipo 2**:

$$E_{xx}^{T2-TGL} = 89,38 \text{ GPa} \quad ; \quad E_{xx}^{c.T2} = 92,70 \text{ GPa}$$

Con un error relativo:

$$\text{Error}_{rel}^{c.T2} (\%) = \frac{|E_{xx}^{T2-TGL} - E_{xx}^{c.T2}|}{E_{xx}^{T2-TGL}} \cdot 100 = 3,71 \%$$

Por tanto, se puede considerar que los resultados obtenidos en los ensayos de compresión son bastante precisos y válidos, si los comparamos, como hemos hecho, con el resultado teórico aportado por la TGL.

5.4 Ensayo de flexión:

El último de los ensayos que se ha realizado sobre las probetas planas ha sido el de flexión. La finalidad de este test es la de obtener una relación Carga-Deformación en una probeta sometida a flexión en tres puntos. Para ello, la instrumentación de las probetas se ha realizado de tal manera para medir la deformación producida en la cara inferior de las probetas, sometida a tracción. Esto se puede observar en la siguiente imagen (**Figura 5.4-1**).

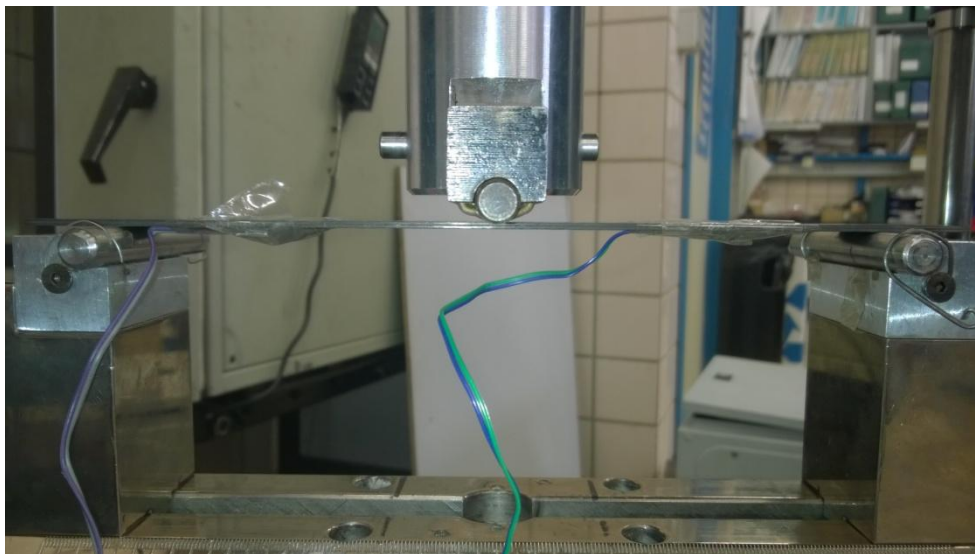


Figura 5.4-1. Configuración del ensayo de flexión en tres puntos

Como se puede observar en la anterior imagen, la luz empleada en el ensayo es bastante grande, como se verá a continuación. Esto es debido a una decisión que se tuvo que hacer acerca de la configuración del ensayo, en el cual primaba la caracterización del material a flexión pura, por encima de otros efectos que se podrían producir para una longitud de la probeta menor, como es la cortadura. Esto va a ocasionar una deflexión de la probeta muy grande en el punto medio ante la aplicación de la carga, por lo que los intervalos de carga aplicada deberán ser muy pequeños. Esto, además, es muy importante de cara a cumplir las

especificaciones de distintas normas que se pueden encontrar para ensayos a flexión, en las cuales se dice que una deflexión mayor de 5 mm durante el ensayo da invalidez a los resultados obtenidos del mismo. Por ello, haciendo aún más énfasis si cabe, se debe ser muy cuidadoso a la hora de realizar el ensayo.

Sobre las normas, se han tomado parámetros y restricciones de varias de ellas, como bien puede ser el límite de deflexión anteriormente explicado, pero realmente no se ha seguido ninguna norma específica a la hora de realizar los ensayos, siendo las medidas de las probetas y el utillaje empleado el resultado de un consenso realizado tras consultar a los tutores. Algunas de las normas consultadas han sido la ASTM C-393, sobre ensayos a flexión en paneles Sándwich, y la ASTM D-6272, de ensayo de flexión en cuatro puntos, entre otras.

La configuración del ensayo se describe a continuación. El utillaje que permite la ejecución de dicho ensayo consiste en un dispositivo rígido dispuesto de dos apoyos inferiores móviles (ver **Figura 5.4-2**), los cuales permiten ser ajustados según la luz (distancia entre dichos apoyos) necesaria para la correcta configuración del ensayo. En nuestro caso la luz será igual a 210 mm. El tercer punto que actúa sobre la probeta será el formado por el rodillo superior, que actuará en el centro mismo de la probeta por su cara superior. Este será el apoyo móvil que aplicará la carga puntual sobre la probeta, mientras que la función de los otros dos rodillos inferiores es la de generar sendas reacciones para generar un momento flector sobre el *span* de la probeta, el cual será lineal. Esta breve explicación de lo sucedido en cuanto a esfuerzos se refiere se ilustra en la **Figura 5.4-3**, donde P es la carga aplicada en el punto medio, l es la longitud de la probeta, f el desplazamiento vertical máximo, es decir, la flecha, producido en el punto medio, y M es el momento flector que se genera en la probeta.

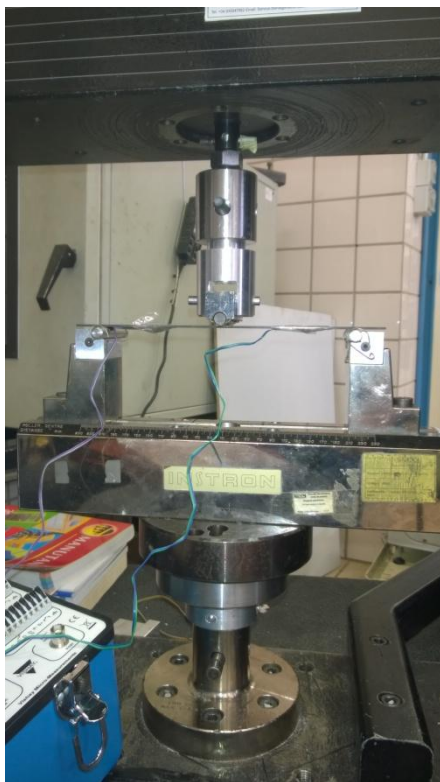


Figura 5.4-2. Utillaje empleado para la flexión en tres puntos

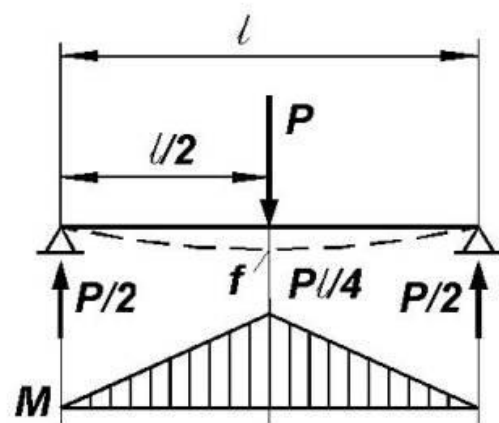


Figura 5.4-3. Diagrama de flectores para flexión en tres puntos

A continuación, en la **Figura 5.4-4**, se puede ver una perspectiva del utillaje usado en el ensayo, donde se puede apreciar de una forma algo más clara lo descrito anteriormente.

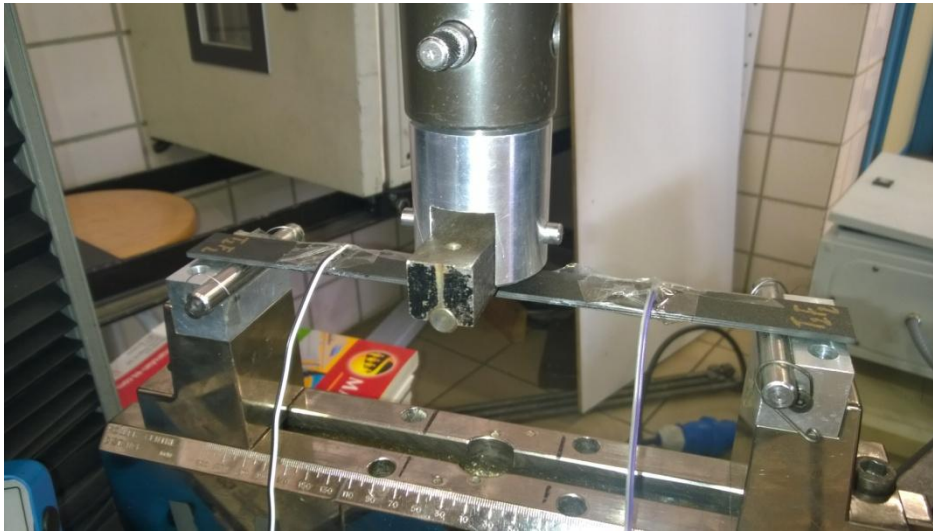


Figura 5.4-4. Perspectiva del ensayo de flexión en tres puntos

Debido a la gran precisión sobre la aplicación de la carga que se debe realizar, la célula de carga a emplear será la de 5 kN. Con ella se mide la carga aplicada, que será del orden de 10^{-2} N, es decir, del orden de gramos. Las deformaciones longitudinales sobre la cara inferior de la probeta se medirán con un puente de Wheatstone (**Figura 5.4-5**).



Figura 5.4-5. Puente de Wheatstone con el que nuevamente se medirán las deformaciones

Una vez definido el tipo de ensayo a realizar, su configuración y el modo en que se medirán los parámetros necesarios (carga y deformación), se proceden a presentar los resultados obtenidos. Al igual que en los otros dos ensayos anteriores, de tracción y de compresión, se dispone de dos probetas por cada tipo de configuración de laminado. Se darán primero los resultados de las probetas de Tipo 1, y posteriormente las de Tipo 2. Las variables medidas se darán en forma de tabla, y también se facilitará una gráfica de los resultados en cada probeta, para probar la linealidad de la deformación frente a la carga aplicada. Como de costumbre, se dará también la medida de cada probeta junto con los resultados.

- **Tipo 1:**

- **Tipo 1, probeta 1 (T1-F1):**

- Medidas:
 - Ancho (w): $w = 19,047 \text{ mm}$
 - Espesor (t): $t = 1,94 \text{ mm}$

A continuación se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de la probeta T1-F1, **Tabla 5.4-1.**

Flexión T1-F1		
carga (kg)	$\varepsilon_1 (\mu\varepsilon)$	$\varepsilon_2 (\mu\varepsilon)$
0,002	36	34
0,003	48	42
0,004	60	53
0,005	74	65
0,006	86	79
0,007	94	86
0,008	104	96
0,009	115	107
0,01	134	123
0,011	148	136
0,012	157	145
0,013	169	158

Tabla 5.4-1. Resultados obtenidos para la probeta T1-F1

Y la gráfica donde se muestran dichos resultados, **Figura 5.4-6.**

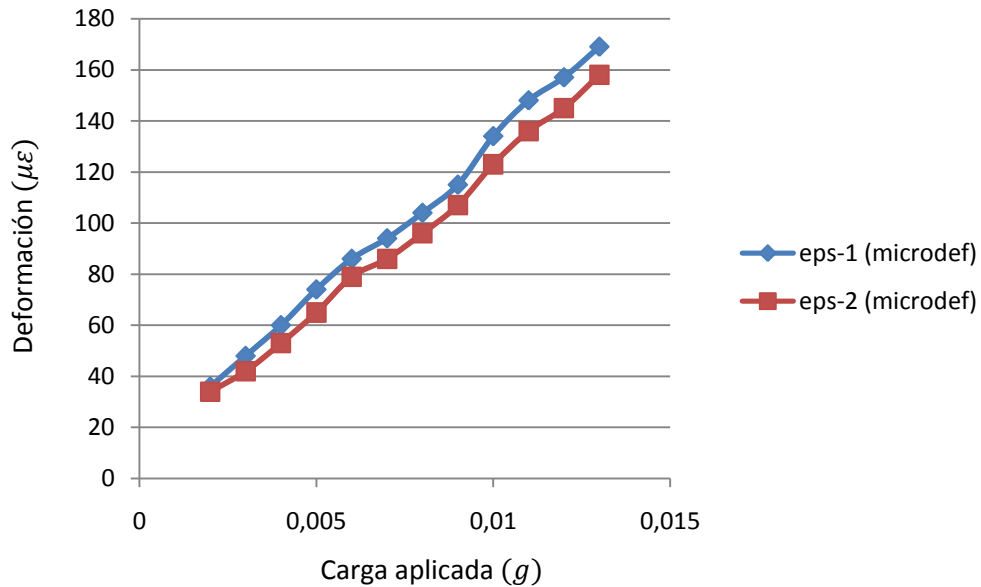


Figura 5.4-6. Gráfica Carga-Deformaciones para la probeta T1-F1

- **Tipo 1, probeta 2(T1-F2):**

- Medidas:
 - Ancho (w): $w = 20,91 \text{ mm}$
 - Espesor (t): $t = 1,94 \text{ mm}$

A continuación se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de la probeta T1-F1,
Tabla 5.4-2.

Flexión T1-F2		
carga (kg)	ε_1 ($\mu\varepsilon$)	ε_2 ($\mu\varepsilon$)
0,002	11	11
0,003	23	22
0,004	35	34
0,005	47	46
0,006	57	55
0,007	67	65
0,008	78	76
0,009	90	86
0,01	101	98
0,011	109	108
0,012	118	116
0,013	130	129

Tabla 5.4-2. Resultados obtenidos para la probeta T1-F2

Y la gráfica donde se muestran dichos resultados, **Figura 5.4-7.**

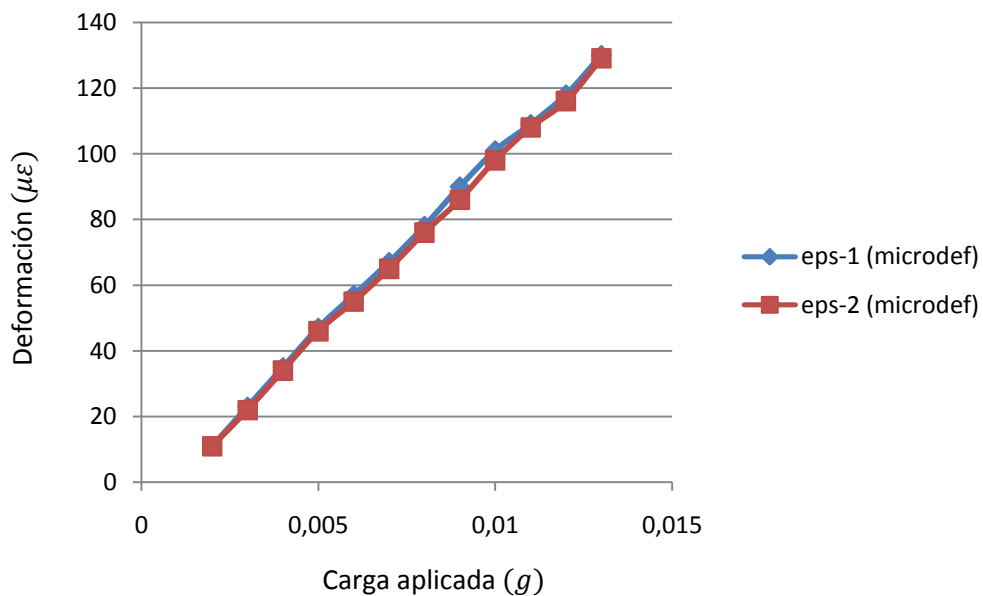


Figura 5.4-7. Gráfica Carga-Deformaciones para la probeta T1-F2

- **Tipo 2:**
- **Tipo 2, probeta 1(T2-F1):**
 - Medidas:
 - Ancho (w): $w = 19,03 \text{ mm}$
 - Espesor (t): $t = 2,69 \text{ mm}$

A continuación se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de la probeta T1-F1,
Tabla 5.4-3.

Flexión T2-F1		
carga (kg)	ε_1 ($\mu\varepsilon$)	ε_2 ($\mu\varepsilon$)
0,002	5	6
0,003	11	12
0,004	20	21
0,005	25	27
0,006	32	37
0,007	38	42
0,008	42	47
0,009	49	55
0,01	55	61
0,011	61	67
0,012	67	73
0,013	72	78

Tabla 5.4-3. Resultados obtenidos para la probeta T2-F1

Y la gráfica donde se muestran dichos resultados, **Figura 5.4-8**.

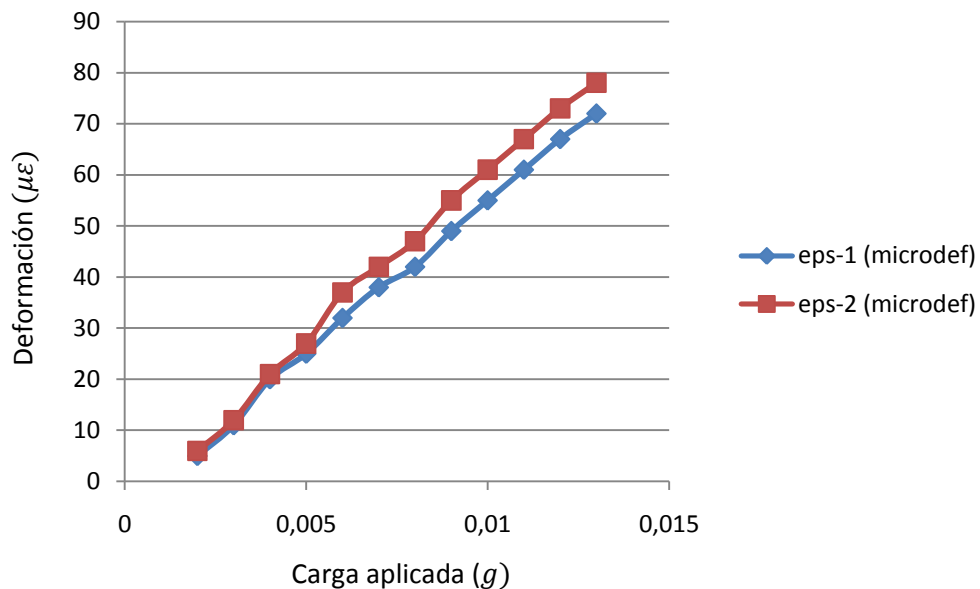


Figura 5.4-8. Gráfica Carga-Deformaciones para la probeta T2-F1

Tipo 2, probeta 2(T2-F2):

- Medidas:
 - Ancho (w): $w = 20,71 \text{ mm}$
 - Espesor (t): $t = 2,70 \text{ mm}$

A continuación se muestran los resultados obtenidos en el ensayo de la probeta T1-F1,

Tabla 5.4-4.

Flexión T2-F2		
carga (kg)	ε_1 ($\mu\varepsilon$)	ε_2 ($\mu\varepsilon$)
0,002	5	4
0,003	9	8
0,004	14	13
0,005	20	18
0,006	26	24
0,007	31	27
0,008	35	31
0,009	40	36
0,01	47	42
0,011	51	45
0,012	56	50
0,013	62	56

Tabla 5.4-4. Resultados obtenidos para la probeta T2-F2

Y la gráfica donde se muestran dichos resultados, **Figura 5.4-9**.

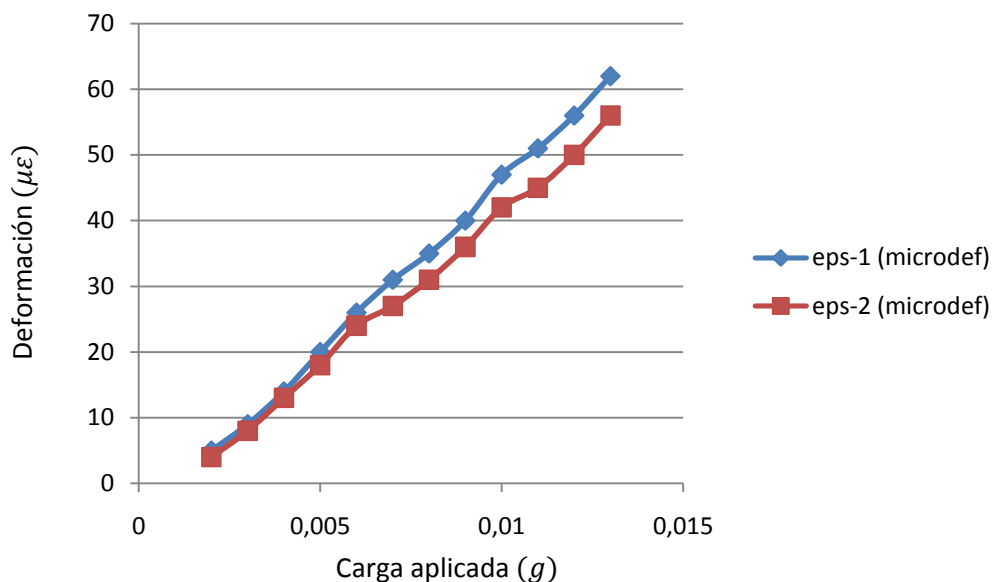


Figura 5.4-9. Gráfica Carga-Deformaciones para la probeta T2-F2

Como se puede observar, la relación entre carga y deformación podría considerarse lineal, si bien es verdad que conforme va aumentando la carga esta linealidad se va perdiendo, como se puede observar con bastante claridad en la **Figura 5.4-8**, donde la rigidez en la parte final de la curva es menor que en la parte inicial. Esto puede ser debido a una pérdida de rigidez del material o al deslizamiento existente en los rodillos, o a ambos motivos.

También hay que tener en cuenta la forma en la que se han obtenido los resultados del experimento, mediante un puente de Wheatstone se medía la deformación una vez que se paraba la aplicación de la carga para apuntar dichos valores. Esto puede ocasionar errores de medida que quizás sí se hayan reflejado en los resultados aquí obtenidos, de ahí la pérdida de linealidad e incluso la separación de las dos curvas Carga-Deformación en cada probeta, las cuales, en teoría, deberían ser iguales, como ocurre en las de la probeta T1-F2, mostradas en la **Figura 5.4-7**.

6. Ensayo de las probetas ILTS:

Ya se está en disposición de realizar los ensayos sobre las probetas ILTS, los cuales son el objeto principal de este trabajo. Estos ensayos consisten en realizar una flexión en cuatro puntos sobre una viga en L de pequeñas dimensiones, con objeto de obtener la resistencia interlaminar de la probeta y la CBS (*Curved Beam Strength*), así como la curva Carga-Desplazamiento característica de este ensayo. De dicho ensayo interesará, sobre todo, la carga máxima que aguanta la probeta, ya que el objeto es obtener la resistencia interlaminar y la CBS, y la curva P- δ que surge de la realización del mismo (ver **Figura 6-1**). El desplazamiento que se menciona es el correspondiente al de los rodillos superiores.

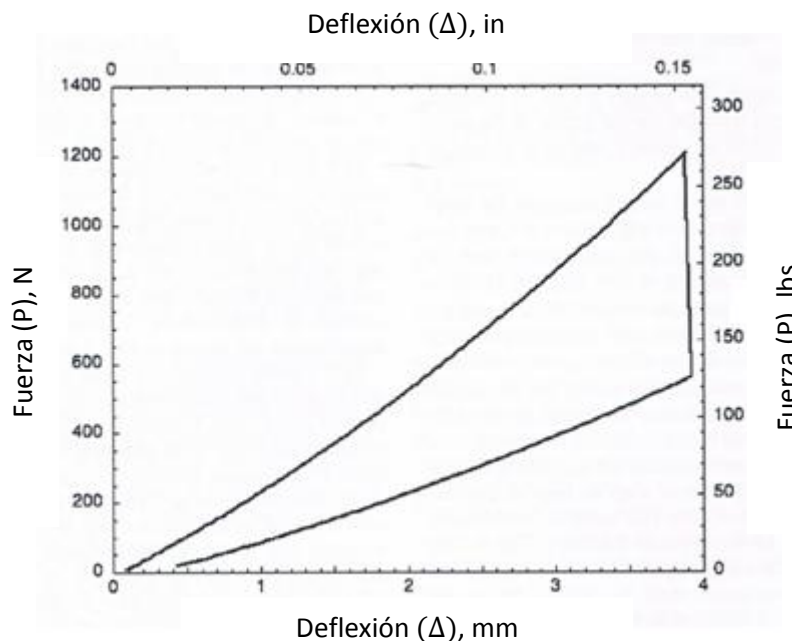


Figura 6-1. Curva típica Carga-Desplazamiento de laminados unidireccionales (ASTM D-6415)

Además, como se ha descrito, se debe obtener la CBS, además de la resistencia interlaminar. Se debe calcular este valor y el de la resistencia interlaminar, el cual, aunque se trate de un laminado multidireccional, es muy interesante su cálculo con vistas a una futura comparación con modelos en elementos finitos. Por ello el principal objetivo tratará en calcular la resistencia de una barra curvada, cuyas características de laminación se explicaron en el apartado correspondiente de fabricación de las probetas.

Según la norma ASTM D-6415, y como se podría haber deducido, el momento aplicado en la sección curva de la probeta es igual al producto de la fuerza ejercida por uno de los rodillos, P_b , y la distancia, l_0 , entre dos rodillos según la dirección del brazo del espécimen. Ante la dificultad de medir la fuerza ejercida por uno de los rodillos sobre la probeta, ya que éste contacta con la probeta, inicialmente, en una sección inclinada según un ángulo φ y, además, debido al desplazamiento vertical de los rodillos superiores, el punto de contacto y este ángulo varían durante la realización del ensayo, y por comodidad, el momento aplicado, M , podrá ser también igual al producto de la fuerza total máxima aplicada y registrada en el ensayo por una serie de coeficientes relacionados con la geometría de la probeta y del dispositivo del ensayo.

Así, para calcular la CBS y, posteriormente, la resistencia interlaminar se presentan las expresiones:

$$CBS = \frac{M}{w} = \frac{P_b l_0}{w} = \left(\frac{P}{2w \cos \phi} \right) \left(\frac{d_x}{\cos \phi} + (D + t) \tan \phi \right); \quad (22)$$

$$\sigma_r^{max} = \frac{3 \cdot CBS}{2t \sqrt{r_i r_o}}; \quad (23)$$

Esta última expresión es una simplificación de la expresión facilitada para calcular la resistencia interlaminar máxima en la norma ASTM D-6415, válida para valores de $\frac{E_{11}}{E_{22}} < 20$, ya que se cometería un error menor al 2%, según la descripción de dicha norma, como es nuestro caso ($E_{11} = 152,15 \text{ GPa}$ y $E_{22} = 8,74 \text{ GPa}$; $\frac{E_{11}}{E_{22}} = 17,41 < 20$).

Los términos que aparecen en ambas ecuaciones se explican a continuación:

- M : Momento aplicado en la zona curvada de la probeta.
- w : Ancho de la probeta.
- P_b : Fuerza aplicada por uno de los rodillos sobre la probeta.
- l_0 : Distancia entre dos rodillos según la dirección del brazo del espécimen.
- P : Fuerza total aplicada.
- ϕ : Ángulo formado entre el brazo de la probeta y la horizontal.
- d_x : Mitad de la diferencia entre las distancias entre rodillos inferiores y superiores.

$$d_x = \frac{l_b - l_t}{2}; \quad (24)$$

- D : Diámetro de los rodillos.
- t : Espesor de la probeta.
- σ_r^{max} : Resistencia interlaminar máxima.
- r_i : Radio interior de la probeta.
- r_o : Radio exterior de la probeta.

En la **Figura 6-2**, se puede observar lo que significan cada uno de los términos recién descritos.

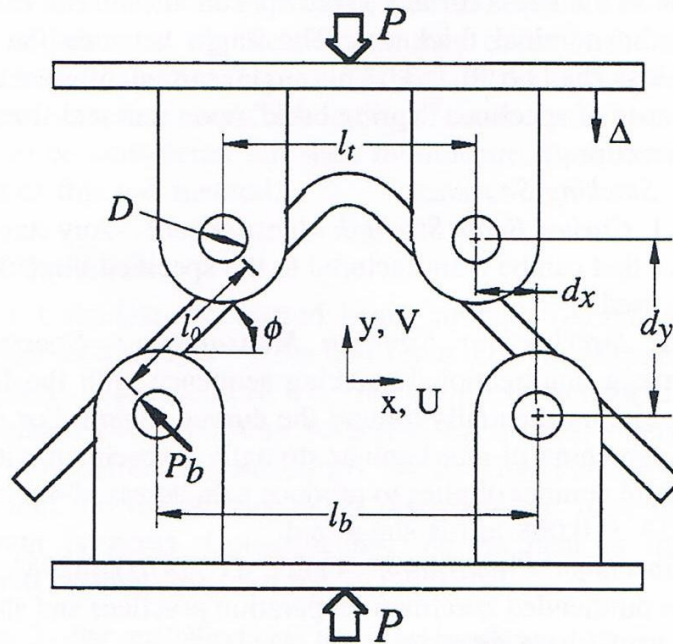


Figura 6-2. Alzado del ensayo ILTS donde se describen algunas dimensiones y parámetros (ASTM D-6415)

Una vez descritos los resultados a obtener y los cálculos que se deben realizar, se comentan la realización del ensayo y las decisiones que se han llevado a cabo sobre el mismo.

Para la realización de los ensayos se han consultado las dos normas facilitadas para ello, que no son otras que la ASTM D-6415 y la AITM 1-0069, siendo esta última la que se ha seguido con más rigor en todo el proceso de diseño y fabricación de las probetas, y, ahora sí, para la realización de los ensayos.

Los motivos de haber elegido la norma de Airbus y no la de ASTM están relacionados con la geometría y la configuración del ensayo, ya que en la AITM 1-0069 se especificaban bastante mejor las dimensiones adecuadas de la probeta para una elección determinada del radio interior de la misma, así como del radio de los rodillos a emplear en el ensayo. Además, dicha norma tenía un rango específico de espesores, el cual ajustaba bastante bien para los laminados empleados (entre 2 y 2,8 mm, aproximadamente), mientras que la ASTM empleaba las mismas dimensiones de las probetas y la misma configuración del ensayo para un rango de espesores muy amplio (entre 2 y 12 mm). Esto hace ver que, siguiendo las indicaciones de la norma de Airbus, se obtendrán unos resultados más adecuados en relación con las dimensiones de la probeta a emplear.

Como se acaba de explicar, el motivo de la elección de la norma a seguir está meramente relacionado a la geometría de las probetas, así como a aspectos relacionados con la fabricación de las mismas, como podría ser la especificación en la ASTM D-6415 de un radio interior de las probetas igual a 6,4 mm, el cual, comparado con el exigido en la AITM 1-0069, igual a 5 mm, hubiera resultado más complejo de obtener. Realmente los aspectos relacionados con la ejecución de los ensayos son muy similares en ambas normas, coincidiendo en prácticamente todos sus puntos. Algunos de los puntos más importantes a la hora de realizar los ensayos se describen a continuación:

- Condiciones ambientales al realizar los ensayos:
 - Temperatura:
 - ASTM: $T = 23 \pm 3^{\circ}C$
 - AITM: $T = 23 \pm 2^{\circ}C$
 - Humedad relativa:
 - ASTM: $H = 50 \pm 5 \%$
 - AITM: No especifica
- Máxima deflexión del espécimen a la hora de realizar el ensayo:
 - En ambas normas se especifica lo mismo, y no debe superar los 5 mm
- Velocidad del ensayo:
 - ASTM: 0.5 mm/min
 - AITM: 2 mm/min

Aunque se ha dicho anteriormente que muchos aspectos a la hora de realizar el ensayo son similares en ambas normas, se ha hecho hincapié en dos aspectos en los cuales dichas normas difieren. El primero de ellos es las condiciones ambientales al realizar los ensayos, para la cual en la ASTM es más específica que la de Airbus, ya que se especifica la humedad relativa que debe tener la sala donde se realicen los ensayos. Es más, la norma de ASTM hace mención a otra norma, concretamente la ASTM D-5229, la cual es la que ha de seguirse para alcanzar dichas condiciones ambientales en la sala de realización de los ensayos. Cabe ahora mencionar que los ensayos se han llevado a cabo en las instalaciones de TEAMS, cuya sala de realización de estos ensayos se sabe que cumplen todas las especificaciones para la correcta ejecución de este ensayo. Por lo tanto, en este aspecto se seguirán las directrices marcadas por la norma ASTM D-6415.

Otro de los parámetros que cambia según la norma que se siga, es la velocidad a la que se debe realizar el ensayo. En la norma de ASTM se dice, específicamente, que si el máximo desplazamiento a la hora del fallo final no puede ser correctamente estimado, se deben utilizar velocidades estándar, en torno a $0,5 \text{ mm/min}$, hasta que la carga de fallo y el máximo desplazamiento se puedan conocer de forma precisa. Entonces se aconseja ajustar la velocidad del ensayo correctamente, la cual se entiende que será mayor de $0,5 \text{ mm/min}$. Por lo tanto, la velocidad especificada en la norma AITM 1-0069, igual a $2 \pm 0,2 \text{ mm/min}$, la que se ha usado para realizar los ensayos, se puede considerar como correcta y ajustada a la hora de realizar los ensayos sobre las probetas ILTS. Además, como ya ocurrió en los ensayos de flexión en tres puntos sobre las probetas planas, en los ensayos de flexión se suelen usar velocidades de ensayo elevadas, ya que la carga aplicada en los mismos no será muy alta, por lo que si se eligen velocidades muy bajas la duración del ensayo podría ser excesiva, para una obtención de resultados similar con velocidades más altas.

Se describe a continuación el utillaje a emplear (ver **Figura 6-3**). Éste consiste en un dispositivo provisto de 4 barras cilíndricas de acero de alta resistencia ($\sigma_e > 1000 \text{ MPa}$) orientadas de manera horizontal según la profundidad, es decir, perpendiculares a la directriz de la viga (ver **Figura 6-4**).



Figura 6-3. Utillaje para la realización del ensayo ILTS

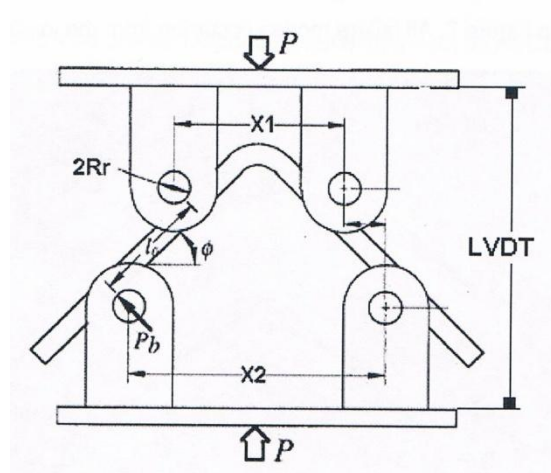


Figura 6-4. Vista para aclarar la disposición de los rodillos con respecto a la probeta (ASTM D-6415)

La distancia entre estos cilindros es ajustable, con objeto de configurar el dispositivo del ensayo de forma adecuada según las dimensiones de la probeta. Éstas, las dimensiones recomendadas según la norma, las cuales ya fueron mostradas en el capítulo pertinente (ver **Tabla 3-1**) son las que van a condicionar en mayor medida la distancia entre rodillos.

En la **Figura 6-5** se puede ver la distancia recomendada según la norma AITM 1-0069 a la que se deben colocar los rodillos para un espesor dado y el radio de los rodillos. En nuestro caso el espesor sumado al radio interior ($t + r_i$) de la probeta es aproximadamente igual a 7 mm , mientras que el radio de los rodillos (R_r) es igual a 5 mm .

↓

	Rr=5	
t+ri	X1 [mm]	X2 [mm]
4	20	35
5		
6		
7	22	36
8		
9		

→

Figura 6-5. Medidas de la distancia entre rodillos según algunas dimensiones relativas al ensayo (AITM 1-0069)

Por lo tanto, la distancia entre rodillos deberá ser la siguiente:

- Distancia entre rodillos superiores:
 - $X_1 = 22 \text{ mm}$
- Distancia entre rodillos inferiores:
 - $X_2 = 36 \text{ mm}$

Estas distancias serán medidas cuidadosamente con un calibre de precisión y ajustadas adecuadamente mediante las mordazas provistas para ello de cara a la correcta realización de los ensayos.

Además, la distancia entre el punto de contacto de los rodillos superiores del utillaje y el comienzo de la zona curvada de la probeta debe ser mayor de 1 mm , como se puede ver en la **Figura 6-6**.

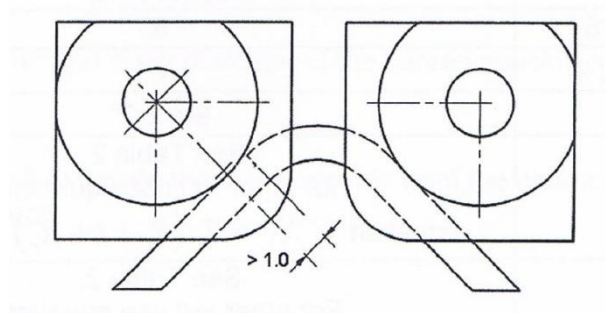


Figura 6-6. Esquema de la posición de los rodillos con respecto a la zona curvada

Una vez se haya instalado correctamente el dispositivo para la realización de los ensayos ILTS, se introduce la probeta en el hueco entre los rodillos, con sumo cuidado de que la probeta se encuentre en la zona media de dichos rodillos, para asegurar que las barras cilíndricas contactan con la probeta en la totalidad de su anchura (ver **Figuras 6-7 y 6-8**). Además, tal y como se explica en la norma, debido a la geometría del utillaje del ensayo y del espécimen, éste se centrará automáticamente al aplicar la carga.



Figura 6-7. Vista lateral del ensayo ILTS (1)



Figura 6-8. Vista lateral del ensayo ILTS (2)

Por lo tanto, se aplicará una precarga sobre la probeta, por dos razones. Primero para que ésta se centre de forma automática. Y segundo para que podamos tomar una referencia desde la que poder tomar medida con las bandas extensométricas. Esta precarga inicial es conocida e igual a 50 kg.

De esta forma, ya se tiene la probeta colocada en su posición, con la precarga de 50 kg aplicada y lista para ser ensayada (**Figura 6-9**).

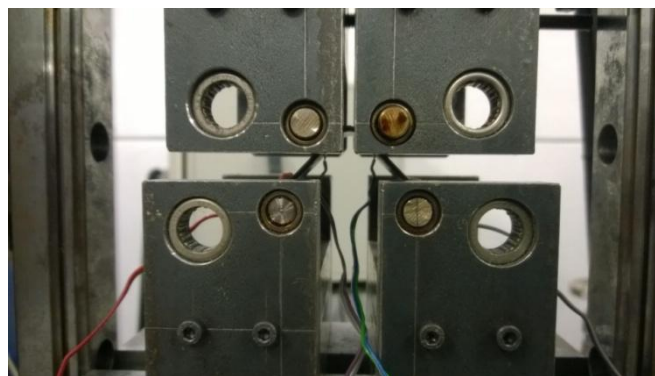


Figura 6-9. Imagen frontal del ensayo ILTS

Seguidamente a la colocación de la probeta de forma correcta en el dispositivo de ensayo, se conectan los cables soldados a las bandas extensométricas en el conector del puente de Wheatstone, que esta vez estará conectado a un sistema de adquisición de datos, para mejorar la precisión de las medidas y las gráficas a obtener.

Una vez se ha descrito el ensayo, las normas a seguir, las dimensiones de la probeta, el dispositivo a utilizar y la configuración del mismo, así como la correcta colocación de la

probeta previa a la realización del ensayo, ya se está en disposición para hacer el ensayo sobre las probetas ILTS (ver **Figura 6-10**).

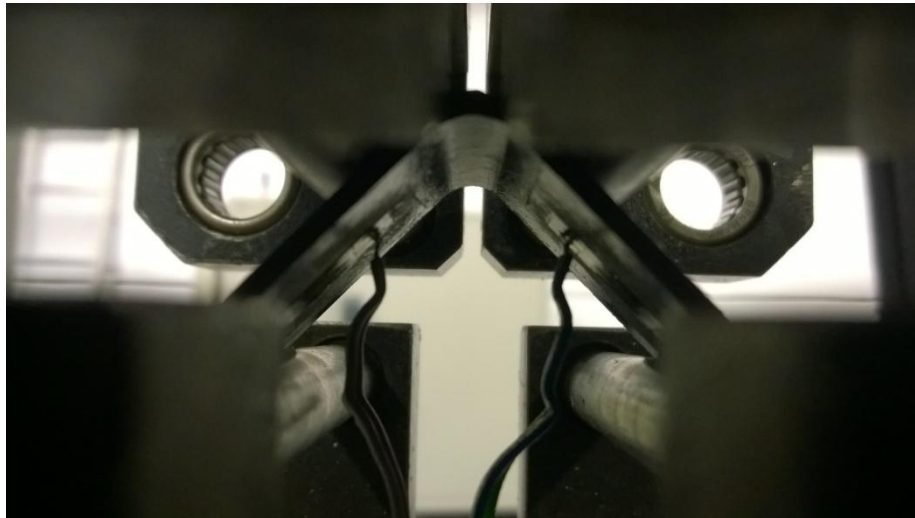


Figura 6-10. Detalle interior del ensayo ILTS

Los primeros ensayos se realizaron sobre dos probetas, las primeras para cada tipo (la T1-1 y la T2-1) el día 25 de mayo de 2015, lunes (Temperatura=23,5°C; Humedad=52%). Solo se ensayaron estas dos probetas debido a los posibles fallos que pudieran encontrarse en la obtención de resultados de las mismas, con vistas a solucionarlos en posteriores ensayos con las restantes probetas. En concreto, uno de los principales problemas que podríamos encontrar era la correcta colocación de las bandas extensométricas que, como se verá más adelante, deberán ser corregidas para los ensayos posteriores. La medida de dichas bandas es única y exclusivamente objeto de comparación con los modelos realizados en elementos finitos de dichos ensayos.

Notar que los resultados de los ensayos mostrados a continuación mezclan requisitos y cálculos a realizar según las dos normas. De cada una de ellas se mostrará:

- ASTM D-6415: Curva P- δ (común a ambas normas) y cálculo de CBS y σ_r^{max} para cada probeta.
- AITM 1-0069: Imagen del detalle de la zona afectada por la rotura y ángulo de la probeta tras la rotura.

Se procede a mostrar los resultados obtenidos tras la realización de sendos ensayos sobre las dos probetas ILTS ya mencionadas: la T2-1 y la T1-1. Para cada una de ellas se facilitarán las medidas tomadas sobre las probetas, tal y como ya se mostró en la **Tabla 4.1-1**, en el apartado correspondiente a la fabricación de las probetas.

- **Probeta T2-1:**

Se pueden ver algunas imágenes de la configuración del ensayo para esta probeta a continuación (**Figuras 6-11 a 6-14**).

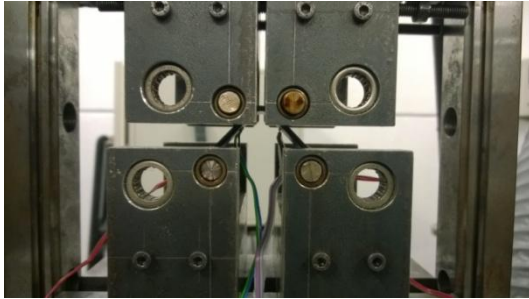


Figura 6-11. Vista frontal del ensayo de la T2-1



Figura 6-12. Detalle interior del ensayo de la T2-1



Figura 6-13. Vista lateral del ensayo de la T2-1 (1)



Figura 6-14. Vista lateral del ensayo de la T2-1 (2)

A continuación se muestran las dimensiones que caracterizan la probeta (**Tabla 6-1**).

Medidas ProbetaT2-1											
nº	w1 (mm)	w2 (mm)	w3 (mm)	t1 (mm)	t2 (mm)	t3 (mm)	t4 (mm)	t5 (mm)	t6 (mm)	$\alpha 1(^{\circ})$	$\alpha 2(^{\circ})$
1	27,02	27,06	27,2	2,68	2,75	2,7	2,69	2,7	2,66	88,5	88,5

Tabla 6-1. Medidas de la probeta T2-1

Y la gráfica típica del ensayo ILTS obtenida tras el ensayo de esta probeta (**Figura 6-15**).

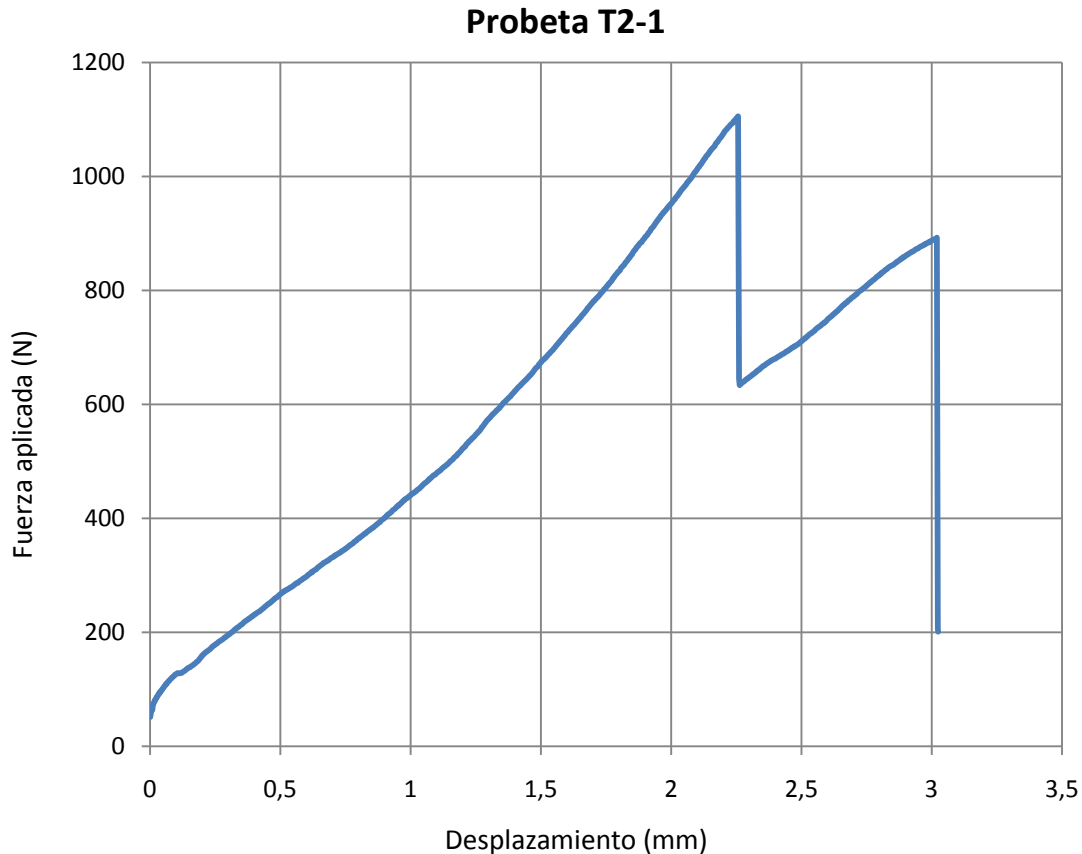


Figura 6-15. Curva P-δ del ensayo ILTS de la T2-1

La carga máxima y el desplazamiento para dicha carga son, respectivamente:

- Carga máxima:

$$P_{max}^{T2-1} = 1105,12 \text{ N}$$

- Desplazamiento máximo:

$$\delta_{max}^{T2-1} = 2,256 \text{ mm}$$

En vista de la deflexión obtenida en el punto de máxima carga, se podría considerar que el ensayo ha sido válido, ya que no se ha superado el valor máximo permitido de 5 mm.

$$\delta_{max}^{T2-1} = 2,256 \text{ mm} < 5 \text{ mm} \rightarrow \text{Ensayo válido}$$

Como se puede ver en la gráfica obtenida de P-δ, tras el punto de máxima carga se decidió seguir aplicando aún más carga, tal y como indica la norma ASTM D-6415 (ver **Figura 6-16**) para laminados cuyas fibras se orientan en múltiples direcciones (como es nuestro caso), con objeto de calcular la CBS (*curved beam strength*). Pero el resultado obtenido para el siguiente pico de carga fue demasiado bajo, no soportándose más carga en la probeta a partir del mismo. Por lo tanto, para este ensayo y para los posteriores, se tomará como válida la curva representativa de P-δ medida hasta P_{max} .

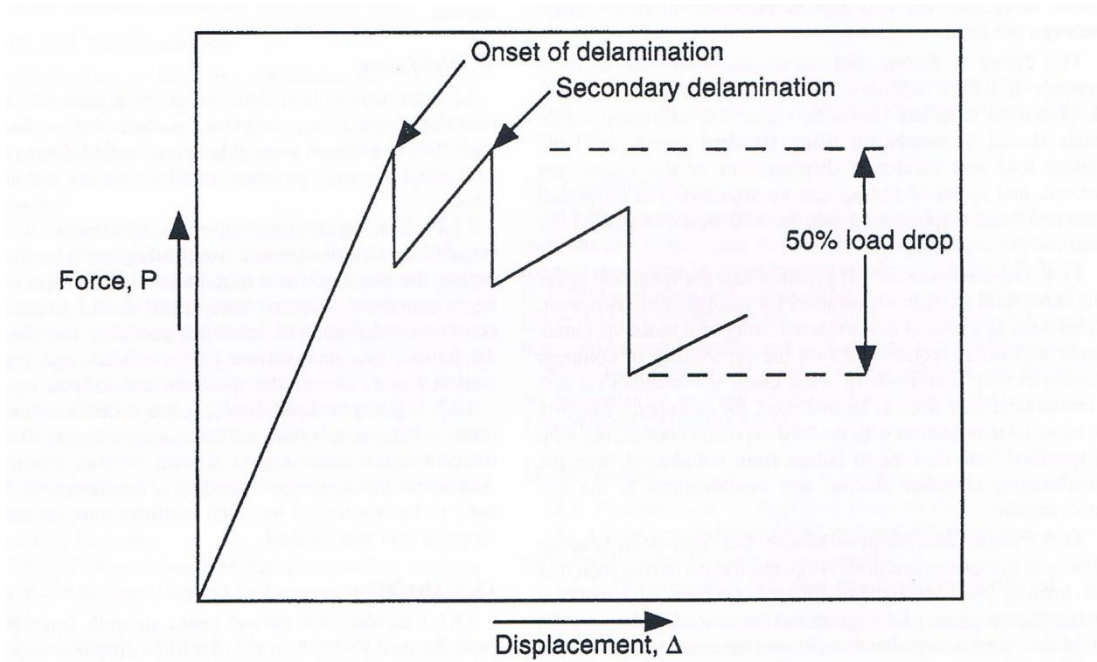


Figura 6-16. Curva típica Carga-Desplazamiento de laminados multidireccionales (ASTM D-6415)

Se procede ahora al cálculo de CBS y de σ_r^{max} . Los valores que toman los parámetros empleados para ello, en esta probeta, son:

- $P = 1105,12 \text{ N}$
- $w = 27,063 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
- $\phi = 45,625^\circ$
- $d_x = 7 \cdot 10^{-3} \text{ m} \rightarrow$ Este valor será el mismo para el resto de ensayos
- $D = 0,01 \text{ m} \rightarrow$ Este valor será el mismo para el resto de ensayos
- $t = 2,70 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
- $r_i = 5 \text{ mm}$
- $r_o \cong r_i + t = 7,70 \text{ mm}$

Por lo tanto, una vez obtenidos los parámetros para calcular la CBS para esta probeta, ya se puede realizar el cálculo del mismo.

El cálculo de CBS para esta probeta es igual a:

$$CBS^{T2-1} = 652,25 \text{ N}$$

Y el cálculo de σ_r^{max} es igual a:

$$\sigma_r^{max} = 58,40 \text{ MPa}$$

El ángulo de la probeta tras la rotura, medido por ambos laterales:

$$\alpha_{1,rot}^{T2-1} = 90,6^\circ \quad ; \quad \alpha_{2,rot}^{T2-1} = 90,5^\circ$$

Aunque, como ya se ha comentado, la disposición de bandas extensométricas es independiente de los parámetros a obtener del ensayo según las normas ASTM D-6415 y AITM 1-0069, se va a facilitar a continuación una gráfica (**Figura 6-17**) con los datos de Carga-Deformación obtenidos, con vistas a una comparación futura con un modelo en elementos finitos. Estos datos se facilitarán para cada probeta ensayada. Las series 3 y 4 mostradas en la gráfica corresponden a las bandas extensométricas situadas en la parte inferior de la probeta y las series 1 y 2 a las bandas situadas en la parte superior.

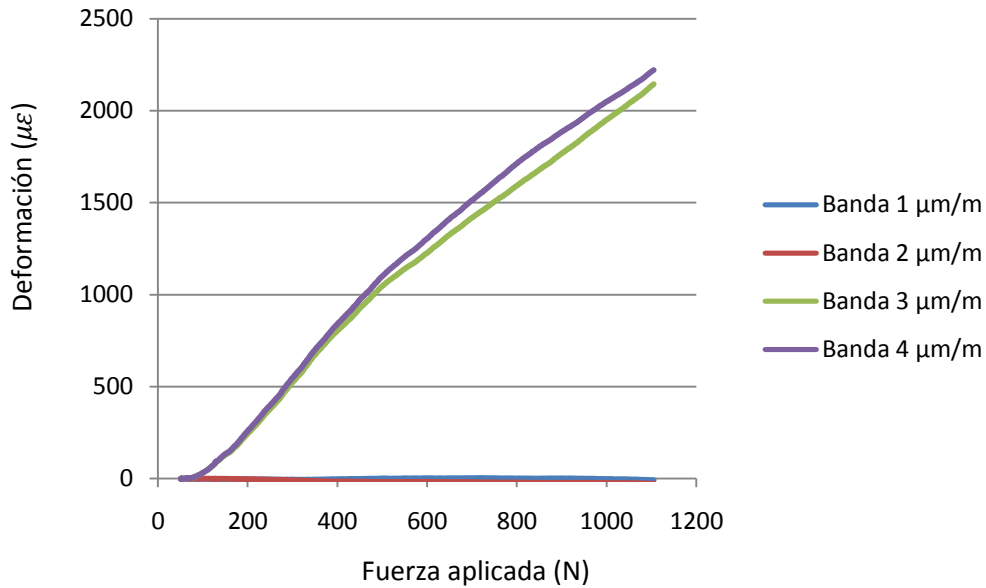


Figura 6-17. Datos de las bandas extensométricas en la T2-1

A continuación se puede ver una imagen del detalle de la zona donde se produce el fallo de la probeta, la **Figura 6-18**.

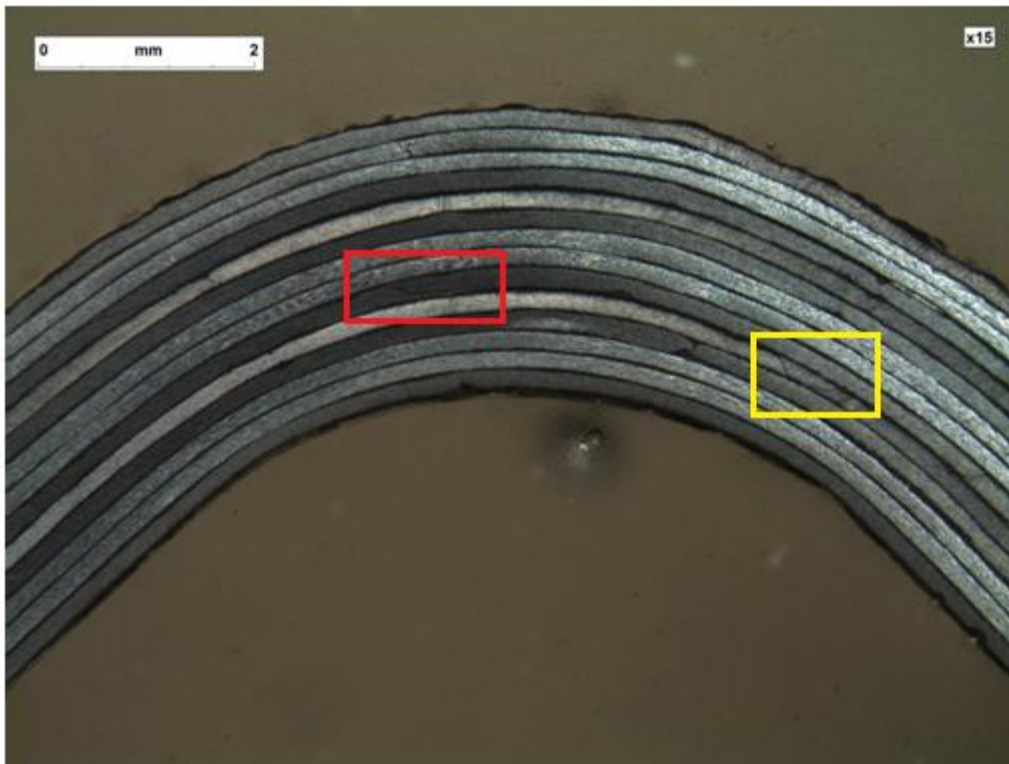


Figura 6-18. Detalle de la zona curvada tras el ensayo de la T2-1

Para esta probeta, se pueden observar distintas grietas (enmarcada una de ellas en amarillo) en las dos láminas dispuestas a 90° , que son la quinta lámina si empezamos a contar desde la superior o la inferior (la secuencia de apilado para el Tipo 2 era $[45/0/0/-45/90/45/0]_s$). Igualmente, en torno a la zona media se aprecia con claridad una grieta que se ha propagado en la lámina central inferior de 45° (la sexta empezando a contar desde la inferior, enmarcada en color rojo) en la dirección de los laminados. Todos estos fallos, y el último de ellos en particular, dan validez al modo en que debería haber roto la probeta, con fallos producidos en la zona curvada y no originadas por los rodillos de aplicación de la carga. Un detalle de los distintos modos de rotura válidos se puede encontrar en la norma AITM 1-0069, concretamente en la Figura 7, página 10.

- **Probeta T1-1:**

Se pueden ver algunas imágenes de la configuración del ensayo para esta probeta a continuación (**Figuras 6-19 a 6-22**).

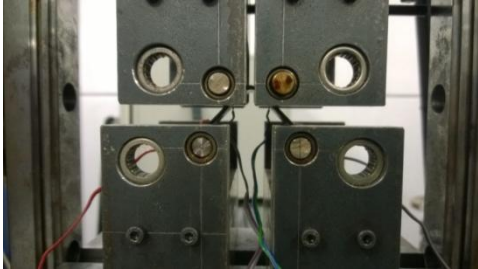


Figura 6-19. Vista frontal del ensayo de la T1-1



Figura 6-20. Detalle interior del ensayo de la T1-1



Figura 6-21. Vista lateral del ensayo de la T1-1 (1)



Figura 6-22. Vista lateral del ensayo de la T1-1 (2)

A continuación se muestran las dimensiones que caracterizan la probeta (**Tabla 6-2**).

Medidas probeta T1-1											
n	w1	w2	w3	t1	t2	t3	t4	t5	t6	$\alpha 1(^{\circ})$	$\alpha 2(^{\circ})$
º	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		
1	27,07	27,02	27,1	1,95	2,05	1,97	1,95	2,2	1,97	89	88,5

Tabla 6-2. Medidas de la probeta T1-1

Y la gráfica típica del ensayo ILTS obtenida tras el ensayo de esta probeta (**Figura 6-23**) se muestra a continuación.

Probeta T1-1

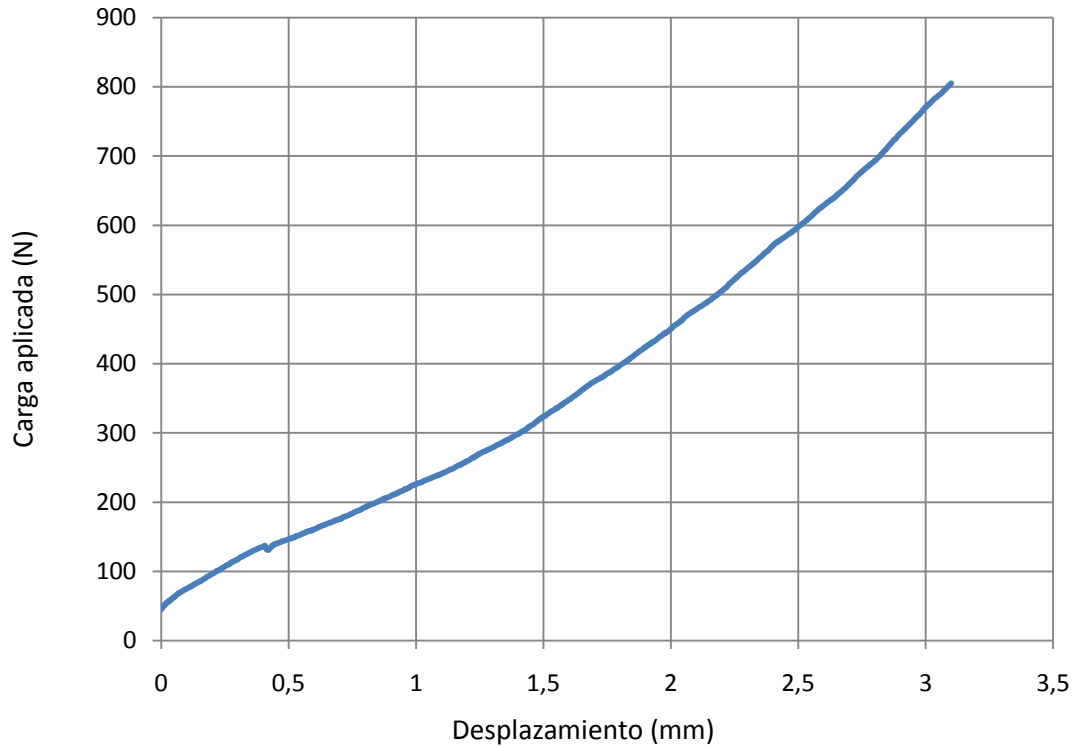


Figura 6-23. Curva P-δ del ensayo ILTS de la T1-1

La carga máxima y el desplazamiento para dicha carga son, respectivamente:

- Carga máxima:

$$P_{max}^{T1-1} = 804,81 \text{ N}$$

- Desplazamiento máximo:

$$\delta_{max}^{T1-1} = 3,10 \text{ mm}$$

En vista de la deflexión obtenida en el punto de máxima carga, se podría considerar que el ensayo ha sido válido, ya que no se ha superado el valor máximo permitido de 5 mm.

$$\delta_{max}^{T1-1} = 3,10 \text{ mm} < 5 \text{ mm} \rightarrow \text{Ensayo válido}$$

Se procede ahora al cálculo de CBS y de σ_r^{max} . Los valores que toman los parámetros empleados para ello, en esta probeta, son:

- $P = 804,81 \text{ N}$
- $w = 27,093 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
- $\phi = 45,75^\circ$
- $t = 2,015 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
- $r_i = 5 \text{ mm}$
- $r_o = 7,015 \text{ mm}$

Por lo tanto, una vez obtenidos los parámetros para calcular la CBS para esta probeta, ya se puede realizar el cálculo del mismo.

El cálculo de CBS para esta probeta es igual a:

$$CBS^{T1-1} = 490,95 N$$

Y el cálculo de σ_r^{max} es igual a:

$$\sigma_r^{max} = 61,71 MPa$$

El ángulo de la probeta tras la rotura, medido por ambos laterales:

$$\alpha_{1,rot}^{T1-1} = 90^\circ \quad ; \quad \alpha_{2,rot}^{T1-1} = 89,8^\circ$$

A continuación se puede ver una imagen del detalle de la zona donde se produce el fallo de la probeta, la **Figura 6-24**.

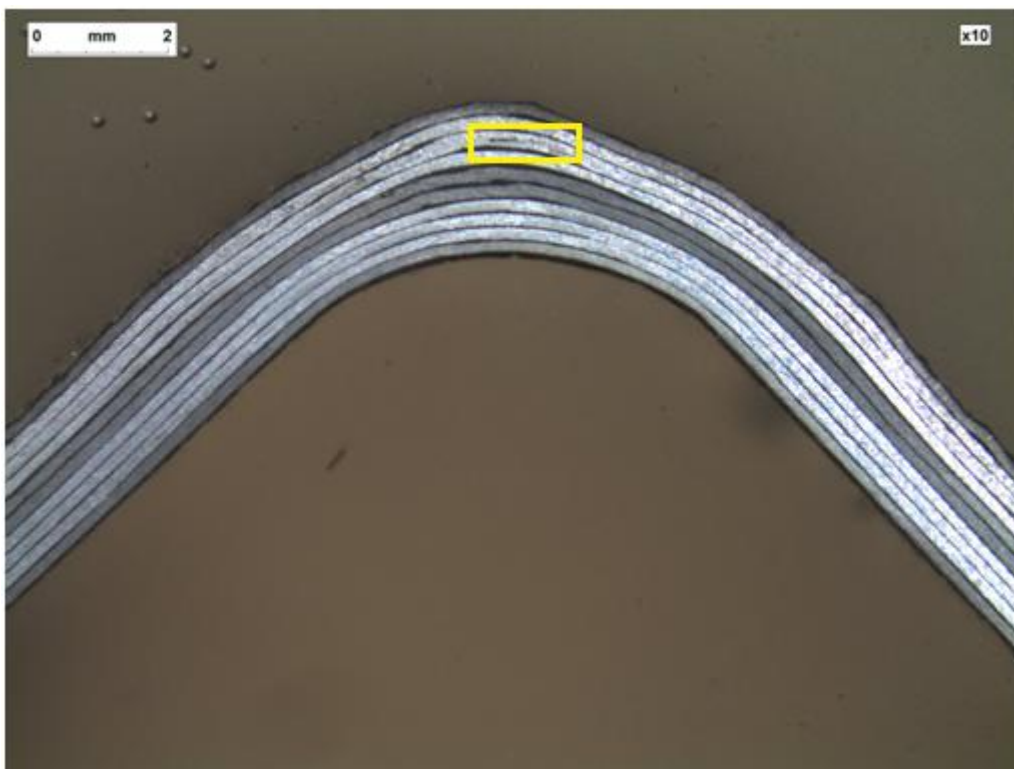


Figura 6-24. Detalle de la zona curvada tras el ensayo de la T1-1

En la imagen recién mostrada se puede apreciar en una de las láminas de 0° superiores (la secuencia de apilado para el Tipo 1 es: $[45/0/0/0/-45]_s$), enmarcado en amarillo, una grieta en la zona central de dicha lámina, la cual indica el modo de fallo de la probeta y, por lo tanto, atendiendo a los modos de fallo válidos descritos por las normas, podemos decir que la probeta ha roto como se esperaba y el ensayo se puede considerar válido en ese aspecto.

Como en el caso anterior, a continuación se facilitan los datos obtenidos de las bandas extensométricas sobre esta probeta en forma de gráfica Carga-Deformación (**Figura 6-25**). Ahora las series 3 y 4 corresponden a las bandas de la zona inferior de la probeta, y las series 1 y 2 a la parte superior.

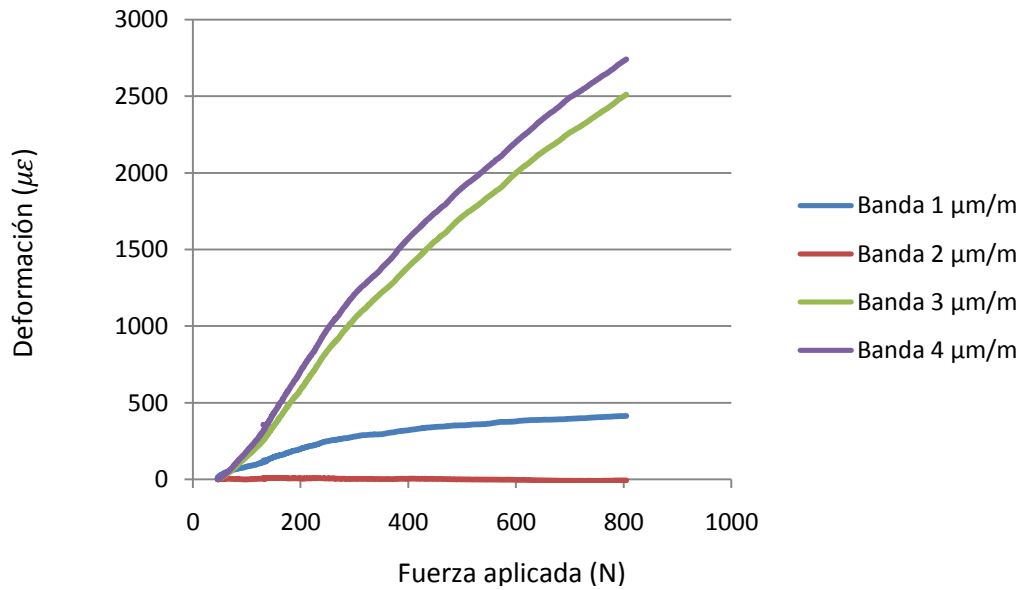


Figura 6-25. Datos de las bandas extensométricas en la T1-1

Tras los primeros dos ensayos realizados sobre las dos probetas número uno de cada tipo, se pueden sacar algunas conclusiones que, por otra parte, eran de esperar. Debido a la secuencia de apilado que se ha usado en ambos tipos de configuración, cabía esperar que la probeta del Tipo 1 fuera más flexible y menos resistente. Principalmente, este hecho se debe a un mayor espesor de la probeta del Tipo 2, la cual, para un mismo número de láminas a 0° , presenta una situación de las mismas de manera que confiere más rigidez al conjunto, encontrándose éstas a una distancia mayor del plano medio del laminado, mientras que en la de Tipo 1 las láminas a 0° se encuentran más cerca del plano medio, por lo que la viga posee menor inercia que la de Tipo 2. Este fenómeno podría compararse con la analogía de un perfil en H metálico, donde el material se aleja del plano medio del perfil con objeto de aportar más rigidez, del mismo modo que aquí las láminas a 0° se alejan del plano medio del laminado con la misma finalidad.

En efecto, tal y como se dijo anteriormente, para las próximas dos probetas a ensayar, la T1-2 y la T2-2, se debe realizar una instrumentación sobre las mismas de tal manera que las bandas se coloquen en zonas interesantes desde un punto de vista tensional. En las dos anteriores, la T1-1 y la T2-1, el principal problema encontrado fue que las dos bandas extensométricas colocadas en la cara superior de las probetas no medían apenas deformación, ya que estaban colocadas muy alejadas del apoyo de los rodillos. Esto se ha solucionado, colocando dichas bandas más cerca de los rodillos y, además, como era la idea original de la instrumentación, para una misma sección de la probeta se han pegado las bandas superior e inferior en la misma zona, como podemos ver en las **Figuras 6-26 y 6-27**.

Para mayor detalle de la colocación de estas bandas, su posición se encuentra a un 25% de la longitud de cada brazo, contando a partir de la zona curvada, es decir, a unos 17 mm contando a partir de dicha zona. Además, las dimensiones de las bandas son, aproximadamente, de 10 mm de longitud por 5 mm de ancho.



Figura 6-26. Nueva disposición de las bandas extensométricas para las T1-2 y T2-2



Figura 6-27. Detalle de la soldadura de los cables a las nuevas galgas

Los ensayos se realizaron el día 16 de junio de 2015, martes. Las condiciones de temperatura y humedad fueron, respectivamente:

- *Temperatura = 23,7 °C*
- *Humedad = 47%*

A continuación se presentan los resultados obtenidos de estos ensayos.

- **Probeta T2-2:**

Se pueden ver algunas imágenes de la configuración del ensayo para esta probeta a continuación (**Figuras 6-28 a 6-31**).

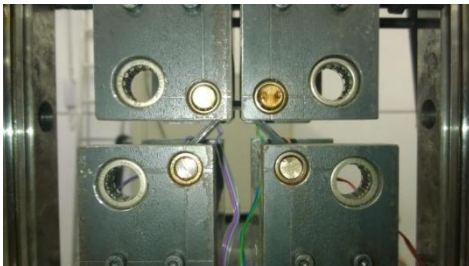


Figura 6-28. Vista frontal del ensayo de la T2-2

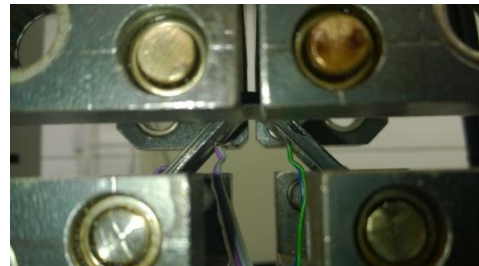


Figura 6-29. Detalle interior del ensayo de la T2-2



Figura 6-30. Vista lateral del ensayo de la T2-2 (1)



Figura 6-31. Vista lateral del ensayo de la T2-2 (2)

A continuación se muestran las dimensiones que caracterizan la probeta (**Tabla 6-3**).

Medidas Probeta T2-2											
n	w1	w2	w3	t1	t2	t3	t4	t5	t6	$\alpha 1(^{\circ})$	$\alpha 2(^{\circ})$
2	27,23	27,18	27,14	2,67	2,64	2,71	2,71	2,65	2,72	88,5	88

Tabla 6-3. Medidas de la probeta T2-2

Y la gráfica típica del ensayo ILTS obtenida tras el ensayo de esta probeta (**Figura 6-32**) se muestra a continuación.

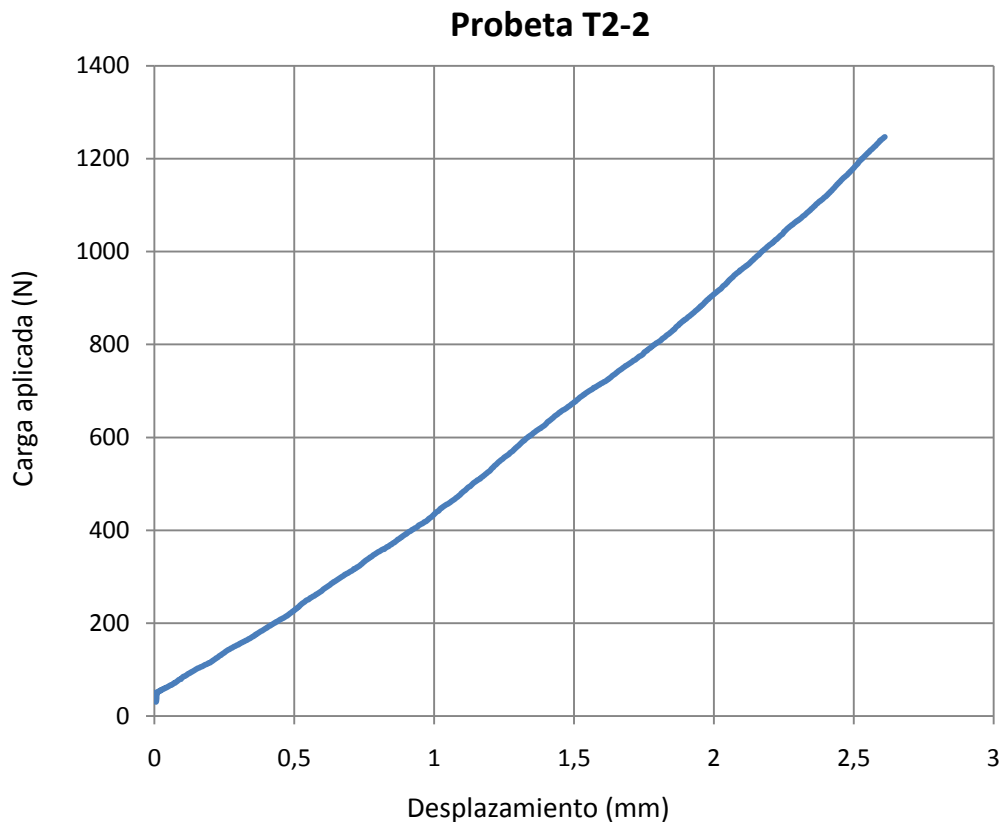


Figura 6-32. Curva P- δ del ensayo ILTS de la T2-2

La carga máxima y el desplazamiento para dicha carga son, respectivamente:

- Carga máxima:

$$P_{max}^{T2-2} = 1246,41 \text{ N}$$

- Desplazamiento máximo:

$$\delta_{max}^{T2-2} = 2,61 \text{ mm}$$

En vista de la deflexión obtenida en el punto de máxima carga, se podría considerar que el ensayo ha sido válido, ya que no se ha superado el valor máximo permitido de 5 mm.

$$\delta_{max}^{T2-2} = 2,61 \text{ mm} < 5 \text{ mm} \rightarrow \text{Ensayo válido}$$

Se procede ahora al cálculo de CBS y de σ_r^{max} . Los valores que toman los parámetros empleados para ello, en esta probeta, son:

- $P = 1246,41 N$
- $w = 27,18 \cdot 10^{-3} m$
- $\phi = 45,875^\circ$
- $t = 2,68 \cdot 10^{-3} m$
- $r_i = 5 mm$
- $r_o = 7,68 mm$

Por lo tanto, una vez obtenidos los parámetros para calcular la CBS para esta probeta, ya se puede realizar el cálculo del mismo.

El cálculo de CBS para esta probeta es igual a:

$$CBS^{T2-2} = 761,66 N$$

Y el cálculo de σ_r^{max} se muestra a continuación:

$$\sigma_r^{max} = 68,79 MPa$$

El ángulo de la probeta tras la rotura, medido por ambos laterales:

$$\alpha_{1,rot}^{T2-2} = 89,1^\circ ; \quad \alpha_{2,rot}^{T2-2} = 89^\circ$$

A continuación se puede ver una imagen del detalle de la zona donde se produce el fallo de la probeta, la **Figura 6-33**.

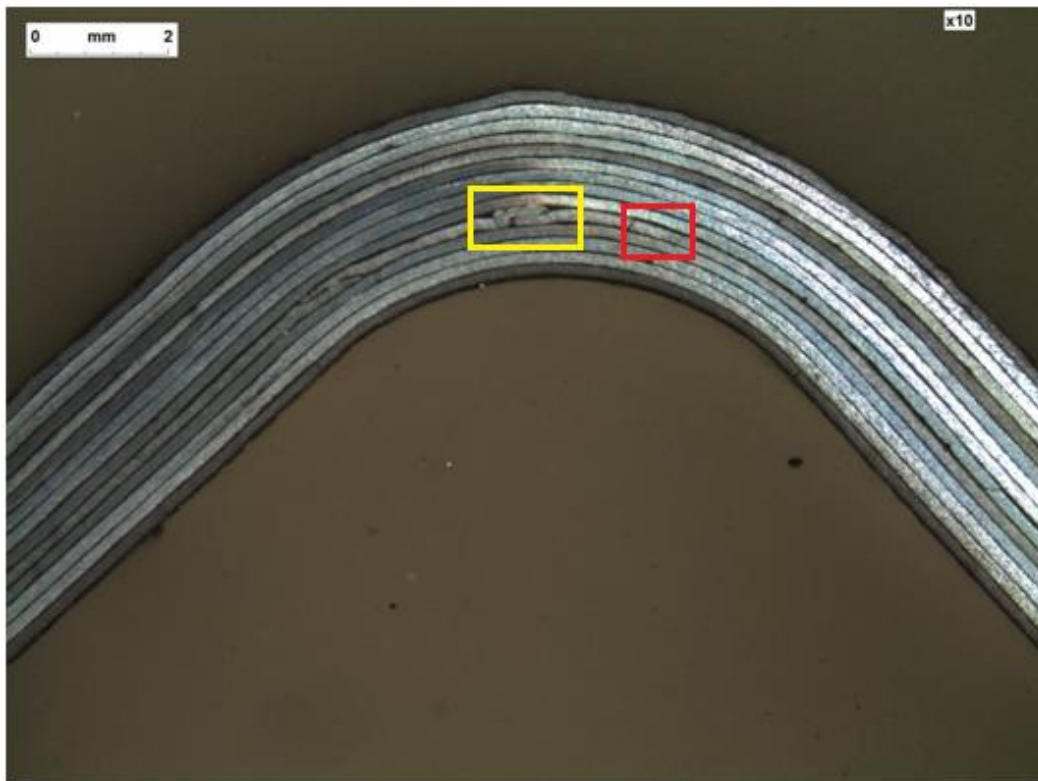


Figura 6-33. Detalle de la zona curvada tras el ensayo de la T2-2

En este caso, aunque la vista del detalle de la zona curvada tras el ensayo no es muy esclarecedora en cuanto al modo de fallo de la probeta se refiere, sí se puede observar que a lo largo de la lámina de 90° inferior (la quinta empezando a contar desde la inferior) presenta varias grietas a lo largo de la zona curvada y algunos fallos de fabricación, como el pliegue que se puede ver claramente en la zona central, enmarcado en amarillo. Justo a la derecha de dicho pliegue, en la misma lámina, se pueden ver claramente un par de grietas (enmarcadas en rojo), que seguramente hayan sido las causantes de la rotura, propagándose ambas por las zonas interlaminares adyacentes. De nuevo, por el tipo de fallo que se esperaba, se puede dar como válido el ensayo sobre esta probeta.

A continuación, se facilitan los datos recogidos por las bandas extensométricas en esta probeta en la siguiente gráfica (**Figura 6-34**). Las series 3 y 4 corresponden a las bandas pegadas en la parte inferior, y las series 1 y 2 corresponden a las bandas de la parte superior, que en esta ocasión si se ha obtenido una medida bastante aceptable.

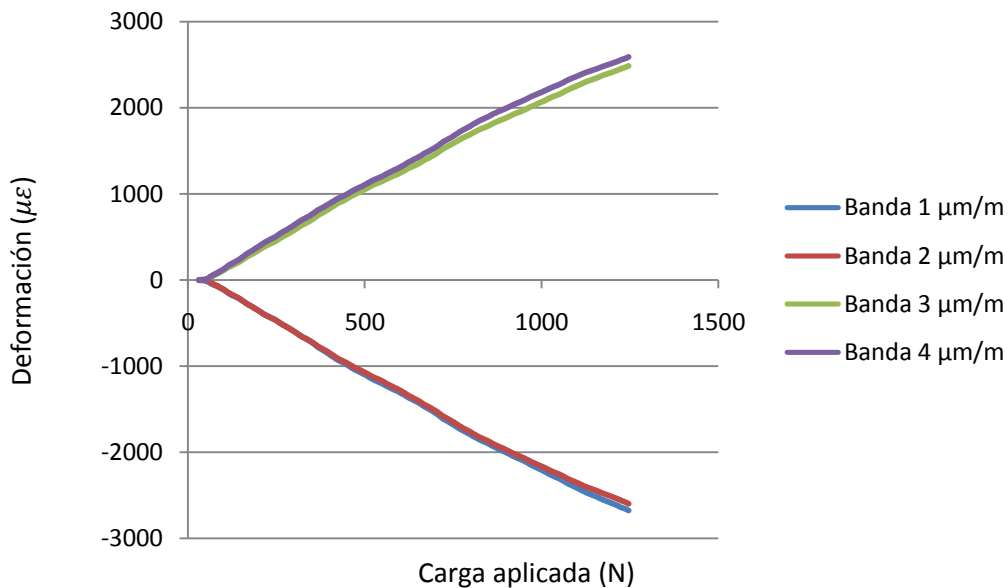


Figura 6-34. Datos de las bandas extensométricas en la T2-2

- **Probeta T1-2:**

Se pueden ver algunas imágenes de la configuración del ensayo para esta probeta a continuación (**Figuras 6-35 a 6-38**).

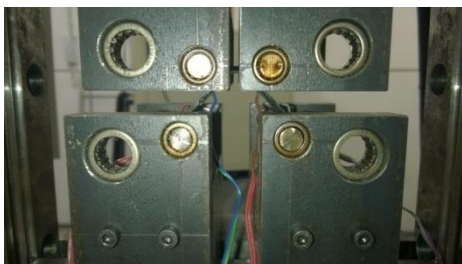


Figura 6-35. Vista frontal del ensayo de la T1-2

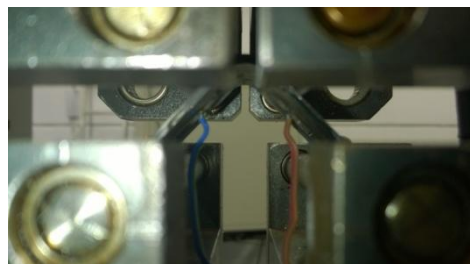


Figura 6-36. Detalle interior del ensayo de la T1-2



Figura 6-37. Vista lateral del ensayo de la T1-2 (1)



Figura 6-38. Vista lateral del ensayo de la T1-2 (2)

A continuación se muestran las dimensiones que caracterizan la probeta (Tabla 6-4).

Medidas Probeta T1-2											
n	w1	w2	w3	t1	t2	t3	t4	t5	t6	$\alpha 1(^{\circ})$	$\alpha 2(^{\circ})$
º	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		
2	27,24	27,23	27,22	1,95	1,93	1,95	1,94	1,98	1,97	89	88,5

Tabla 6-4. Medidas de la probeta T1-2

Y la gráfica típica del ensayo ILTS obtenida tras el ensayo de esta probeta (Figura 6-39) se muestra a continuación.

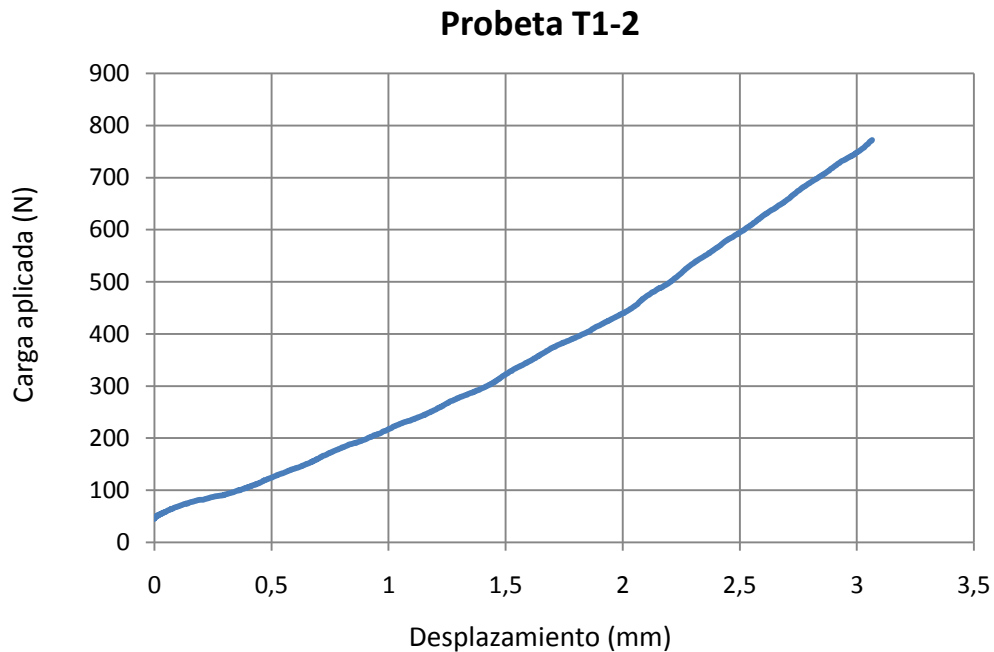


Figura 6-39. Curva P-δ del ensayo ILTS de la T1-2

La carga máxima y el desplazamiento para dicha carga son, respectivamente:

- Carga máxima:

$$P_{max}^{T1-2} = 772,035 N$$

- Desplazamiento máximo:

$$\delta_{max}^{T1-2} = 3,065 mm$$

En vista de la deflexión obtenida en el punto de máxima carga, se podría considerar que el ensayo ha sido válido, ya que no se ha superado el valor máximo permitido de 5 mm.

$$\delta_{max}^{T1-2} = 3,065 mm < 5 mm \rightarrow \text{Ensayo válido}$$

Se procede ahora al cálculo de CBS y de σ_r^{max} . Los valores que toman los parámetros empleados para ello, en esta probeta, son:

- $P = 772,035 N$
- $w = 27,23 \cdot 10^{-3} m$
- $\phi = 45,625^\circ$
- $t = 1,95 \cdot 10^{-3} m$
- $r_i = 5 mm$
- $r_o = 6,95 mm$

Por lo tanto, una vez obtenidos los parámetros para calcular la CBS para esta probeta, ya se puede realizar el cálculo del mismo.

El cálculo de la CBS para esta probeta es igual a:

$$CBS^{T1-2} = 450,47 N$$

Y el cálculo de σ_r^{max} se muestra a continuación:

$$\sigma_r^{max} = 58,78 MPa$$

El ángulo de la probeta tras la rotura, medido por ambos laterales:

$$\alpha_{1,rot}^{T1-2} = 89,7^\circ ; \alpha_{2,rot}^{T1-2} = 90^\circ$$

A continuación se puede ver una imagen del detalle de la zona donde se produce el fallo de la probeta, la **Figura 6-40**.

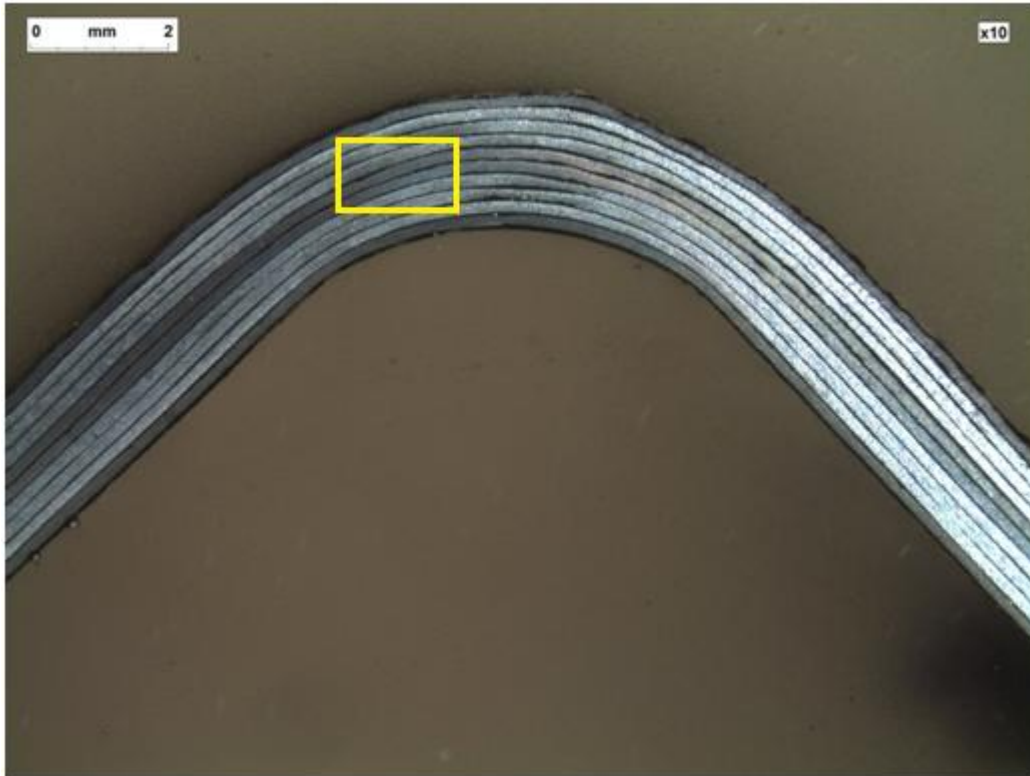


Figura 6-40. Detalle de la zona curvada tras el ensayo de la T1-2

En esta probeta, se pueden apreciar distintas grietas a lo largo de las dos láminas centrales orientadas a -45° en la zona curvada, sobre todo en la parte izquierda de dicha zona (enmarcada en amarillo). Para ello sería conveniente ampliar la imagen, ya que como se muestra en muy difícil apreciar las grietas mencionadas. Por lo tanto, suponiendo que dichas grietas hayan causado la rotura final, propagando éstas a lo largo de las zonas interlaminares adyacentes, se puede considerar válido el ensayo desde el punto de vista del modo de fallo.

De nuevo, se vuelven a mostrar los valores obtenidos de la medición de las bandas extensométricas en esta probeta en la siguiente gráfica (**Figura 6-41**).

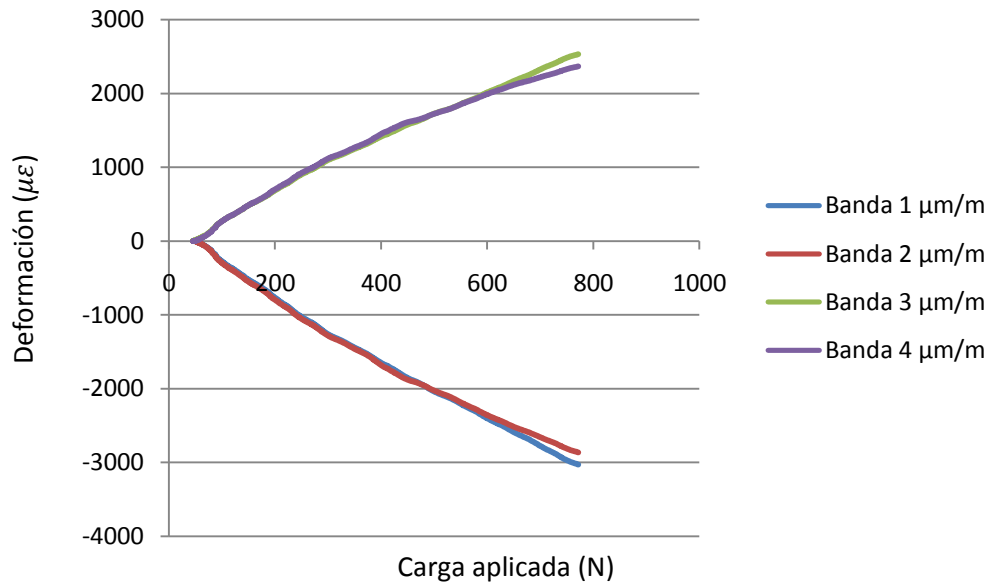


Figura 6-41. Datos de las bandas extensométricas en la T1-2

Las series 1 y 2 corresponden a las bandas extensométricas pegadas en la parte superior de la probeta, y las 3 y 4 corresponden a la parte inferior de ésta.

Tras los dos ensayos con la nueva configuración de instrumentación en las probetas T2-2 y T2-1, los resultados obtenidos son bastante satisfactorios desde el punto de vista de las deformaciones medidas en la cara superior de las probetas.

Seguidamente, se han realizado dos ensayos más, concretamente sobre las probetas T2-3 y T1-3, con el objeto de obtener más resultados y poder compararlos con los ya obtenidos. Dichos ensayos fueron realizados el mismo día que los dos anteriores, por lo que las condiciones de temperatura y humedad son idénticas.

- **Probeta T2-3:**

Se pueden ver algunas imágenes de la configuración del ensayo para esta probeta a continuación (**Figuras 6-42 a 6-45**).



Figura 6-42. Vista frontal del ensayo de la T2-3

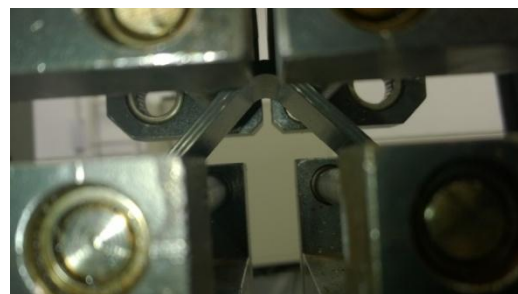


Figura 6-43. Detalle interior del ensayo de la T2-3



Figura 6-44. Vista lateral del ensayo de la T2-3 (1)



Figura 6-45. Vista lateral del ensayo de la T2-3 (2)

A continuación se muestran las dimensiones que caracterizan la probeta (Tabla 6-5).

Medidas Probeta T2-3											
n	w1	w2	w3	t1	t2	t3	t4	t5	t6	$\alpha 1(^{\circ})$	$\alpha 2(^{\circ})$
º	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		
3	27,02	27	27,06	2,67	2,64	2,69	2,71	2,72	2,72	89	88,5

Tabla 6-5. Medidas de la probeta T2-3

Y la gráfica típica del ensayo ILTS obtenida tras el ensayo de esta probeta (Figura 6-46) se muestra a continuación.

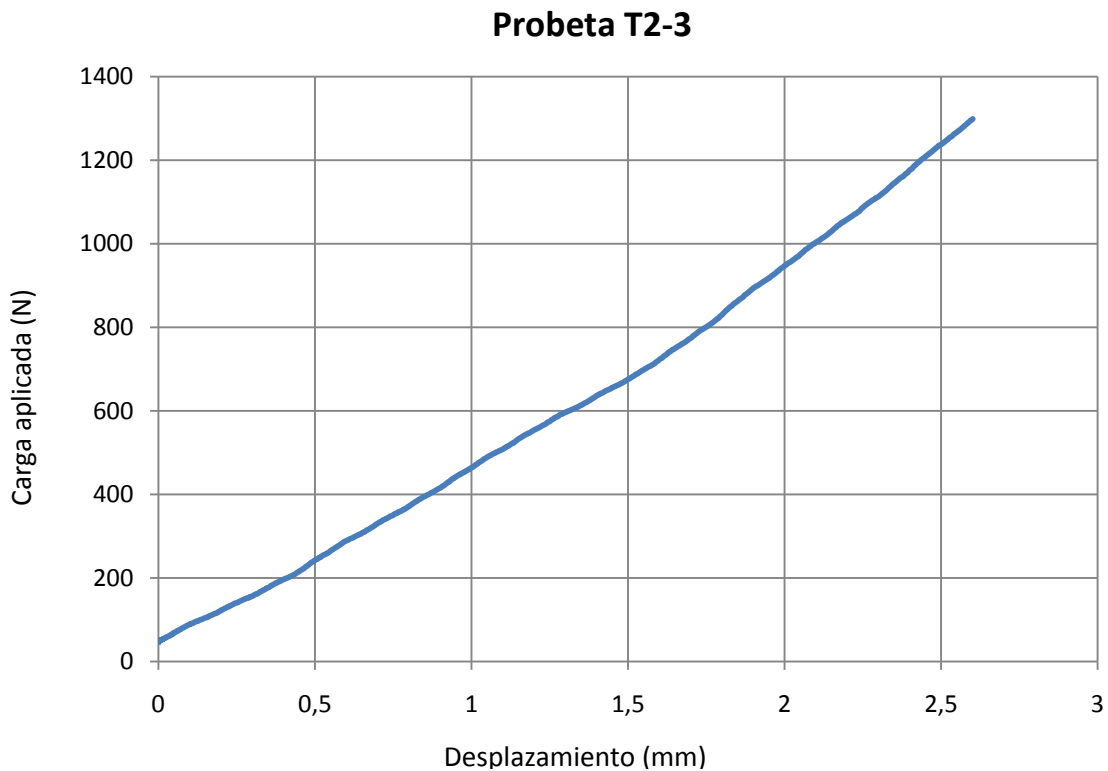


Figura 6-46. Curva P-δ del ensayo ILTS de la T2-3

La carga máxima y el desplazamiento para dicha carga son, respectivamente:

- Carga máxima:

$$P_{max}^{T2-3} = 1298,68 N$$

- Desplazamiento máximo:

$$\delta_{max}^{T2-3} = 2,60 mm$$

En vista de la deflexión obtenida en el punto de máxima carga, se podría considerar que el ensayo ha sido válido, ya que no se ha superado el valor máximo permitido de 5 mm.

$$\delta_{max}^{T2-3} = 2,60 mm < 5 mm \rightarrow \text{Ensayo válido}$$

Se procede ahora al cálculo de CBS y de σ_r^{max} . Los valores que toman los parámetros empleados para ello, en esta probeta, son:

- $P = 1298,68 N$
- $w = 27,027 \cdot 10^{-3} m$
- $\phi = 45,625^\circ$
- $t = 2,69 \cdot 10^{-3} m$
- $r_i = 5 mm$
- $r_o = 7,69 mm$

Por lo tanto, una vez obtenidos los parámetros para calcular CBS para esta probeta, ya se puede realizar el cálculo del mismo.

El cálculo de la CBS para esta probeta es igual a:

$$CBS^{T2-3} = 789,43 N$$

Y el cálculo de σ_r^{max} para esta probeta se muestra a continuación:

$$\sigma_r^{max} = 70,99 MPa$$

El ángulo de la probeta tras la rotura, medido por ambos laterales:

$$\alpha_{1,rot}^{T2-3} = 89,2^\circ \quad ; \quad \alpha_{2,rot}^{T2-3} = 89,5^\circ$$

A continuación se puede ver una imagen del detalle de la zona donde se produce el fallo de la probeta, la **Figura 6-47**.

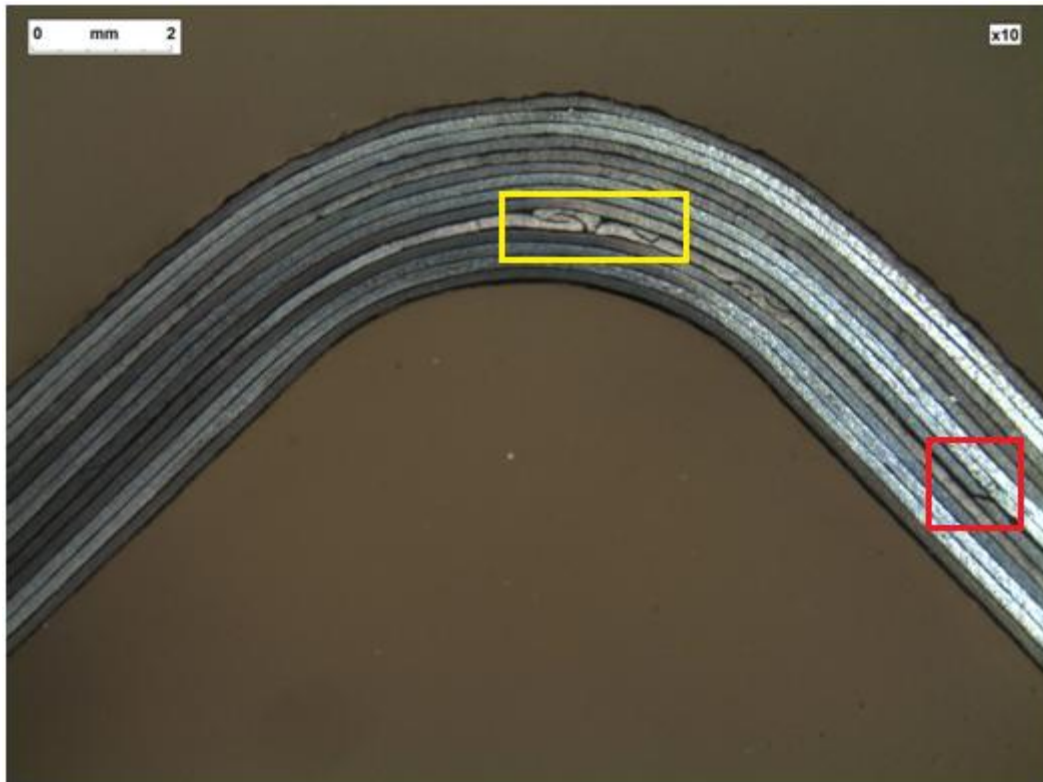


Figura 6-47. Detalle de la zona curvada tras el ensayo de la T2-3

Como en la **Figura 6-33**, correspondiente al detalle de la zona curvada tras el ensayo de la probeta T2-2, se pueden ver distintos defectos de fabricación en la misma lámina de 90° en esta probeta, apreciándose distintos pliegues a lo largo de la misma (enmarcado en amarillo). A simple vista no se pueden apreciar de forma clara grietas en la zona curvada de esta probeta, aunque sí se puede ver una separación excesiva entre la lámina de 90° inferior y la de 45° adyacente a ella (láminas quinta y sexta contando desde la inferior, respectivamente, enmarcado en rojo) que podría hacer indicar una delaminación, causada, muy posiblemente, por el mencionado defecto de fabricación.

- **Probeta T1-3:**

Se pueden ver algunas imágenes de la configuración del ensayo para esta probeta a continuación (**Figuras 6-48 a 6-51**).

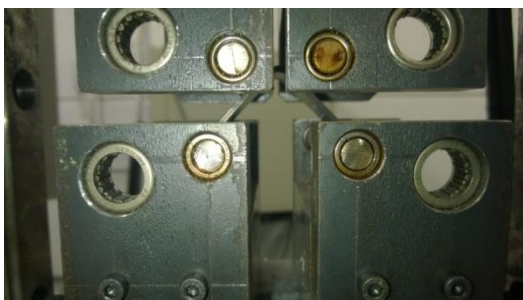


Figura 6-48. Vista frontal del ensayo de la T1-3

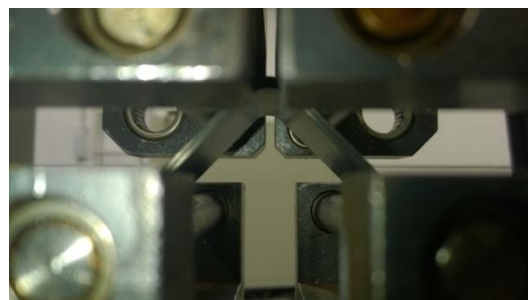


Figura 6-49. Detalle interior del ensayo de la T1-3



Figura 6-50. Vista lateral del ensayo de la T1-3 (1)



Figura 6-51. Vista lateral del ensayo de la T1-3 (2)

A continuación se muestran las dimensiones que caracterizan la probeta (Tabla 6-6).

Medidas Probeta T1-3											
n	w1	w2	w3	t1	t2	t3	t4	t5	t6	$\alpha 1(^{\circ})$	$\alpha 2(^{\circ})$
o	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		
3	27,1	27,07	27,09	1,96	2,08	1,95	1,93	2,13	1,96	88	88

Tabla 6-6. Medidas de la probeta T1-3

Y la gráfica típica del ensayo ILTS obtenida tras el ensayo de esta probeta (Figura 6-52) se muestra a continuación.

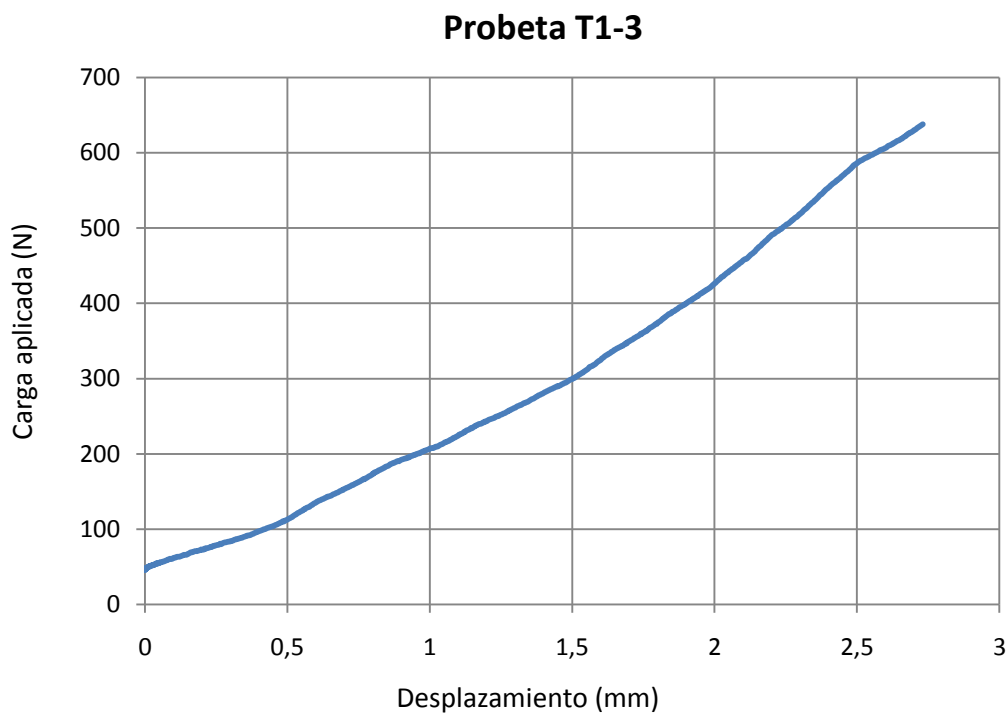


Figura 6-52. Curva P-δ del ensayo ILTS de la T1-3

La carga máxima y el desplazamiento para dicha carga son, respectivamente:

- Carga máxima:

$$P_{max}^{T1-3} = 637,70 \text{ N}$$

- Desplazamiento máximo:

$$\delta_{max}^{T1-3} = 2,73 \text{ mm}$$

En vista de la deflexión obtenida en el punto de máxima carga, se podría considerar que el ensayo ha sido válido, ya que no se ha superado el valor máximo permitido de 5 mm.

$$\delta_{max}^{T1-3} = 2,73 \text{ mm} < 5 \text{ mm} \rightarrow \text{Ensayo válido}$$

Se procede ahora al cálculo de CBS y de σ_r^{max} . Los valores que toman los parámetros empleados para ello, en esta probeta, son:

- $P = 637,70 \text{ N}$
- $w = 27,87 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
- $\phi = 46^\circ$
- $t = 2,0017 \cdot 10^{-3} \text{ m}$
- $r_i = 5 \text{ mm}$
- $r_o = 7,0017 \text{ mm}$

Por lo tanto, una vez obtenidos los parámetros para calcular la CBS para esta probeta, ya se puede realizar el cálculo del mismo.

El cálculo de la CBS para esta probeta es igual a:

$$CBS^{T1-3} = 370,64 \text{ N}$$

Y el cálculo de σ_r^{max} para esta probeta se muestra a continuación:

$$\sigma_r^{max} = 46,94 \text{ MPa}$$

El ángulo de la probeta tras la rotura, medido por ambos laterales:

$$\alpha_{1,rot}^{T1-3} = 89^\circ \quad ; \quad \alpha_{2,rot}^{T1-3} = 89,2^\circ$$

A continuación se puede ver una imagen del detalle de la zona donde se produce el fallo de la probeta, la **Figura 6-53**.

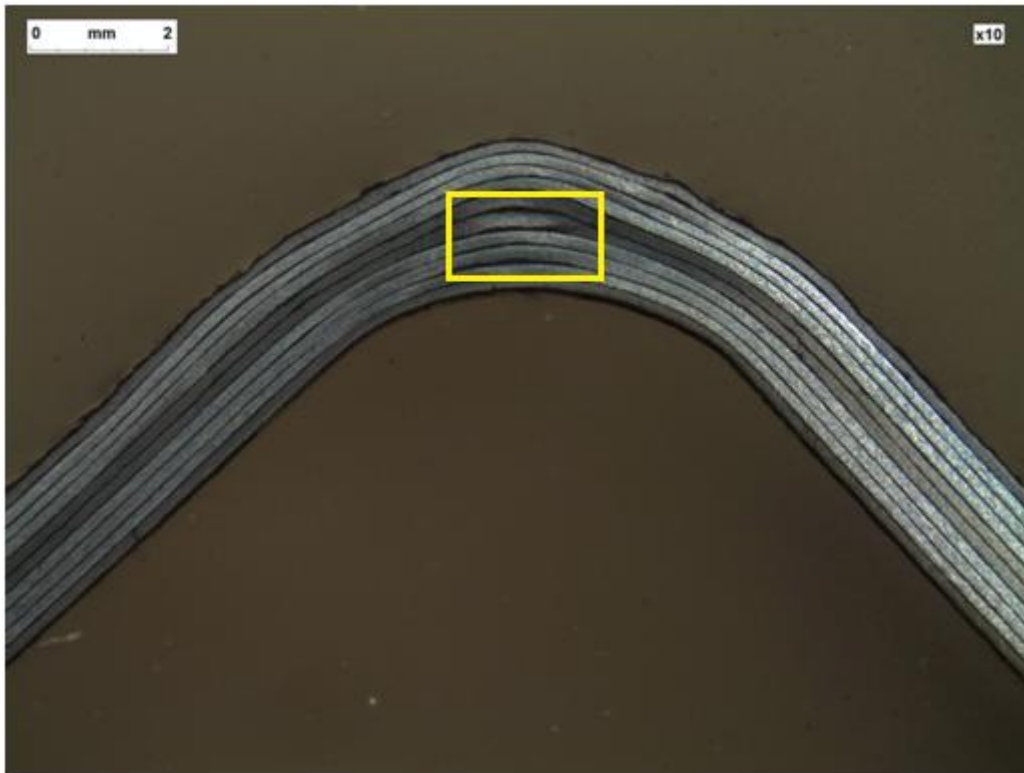


Figura 6-53. Detalle de la zona curvada tras el ensayo de la T1-3

Para esta última probeta ensayada, se puede ver que en las láminas centrales (zona enmarcada en amarillo), orientadas ambas a -45° , hay una separación interlaminar excesiva, pudiéndose apreciar, si se amplía la imagen preferentemente, varias grietas justo en la parte de central de la lámina de -45° inferior. Por lo tanto, a la vista de la localización de los fallos tras la realización del ensayo sobre esta probeta, se puede decir que este test ha sido válido. También mencionar la importancia que ha podido tener la separación interlaminar de las dos láminas centrales a la hora de realizar el ensayo, ya que, casi con total seguridad, esto se debe a un defecto de fabricación, siendo la zona oscura entre láminas una acumulación de resina que no ha podido fluir correctamente durante el proceso de curado. Esto podría justificar en gran medida la baja carga de rotura registrada en este ensayo, de 637,7 N, cuando para esta configuración de laminados, del Tipo 1, la carga de fallo se estaba situando en torno a los 800 N.

7. Conclusiones y desarrollos futuros:

Es necesario, antes de describir las conclusiones más importantes, a modo de introducción de este apartado, un resumen de las fases realizadas en este trabajo. Inicialmente se ha realizado la caracterización del material, con el objeto de obtener de él las propiedades mecánicas más importantes. Seguidamente se ha realizado la fabricación de los laminados, tanto curvados como planos, previa al ensayo de las probetas que de ellos se obtuvieron. A continuación, fue necesaria una caracterización general de los laminados, por lo que se ensayaron en primer lugar las probetas planas. Y, por último, se realizaron los ensayos sobre las probetas ILTS, objeto principal de esta memoria.

A continuación se detallan las conclusiones más importantes:

En primer lugar, la caracterización del material se puede considerar que ha sido satisfactoria, ya que se obtuvieron unos resultados de rigideces y coeficiente de Poisson bastante aceptables y dentro de los estándares para un laminado de matriz epoxi y fibra de carbono. Dichos resultados se compararon incluso con unos obtenidos por diferentes laboratorios presentes en la norma ASTM D-3039, estando los resultados de nuestro material dentro de los aceptables que presenta dicha norma.

En segundo lugar, la fabricación de los laminados angulares y las probetas planas se puede considerar que ha sido aceptable, si bien, como se intuye de algunas de las macrografías del apartado 6, y como se dirá más adelante, se han producido algunos defectos en la zona curvada de los laminados angulares. Sobre las probetas planas no se han tomado imágenes de detalle sobre las láminas, pero como se siguió el mismo procedimiento que para fabricar las probetas de caracterización, el cual, al ser laminados planos, no presentaba excesiva complejidad, se supone que la fabricación ha sido satisfactoria para dichas probetas.

Sobre éstas últimas, las probetas planas, se realizaron ensayos de tracción, compresión y flexión, de donde se obtuvieron unos resultados bastante aceptables comparados, sobre todo los de tracción y compresión, con los que se deberían de haber obtenido de acuerdo con las predicciones teóricas. En este caso, se hizo una estimación inicial del valor de la rigidez longitudinal, E_{xx} , a través de la TGL para ambos laminados, obteniéndose de los ensayos unos resultados muy parecidos a los teóricos. Por lo tanto, se puede concluir que los ensayos de caracterización de los laminados fabricados han sido muy satisfactorios.

Por último, y no por ello menos importante, ya que se trata del objeto principal de este trabajo, se hicieron los ensayos sobre las probetas ILTS que, como ya se sabe, consisten en someter una probeta en forma de L a flexión en cuatro puntos. Para los dos tipos de laminados fabricados se han ensayado tres probetas de cada tipo, en concreto las T1-1, T1-2 y la T1-3 del Tipo 1; y la T2-1, T2-2 y la T2-3 del Tipo 2. De cada tipo, tras los ensayos realizados, se puede concluir que los resultados obtenidos siguen una tendencia muy parecida, tanto en rigidez como en carga de fallo (excepto la T1-3, que se explicará a continuación) para las mismas probetas ensayadas de cada tipo, así como un modo de fallo dentro de los estándares.

Sobre el ensayo de las probetas ILTS, cabe destacar que el proceso de fabricación ha podido causar defectos apreciables en el material, reflejándose estos fallos en los resultados obtenidos de los ensayos. En concreto, en la probeta T1-3 el defecto encontrado era bastante apreciable y afectó, aparentemente, en gran medida sobre el resultado final del ensayo, rompiendo dicha probeta a una carga en torno a un 20% por debajo de la carga que se estaba obteniendo de otros ensayos del mismo tipo de laminado. Por ello, un punto muy a tener en cuenta para revisiones futuras es realizar un mayor control sobre el proceso de fabricación de los laminados para evitar que fallos durante el mismo causen efecto sobre los ensayos finales.

Una vez finalizados los ensayos, cabe comentar los desarrollos futuros a realizar, para completar y complementar la información que se recoge en este documento. En primer lugar, como se ha mencionado en varios apartados de la memoria, sería interesante comparar los resultados obtenidos en los distintos tipos de ensayo, especialmente de los ILTS, con modelos realizados en elementos finitos, con objeto de intentar mejorar y profundizar sobre el comportamiento de laminados de material compuesto. Otro aspecto a tener en cuenta sería un diseño de las probetas al margen de lo dictado por las normas, ya que una de las ideas que se quería conseguir, y no se ha obtenido, es la de conferirle la misma rigidez a las probetas de los distintos tipos de laminados, lo cual solo se puede conseguir con una mayor anchura de las probetas del Tipo 1. Por último cabría destacar mejoras en el proceso de fabricación, probar distintos ciclos de curado y usar un material en condiciones óptimas.

8. Referencias bibliográficas:

A continuación se enumerarán las referencias bibliográficas utilizadas durante la realización de este trabajo:

Normas

Norma ASTM D-3039 –“Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials”

Norma UNE-EN-2561 –“Material aeroespacial / Plásticos reforzados de fibra de carbono / Estratificados unidireccionales / Ensayo de tracción paralelamente a la dirección de la fibra”

Norma ASTM D-3518 –“Ensayos sobre laminados equiangulares $\pm 45^\circ$ ”

AITM 1-0069 –“Airbus Test Method for Fiber Reinforced Plastics / Determination of curved-beam failure load”

ASTM D-6415 –“Standard Test Method for Measuring the Curved Beam Strength of a Fiber-Reinforced Polymer-Matrix Composite”

AITM 1-0008 – “Airbus Test Method for Fiber Reinforced Plastics / Determination of Plain, Open Hole and Filled Holed Compression Strength”

ASTM C-393 – “Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure”

ASTM D-6272 – “Standard Test Method for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials by Four-Point Bending”

Libros

[1] “Teoría de la Elasticidad”. F. París

[2] “Introducción al análisis y diseño con materiales compuestos”. F. París, J. Cañas, J. C. Marín, A. Barroso