

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Estudio comparativo del módulo y resistencia a cortadura intralaminar con diferentes tipologías de probetas Off-Axis para un material compuesto Grafito-Epoxi

Autor: Emilio García Gil

Tutor: José Cañas Delgado

Dep. Elasticidad y Resistencia de Materiales
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

**Estudio comparativo del módulo y
resistencia a cortadura intralaminar con
diferentes tipologías de probetas Off-Axis
para un material compuesto Grafito-Epoxi**

Autor:

Emilio Garcia Gil

Tutor:

José Cañas Delgado

Catedrático de Universidad

Dep. de Elasticidad y Resistencia de Materiales

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016

Trabajo Fin de Grado: Estudio comparativo del módulo y resistencia a cortadura intralaminar con diferentes tipologías de probetas Off-Axis para un material compuesto Grafito-Epoxi

Autor: Emilio García Gil
Tutor: José Cañas Delgado

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos:

Quiero agradecer en primer lugar a D. José Cañas por haber confiado en mí para llevar a cabo este Trabajo Fin de Grado y ofrecerme su conocimiento en esta investigación.

A mis compañeros de TEAMS, gracias a ellos he conseguido disfrutar, conocer y enfrentarme a la vida tras la Escuela. A todo el personal de TEAMS con el que he trabajado, gracias.

A mis amigos de la Escuela, por estar siempre juntos, en los buenos y malos momentos, haciendo que este camino sea más sencillo.

A mis amigos, por estar siempre ahí y poder compartir tantas risas con vosotros.

A mis padres, padres segundos y mi abuela, por su apoyo incondicional, por haberme aportado tanto en la vida, gracias.

Y por último agradecer a Laura, por su ánimo constante, por su apoyo, y por toda la ayuda que me ha prestado siempre cuando me hacía falta.

RESUMEN:

El siguiente trabajo se centra en calcular el módulo y la resistencia a cortadura intralaminar de un material grafito-epoxi mediante el ensayo de tracción Off-Axis y en comparar los resultados obtenidos para cuatro configuraciones de especímenes, con objeto de vislumbrar la tipología óptima para el cálculo de ambas propiedades de cizalladura simultáneamente. Para ello se partirá del material fresco y se repasará el procedimiento a seguir hasta la obtención de las probetas listas para ensayo. Además del ensayo Off-Axis, también se realizarán dos ensayos de caracterización del material, tracción en sentido longitudinal y transversal a las fibras para evaluar la rigidez y resistencia a tracción en ejes de ortotropía del laminado.

ÍNDICE

1.	Introducción.....	1
1.1	Materiales compuestos en la industria:	1
1.2	Objetivos del proyecto	3
1.3	Contenido	4
2.	Antecedentes	5
2.1	Introducción	5
2.2	Caracterización a cizalladura intralaminar de materiales compuestos.....	7
2.2.1	Indirectos.....	7
2.2.2	Directos.....	8
2.2.2.1	Ensayos de cortadura con railes (Rail Shear Test)	8
2.2.2.2	Ensayo de cortadura sobre probetas de doble muesca (Iosipescu y Compact)	9
2.2.2.3	Ensayo de torsión de tubos	10
2.3	El ensayo Off-Axis	10
2.3.1	Descripción del ensayo.....	11
2.3.2	Problemas asociados	16
2.3.3	Soluciones planteadas	17
3.	Fabricación de las probetas.....	19
3.1	Material	19
3.1.1	Características del material	20
3.1.2	Requisitos del material pre-impregnado.....	20
3.1.3	Tipología de las probetas.....	21
3.2	Fabricación del laminado.....	25
3.2.1	Preparación del material fresco	25
3.2.2	Proceso de curado en autoclave	28
3.3	Fabricación de las probetas.....	29
3.3.1	Proceso de mecanizado.....	29
3.3.2	Proceso de pegado de tacones.....	30
3.3.3	Proceso de corte.....	33
3.4	Instrumentación de las probetas.....	33
3.4.1	Pegado de las bandas extensométricas	33
3.4.2	Soldado de los cables a las bandas extensométricas	35

4.	Estudio experimental	39
4.1	Ensayo de tracción con fibras a 0°	39
4.2	Ensayo de tracción con fibras a 90°	46
4.3	Ensayo Off-Axis	49
4.3.1	Ensayo de las probetas de tipología 1	51
4.3.2	Ensayo de las probetas de tipología 2	53
4.3.3	Ensayo de las probetas de tipología 3	55
4.3.4	Ensayo de las probetas de tipología 4	57
5.	Evaluación de los resultados	59
5.1	Análisis del módulo a cortadura G_{12}	60
5.1.1	Cálculo de G_{12} para la tipología de probetas 1	65
5.1.2	Cálculo de G_{12} para la tipología de probetas 2	68
5.1.3	Cálculo de G_{12} para la tipología de probetas 3	70
5.1.4	Cálculo de G_{12} para la tipología de probetas 4	72
5.2	Análisis de resultados obtenidos para G_{12}	73
5.3	Análisis de la resistencia a cortadura S	75
5.3.1	Criterio de máxima deformación	75
5.3.2	Criterio de Tsai-Hill	76
5.3.3	Criterio de Hashin-Rotem	77
5.4	Cálculo de la resistencia a cortadura	79
5.4.1	Resistencia a cortadura de las probetas con tipología 1	80
5.4.2	Resistencia a cortadura de las probetas con tipología 2	81
5.4.3	Resistencia a cortadura de las probetas con tipología 3	82
5.4.4	Resistencia a cortadura de las probetas con tipología 4	82
5.5	Análisis de resultados obtenidos para S	83
5.6	Selección de la tipología óptima	86
6.	Conclusiones	87
7.	Bibliografía	90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Características Físico-Químicas del material [5].....	20
Tabla 2: Características mecánicas del material [5].....	20
Tabla 3: Banda extensométrica para el ensayo de tracción 0°	39
Tabla 4: Control dimensional especímenes de tracción 0°	40
Tabla 5: Resultados individuales de las probetas 0°	45
Tabla 6: Valores medios de las probetas 0°	45
Tabla 7: Dimensiones de las probetas de tracción 90°	46
Tabla 8: Resultados individuales de las probetas 90°	48
Tabla 9: Valores medios de las probetas 90°	48
Tabla 10: Valores del material y valores esperados.....	48
Tabla 11: Banda extensométrica para el ensayo Off-Axis.....	49
Tabla 12: Control dimensional de las probetas tipo 1	49
Tabla 13: Control dimensional de las probetas tipo 2	50
Tabla 14: Control dimensional de las probetas tipo 3	50
Tabla 15: Control dimensional de las probetas tipo 4	50
Tabla 16: Resultados individuales de las probetas Off-Axis Tipología 1	52
Tabla 17: Valores medios de las probetas Off-Axis Tipología 1	53
Tabla 18: Resultados individuales de las probetas Off-Axis Tipología 2	54
Tabla 19: Valores medios de las probetas Off-Axis Tipología 2	54
Tabla 20: Resultados individuales de las probetas Off-Axis Tipología 3	56
Tabla 21: Valores medios de las probetas Off-Axis Tipología 3	56
Tabla 22: Resultados individuales de las probetas Off-Axis Tipología 4	58
Tabla 23: Valores medios de las probetas Off-Axis Tipología 4	58
Tabla 24: Resumen resultados obtenidos para las probetas Off-Axis	59
Tabla 25: Valores individuales del módulo de cizalladura tangencial tipología 1.....	66
Tabla 26: Valores medios del módulo de cizalladura tangencial tipología 1	66
Tabla 27: Valores individuales del módulo de cizalladura secante tipología 1.....	67
Tabla 28: Valores medios del módulo de cizalladura secante tipología 1	67
Tabla 29: Valores individuales del módulo de cizalladura tangencial tipología 2.....	68
Tabla 30: Valores medios del módulo de cizalladura tangencial tipología 2	68
Tabla 31: Valores individuales del módulo de cizalladura secante tipología 2.....	69
Tabla 32: Valores medios del módulo de cizalladura secante tipología 2	69
Tabla 33: Valores individuales del módulo de cizalladura tangencial tipología 3.....	70
Tabla 34: Valores medios del módulo de cizalladura tangencial tipología 3	70
Tabla 35: Valores individuales del módulo de cizalladura secante tipología 3.....	71
Tabla 36: Valores medios del módulo de cizalladura secante tipología 3	71
Tabla 37: Valores individuales del módulo de cizalladura tangencial tipología 4.....	72
Tabla 38: Valores medios del módulo de cizalladura tangencial tipología 4	72
Tabla 39: Valores individuales del módulo de cizalladura secante tipología 4.....	73
Tabla 40: Valores medios del módulo de cizalladura secante tipología 4	73
Tabla 41: Recopilación valores medios del módulo de cizalladura tangente para todas las tipologías.....	74

Tabla 42: Recopilación valores medios del módulo de cizalladura secante para todas las tipologías	74
Tabla 43: Propiedades de rigidez y resistencia	80
Tabla 44: Valores individuales de la resistencia a cortadura para tipología 1	80
Tabla 45: Valores individuales de la resistencia a cortadura para tipología 1	81
Tabla 46: Valores individuales de la resistencia a cortadura para tipología 2	81
Tabla 47: Valores individuales de la resistencia a cortadura para tipología 2	81
Tabla 48: Valores individuales de la resistencia a cortadura para tipología 3	82
Tabla 49: Valores individuales de la resistencia a cortadura para tipología 3	82
Tabla 50: Valores individuales de la resistencia a cortadura para tipología 4	82
Tabla 51: Valores individuales de la resistencia a cortadura para tipología 4	83
Tabla 52: Valores medios de la resistencia a cizalladura para todas las tipologías	83
Tabla 53: Valores de resistencia y módulo agrupados por ratio y orientación.....	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Propiedades mecánicas de la matriz, refuerzo y material compuesto obtenida por la combinación de ambos.	1
Figura 2: Pirámide de ensayos [13]	3
Figura 3: Esquema de las probetas para el cálculo de E_{11} , E_{22} , ν_{12} , con las bandas extensométricas pegadas [13].	6
Figura 4: Ensayo de caracterización de la resistencia longitudinal de tracción X_T y de la resistencia longitudinal a compresión X_C	6
Figura 5: Ensayo de caracterización de la resistencia transversal de tracción Y_T y de la resistencia transversal a compresión Y_C	6
Figura 6: Deformada de un laminado equiangular [14].....	8
Figura 7: Esquema de la probeta y sistema de cogida del ensayo Rail Shear Test [13].....	9
Figura 8: Esquema del útil del ensayo losipescu.....	10
Figura 9: Esquema de la probeta losipescu.....	10
Figura 10: Esquema de la probeta del ensayo Off-Axis.....	11
Figura 11: Variación de la deformación tangencial frente a la deformación longitudinal según la orientación de fibras [7].....	14
Figura 12: Variación de las tensiones en función del ángulo de orientación en un ensayo Off-Axis [7].....	15
Figura 13: Contribución de la tensión tangencial al fallo [7]	16
Figura 14: Esquema de la deformada de la probeta del ensayo Off-Axis. El caso (a) corresponde a la deformada ideal, el caso (b) corresponde a la deformada debido al sistema de cogida real, y por último, el caso (c) es la solución propuesta de Pagano para suavizar éstos esfuerzos [12].	17
Figura 15: Ejemplo de gráfico de corrección para probetas de ratio 10 y varios ángulos de orientación	18
Figura 16: Condiciones de trabajo.....	21
Figura 17: Planos de la probetas Off-Axis tipologías 1 y 2 (izquierda), 3 y 4 (derecha)	22
Figura 18: Planos de la probeta de tracción 0° (izquierda) y 90° (derecha).....	23
Figura 19: Distribución de las probetas en el panel 450x300mm.....	24
Figura 20: Distribución de las probetas en el panel 400x300mm.....	24
Figura 21: Ejemplo de bobina de pre-preg.....	26
Figura 22: Compactación de las láminas de pre-preg	26
Figura 23: Bolsa de vacío.....	27
Figura 24: Estructura metálica y autoclave	28
Figura 25 Ejemplo de máquina de corte	29
Figura 26: Panel cortado y lijado.....	30
Figura 27: Lámina de adhesivo Z-15429.....	31
Figura 28: Panel con los tacones situados.....	31
Figura 29: Colocación de la cinta adhesiva	32
Figura 30: Prensa de platos calientes.....	32
Figura 31: Probeta tras haber sido lijada y marcado su centro	33

Figura 32: Colocación de la banda ayudado de la cinta adhesiva.....	34
Figura 33: Aplicación del adhesivo	34
Figura 34: Banda pegada a la probeta	34
Figura 35: Terminal de empalme	35
Figura 36: Conector intermedio para facilitar el conexionado con el D-sub 25	36
Figura 37: Colocación de cinta aislante y tira de contactos	37
Figura 38: Realización de la soldadura	37
Figura 39: Detalle de la soldadura de los cables a los terminales de la banda	38
Figura 40: Banda biaxial para el ensayo de tracción 0°	39
Figura 41: Colocación de la probeta 0° en la máquina de ensayos.....	41
Figura 42: Configuración de ensayo tracción 0°	42
Figura 43: Probetas listas para la realización del ensayo de tracción 0°	43
Figura 44: Rotura explosiva de las probetas tras la realización del ensayo de tracción 0°	43
Figura 45: Configuración ensayo de tracción 90°	46
Figura 46: Probetas de tracción 90° antes de ser ensayadas.....	47
Figura 47: Probetas de tracción 90° tras ser ensayadas	47
Figura 48: Banda triaxial para el ensayo Off-Axis.....	49
Figura 49: Configuración de ensayo probetas Off-Axis.....	51
Figura 50: Probetas Off-Axis Tipología 1 antes de ser ensayadas.....	51
Figura 51: Probetas Off-Axis Tipología 1 tras ser ensayadas	52
Figura 52: Probetas Off-Axis Tipología 2 antes de ser ensayadas.....	53
Figura 53: Probetas Off-Axis Tipología 2 tras ser ensayadas	54
Figura 54: Probetas Off-Axis Tipología 3 antes de ser ensayadas.....	55
Figura 55: Probetas Off-Axis Tipología 3 tras ser ensayadas	55
Figura 56: Probetas Off-Axis Tipología 4 antes de ser ensayadas.....	57
Figura 57: Probetas Off-Axis Tipología 4 tras ser ensayadas	57
Figura 58: Resistencia a tracción normalizada frente al ángulo de orientación de las fibras.....	59
Figura 59: Tensión de cizalladura frente a deformación angular tipología 1.....	65
Figura 60: Ejemplo de evolución del modulo de cizalladura.....	66
Figura 61: Tensión de cizalladura frente a deformación angular tipología 2.....	68
Figura 62: Tensión de cizalladura frente a deformación angular tipología 3.....	70
Figura 63: Tensión de cizalladura frente a deformación angular tipología 4.....	72
Figura 64: Comparación de los resultados experimentales con la predicción del criterio de Hashin-Rotem [6]	79
Figura 65: Contribución de la tensión tangencial al fallo para XT/S=47 e YT/S=27	85

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Materiales compuestos en la industria:

Los materiales compuestos se definen en ciencia de materiales como aquellos que se forman por la unión de dos materiales para conseguir la combinación de propiedades que no es posible obtener en los originales. Estos compuestos pueden seleccionarse para lograr combinaciones poco usuales de rigidez, resistencia, peso, rendimiento a alta temperatura, resistencia a la corrosión, dureza o conductividad (Figura 1) [19].

Las características principales que debe poseer un material para definirlo como material compuesto son:

- Estar formados por dos o más componentes distinguibles físicamente y separables mecánicamente.
- Presentar varias fases químicamente distintas, completamente insolubles entre sí y separadas por una interfase.
- Sus propiedades mecánicas son superiores a la simple suma de las propiedades de sus componentes (sinergia).
- No pertenecer a los materiales compuestos los polifásicos, como las aleaciones metálicas, en las que mediante un tratamiento térmico se cambia la composición de las fases presentes.

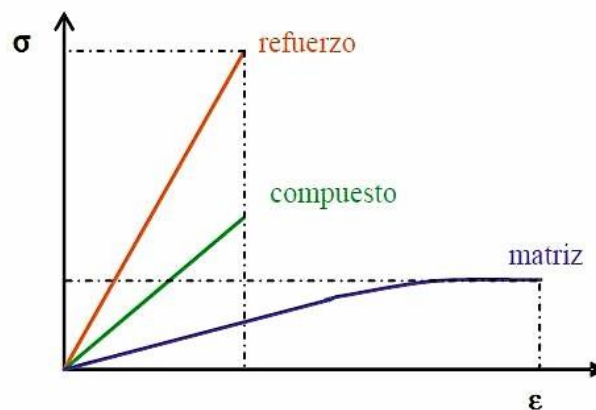


Figura 1: Propiedades mecánicas de la matriz, refuerzo y material compuesto obtenida por la combinación de ambos.

En los últimos años ha ido creciendo de manera considerable el uso de materiales compuestos, en concreto la matriz epoxi reforzada con fibra de carbono a debido a las ventajas que presentan entre las que destacamos:

- 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.

A pesar de todo, estos materiales presentan varios inconvenientes. Por un lado el alto coste de la materia prima, en especial en aquellos que contienen fibras de carbono y por otro lado lo tedioso del proceso de fabricación que a priori puede parecer sencillo, pero debido a presentar fases largas y costosas, como puede ser el proceso de curado en autoclave, limita la producción en masa de los mismos demandando una mano de obra cualificada tanto en estructuras de simple laminado como en otras más complejas, lo que evidentemente encarece el producto

El complejo estado carga al que pueden estar sometidos estos materiales es otro aspecto a tener en cuenta, y que en muchos casos puede resultar limitante. Éste se presenta, comúnmente, en forma de laminados constituidos por fibras orientadas y una matriz aglomerante, debido a esta característica, son no homogéneos y anisótropos, más concretamente ortótropos (generalmente), encontrándose en cada una de las láminas tres planos de simetría elástica. A consecuencia de esto debemos recurrir en su diseño a modelos más complejos por ejemplo La teoría General de Laminados. Las similitudes respecto a los estados de carga entre los materiales compuestos y los materiales metálicos, como el acero y el aluminio son escasas pues estos últimos pueden considerarse homogéneos e isótropos por lo que están sometidos a unos estados de carga mucho más sencillos.

Estas cuestiones favorecen la remanencia de competidores que estaban siendo desbancados del mercado, como es el caso del aluminio. Un material con el que se están consiguiendo aleaciones muy competitivas en precio (ya que el coste de la manufactura o la materia prima es muy inferior al de la fibra de carbono) y una gran mejora en las propiedades, que hace a la industria actual plantearse la posibilidad de invertir el proceso de sustitución del aluminio por la fibra de carbono.

Para subsanar estos inconvenientes, es esencial mejorar los procesos de fabricación y ajustar las propiedades que puede ofrecer este material, adaptando las mismas a las necesidades de uso que se requieran. Por ello tenemos que definir y caracterizar por completo las propiedades que estos materiales poseen (tanto en rigidez y resistencia) por medio del método más sencillo posible. Este es el objetivo de este proyecto.

1.2 Objetivos del proyecto

Para poder aprovechar los materiales compuestos de manera óptima en el diseño de elementos estructurales, es necesario adquirir el conocimiento preciso del comportamiento del mismo. Dicho comportamiento macromecánico se define a través de unas propiedades mecánicas de rigidez y resistencia.

Dentro de este análisis, la caracterización a cizalladura intralaminar de laminados unidireccionales de materiales compuestos actualmente sigue siendo un problema abierto. Si bien, en el caso del módulo de rigidez a cizalladura G_{12} existen procedimientos para su evaluación que ofrecen cierta fiabilidad, para la evaluación de la resistencia S , ninguno de estos procedimientos proporciona una buena aproximación.

El objetivo de este proyecto es el estudio y la evaluación de la rigidez así como la resistencia a cizalladura intralaminar (G_{12} y S respectivamente) mediante el ensayo Off-Axis para los compuestos de grafito epoxi.

Este ensayo se sitúa en el contexto de calificación y caracterización técnica del material, en la base de la pirámide de ensayos (Figura 2 [13]). Para lograr este objetivo, se realizarán ensayos experimentales sobre cuatro tipologías diferentes de probetas, para determinar cuáles serían las configuraciones más adecuadas.

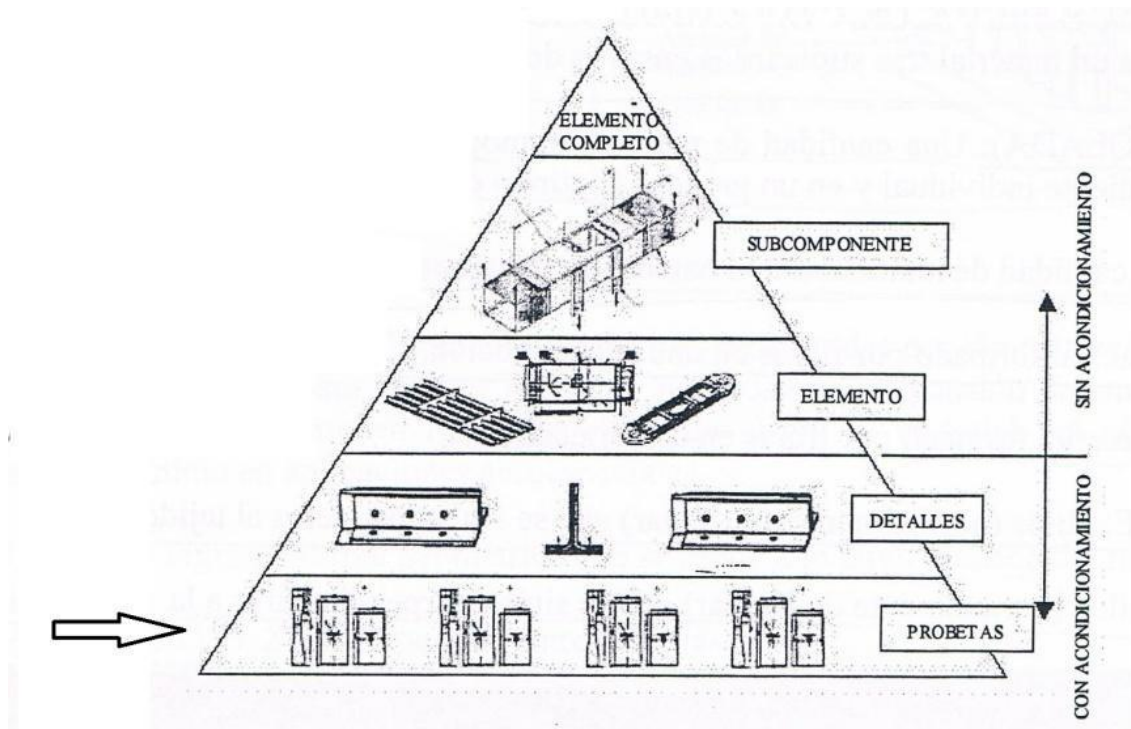


Figura 2: Pirámide de ensayos [13]

1.3 Contenido

Una vez ya se han explicado, a rasgos generales, el motivo y el contexto de la realización de este trabajo, se indican a continuación las etapas de las que constará:

- Fabricación de los paneles y mecanizado e instrumentación de las probetas.
- Ensayo de las probetas de caracterización.
- Realización del ensayo Off-Axis.
- Discusión de los resultados obtenidos.

2. ANTECEDENTES

2.1 Introducción

Como se ha definido en el capítulo anterior, los materiales compuestos permiten alcanzar unas propiedades determinadas, que por sí solos los constituyentes no tendrían. Algunas de estas propiedades pueden ser:

- Aislamiento Acústico
- Aislamiento Térmico
- Resistencia a la Abrasión
- Resistencia a la Corrosión
- Resistencia Mecánica
- Rigidez
- Peso
- Vida a fatiga

Los materiales que se van a considerar en este proyecto son los polímeros reforzados con fibras. Específicamente, dentro de este grupo de materiales, se trabajará los compuestos de grafito-epoxi.

El tratamiento macromecánico de las láminas de material compuesto supone un comportamiento ortótropo de estas respecto a los ejes de ortotropía del material.

La caracterización plana a rigidez de los laminados implicaría la determinación de las cuatro constantes que definen el comportamiento de un material ortótropo en el plano, es decir, el módulo de elasticidad en la dirección de la fibra (E_{11}) y perpendicular a estas (E_{22}), el coeficiente de Poisson (ν_{12}) y el modulo a cizalladura intralaminar (G_{12}).

Las constantes E_{11} , E_{22} y ν_{12} se obtienen mediante ensayos de tracción en dos laminados, uno con fibra orientada en la dirección de carga y otra con fibra en dirección perpendicular a esta. Para ello se sitúan las galgas como se muestra en la Figura 3, obteniéndose en el primer espécimen las constantes E_{11} y ν_{12} , y en el segundo, la E_{22} .

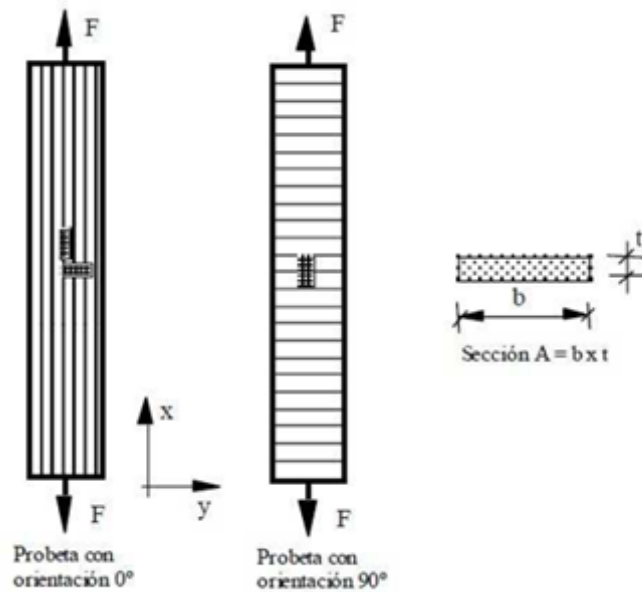


Figura 3: Esquema de las probetas para el cálculo de E_{11} , E_{22} , ν_{12} , con las bandas extensométricas pegadas [13].

Los diferentes métodos de obtención de la constante G_{12} , vendrán detallados en el siguiente apartado.

En cuanto a las constantes de resistencia, sería preciso determinar cinco valores admisibles como son la resistencia longitudinal a tracción X_T y a compresión X_c , la resistencia transversal a tracción Y_T y a compresión Y_c y por último, la resistencia a cortadura intralaminar S , para caracterizar el comportamiento resistente de las láminas en el plano.

Para obtener estas constantes, salvo en el caso de la resistencia S que se verá en el siguiente apartado, se recurren a sencillos ensayos de tracción y compresión sobre laminados con orientaciones de fibra en dirección a la carga aplicada (X_T y X_c) y en dirección perpendicular a esta (Y_T e Y_c), como se puede observar en las siguientes figuras (Figura 4 y Figura 5 [13]).

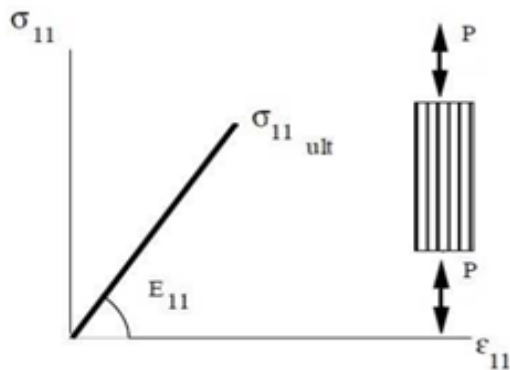


Figura 4: Ensayo de caracterización de la resistencia longitudinal de tracción X_T y de la resistencia longitudinal a compresión X_c

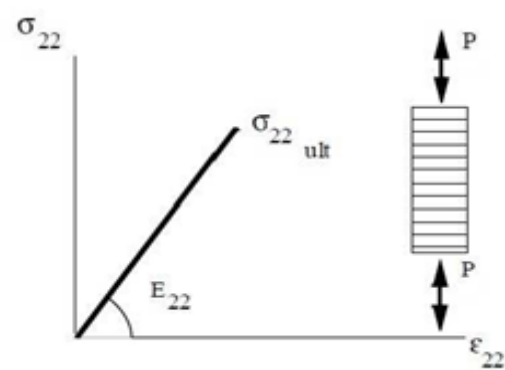


Figura 5: Ensayo de caracterización de la resistencia transversal de tracción Y_T y de la resistencia transversal a compresión Y_c

Cabe destacar que para cualquier material grafito-epoxi, siempre se cumplen un par de reglas que relacionan las constantes de tracción entre si y las de compresión entre sí. De este modo, siempre se cumple que $X_T > Y_T$, lo que significa que el material tendrá más resistencia a tracción cuanto más se aproximen las fibras del laminado a la dirección de carga.

2.2 Caracterización a cizalladura intralaminar de materiales compuestos

Para poder determinar correctamente tanto la rigidez como la resistencia a cizalladura intralaminar (G_{12} y S respectivamente), hace falta tener un estado tensional tangencial puro. No obstante, existen métodos para calcular dichas constantes sin necesidad de que se logre dicho estado tensional, facilitando de cierto modo la geometría o características de agarre de las probetas a ensayo.

Los dos procedimientos existentes son los métodos indirectos y los directos. En los primeros, mediante un ensayo con geometría más sencilla, se pretende alcanzar un estado tensional donde, pese a existir otras componentes de tensión, la tangencial presenta un valor muy influyente. Por otro lado, los segundos pretenden alcanzar el estado tensional tangencial puro directamente. En cada uno de estos métodos existen diferentes configuraciones de ensayos que se describen a continuación.

2.2.1 Indirectos

El principal ensayo del método indirecto, y más extendido para la caracterización tanto de S como de G_{12} es el ensayo Off-Axis, que procederemos a explicar en el siguiente apartado.

Una alternativa al Off-Axis dentro de los métodos indirectos es el ensayo de laminados equiangulares o laminados con una orientación de fibras de $\pm 45^\circ$.

Este ensayo consiste en realizar un ensayo de tracción sobre un laminado de fibras orientadas a $\pm 45^\circ$ respecto la dirección de tracción. Con esto se logra que la probeta no se deforme angularmente, ya que se consigue un estado simétrico equiangular (Figura 6 [14]). De este modo, se evita el acople existente en el ensayo Off-Axis entre tensiones normales y deformaciones tangenciales.

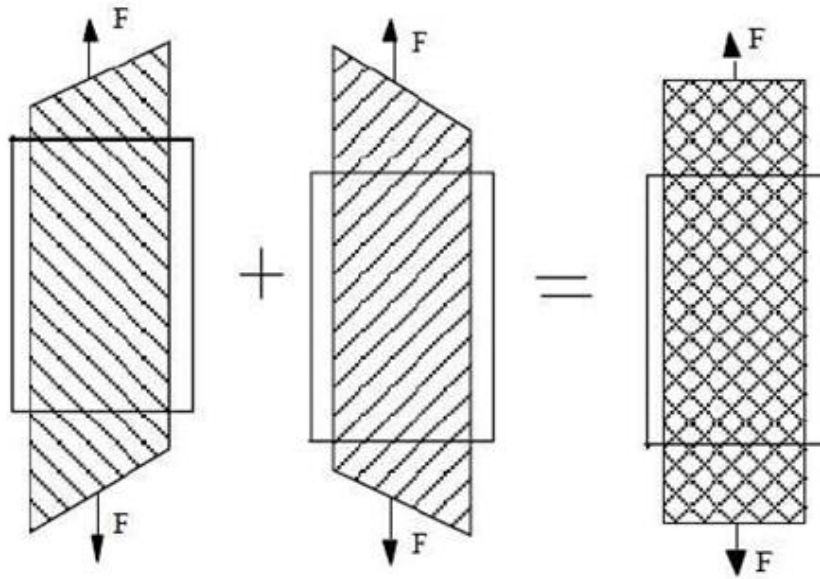


Figura 6: Deformada de un laminado equiangular [14]

Mediante dos galgas pegadas, una en dirección al eje de tracción, y la otra en su eje perpendicular, se consigue medir la deformación ocasionada a la probeta, y obtener la rigidez a cortadura gracias a la tensión tangencial.

El inconveniente de este método es la fabricación de las probetas, ya que los laminados van orientados perpendiculares entre sí, y provocan no simetrías respecto al eje Z, lo que puede conllevar un curado no efectivo de las probetas, con posibles deformaciones, y la variación de ángulos entre ellos provoca que el efecto compensatorio entre laminados $\pm 45^\circ$, no se produzca.

2.2.2 Directos

En cuanto a los métodos directos, se dividen en tres ensayos distintos.

2.2.2.1 Ensayos de cortadura con railes (Rail Shear Test)

En este ensayo, se trabaja con probetas unidireccionales, generalmente orientadas a 90° respecto del eje X. Dichos especímenes se introducen en dos mordazas con railes solidarios a la probeta sobre la que se aplica una tracción o una compresión (Figura 7 [14]). De este modo se somete a la probeta un estado de deformación tangencial puro que se mide mediante la colocación de dos galgas a 45° respecto a la dirección de las fibras y se obtiene un estado tensional tangencial puro en la línea central de la probeta.

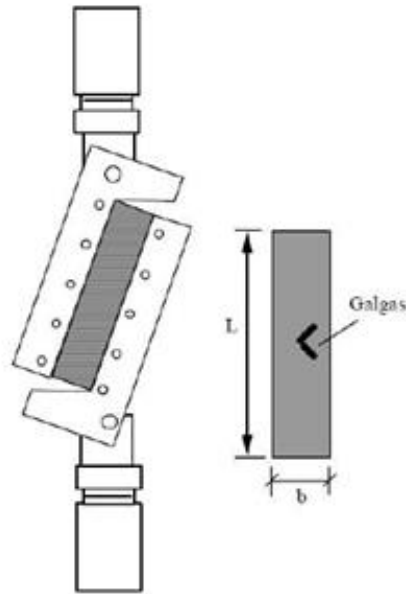


Figura 7: Esquema de la probeta y sistema de cogida del ensayo Rail Shear Test [13]

Los inconvenientes en este caso se producen en el sistema de agarre entre mordaza y probeta, ya que los múltiples taladros necesarios para incorporarla en las mordazas de raíl se convierten en concentradores de tensiones, pudiendo debilitar la probeta localmente y originar fallos inesperados, igualmente la fabricación de las mordazas y el sistema de cogida resulta complejo. Finalmente, las probetas suelen ser de gran tamaño y el proceso para cambiar las muestras en la máquina suele ser laborioso.

2.2.2.2 Ensayo de cortadura sobre probetas de doble muesca (Iosipescu y Compact)

El ensayo Iosipescu es uno de los ensayos más extendidos para calcular la resistencia a cortadura. Al igual que en el caso anterior, se pretende generar una sección en la probeta donde se obtenga un estado tensional puro, que será medido mediante dos bandas extensométricas situadas en el medio de la probeta y orientadas a $\pm 45^\circ$ (Figura 8 [14]).

La probeta Iosipescu (Figura 9 [14]) es una probeta de doble muesca, donde la entalla en el centro de la probeta obliga a que la rotura se produzca en ese punto, ya que es la zona con menor sección. La rotura en este punto se produce por completo en un estado tensional tangencial puro.

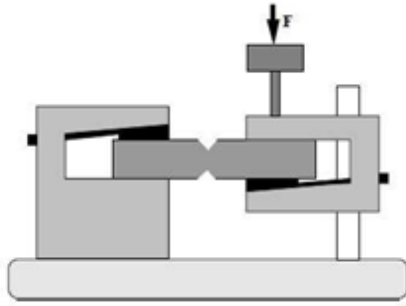


Figura 8: Esquema del útil del ensayo losipescu.

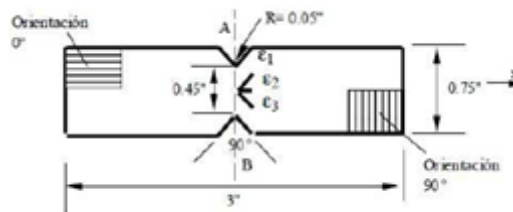


Figura 9: Esquema de la probeta losipescu.

Pese a existir un largo debate acerca de la idoneidad del ensayo para el cálculo tanto del módulo de cizalladura como de la resistencia a cizalladura intralaminar, no se ha llegado aún a un consenso entre las ventajas del ensayo Off-Axis frente al losipescu y viceversa.

Artículos comparativos entre ensayos losipescu a 0° y Off-Axis a 10° [11], que afirman se produce el mismo resultado usando un método que otro, con variaciones muy pequeñas entre ellos. No obstante, estos artículos defienden la sencillez de la probeta Off-Axis frente a la losipescu, en cuanto a fabricación, y critican la cuantía de ensayos que hay que realizar en el método Off-Axis frente al losipescu para determinar la resistencia a cortadura. Además, como se sabe que el comportamiento es no lineal, con el método de losipescu se recurre a errores importantes en el modelo de elementos finitos a la hora de evaluar la tensión en la zona próxima a los nodos. En este trabajo se pretende así mismo comprobar la necesidad o no de recurrir a un elevado número de especímenes para obtener un resultado representativo de las propiedades del material empleando el ensayo Off-Axis.

2.2.2.3 Ensayo de torsión de tubos

El último de los métodos directos para la obtención de la resistencia a cortadura es el ensayo de torsión de tubos. Podemos definir este ensayo como el más adecuado para calcular la resistencia a la cortadura ya que al ejecutar una torsión sobre un tubo, se obtiene un estado tensional tangencial puro. Sin embargo este ensayo no está libre de inconvenientes, por un lado es un de difícil ejecución, debido al sistema de cogida, y por otro es difícil fabricar este tipo de probetas, tubo d material compuesto, ello conlleva el encarecimiento del mismo. Es por ello que se prefiere elegir el ensayo Off-Axis como primera opción.

2.3 El ensayo Off-Axis

El ensayo Off-Axis es el método indirecto más empleado para el cálculo de la resistencia y del módulo a cizalladura, debido a su sencilla configuración geométrica tanto de la probeta como del sistema de mordaza. A su vez, es considerado uno de los ensayos que presentan mejores resultados junto al losipescu, como se explicó anteriormente.

2.3.1 Descripción del ensayo

El ensayo Off-Axis se caracteriza por tratarse de un ensayo de tracción sobre un laminado de fibra de carbono, mediante este ensayo intentamos que la tensión tangencial tenga un papel predominante en el mismo, ya que no podemos conseguir un estado tensional tangencial puro.

El laminado es unidireccional, estando todas las capas con las fibras en la misma dirección, dichas capas están orientadas un cierto ángulo θ respecto de la vertical, de modo que la tracción será soportada en gran medida por la fibra, no obstante una parte de la carga también será resistida por la matriz. Gracias a esto, el comportamiento del material es aparentemente anisótropo y será posible calcular los valores deseados.

Para medir las deformaciones que sufre el espécimen, se coloca una galga extensométrica o un extensómetro en dirección longitudinal para su obtención (Figura 10 [14]).

Mediante las ecuaciones de relación tensión-deformación, se consigue definir el módulo de Young del material en la dirección principal de tracción (E_x), distinto del anteriormente definido en el eje de las fibras (E_{11} y E_{22}).

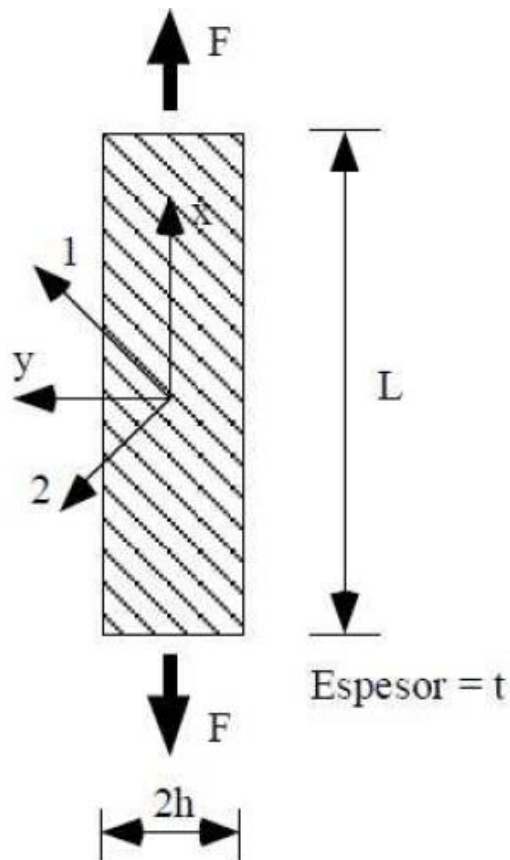


Figura 10: Esquema de la probeta del ensayo Off-Axis

La solución analítica del problema ideal mostrado en la Figura 10 viene dada por las ecuaciones:

$$\begin{aligned} \sigma_x &= \frac{F}{2ht}; & \sigma_y &= 0; & \sigma_{xy} &= 0; \\ \varepsilon_x &= \frac{\sigma_x}{E_x}; & \varepsilon_y &= -\nu_{xy} \frac{\sigma_x}{E_x}; & \gamma_{xy} &= \eta_{xy,x} \frac{\sigma_x}{E_x} \end{aligned} \quad (1)$$

Donde F es la carga aplicada, h es el semi ancho de la probeta y t el espesor. En ejes de ortotropía (1-2) tendríamos por tanto:

$$\sigma_{11} = \sigma_x \cos^2 \theta; \quad \sigma_{22} = \sigma_x \sin^2 \theta; \quad \sigma_{12} = -\sigma_x \sin \theta \cos \theta \quad (2)$$

Para obtener su valor, es necesario resolver este problema implementando una solución analítica que describa las relaciones que se establecen en los materiales ortótropos.

Los materiales ortótropos destacan por que se definen por completo mediante nueve constantes y no existe acoplamiento entre tensiones normales y deformaciones tangenciales en los planos principales del material. Además, si se considera que existe simetría respecto del eje Z, se puede tratar como un problema de laja, aplicando las ecuaciones de tensión plana, simplificando las ecuaciones, por lo que la ley de comportamiento en direcciones principales queda:

$$\sigma_i = C_{ij} \varepsilon_j \quad (3)$$

Y desarrollando la relación inversa:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & 0 \\ S_{12} & S_{22} & 0 \\ 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (4)$$

Donde las cuatro constantes de flexibilidad S_{ij} representan:

$$\begin{aligned} S_{11} &= \frac{1}{E_{11}}; & S_{22} &= \frac{1}{E_{22}}; \\ S_{66} &= \frac{1}{G_{12}}; & S_{12} &= \frac{-\nu_{12}}{E_{11}} = \frac{-\nu_{21}}{E_{22}} \end{aligned} \quad (5)$$

Como este laminado no se encuentra en ejes principales, sino que presenta un cierto ángulo respecto de la dirección de carga, hay que realizar un cambio de base, y por lo tanto, la relación deformación-tensión resulta:

Donde las nuevas constantes vienen definidas por las siguientes relaciones:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{S}_{11} & \bar{S}_{12} & 0 \\ \bar{S}_{12} & \bar{S}_{22} & 0 \\ 0 & 0 & \bar{S}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} \quad (6)$$

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

Gracias a esta nueva definición de constantes, se puede calcular el valor aproximado que tomaría la rigidez a cizalladura mediante una ecuación que relaciona el módulo de elasticidad en la dirección principal de carga del material con los parámetros básicos definidos para ejes principales (8), (1), como son el módulo de Young tanto longitudinal como transversal respecto de la orientación de la fibra E_{11} y E_{22} y el coeficiente de Poisson del material, ν_{12} o ν_{21} .

Aplicando la igualdad $\bar{S}_{11} = \frac{1}{E_x}$, se consigue una relación sencilla para la obtención del módulo a cortadura.

$$G_{12} = \frac{(\sin \theta)^2(\cos \theta)^2}{\frac{1}{E_x} - \frac{(\cos \theta)^4}{E_{11}} - \frac{(\sin \theta)^4}{E_{22}} + \frac{2\nu_{12}(\sin \theta)^2(\cos \theta)^2}{E_{11}}} \quad (8)$$

En el método descrito anteriormente, pueden producirse errores asociados a la obtención de los parámetros de rigidez, como redondeos o mal posicionamiento de las galgas extensométricas, lo que conlleva a un arrastre de los mismos en el cálculo de la rigidez a cizalladura.

Al objeto de minimizar este problema, se procede a pegar, orientada en la dirección de carga, una roseta de tres galgas en el centro de la probeta, obteniendo gracias a ella la deformación tangencial que sufre el espécimen.

Una vez se tiene este valor, dando uso de la relación entre tensión y deformación tangencial se logra de manera directa y sin que intervengan las propiedades del material el valor de la rigidez a cortadura (9).

$$G_{12} = \frac{\sigma_{12}}{\gamma_{12}} \qquad \sigma_{12} = -\frac{F}{A} \sin \theta \cos \theta \qquad (9)$$

Otro aspecto importante a tener en cuenta para caracterizar el ensayo es la orientación de las fibras en la probeta. Se pueden presentar orientaciones de muy diversos ángulos. En este proyecto se barajaran datos de especímenes con orientación de 10° y 15° y dos ratios de $L/2h$ distintos, 10 y 15, cuyas ventajas e inconvenientes se describirán a lo largo del estudio.

No obstante, varios estudios [8, 9, 10, 11] sobre una gran gama de materiales compuestos, definen, que la mejor orientación para alcanzar el máximo de la relación deformación tangencial frente a deformación longitudinal, se encuentra por lo general en una orientación de fibra cercana a 10°, presentando además un porcentaje de error prácticamente nulo frente a otras orientaciones (Figura 11 [7]).

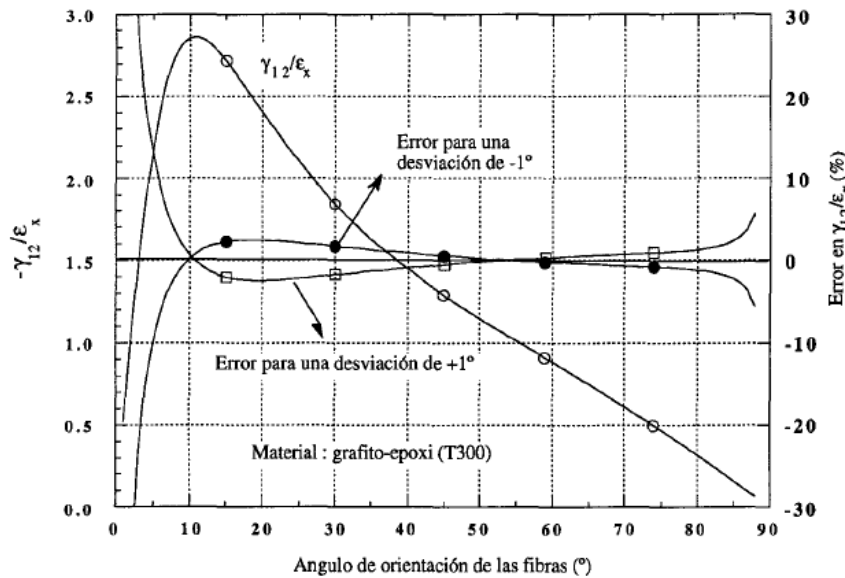


Figura 11: Variación de la deformación tangencial frente a la deformación longitudinal según la orientación de fibras [7]

Otros estudios [3,4], de Chamis y Sinclair apuntan no sólo a calcular el módulo de cizalladura sino no a obtener además la resistencia. En este aspecto, estudiando cada componente de tensión en dirección de fibras frente a la tensión principal, se observa que en todo momento la tensión tangencial es inferior a una de las dos tensiones normales, por lo que podría interpretarse que el ensayo no está capacitado para definir de manera fácil un estado tensional tangencial puro, o un estado donde la rotura se produzca por un esfuerzo cortante entre fibras (Figura 12 [7]).

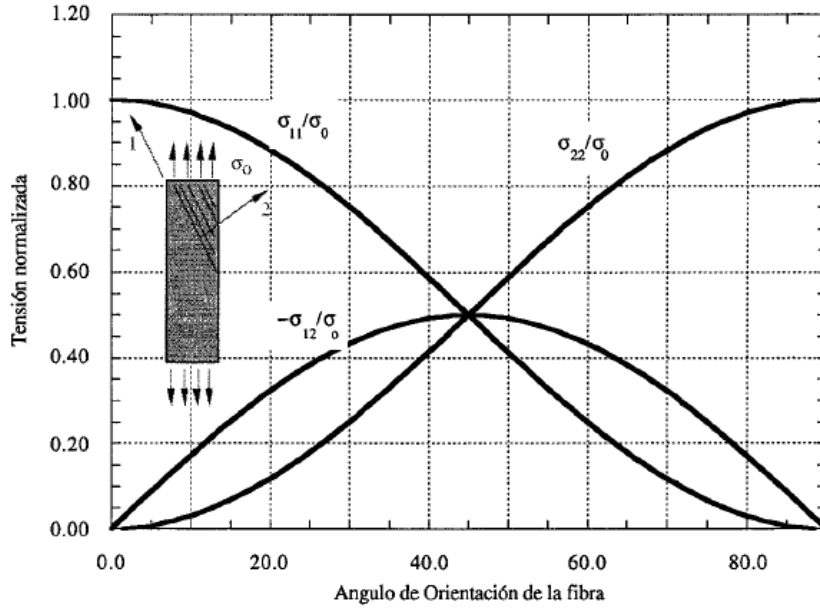


Figura 12: Variación de las tensiones en función del ángulo de orientación en un ensayo Off-Axis [7]

Sin embargo a la hora de determinar la resistencia a cortadura, el peso que cada tensión introduce sobre los criterios de fallo varía.

Haciendo uso del criterio de Tsai-Hill [18], se llega a una serie de conjeturas:

$$\left(\frac{\sigma_o}{X_T}\right)^2 \left[\left\{ (\cos \theta)^4 - (\sin \theta)^2 (\cos \theta)^2 + \left(\frac{X_T}{Y_T}\right)^2 (\sin \theta)^4 \right\} + \left\{ \left(\frac{X_T}{S}\right)^2 (\sin \theta)^2 (\cos \theta)^2 \right\} \right] = 1 \quad (10)$$

El primer término dentro del corchete representa la influencia de las tensiones normales al fallo de la lámina, frente al segundo término, que representa la contribución de las tensiones tangenciales. Asumiendo que la relación entre la resistencia a tracción en la dirección 1 y la resistencia a cortadura de los ejes 1-2 (X/S) toma el valor 15, y la relación entre tensiones a tracción en la dirección 1 y la 2 (X/Y) toma el valor 30 (valores típicos de cualquier material compuesto), se obtiene un gráfico que representa la contribución de la tensión tangencial en el fallo [7].

Se puede observar claramente en la Figura 13 [7], que el punto máximo también se localiza en una orientación de fibras de 10° , lo que a priori se puede considerar como la orientación deseada y es la que habitualmente se emplea. No obstante, se irá analizando las ventajas e inconvenientes de este valor, y el cambio a orientaciones de 15° .

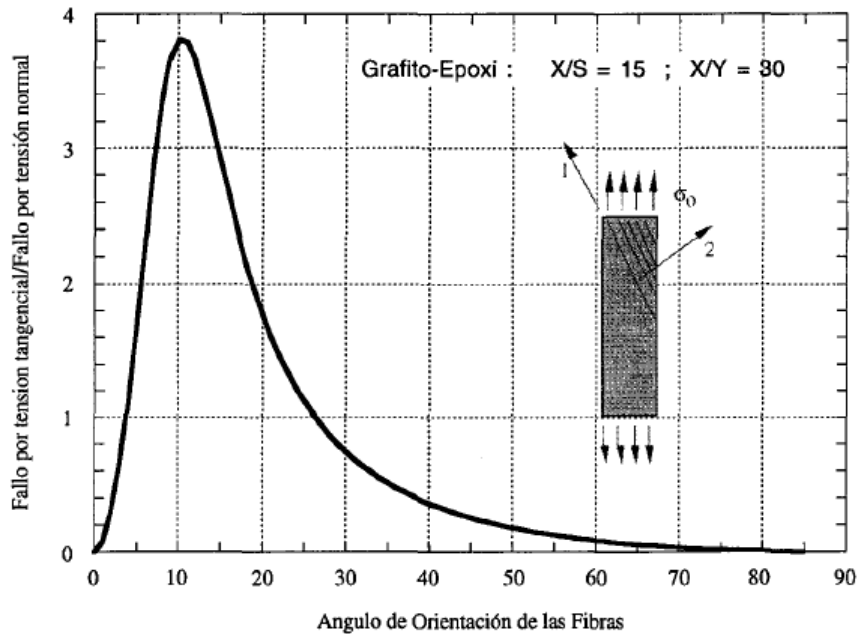


Figura 13: Contribución de la tensión tangencial al fallo [7]

2.3.2 Problemas asociados

Aunque el ensayo está definido para que su ejecución sea sencilla, se presenta un problema que debe ser resuelto para llegar a tener un estado tensional lo más parecido posible a un estado tensional tangencial puro.

Existe un acoplamiento entre tensiones normales y deformaciones tangenciales como consecuencia de que la carga no actúa según las direcciones principales de ortotropía, que se debe intentar solucionar en la medida de lo posible para conseguir el desacople de ambos esfuerzos, y así obtener un estado tensional uniforme de carga.

Debido a este acople de tensiones, la deformación ideal que el ensayo necesita para poder realizarse de manera efectiva es difícil de lograr.

Por lo general, las mordazas fijan los extremos de la probeta, obteniendo un empotramiento en uno de los extremos y permitiendo un desplazamiento en la dirección de carga en el otro extremo. En ningún caso se permite bajo esta configuración de probeta una deformación sobre el espécimen al mismo tiempo, por lo que el sistema de mordazas puede incurrir en un serio problema.

La deformación acaecida sobre la probeta (Figura 14 [13]) es debida a que se origina un esfuerzo cortante y un momento flector que anulan el giro de los extremos, y además se crea un complejo estado tensional no uniforme, tanto menos uniforme conforme el ratio de la probeta disminuye como se advertía en los artículos de Chamis y Sinclair [3,4] y Pindera Heracovik [15].

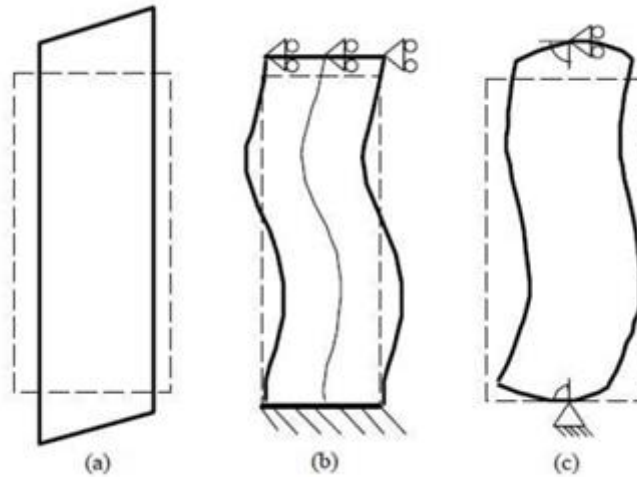


Figura 14: Esquema de la deformada de la probeta del ensayo Off-Axis. El caso (a) corresponde a la deformada ideal, el caso (b) corresponde a la deformada debido al sistema de cogida real, y por último, el caso (c) es la solución propuesta de Pagano para suavizar éstos esfuerzos [12].

Para poder lograr minimizar este acople, existen tres maneras de intervenir. La primera, consistiría en actuar sobre las mordazas de las probetas para que permitan esta deformación libremente. La segunda, estribaría en trabajar sobre los tacones de las probetas y la tercera sería aumentar el ratio $L/2h$, de modo que se obtenga en el área central del espécimen un estado, lo más homogéneo posible.

2.3.3 Soluciones planteadas

Los estudios realizados en este campo, indican que hay dos vertientes de pensamiento para solucionar este problema. Por un lado, se pretende evitar el acoplamiento modificando la configuración del ensayo, y por otro lado, se plantea la posibilidad de, manteniendo la configuración del ensayo, aplicar unos gráficos de corrección para solventar el acoplamiento entre tensiones normales y deformaciones tangenciales.

La primera decisión de modificar la configuración del ensayo Off-Axis, tiene varias vías de actuación, defendidas por distintos autores.

En primer lugar, aumentar el ratio o relación entre longitud de probeta frente al ancho de la misma, de modo que, al tener una probeta tan esbelta, apenas sean perceptibles las deformaciones tangenciales. De este modo, se origina una zona central de la probeta donde el estado tensional es lo más uniforme posible. Este estudio es llevado a cabo por Chamis y Sinclair [3 y 4]. Este punto será el centro de estudio en este trabajo.

Otra vía de actuación sería la de incurrir directamente sobre las mordazas, permitiendo de esta manera los giros necesarios en los extremos de las probetas a fin de evitar el momento flector y el esfuerzo cortante que hacen que la probeta se deforme. Pindera y Herakovich [15], llevaron a cabo este estudio y diseñaron un sistema de mordazas que aunaba todos los conocimientos

hasta el momento, utilizando las bases de: Wu y Thomas [20], “El empleo de mordazas que permitan la rotación, reduce las perturbaciones sobre el campo de deformaciones”, de Pagano [12] “El acortamiento es el factor dominante” y Rizzo, “Es aconsejable el uso de mordazas que permitan el giro”. Sin embargo, la dificultad de llevar a cabo los ensayos por el tipo de mordaza a usar, hace que se planteen algunos sistemas más simples.

Finalmente, en el último método, se pretende cambiar la configuración estándar de tacones rectos usados en los ensayos, por una configuración de tacones oblicuos, con una inclinación fijada según la orientación de las fibras en la probeta, optimizando de este modo la minimización del acople entre tensiones normales y deformaciones tangenciales. Este procedimiento fue propuesto por C.T. Sun [16, 17].

La segunda decisión tomada para solucionar los problemas que aparecían en el ensayo Off-Axis, es mantener la configuración del ensayo estándar de tracción, y crear un modelo de corrección, de modo que mediante números adimensionales y con unas relaciones entre variables reales y variables aparentes, se llegue a unos gráficos de correlación para que, sabiendo el resultado del ensayo, se pueda obtener el valor real del parámetro que queremos estudiar (Figura 15). Bajo esta línea de investigación, autores como Pagano y Halpin [12] comenzaron a buscar ecuaciones que relacionaran parámetros reales y aparentes. Posteriormente, autores como Pindera y Herakovich [15] o más tarde J.C. Marín [8, 9], profundizaron en su investigación.

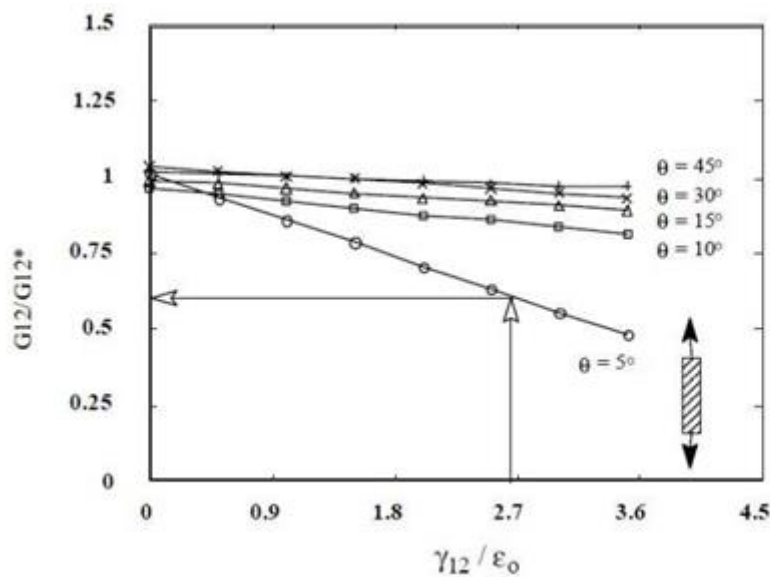


Figura 15: Ejemplo de gráfico de corrección para probetas de ratio 10 y varios ángulos de orientación

3. FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS

En este capítulo se llevará a cabo una descripción del proceso seguido para la fabricación de los especímenes necesarios para la realización de los ensayos y se presentarán las características de los materiales empleados.

En los siguientes apartados se explicará detalladamente:

- Materiales empleados: material base para el ensayo (rollo pre-preg de fibra de carbono/resina epoxi) y materiales auxiliares para la fabricación de las probetas (fibra de vidrio para tacones y materiales necesarios en cada una de las fases de fabricación: adhesivos, cintas adhesivas, etc.). Se explicarán las características y propiedades de dichos materiales, su forma de suministro y las condiciones y recomendaciones necesarias para su uso.
- Fases del proceso de fabricación: apilado, curado, corte. Se detallarán asimismo los útiles y herramientas necesarios para cada una de las fases.
- Preparación de las probetas: pegado de los tacones de fibra de vidrio y corte.

3.1 Material

El material empleado para fabricación y posterior ensayo es una cinta unidireccional de fibra de carbono pre-impregnada en resina epoxi. Fabricado por Hexcel Composites y con designación M21/34%/UD194/T800S-24K.

Para poder designarse como M21/34%/UD194/T800S-24K al material se le exige tanto unos procesos de fabricación determinados como unas propiedades físicas y químicas específicas. Estas exigencias vienen recogidas en la IPS 05-02-002-03 [5].

Su forma de distribución es en rollos de cinta pre-impregnadas. Por la cara interior de cada lamina viene protegida con un papel que evita que se pegue a si misma cuando ésta permanece enrollada.

3.1.1 Características del material

Extracto de IPS 05-02-002-03 [5] y AIMS 05-01-002 [1].

Propiedad	Norma de ensayo	Valor		Unidad
		Individual	Medio	
Masa prepeg/unidad de área	EN 2557	294±18	294±12	g/m ²
Masa de fibra/unidad de área	EN2559C	194±8	194±6	g/m ²
Contenido en volátiles	EN 2558	≤ 0.8		%
Contenido de resina	EN 2559C	34±3	34±2	%
Tiempo de gelificación	AITM 3-0004	19 a 26		min
Fluidez	EN 2560	5 a 11		%

Tabla 1: Características Físico-Químicas del material [5]

Propiedad	Norma de ensayo	T ^a de ensayo (°C)	Valor				Unidad	
			Individual		Medio			
			Mín.	Máx.	Mín.	Máx.		
Tracción (0°)	Resistencia	EN 2561	T.a.	2200	-	2400	-	MPa
	Módulo			155	185	155	185	GPa
Tracción(90°)	Resistencia	EN 2597	T.a.	45	-	50	-	MPa
	Módulo			7.0	9.0	7.0	9.0	GPa
Cortadura intralaminar	Resistencia	AITM 1.0002	T.a.	85	-	90	-	MPa
	Módulo			3.5	5.5	3.5	5.5	GPa
Coeficiente de Poisson	EN 2561	T.a.	0.3	-	0.3	-	GPa	

Tabla 2: Características mecánicas del material [5]

3.1.2 Requisitos del material pre-impregnado

El proceso clave en el curado de la resina es la polimerización. Esta polimerización puede producirse a temperatura ambiente y aunque se trata de un proceso muy lento puede afectar a las propiedades nominales del tejido pre-preg. Se trata por tanto de lo que podemos denominar un “material vivo”. Por esta razón este tipo de material tiene unas condiciones especiales de almacenaje y tiempo de vida útil. Dichas condiciones se encuentran determinadas por el fabricante y se detallan a continuación:

- El tiempo máximo de almacenaje será de 1 año a -18°C máximo a partir de la fecha de fabricación. El material debe recibirse, como máximo, 2 meses después de su fecha de fabricación.
- El tiempo máximo de exposición al ambiente en la zona de apilado (“lay up”) (Figura 16), en continuo o en intervalos acumulativos, será de 30 días.

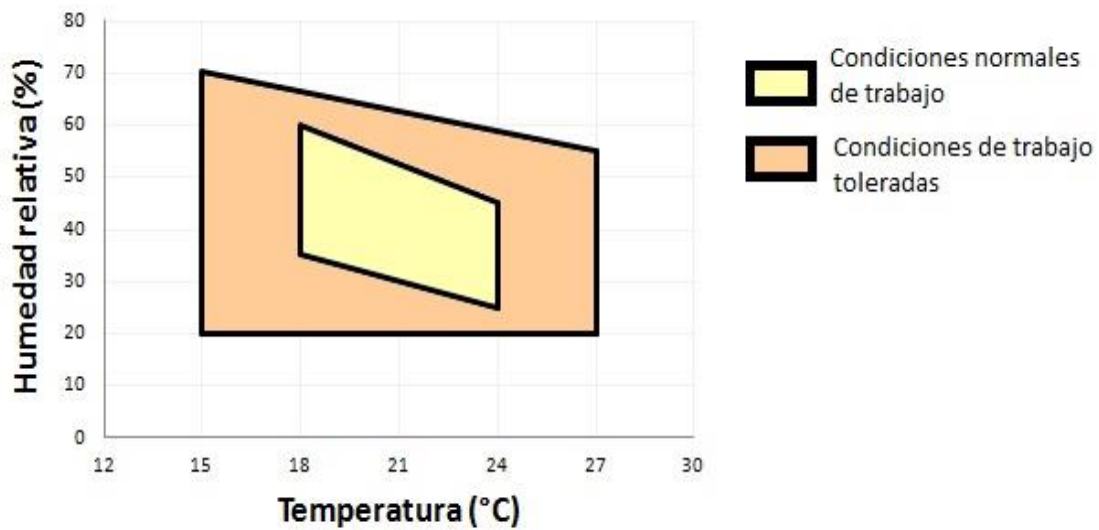


Figura 16: Condiciones de trabajo

3.1.3 Tipología de las probetas

En este trabajo, se van a ensayar cuatro configuraciones diferentes de probetas para el ensayo de tracción Off-Axis, las cuales serán:

- Tipología 1: ratio $L/2h = 10$ y ángulo de orientación de la fibra 10°
- Tipología 2: ratio $L/2h = 10$ y ángulo de orientación de la fibra 15°
- Tipología 3: ratio $L/2h = 15$ y ángulo de orientación de la fibra 10°
- Tipología 4: ratio $L/2h = 15$ y ángulo de orientación de la fibra 15°

Para la realización de los ensayos de tracción Off-Axis se van a ensayar tres especímenes por cada una de las configuraciones anteriormente indicadas. Para ello se van a seguir las pautas indicadas en la norma ASTM D3039/D3039M [2]. En este documento se marcan unas directrices sobre las dimensiones de los especímenes, en concreto, según el tipo de laminado, el espesor varía entre 1 y 2.5mm, el ancho entre 15 y 25mm y la longitud total entre 175 y 250mm. Por otro lado los tacones recomendados son de fibra de vidrio con un espesor de 1.5mm, una longitud variando entre 25 y 56mm y un ángulo de chaflán entre 5° y 90° .

Vistas estas indicaciones, se seleccionará un ancho de 15mm para los especímenes, con objeto de evitar una longitud excesiva de las probetas. Fijado el ancho, la longitud vendrá determinada para que se cumpla el ratio entre el ancho y la distancia entre tacones más la suma de la longitud de los tacones. El espesor será 1.104mm (6 láminas). Los tacones serán de tejido de vidrio con una orientación $\pm 45^\circ$, un espesor de 1.5mm una longitud de 56mm y sin chaflán (Figura 17).

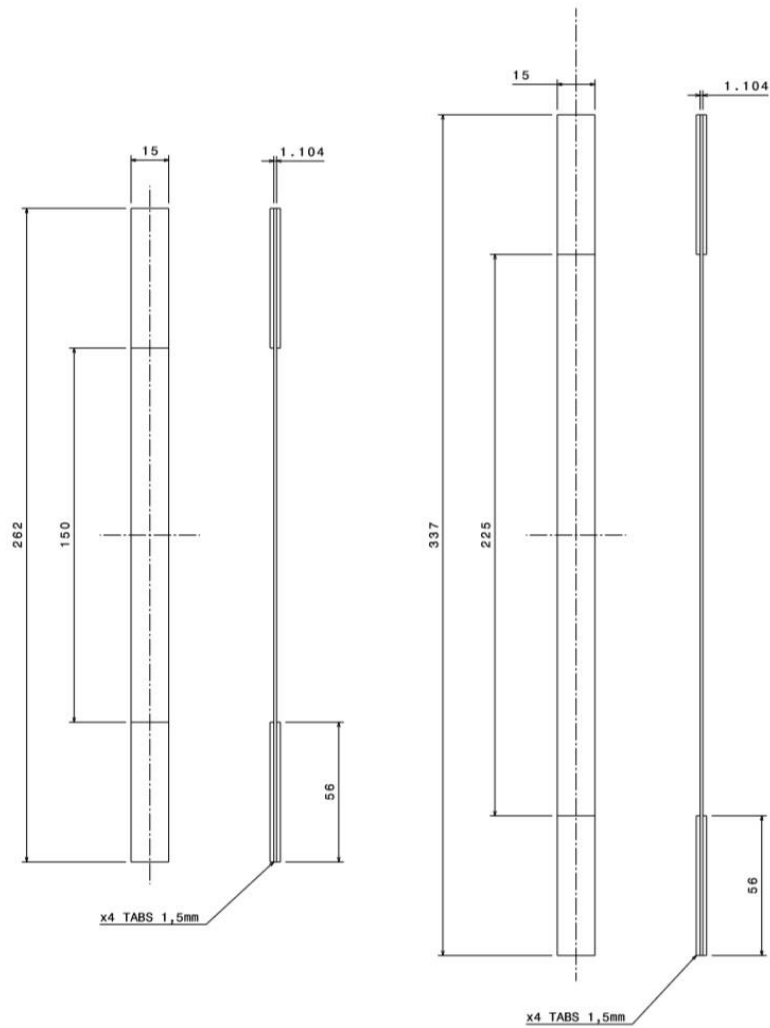


Figura 17: Planos de la probetas Off-Axis tipologías 1 y 2 (izquierda), 3 y 4 (derecha)

Además de las tipologías anteriormente comentadas se va a realizar un ensayo de tracción sobre tres probetas en la dirección de las fibras (tracción 0°) y un ensayo de tracción sobre tres probetas en dirección perpendicular a la fibra (tracción 90°) con el objetivo de obtener las constantes de rigidez y resistencia que caracterizan el material E_{11} , E_{22} , ν_{12} , X_T e Y_T . Las dimensiones de las probetas y los tacones serán los estándares ASTM D3039/D3039M [2] y vienen ilustradas en la Figura 18.

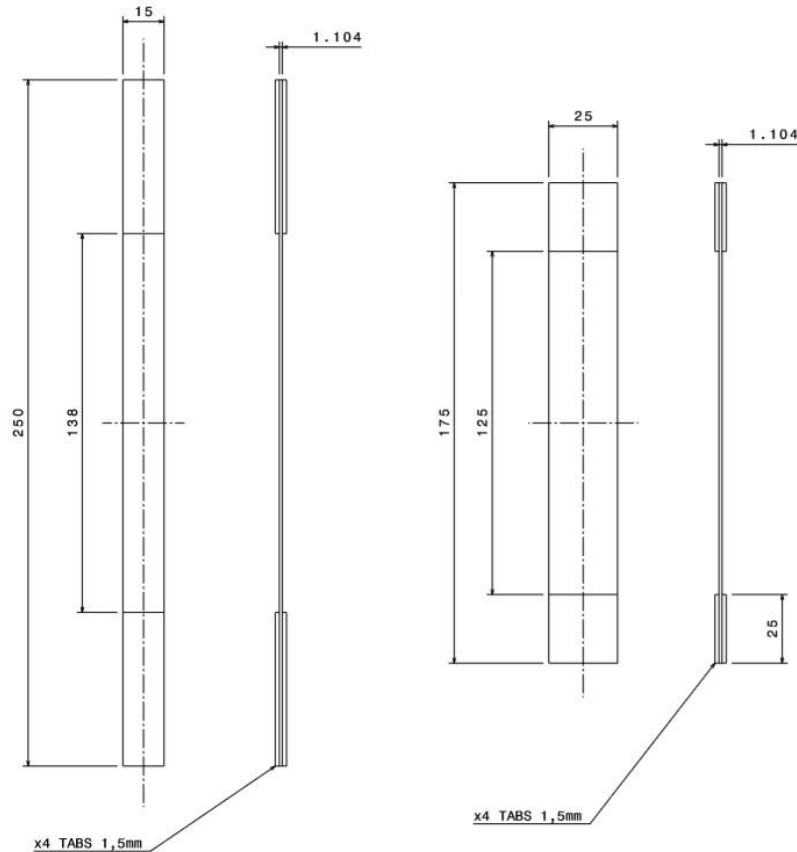


Figura 18: Planos de la probeta de tracción 0° (izquierda) y 90° (derecha)

Una vez definido el número y las dimensiones de todos los especímenes que se van a ensayar se planteará en un programa de CAD, (en nuestro caso el módulo drawing de Catia V5), posibles disposiciones de las probetas sobre los paneles de material laminado con objeto de reducir al mínimo el número de paneles a fabricar y el tamaño de estos.

Con la restricción de tamaño máximo del panel de 450mm en sentido longitudinal y 300mm en sentido transversal a la fibra, impuesta por las dimensiones del autoclave y los siguientes criterios:

- Mantener un margen 25mm en el perímetro del panel en el que no se colocarán probetas para evitar cualquier posible defecto o variación del espesor que se pudiese haber dado durante la fabricación del mismo debido al flujo de la resina cerca de los bordes.
- Respetar una distancia mínima entre probetas de 8 a 10mm para permitir la operación de corte y mecanizado del panel.
- Agrupar cada conjunto de tres probetas con objeto de facilitar la operación de pegado de los tacones.

Con los criterios anteriormente mencionados; finalmente se obtiene que son necesarios dos paneles, uno de 450mm en dirección longitudinal y 300mm en dirección transversal y otro

400mm en dirección longitudinal y 300mm en dirección transversal. Siendo la distribución de las probetas, la mostrada en la Figura 19 y Figura 20.

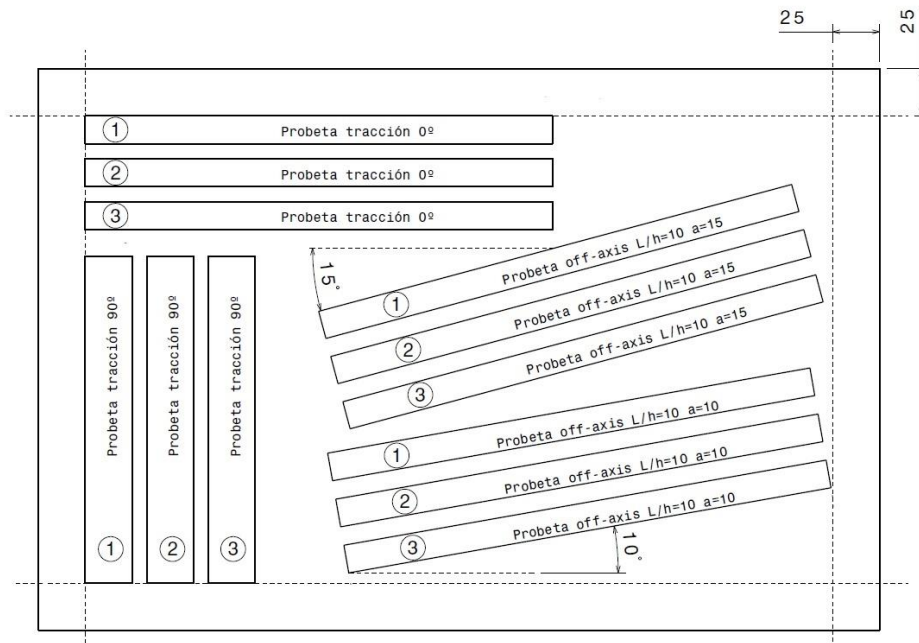


Figura 19: Distribución de las probetas en el panel 450x300mm

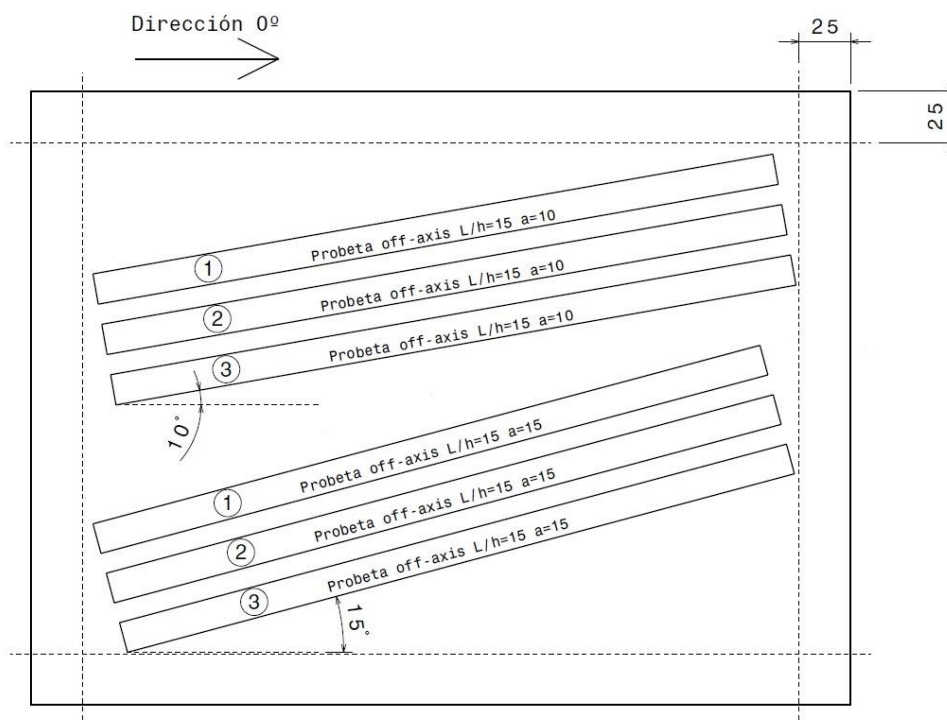


Figura 20: Distribución de las probetas en el panel 400x300mm

3.2 Fabricación del laminado

El proceso de fabricación del laminado engloba desde la extracción del material del congelador donde está almacenado, hasta su retirada del autoclave una vez curado.

Vamos a diferenciar en dos partes el proceso de fabricación, la primera aunará todos los pasos a realizar en el material fresco (corte, apilado, bolsa de vacío...) y la segunda su proceso de curado.

3.2.1 Preparación del material fresco

Se ha comentado anteriormente que existe una dependencia entre la temperatura y humedad del ambiente y la vida útil del material fresco, por ello para la manipulación del pre-preg será necesario un lugar de trabajo con condiciones ambientales controladas para evitar tanto una contaminación como una polimerización prematura de la resina. Por esta razón, todo el trabajo con material fresco se realiza dentro de una sala conocida como sala limpia.

Una sala limpia mantiene constantes sus condiciones ambientales monitorizando y controlando la temperatura, humedad, presión del aire, velocidad del aire y nivel de partículas en suspensión.

Para el control de la contaminación, la sala está equipada tanto con filtros, como con un sistema de sobrepresión que neutraliza la posible introducción de partículas en suspensión en el aire. El nivel de partículas en suspensión debe mantenerse controlado y debe ser inferior a 50 partículas por litro de aire. En la Figura 16 se pueden observar las condiciones a las que debe estar la sala para una correcta manipulación del material.

Una vez situados en la sala limpia con los materiales necesarios comenzamos el proceso de apilado. Los dos paneles de este proyecto consisten en seis capas apiladas de manera unidireccional. Con ayuda de un cúter se irán cortando los preg-pregs necesarios (Figura 21). Una vez cortados los preg-pregs se comienza con el apilado.

El apilado se realiza siempre de una en una capa. Para asegurar que las fibras se encuentran orientadas a 0° y todas las capas estén alineadas y paralelas se hará uso de una escuadra y cartabón.

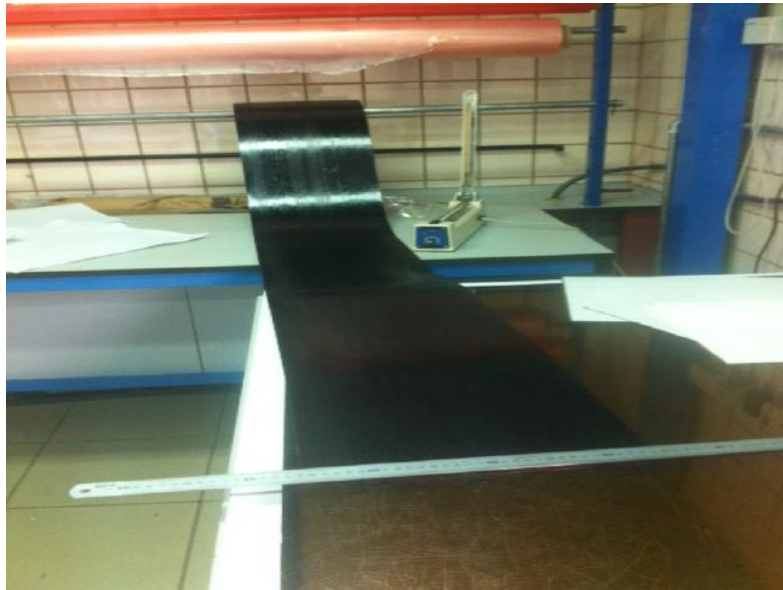


Figura 21: Ejemplo de bobina de pre-preg

Una vez están superpuestas las dos primeras láminas, se aplicará una presión manual con una espátula de nylon en la dirección de la fibra con el objetivo de adherir las dos láminas y eliminar el posible aire que se haya quedado atrapado al unir estas dos capas (Figura 22). Terminado el procedimiento anterior, retiraremos el papel protector y continuaremos con el mismo proceso para el resto de capas.



Figura 22: Compactación de las láminas de pre-preg

Una vez terminado el apilado de todas las capas de pre-preg queda la preparación de las bolsas de vacío. Las bolsas de vacío proporcionan un ambiente hermético al panel evitando posibles oxidaciones y a su vez facilitando la correcta aplicación de presión durante su curado en el autoclave.

Para su realización, se precisa de una plancha metálica que actuará como molde y servirá de base para la bolsa de vacío (Figura 23). Esta plancha metálica quedará como soporte de nuestro panel dentro del autoclave.

Con objeto de evitar que el material quede adherido al molde metálico, se ha de situar una fina capa de teflón entre la plancha y el panel. Se ha de procurar que quede bien tensa y libre de arrugas, ya que al hacer funciones de molde, sus arrugas se transmitirían al panel provocando la aparición de defectos. Esta capa se fija a la lámina de metal mediante unos trozos de cinta adhesiva de alta resistencia térmica.

Sobre la capa de teflón se sitúan los laminados, se retiran los papeles protectores y se pone otra capa de teflón que evitará que quede adherida a la parte superior del laminado a la bolsa de vacío.

El siguiente paso es situar una capa Air Weave, un material esponjoso que permite una mejor distribución del vacío en la bolsa y lo uniformiza. La única precaución que se ha de tomar en la instalación de esta capa es que debe ser continua en todo el panel, un solape de esta capa sobre el panel le imprimiría una disconformidad al material.

Se colocará una doble capa de este material en la zona donde se colocan las tomas de vacío.

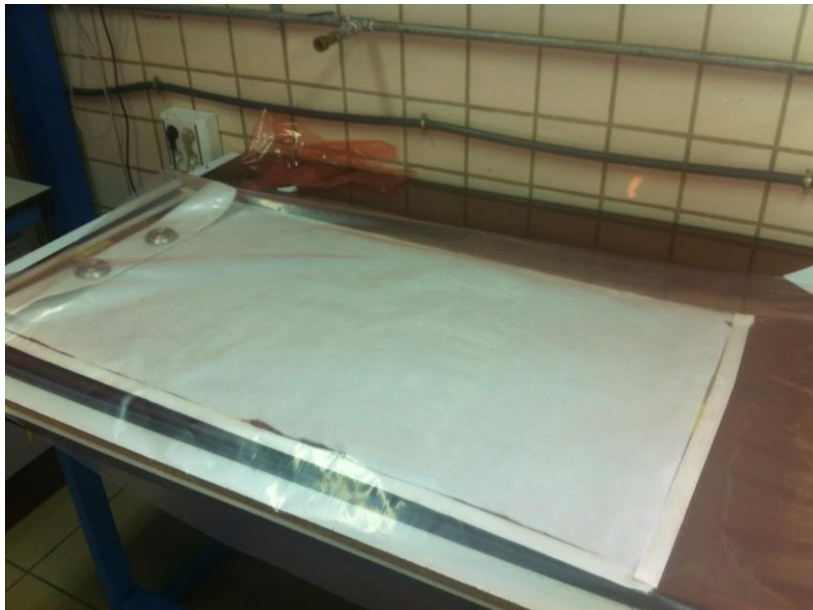


Figura 23: Bolsa de vacío

Por último el sellado de la bolsa de vacío se realiza con una capa plástica colocada en la parte superior de todo el conjunto y empleando una cinta de cromato de zinc que fijará esta capa con la base metálica a lo largo de todo el perímetro.

La aplicación de un vacío de prueba es necesaria para comprobar la estanqueidad de la bolsa y verificar que no tendrá problemas durante el ciclo de curado.

3.2.2 Proceso de curado en autoclave

El curado es necesario para la correcta polimerización de la resina epoxi, este curado implica la aplicación de calor y presión. El autoclave consiste en una cámara presurizada donde se controla la temperatura y presión necesaria para el ciclo de curado. A su vez está equipado con un sistema de vacío que se encarga de la compactación del laminado, asegurando la calidad requerida en los paneles.

El ciclo de curado se refiere a la evolución temporal de temperatura y presión necesarias durante el proceso, depende del material utilizado y viene determinado por el fabricante del material. Comienza con una rampa de subida de temperatura y presión, un tramo donde se mantienen los valores de temperatura y presión, y por último un tramo de enfriamiento y despresurización.

El ciclo teórico a aplicar queda definido como sigue:

- Vacío de la bolsa: aplicar vacío hasta una presión (dentro de la bolsa) entre 0.65 y 0.90 bares.
- Presión del autoclave: 7 ± 0.5 bares
- Velocidad de calentamiento: 2 ± 0.5 °C/min
- Temperatura de curado: 180 ± 5 °C
- Tiempo de curado: $120 + 30/-0$ min
- Velocidad de enfriamiento: 2 ± 1 °C/min

A la hora de introducir los paneles en el autoclave nos ayudaremos de una estructura metálica que dará soporte a los mismos (Figura 24). Una vez termine el ciclo de curado se dará por finalizado el proceso de fabricación de los paneles.



Figura 24: Estructura metálica y autoclave

3.3 Fabricación de las probetas

Teniendo en cuenta que todas las probetas que se han ensayado en este proyecto tienen espesor y apilado común, todos los paneles fabricados consisten en 6 capas de pre-impregnado y apilados de manera unidireccional con la fibra paralela (0°) a la dirección longitudinal del panel. Se han fabricado dos paneles, número suficiente para poder obtener todas las probetas necesarias como vimos anteriormente.

Este punto va a describir los procesos necesarios que hay que realizar para convertir paneles curados en probetas listas para ser ensayadas.

3.3.1 Proceso de mecanizado

Terminado el ciclo de curado, se procede a cortar el panel. Para ello la herramienta de corte que se ha empleado es un disco de polvo de diamante de espesor 2.5mm montado sobre una máquina de corte (Figura 25). La distribución de las probetas en los paneles será la mostrada en las Figura 19 y Figura 20.

Como se ha mencionado anteriormente, en la distribución de las probetas se ha mantenido un margen de seguridad de 25mm. Esto es necesario ya que en las zonas del borde del panel se produce una mayor fluencia de la resina que provoca que quede un área sea más rica en resina y con menor espesor.



Figura 25 Ejemplo de máquina de corte

Con objeto de facilitar el proceso de pegado de los tacones las probetas no se cortan de manera individual, en su lugar se procede a cortar un panel, en el cuál, un lado tenga la medida de longitud de la probeta y otro lado tan largo como sea posible. Una vez que tenemos estos paneles se cortan los tacones de fibra de vidrio con el ancho necesario según el tipo de probeta

y tan largo como el propio panel. Necesitaremos 4 paneles de tacones de vidrio por cada panel de carbono.

Antes de proceder con el pegado será necesario la abrasión de la superficie tanto del vidrio como de los paneles de fibra de carbono (Figura 26). La abrasión se ha realizado mediante un chorro de arena. Tras el lijado es necesario limpiar bien el panel con alcohol isopropílico para eliminar cualquier partícula que pudiese haber quedado e imposibilitase una correcta adhesión.

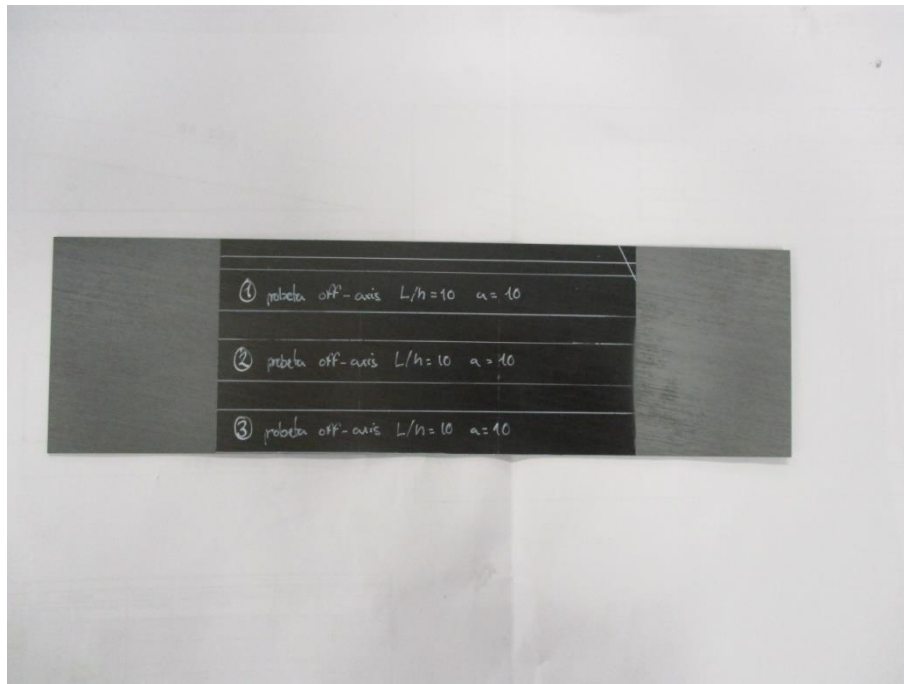


Figura 26: Panel cortado y lijado

3.3.2 Proceso de pegado de tacones

Una vez lijados los paneles podemos proceder al pegado de los tacones. El adhesivo que se va a emplear tiene la designación Z-15429 cuyas características vienen recogidas en la IPS 05-01-002-03 [5]. Siendo de un color rosado se distribuye con dos capas protectoras a su alrededor de color más amarillento (Figura 27).



Figura 27: Lámina de adhesivo Z-15429

Para cortar el adhesivo retiramos una capa protectora que lleva encima con la ayuda de un cúter. Retirado el film protector, colocamos los tacones encima del adhesivo y con el cúter cortamos el adhesivo del tamaño necesario.

Una vez repetido el proceso con los cuatro paneles de los tacones, se comienza situando el primer panel de tacón sobre el panel del cual se sacan las probetas ajustando los extremos de los mismos (Figura 28). Para cerciorarnos que la longitud del Span (separación entre los tacones) sea la indicada, se emplea un trozo de panel auxiliar a modo de plantilla con un ancho igual a la longitud de Span. Se coloca el tacón opuesto y se prosigue de la misma manera en la cara opuesta.



Figura 28: Panel con los tacones situados

Una vez situados los tacones, se procede al curado del adhesivo en una prensa de platos calientes. Para evitar que el adhesivo que rebose quede pegado a lo largo del Span, se coloca cinta adhesiva en la zona del Span cercana a los tacones del panel durante el proceso de curado del adhesivo (Figura 29), de modo que tras el curado del adhesivo sea sencillo retirar el exceso de material rebosado. Además se colocará una lámina de teflón entre el panel y los platos de la prensa para que el adhesivo no se pegue a los platos (Figura 30).



Figura 29: Colocación de la cinta adhesiva

Las condiciones necesarias para el curado del adhesivo son:

- Presión de 1.2 ± 0.03 bar.
- Temperatura de 125 ± 5 °C.
- Durante un tiempo de 90 minutos.

Estas indicaciones vienen recogidas en la IPS del material.



Figura 30: Prensa de platos calientes

3.3.3 Proceso de corte

Una vez tenemos los paneles con los tacones pegados, se cortan las probetas individualmente con las medidas indicadas anteriormente. La herramienta de corte que se ha empleado es la misma que para los procesos previos de mecanizado, es decir, un disco de polvo de diamante de espesor 2.5mm montado sobre una máquina de corte.

3.4 Instrumentación de las probetas

La instrumentación de las probetas consistirá en el pegado de unas bandas extensométricas para obtener las lecturas de las deformaciones acaecidas en las mismas. Por otro lado también será necesario soldar unos cables a los terminales de las bandas que permitan leer las mediciones de éstas empleando un software de recogida de datos.

3.4.1 Pegado de las bandas extensométricas

El procedimiento para pegar las bandas es el siguiente (todos los puntos se realizarán bajo una lupa retro iluminada para facilitar el trabajo y aumentar la precisión de las medidas):

- En primer lugar se realiza una pequeña abrasión sobre la superficie donde va a ir pegada la banda con papel de esmeril de grano fino, para asegurar una superficie libre de rugosidades y que garantice un buen pegado.
- Segundo se limpia la superficie lijada, con objeto de eliminar toda partícula residual que pueda quedar tras el lijado e impida una correcta adhesión.
- Seguidamente se marca el centro de la probeta tanto en el ancho como longitudinalmente con un pie de altura, de la manera más precisa posible (Figura 31).



Figura 31: Probeta tras haber sido lijada y marcado su centro

- A continuación se procede al pegado de la banda. Pero antes, con ayuda de cinta adhesiva convencional, se coloca la banda sobre su posición correcta donde debería ir situada (Figura 32).



Figura 32: Colocación de la banda ayudado de la cinta adhesiva

- Finalmente, se aplica un adhesivo en la superficie de la banda y se pega la banda a la probeta (Figura 33 y Figura 34).

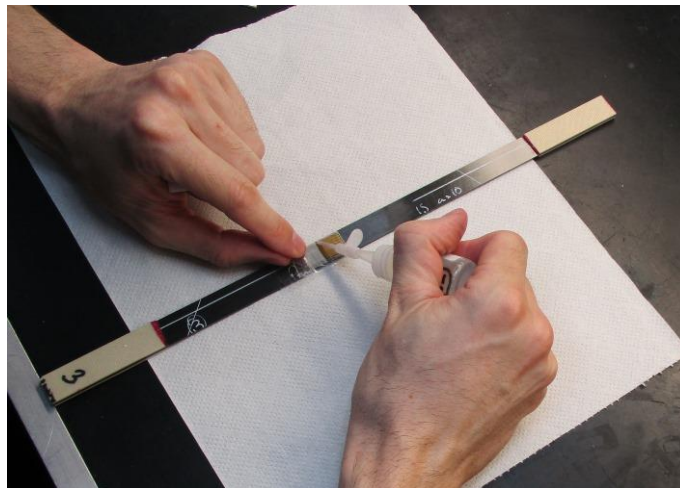


Figura 33: Aplicación del adhesivo



Figura 34: Banda pegada a la probeta

3.4.2 Soldado de los cables a las bandas extensométricas

La interpretación de los datos de las lecturas de las bandas se llevará a cabo mediante un MGCplus y un software de procesamiento de datos y que a su vez controla la máquina de ensayos.

Para permitir la conexión de las bandas con el MGCplus, se deben soldar a los contactos de las bandas unos cables con un terminal D-sub de 25 pines (Figura 35).

El procedimiento seguido es el siguiente:

- En primer lugar, se cogen y cortan los trozos de cables que se necesiten mediante unos alicates y un pelacables. En un extremo de los cables se les coloca un conector para facilitar la conexión al terminal D-sub25 (Figura 36).

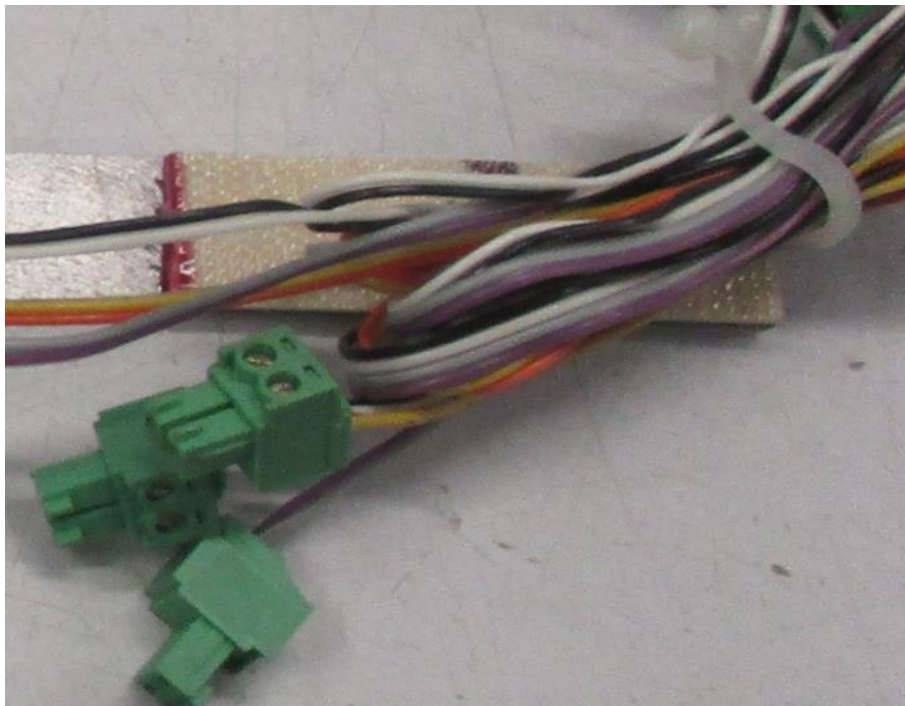


Figura 35: Terminal de empalme



Figura 36: Conector intermedio para facilitar el conexionado con el D-sub 25

- Seguidamente se decapan y estañan las puntas de los cables que irán soldadas, con objeto de mejorar y facilitar la soldadura.
- Para las bandas triaxiales empleadas en los ensayos Off-Axis es necesario pegar una tira de contactos que nos permitirá hacer la soldadura de unión con los cables. Además entre la tira de contactos y la base de poliamida de la banda hay que pegar cinta aislante para impedir que el contacto con el carbono falsee la lectura de las bandas (Figura 37). Esto no será necesario con las bandas biaxiales del ensayo de tracción 0° ya que estas bandas tienen los contactos en la propia base de poliamida.



Figura 37: Colocación de cinta aislante y tira de contactos

- A continuación se limpian y se decapan los contactos de la tira mediante un lápiz de fibra de vidrio para garantizar una correcta adhesión del fundente.
- Terminando, se fijan los cables terminales de la banda extensométrica con cinta adhesiva a la probeta para facilitar el proceso de soldadura. Y mediante un soldador eléctrico y fundente de estaño, se sueldan las puntas del cable a los contactos (Figura 38).



Figura 38: Realización de la soldadura

- Por último se corta el sobrante de los terminales para evitar que se enreden con los cables (Figura 39).

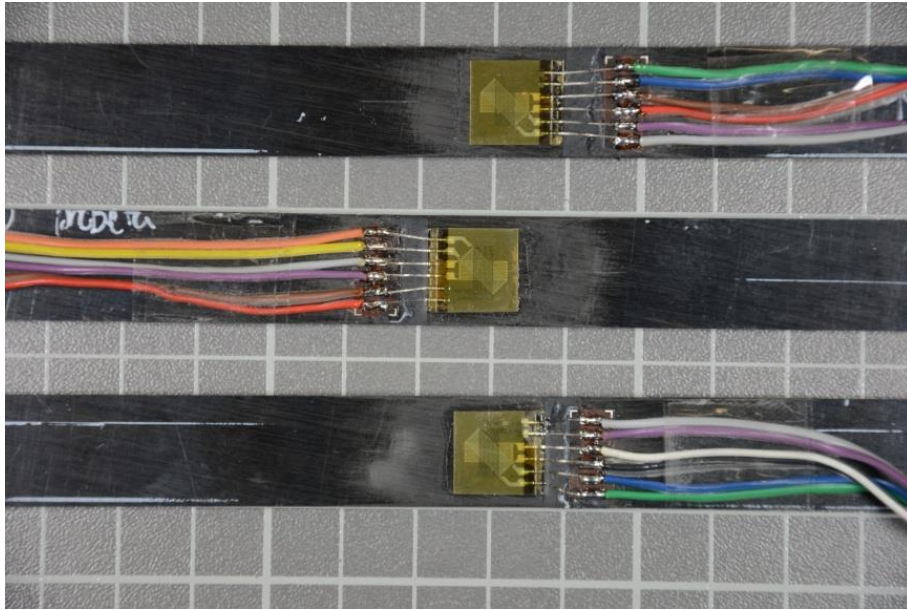


Figura 39: Detalle de la soldadura de los cables a los terminales de la banda

Una vez se han fabricado los paneles y mecanizado e instrumentado las probetas podemos realizar los ensayos.

4. ESTUDIO EXPERIMENTAL

4.1 Ensayo de tracción con fibras a 0°

El objetivo de este ensayo es obtener el módulo elástico en la dirección de las fibras, E_{11} , la resistencia a tracción en la dirección de las fibras X_T , así como el coeficiente de Poisson, ν_{12} .

Conforme a la norma ASTM D-3039 [2], 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 están relacionados por la siguiente ecuación:

$$\nu_{12} * E_{11} = \nu_{21} * E_{22} \quad (11)$$

Sin embargo es mejor obtener este coeficiente, ν_{12} , mediante este ensayo por dos motivos:

- 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 entrefase fibra-matriz defectuosa, y el error en la medida de ν_{21} podría ser mayor.

Se debe hacer uso de bandas extensométricas biaxiales para calcular las propiedades del material que queremos obtener, ya que es necesario medir la deformación en la dirección de aplicación de la carga (ϵ_{11}) para el cálculo del módulo elástico E_{11} , la deformación en la dirección de aplicación de la carga (ϵ_{11}) y en la dirección perpendicular (ϵ_{22}) para el coeficiente de Poisson ν_{12} y la fuerza máxima que soporta el espécimen en el momento de rotura para calcular X_T . Por esta razón, se ha pegado una banda extensométrica biaxial en la cara útil de las tres probetas, alineadas con la dirección de las fibras (0°) (Figura 40).

Las bandas extensométricas empleadas son las 1-XY31-3/350 del fabricante HBM.

Tipo de banda	Resistencia nominal	Dimensiones (mm)				Voltaje máximo de excitación permitido	Terminales para soldeo
	Ω	a	b	c	d	V	
1-XY31-3/350	350	3	3.3	10.9	7.6	10	LS 5

Tabla 3: Banda extensométrica para el ensayo de tracción 0°

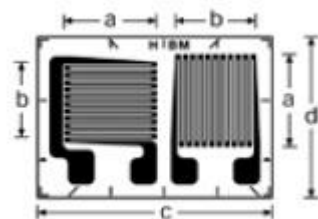


Figura 40: Banda biaxial para el ensayo de tracción 0°

Previo a la realización de los ensayos se realizó un control dimensional a las tres probetas, los cuales se pueden apreciar en la Tabla 3. Para obtener las medidas, el método empleado fue el indicado por la norma ASTM D3039/D3039M [2] y se describe a continuación:

- La medidas han de realizarse con un instrumento que nos dé una precisión de al menos el 1% de la medida. En nuestro caso hemos empleado un pie de rey electrónico para las medidas de ancho y longitud y un micrómetro de bolas para las medidas de espesor.
- Para obtener la medida de ancho del espécimen se realizan tres mediciones por probeta repartidas a lo largo de la longitud.
- El espesor se mide de forma similar tomando tres datos del espesor equiespaciados a lo largo del ancho del espécimen.
- La obtención de la longitud no es imperativa para la realización de los cálculos, pero si es interesante para comprobar que se han respetado las dimensiones indicadas en el mecanizado. Esta medida se realiza de forma análoga a la del espesor.
- Una vez realizadas las medidas, para obtener las dimensiones representativas se realiza la media para los tres valores individuales de ancho, espesor y longitud (Tabla 4).

Probeta	Valores medios obtenidos		
	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Longitud (mm)
1	14.98	1.12	249.45
2	14.98	1.15	249.35
3	14.97	1.16	249.21

Tabla 4: Control dimensional especímenes de tracción 0°

Tras el control dimensional, estamos en disposición de realizar el ensayo de tracción donde una vez más seguiremos las indicaciones de la norma ASTM D3039/D3039M [2]. La máquina para la realización de los ensayos es una Máquina Universal de Ensayos Zwick Z100 BS1 equipada con una célula de carga de 100 kN (Zwick Z100 BS1) modelo (Xforce K).

Los pasos a seguir para la realización del ensayo son los siguientes:

- Primero situaremos la probeta en la máquina de ensayos sujetándola con la mordaza inferior y posteriormente con la superior (Figura 41). En este punto es crucial prestar atención al alineamiento del espécimen con el eje de carga ya que una mala orientación daría lugar a un fallo prematuro de la probeta invalidando los resultados. Para garantizar el alineamiento nos ayudaremos de una escuadra metálica durante la inserción de la probeta.

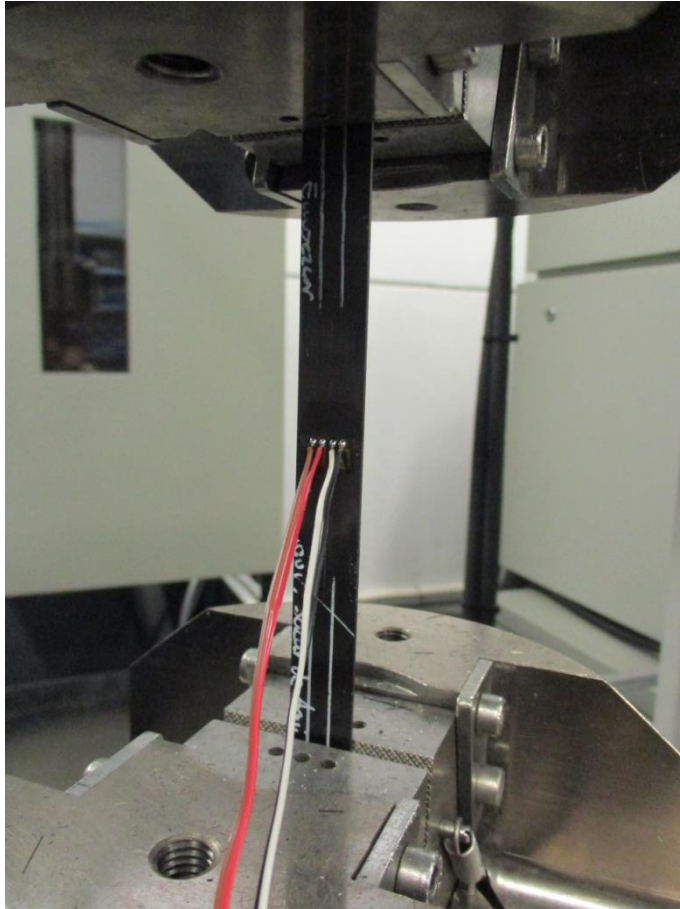


Figura 41: Colocación de la probeta 0° en la máquina de ensayos

- Con el espécimen instalado en la máquina de ensayos conectaremos los cables soldados a las bandas extensométricas al conector de acople al terminal D-sub de 25 pines. Este a su vez estará conectado a un MGCPlus y a un ordenador con un software de adquisición de datos que nos permitirá ver las lecturas de las bandas (Figura 42).



Figura 42: Configuración de ensayo tracción 0°

- Seguidamente se realiza un pequeña precarga (aproximadamente unos 100N), con el fin de comprobar que todas las bandas extensométricas están bien colocadas y miden correctamente (Figura 43).
- Finalmente, sólo queda realizar la tracción sobre la probeta. Para ello se selecciona una velocidad de avance de la cruceta de 2mm/min, esto es, la mordaza superior se desplazará hacia arriba a razón de 2 milímetros cada minuto. Este desplazamiento de cruceta de mantendrá hasta el fallo (rotura) del espécimen (Figura 44). Las condiciones de temperatura y humedad durante la ejecución del ensayo eran de 23.2 °C y 50.2% respectivamente. Durante todo el proceso se registrarán los datos de la fuerza que se aplica a la probeta medida en la célula de carga y las deformaciones experimentadas por el espécimen, obtenidas de las galgas extensométricas.

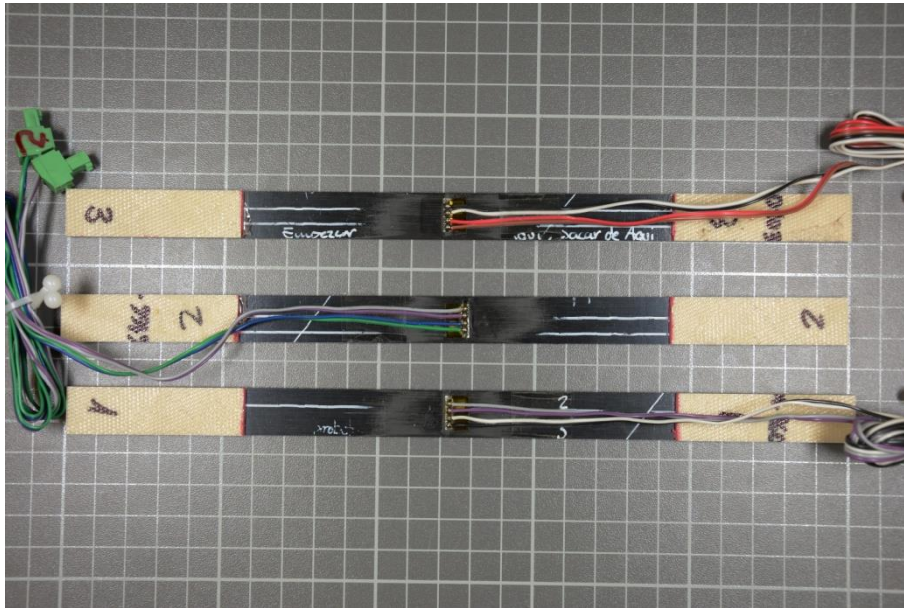


Figura 43: Probetas listas para la realización del ensayo de tracción 0°

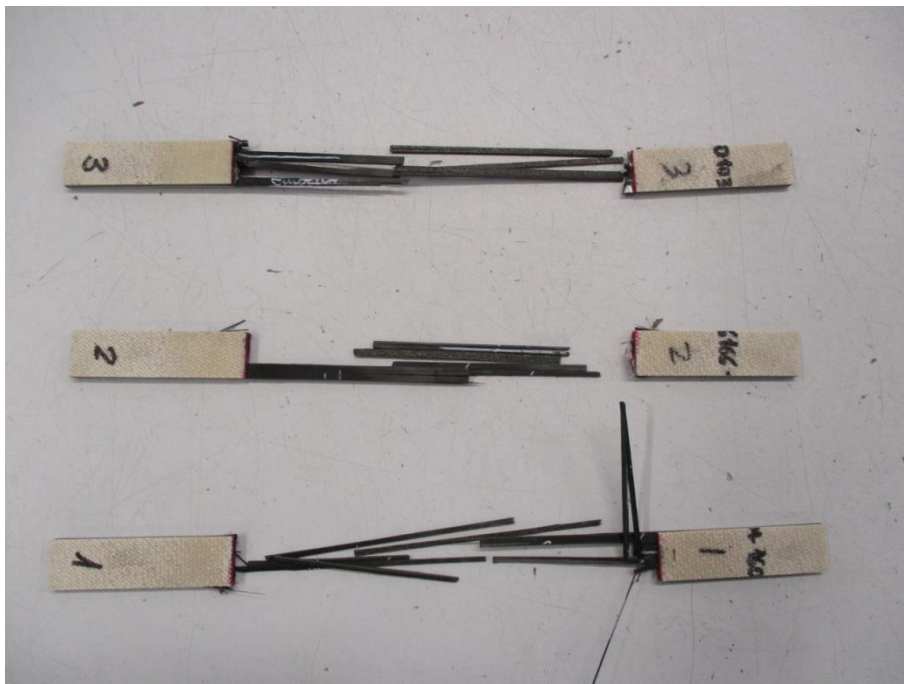


Figura 44: Rotura explosiva de las probetas tras la realización del ensayo de tracción 0°

Tras la realización del ensayo y obtención de los datos, tan solo queda calcular las propiedades del material.

El módulo elástico en la dirección de las fibras E_{11} , se calcula empleando las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} E_{11} &= \Delta\sigma / \Delta\varepsilon \\ \sigma_i &= P_i / A \\ A &= w * h \end{aligned} \quad (12)$$

Dónde:

- σ_i es la tensión de la probeta en el i-ésimo dato recogido [MPa].
- P_i es la carga máxima soportada por la probeta en el i-ésimo dato recogido [N].
- ε_i es la deformación sufrida por la probeta en el i-ésimo dato recogido [$\mu\varepsilon$].
- A es el área de la sección transversal de la probeta [mm^2].
- w es ancho medio de la probeta [mm].
- h es el espesor medio de la probeta [mm].

La resistencia a tracción del material en la dirección de las fibras X_T , será la tensión máxima acaecida sobre la probeta durante el ensayo y se calcula particularizando la ecuación (13) de la tensión en cualquier punto al momento de rotura:

$$X_T = P^{m\acute{a}x} / A \quad (13)$$

Dónde:

- $P^{m\acute{a}x}$ es la carga máxima soportada por la probeta en el momento de rotura [N].

El coeficiente de Poisson ν_{12} , es la relación existente entre la deformación en el eje perpendicular al eje de aplicación de la carga y la deformación que se produce en el eje de la carga y viene dado por la siguiente expresión:

$$\nu_{12} = -\Delta\varepsilon_t / \Delta\varepsilon_l \quad (14)$$

Dónde:

- ε_t es la deformación en dirección transversal a la fibra [$\mu\varepsilon$].
- ε_l es la deformación en dirección paralela a la fibra [$\mu\varepsilon$].

Tanto para el módulo elástico E_{11} , como para el coeficiente de Poisson ν_{12} tomaremos los puntos más cercanos a $1000\mu\varepsilon$ y $3000\mu\varepsilon$ como aconseja la Norma ASTM D3039/D3039M [2] cuando en el ensayo se superan las $6000\mu\varepsilon$ antes de la rotura.

Los resultados obtenidos para cada una de las probetas se pueden observar en la Tabla 5:

Nº	F _{max} (N)	X _T (MPa)	E ₁₁ (GPa)	Coefficiente de Poisson
1	46826	2801	153.35	0,2984
2	47736	2778	153.84	0,3648
3	46622	2694	146.02	0,3393

Tabla 5: Resultados individuales de las probetas 0°

Durante el proceso de mecanizado de las probetas se planteó un problema, de modo que para obtener la probeta 3 se hizo necesario introducirse en el margen de seguridad de 25mm que bordea el panel. A la vista que el módulo de elasticidad obtenido tiene un valor muy por debajo de las otras dos probetas y es una propiedad que suele experimentar poca variación se procede a descartar dicha probeta para los sucesivos cálculos.

Una vez se tienen los datos de cada una de las probetas de forma individual, para obtener un valor representativo de la propiedad del material se realiza la media a los resultados individuales (Tabla 6).

Serie n=2	F _{max} (N)	X _T (MPa)	E ₁₁ (Mpa)	Coef. Poisson
min	46826	2778	153.35	0,2984
máx	47736	2801	153.84	0,3648
Valor medio	47281	2780	153595	0,3342
s	644	16	348	0,0335
cv%	1,36	0,58	0,23	10,03

Tabla 6: Valores medios de las probetas 0°

Se puede observar que los resultados son bastante uniformes siendo el coeficiente de variación para la fuerza máxima de 1.36%, de 0.58% para la resistencia a la tracción en la dirección de las fibras, 0.23% para el módulo elástico E₁₁ y 10.03% para el coeficiente de Poisson; el que más variación experimenta. De este modo los valores medios obtenidos se pueden admitir como los valores reales del material.

4.2 Ensayo de tracción con fibras a 90°

En este ensayo se pretende obtener el Módulo elástico y la resistencia a tracción en dirección transversal a las fibras, es decir E_{22} e Y_T respectivamente, según la norma ASTM D3039/D3039M [2]. La forma de proceder para la realización del ensayo de tracción con las fibras a 90° es análoga a la realización del ensayo de tracción con las fibras a 0°.

Dado que en este ensayo no se va a calcular el coeficiente de Poisson, no se requiere la colocación de bandas extensométricas biaxiales. Únicamente es necesario un extensómetro que mida la deformación en la dirección de aplicación de la carga, es decir, un extensómetro que mida la deformación en dirección perpendicular a la fibra (Figura 45). El extensómetro utilizado es el Zwick BTC-EXMACRO.011.



Figura 45: Configuración ensayo de tracción 90°

Antes de la realización del ensayo es también necesario realizar un control dimensional a las probetas. El control dimensional se hará de acuerdo al procedimiento explicado en el punto anterior. Las medidas obtenidas para las tres probetas de este ensayo han sido las mostradas en la Tabla 7.

Probeta	Dimensiones		
	Ancho	Espesor	Longitud
1	24.96	1.13	175.22
2	25.06	1.14	175.09
3	25.07	1.15	174.95

Tabla 7: Dimensiones de las probetas de tracción 90°

La realización del ensayo se hará en la misma Máquina Universal de Ensayos Zwick Z100 BS1 y siguiendo el mismo procedimiento indicado en el ensayo de tracción con las fibras orientadas a 0°. Las condiciones de temperatura y humedad registradas durante el ensayo fue de 23.2 °C y 50.2% respectivamente. En la Figura 46 se pueden ver las tres probetas antes de haber sido ensayadas y en la Figura 47 tras haber sido ensayadas observándose que la rotura se produce en la zona próxima a los tacones.

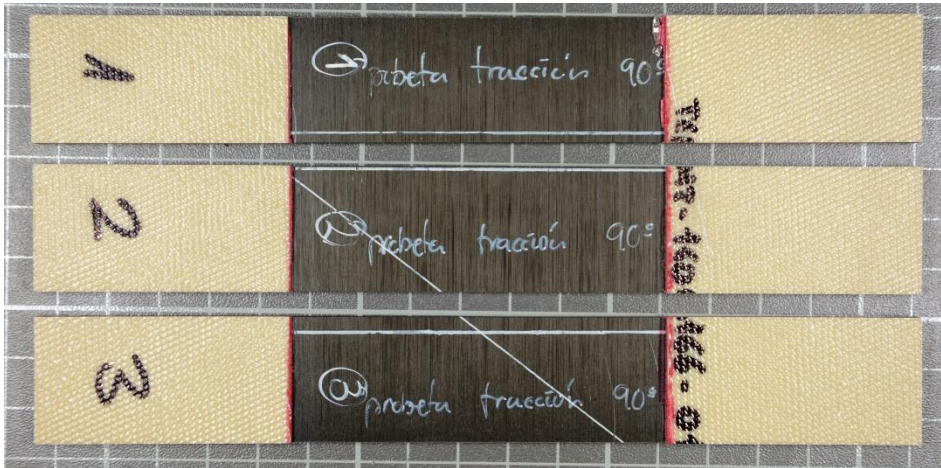


Figura 46: Probetas de tracción 90° antes de ser ensayadas

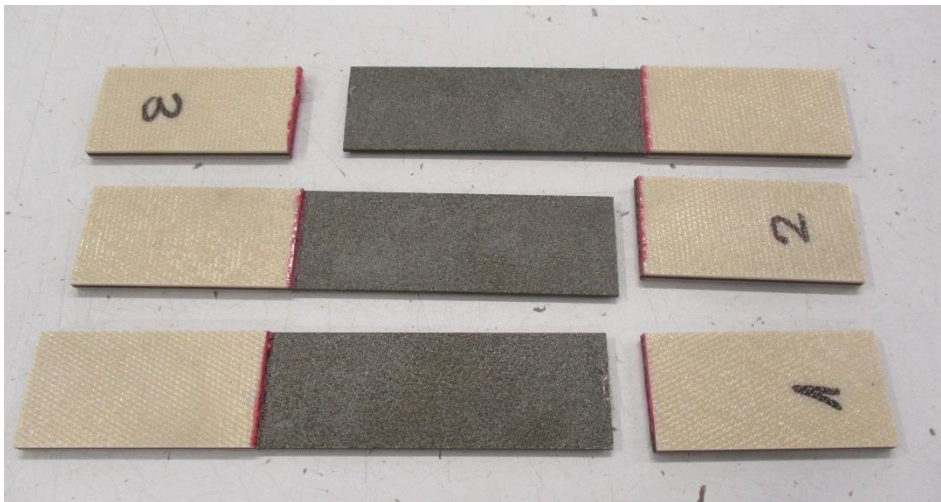


Figura 47: Probetas de tracción 90° tras ser ensayadas

Los resultados individuales obtenidos tras ensayar las tres probetas están recogidos en la Tabla 8:

Nº	F _{max} (N)	Y _T (MPa)	E ₂₂ (GPa)
1	1779	63.3	8.53
2	1705	59.9	8.60
3	1582	54.8	8.29

Tabla 8: Resultados individuales de las probetas 90°

Una vez tenemos los datos de cada una de las probetas de forma individual, para obtener un valor representativo de la propiedad del material se realiza la media a los resultados individuales (Tabla 9).

Series n=3	F _{max} (N)	Y _T (MPa)	E ₂₂ (GPa)
min	1582	54.8	8.29
máx	1779	63.3	8.6
Valor medio	1688	59.3	8.47
s	99.7	4.30	0.16
cv%	5.91	7.25	1.92

Tabla 9: Valores medios de las probetas 90°

Se puede observar que los resultados aun sufriendo mayor variación que en el ensayo de tracción con las fibras orientadas a 0° siguen siendo razonablemente uniformes siendo el coeficiente de variación para la fuerza máxima de 5.91%, de 7.25% para la resistencia a la tracción en la dirección transversal de las fibras y 1.92% para el módulo elástico E₂₂. De este modo los valores medios obtenidos se pueden admitir como los valores reales de las propiedades del material.

Una vez realizados los ensayos de tracción a 0° y a 90° concluye que los resultados están en el entorno de los valores esperados y recogidos en la AIMS 05-01-002 [1].

Propiedad	Unidad	Valor obtenido	Valor esperado
E11	GPa	153,5	170±15
E22	GPa	8,5	8±1
ν12		0,33	0,3
XT	MPa	2790	2400*
YT	MPa	59	50*

Tabla 10: Valores del material y valores esperados

*Valores mínimos

4.3 Ensayo Off-Axis

En este punto nos centraremos en realizar el ensayo Off-Axis que nos permitirá determinar el módulo de cizalladura G_{12} así como la resistencia intralaminar S .

Para obtener el módulo de cortadura G_{12} es necesario medir la deformación tangencial en la probeta para ello se instalará en los especímenes una banda extensométrica triaxial alineada con la dirección de la carga (Figura 48). Las bandas extensométricas a emplear son las 1-RY91-3/350 del fabricante HBM.

Tipo de banda	Resistencia nominal	Dimensiones (mm)				Voltaje máximo de excitación permitido	Terminales para soldeo
	Ω	a	b	c	d	V	
1-RY91-3/350	350	3	1.5	9	9	3.5	LS 7

Tabla 11: Banda extensométrica para el ensayo Off-Axis

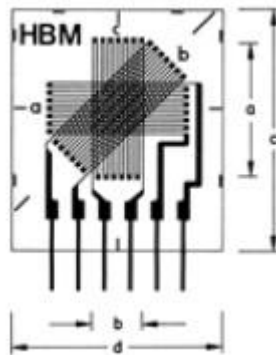


Figura 48: Banda triaxial para el ensayo Off-Axis

Primeramente antes de realizar el ensayo a las cuatro tipologías de probetas que se van a ensayar es imprescindible hacer un control dimensional a cada uno de los especímenes. Este control dimensional se hará conforme a la norma ASTM D3039/D3039M [2] siguiendo el procedimiento explicado anteriormente. Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes tablas:

- Control dimensional de los especímenes de Tipología 1; ratio $L/2h = 10$ y ángulo de orientación de la fibra 10°

Probeta	Valores medios obtenidos			
	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Longitud (mm)	Span (mm)
1	15.00	1.15	262.28	150.23
2	14.97	1.16	262.17	150.10
3	14.97	1.13	262.09	149.89

Tabla 12: Control dimensional de las probetas tipo 1

- Control dimensional de los especímenes de Tipología 2; ratio $L/2h = 10$ y ángulo de orientación de la fibra 15°

Probeta	Valores medios obtenidos			
	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Longitud (mm)	Span (mm)
1	14.98	1.15	261.81	149.82
2	15.00	1.15	261.75	149.96
3	14.98	1.14	261.64	150.12

Tabla 13: Control dimensional de las probetas tipo 2

- Control dimensional de los especímenes de Tipología 3; ratio $L/2h = 15$ y ángulo de orientación de la fibra 10°

Probeta	Valores medios obtenidos			
	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Longitud (mm)	Span (mm)
1	15.15	1.15	336.83	224.98
2	15.10	1.16	336.95	224.86
3	15.08	1.14	336.98	224.86

Tabla 14: Control dimensional de las probetas tipo 3

- Control dimensional de los especímenes de Tipología 4; ratio $L/2h = 15$ y ángulo de orientación de la fibra 15°

Probeta	Valores medios obtenidos			
	Ancho (mm)	Espesor (mm)	Longitud (mm)	Span (mm)
1	15.11	1.13	336.70	225.03
2	15.11	1.15	336.83	225.14
3	14.92	1.13	336.99	225.21

Tabla 15: Control dimensional de las probetas tipo 4

El ensayo de tracción Off-Axis se realizará conforme a la norma internacional ASTM D3039/D3039M [2], del mismo modo que los ensayos de tracción en la dirección paralela y perpendicular a la fibra anteriores (Figura 49). La máquina de ensayos a emplear también será la misma, la Máquina Universal de Ensayos Zwick Z100 BS1.



Figura 49: Configuración de ensayo probetas Off-Axis

4.3.1 Ensayo de las probetas de tipología 1

El ensayo de la tipología 1 se ha realizado a unas condiciones ambientales de 24.9 °C de temperatura y 50.4 % de humedad relativa.

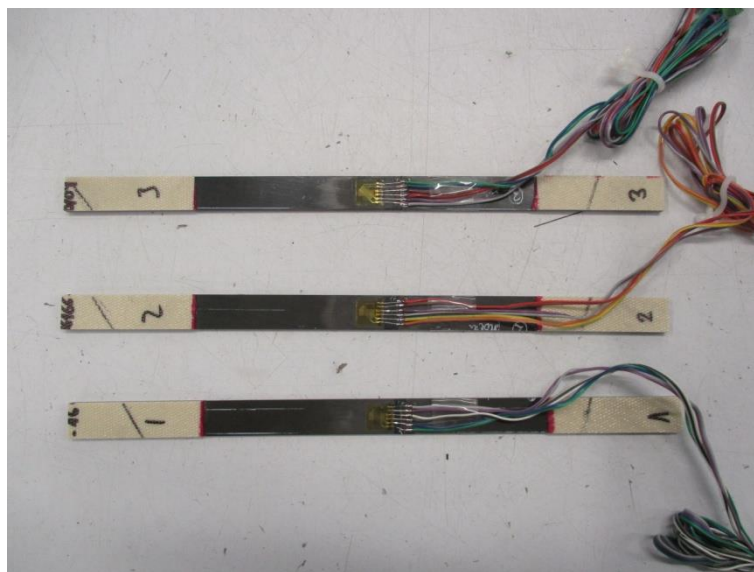


Figura 50: Probetas Off-Axis Tipología 1 antes de ser ensayadas



Figura 51: Probetas Off-Axis Tipología 1 tras ser ensayadas

Se puede observar en la Figura 51 como la rotura de las probetas se producen en un área cercana a la zona de influencia del tacón siendo más acentuada en la probeta 2.

Los resultados obtenidos tras realizar los ensayos se muestran en la Tabla 16:

Nº	$F_{m\acute{a}x}$ (N)	$\sigma_{xx\ m\acute{a}x}$ (MPa)	Distancia de la rotura al tacón (mm)
1	6698	390	6.6
2	7006	403	1.5
3	6696	396	8.5

Tabla 16: Resultados individuales de las probetas Off-Axis Tipología 1

Dónde:

$\sigma_{xx\ m\acute{a}x}$ es la tensión longitudinal máxima soportada por la probeta y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\sigma_{xx\ m\acute{a}x} = F_{m\acute{a}x} / A \quad (15)$$

Para la distancia de rotura al tacón se ha considerado la mínima distancia de las dos posibles.

Con los resultados de las probetas de forma individual se realiza un estudio estadístico con objeto de comprobar la representatividad de los resultados.

Series n=3	$F_{\text{máx}}$ (N)	$\sigma_{xx \text{ máx}}$ (MPa)
min	6696	390
máx	7004	403
Valor medio	6799	396
s	177	6,5
cv%	2,60	1,64

Tabla 17: Valores medios de las probetas Off-Axis Tipología 1

Como se puede observar en la Tabla 17, los resultados son muy uniformes obteniendo un coeficiente de variación para la fuerza máxima de 2.60% y 1.64% para la tensión máxima.

4.3.2 Ensayo de las probetas de tipología 2

En ensayo de la tipología 2 se ha realizado a unas condiciones ambientes de la sala de 25.0 °C de temperatura y 50.1 % de humedad relativa.

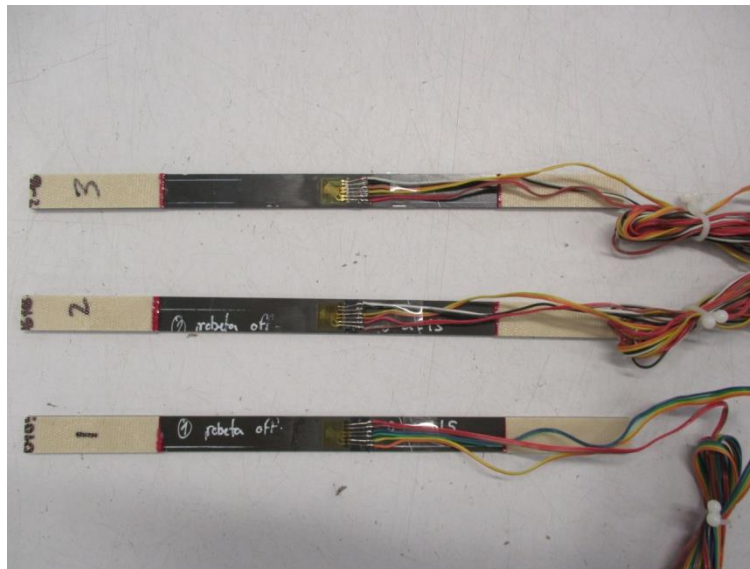


Figura 52: Probetas Off-Axis Tipología 2 antes de ser ensayadas



Figura 53: Probetas Off-Axis Tipología 2 tras ser ensayadas

Se puede observar en la Figura 53 como la roturas de la probetas 1 y 2 se producen en una región cercana a la zona del tacón, mientras que en la probeta 3 la rotura parte de este.

Los resultados obtenidos tras realizar los ensayos se muestran en la Tabla 18:

Nº	$F_{\text{máx}}$ (N)	$\sigma_{xx \text{ máx}}$ (MPa)	Distancia de la rotura al tacón (mm)
1	4569	263	6.2
2	4849	277	6.8
3	4729	275	0

Tabla 18: Resultados individuales de las probetas Off-Axis Tipología 2

Con los resultados de las probetas de forma individual se realiza un estudio estadístico con objeto de comprobar la representatividad de los resultados.

Series n=3	$F_{\text{máx}}$ (N)	$\sigma_{xx \text{ máx}}$ (MPa)
min	4569	263
máx	4849	277
Valor medio	4716	272
s	140,7	7,47
cv%	2,98	2,74

Tabla 19: Valores medios de las probetas Off-Axis Tipología 2

En la Tabla 19 se puede observar que los resultados obtenidos son muy similares siendo el coeficiente de variación para la fuerza máxima de 2,98% y 2,74% para la tensión máxima.

4.3.3 Ensayo de las probetas de tipología 3

Las condiciones ambientales de la sala durante el ensayo de la tipología 3 ha sido de 23.8 °C de temperatura y 49.1 % de humedad relativa.

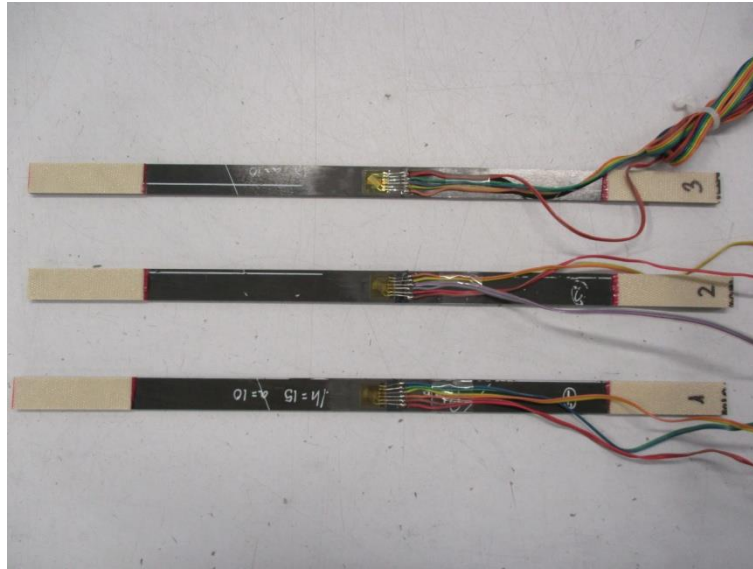


Figura 54: Probetas Off-Axis Tipología 3 antes de ser ensayadas



Figura 55: Probetas Off-Axis Tipología 3 tras ser ensayadas

En la Figura 55 se aprecia como la rotura de las tres probetas es semejante produciéndose en una zona cercana al tacón.

Los resultados obtenidos tras realizar los ensayos se muestran en la Tabla 20:

Nº	$F_{\text{máx}}$ (N)	$\sigma_{xx \text{ máx}}$ (MPa)	Distancia de la rotura al tacón (mm)
1	7322	424	13,6
2	7171	416	6,4
3	6970	410	11,1

Tabla 20: Resultados individuales de las probetas Off-Axis Tipología 3

Con los resultados individuales de las probetas se realiza un estudio estadístico con objeto de comprobar la representatividad de los resultados.

Series n=3	$F_{\text{máx}}$ (N)	$\sigma_{xx \text{ máx}}$ (MPa)
min	6970	410
máx	7322	424
Valor medio	7154	416
s	176,3	6,98
cv%	2,46	1,68

Tabla 21: Valores medios de las probetas Off-Axis Tipología 3

Conforme a la Tabla 21 se observa como los resultados obtenidos tras los ensayos son muy parejos obteniendo un coeficiente de variación para la fuerza máxima de 2,46% y 1,68% para la tensión de rotura.

4.3.4 Ensayo de las probetas de tipología 4

Las condiciones ambientales para el ensayo de la tipología 4 fue de 25.0 °C de temperatura y 49.3 % de humedad relativa.

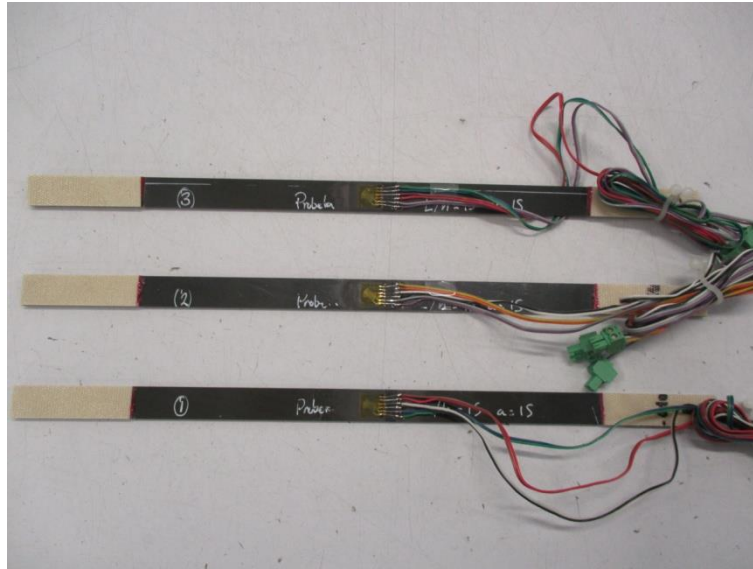


Figura 56: Probetas Off-Axis Tipología 4 antes de ser ensayadas

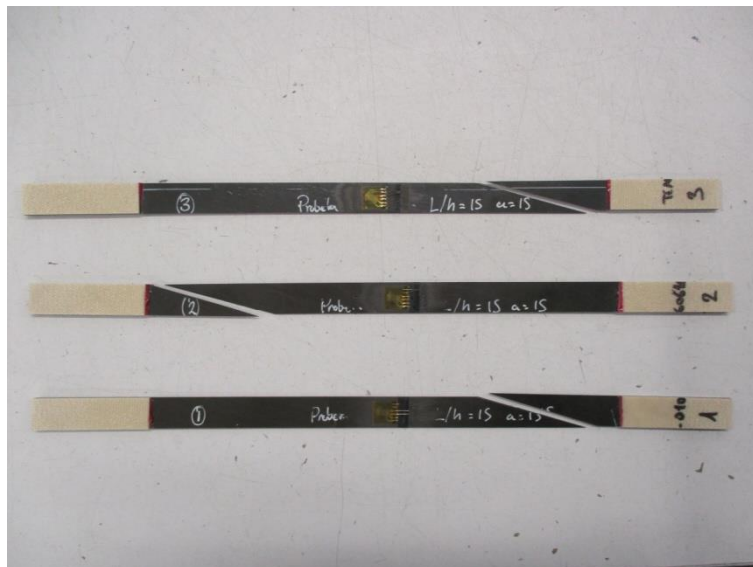


Figura 57: Probetas Off-Axis Tipología 4 tras ser ensayadas

En la Figura 57 se puede apreciar como la roturas de las tres probetas ocurre en una región cercana al tacón siendo más marcado en la probeta 2.

Los resultados obtenidos tras realizar los ensayos se muestran en la Tabla 22:

Nº	$F_{\text{máx}}$ (N)	$\sigma_{xx \text{ máx}}$ (MPa)	Distancia de la rotura al tacón (mm)
1	4531	265	11,3
2	4267	246	3,1
3	4622	276	5,3

Tabla 22: Resultados individuales de las probetas Off-Axis Tipología 4

Con los resultados de las probetas de forma individual se realiza un estudio estadístico con objeto de comprobar la representatividad de los resultados.

Series n=3	$F_{\text{máx}}$ (N)	$\sigma_{xx \text{ máx}}$ (MPa)
min	4267	246
máx	4622	276
Valor medio	4473	262
s	184,9	14,849
cv%	4,13	5,67

Tabla 23: Valores medios de las probetas Off-Axis Tipología 4

Como se puede observar en la Tabla 23, aun siendo los resultados que más variación tienen de los ensayos Off-Axis, son muy uniformes teniendo un coeficiente de variación para la fuerza máxima de 4,13% y 5,67 % para la tensión máxima.

5. EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS

Una vez hemos realizado todos los ensayos necesarios para este proyecto sobre cada una de las tipologías de probetas cabe reflexionar sobre los resultados que se han obtenido antes de introducirnos de lleno con el cálculo de las propiedades a cortadura del material (Tabla 24).

Tipología	Ratio	θ	$F_{m\acute{a}x}$ (N)	Desviación estándar $F_{m\acute{a}x}$	$\sigma_{xx\ m\acute{a}x}$ (MPa)	Desviación estándar $\sigma_{xx\ m\acute{a}x}$
1	10	10°	6799	2,60	396	1,64
2	10	15°	4716	2,98	272	2,74
3	15	10°	7154	2,46	416	1,68
4	15	15°	4473	4,13	262	5,67

Tabla 24: Resumen resultados obtenidos para las probetas Off-Axis

En primer lugar podemos observar cómo tanto la fuerza máxima como la tensión que soportan las probetas con una orientación de fibras de 10° (tipologías 1 y 3) es muy superior a la fuerza y tensión resistidas por las probetas con una orientación de fibras de 15° (tipologías 2 y 4), aproximadamente un 50% superior. Este hecho era previsible ya que cuanto mayor es el ángulo de orientación de las fibras en el laminado menor es la carga soportada por estas y mayor porcentaje de la carga es soportada por la matriz, como se ilustra en el gráfico de la Figura 58, dónde se representa el criterio de fallo de Tsai-Hill [18] según la orientación de las fibras, dónde la relación entre la resistencia a tracción y la resistencia a cortadura de los ejes de ortotropía (X_T/S) toma el valor 27, y la relación entre tensiones a tracción (X_T/Y_T) toma el valor 47 característicos del material empleado en este trabajo.

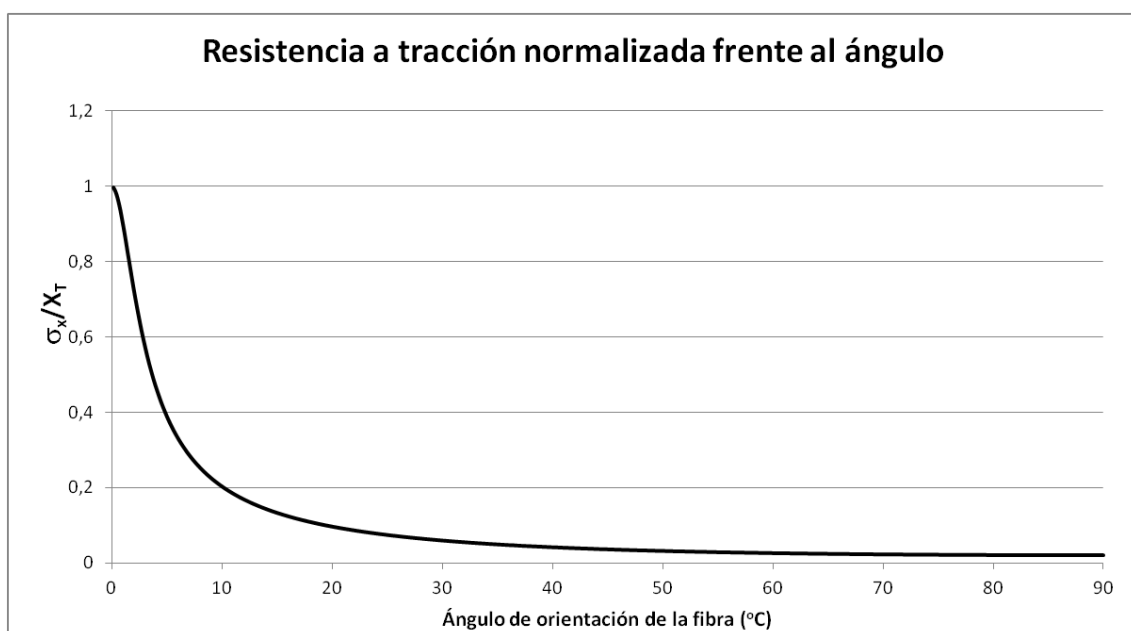


Figura 58: Resistencia a tracción normalizada frente al ángulo de orientación de las fibras

En el gráfico se puede ver como decae bruscamente la resistencia a tracción del laminado cuando aumenta el ángulo de orientación de la fibra.

Por otro lado observamos como para las tipologías 1 y 3 la tensión de rotura es muy similar a como cabía esperar según lo comentado anteriormente. Pero además las probetas con un ratio mayor soportan algo más de carga 416 MPa (tipología 3) frente a 396 MPa (tipología 1), la razón de esto es que al aumentar el ratio del espécimen y tener una probeta más esbelta se minimizan las deformaciones tangenciales uno de los problemas asociados al ensayo como se apuntaba en los artículos [3, 4, 15] reduciendo los concentradores de tensiones cerca de los tacones.

Por último comentar que, como se pretendía comprobar, al aumentar el ratio de las probetas la distancia de la rotura a los tacones aumenta, no observándose ninguna rotura en el tacón para las probetas de ratio 15.

5.1 Análisis del módulo a cortadura G_{12}

Como se explicó anteriormente, para el cálculo de G_{12} , hay dos maneras de proceder, la primera consistiría a partir de la matriz de flexibilidad particularizada para el caso de tensión plana y un material ortótropo fuera de los ejes de ortotropía, obtener una relación entre las constantes del material.

De este modo, del término \bar{S}_{11} de la matriz de flexibilidad y de la igualdad $\bar{S}_{11} = \frac{1}{E_x}$, se consigue una relación sencilla para la obtención del módulo a cortadura (17), el valor de E_x se obtiene de la lectura de una banda orientada según el eje de la probeta (eje de carga) y de la carga aplicada (16).

$$E_{xx} = F/A * \varepsilon_{xx} \quad (16)$$

$$G_{12} = \frac{(\sin \theta)^2 (\cos \theta)^2}{\frac{1}{E_x} - \frac{(\cos \theta)^4}{E_{11}} - \frac{(\sin \theta)^4}{E_{22}} + \frac{2\nu_{12} (\sin \theta)^2 (\cos \theta)^2}{E_{11}}} \quad (17)$$

Sin embargo este procedimiento es muy susceptible a errores, debido a la necesidad de calcular las propiedades de rigidez del material E_x , E_{11} , E_{22} y el coeficiente de Poisson ν_{12} , arrastrando la incertidumbre así como los posibles errores en la realización del ensayo al cálculo de la rigidez a cizalladura.

Por esta razón, en este trabajo, se opta por calcular el módulo a cizalladura de forma directa sin que intervengan las propiedades del material. Aplicando la relación entre tensión y deformación tangencial:

$$G_{12} = \frac{\sigma_{12}}{\gamma_{12}} \quad \sigma_{12} = -\frac{F}{A} \sin \theta \cos \theta \quad (18)$$

Este es el motivo por el cual se han empleado bandas extensométricas triaxiales en el ensayo Off-Axis dado que estas eran necesarias para medir la deformación tangencial de la probeta.

Destacar que aunque la precisión a la hora del cálculo del módulo a cortadura es mayor con el método directo aún sigue siendo insuficiente ya que como se recoge en los estudios [12] [15] los errores que se comenten pueden ser superiores al 50% para probetas de ratio $L/2h < 10$. En base a esto, una vez calculado el módulo de cizalladura intralaminar, se le aplicará un factor corrector [15], de este modo se obtendrán dos valores del módulo de cortadura, un valor aparente G_{12}^{apa} y un valor corregido más cercano al real G_{12}^{cor} , además a modo comparativo también se calculará el módulo a partir de la igualdad $\bar{S}_{11} = \frac{1}{E_x}$, que denominaremos como G_{12}^* , que a su vez ajustaremos mediante un factor de corrección [7].

El primer factor de corrección para el módulo de cortadura intralaminar que vamos a emplear en este trabajo es el propuesto por Pindera y Herakovich [15], que se basa en la solución del problema de Pagano [12] (Figura 14), ya que para ratios mayores de 6 la solución de este problema es una buena aproximación del problema con condiciones de contorno de empotramiento [6].

El método para calcular el factor de corrección y G_{12}^{cor} , es un proceso iterativo que se esquematiza en el Esquema 1.

- Con los datos geométricos de la probeta provenientes del control dimensional de las probetas, las propiedades de rigidez del material E_{11} , E_{22} y u_{12} obtenidos de los ensayos de caracterización de tracción a 0° y 90° , y con los datos del ensayo Off-Axis, se determinan γ_{12} y σ_{12}^{apa} en el centro de la probeta.

$$\sigma_{12}^{apa} = -\sigma_x \sin \theta \cos \theta \quad (19)$$

- Una vez obtenidos γ_{12} y σ_{12}^{apa} se calcula el módulo de cortadura.

$$G_{12}^{apa} = \frac{\sigma_{12}^{apa}}{\gamma_{12}} \quad (20)$$

- Posteriormente se calcula G_{12}^{cor} mediante la siguiente expresión:

$$G_{12}^{cor} = \frac{G_{12}^{apa}}{1 - \frac{2}{3}\eta} \left(1 - \beta \frac{\cos^2\theta - \sin^2\theta}{\sin\theta \cos\theta} \right) \quad (21)$$

Dónde:

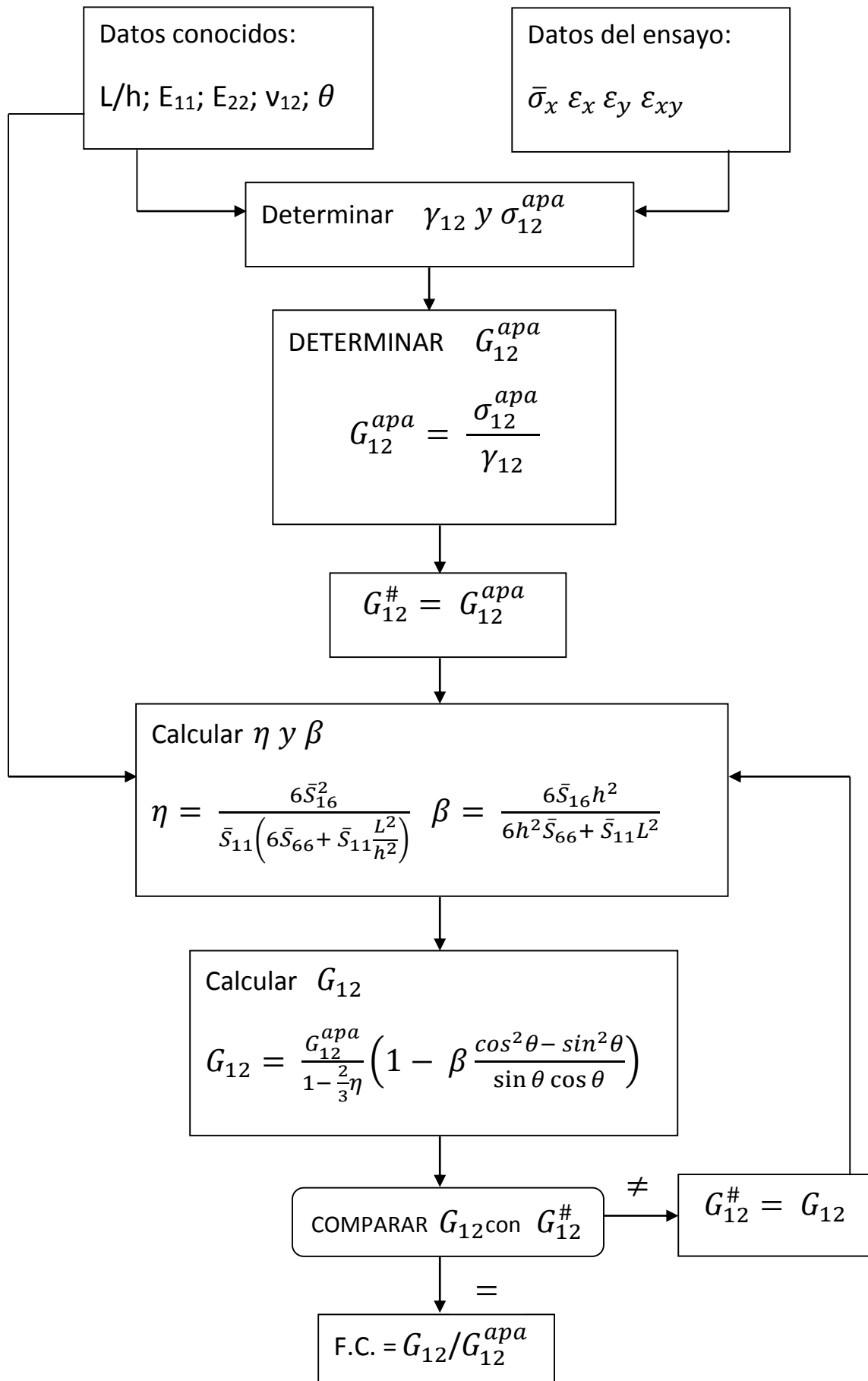
$$\eta = \frac{6\bar{S}_{16}^2}{\bar{S}_{11} \left(6\bar{S}_{66} + \bar{S}_{11} \frac{L^2}{h^2} \right)} \quad (22)$$

$$\beta = \frac{6\bar{S}_{16}h^2}{6h^2\bar{S}_{66} + \bar{S}_{11}L^2} \quad (23)$$

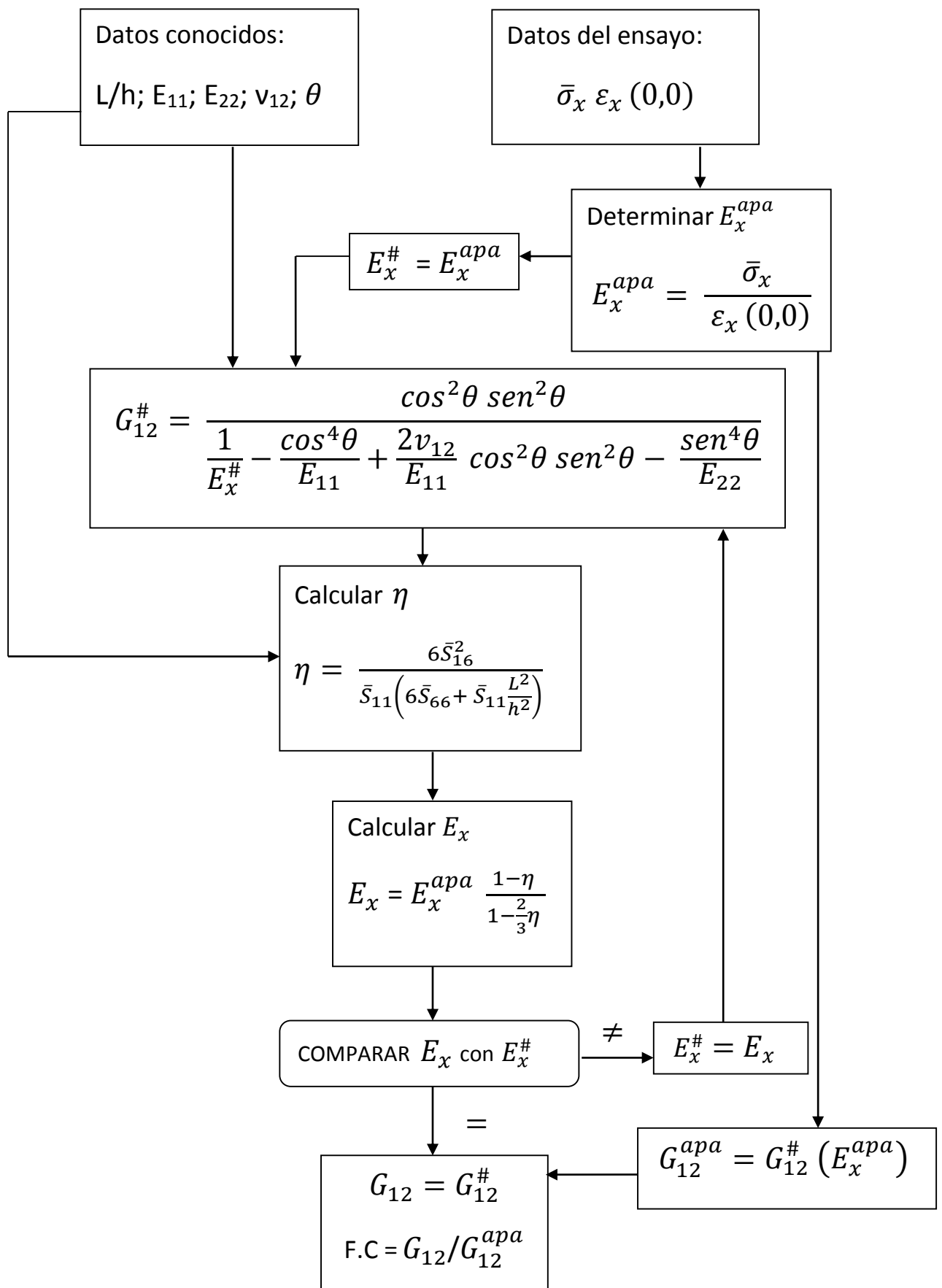
- Finalmente se compara G_{12}^{cor} con G_{12} antes de corregir. Si la diferencia no es suficientemente pequeña, se itera, calculándose un nuevo G_{12}^{cor} a partir del G_{12}^{cor} anterior. Si por el contrario la diferencia es pequeña se calcula el factor de corrección con la siguiente expresión:

$$F.C. = G_{12}/G_{12}^{apa} \quad (24)$$

El cálculo del segundo factor de corrección, sigue un procedimiento análogo al anterior, salvo por el hecho de que se aplica sobre el Módulo de Young en la dirección longitudinal del laminado, E_x . El método iterativo para la evaluación de este factor se resume en el Esquema 2.



Esquema 1: Cálculo del factor de corrección sobre G_{12} [7]



Esquema 2: Cálculo del factor de corrección sobre E_{xx} [7]

5.1.1 Cálculo de G12 para la tipología de probetas 1

Una vez se ha explicado el método de cálculo a emplear para el módulo de cortadura intralaminar se va a proceder a representar la evolución de σ_{12} frente a γ_{12} cuya pendiente se corresponde con el módulo de cizalladura.

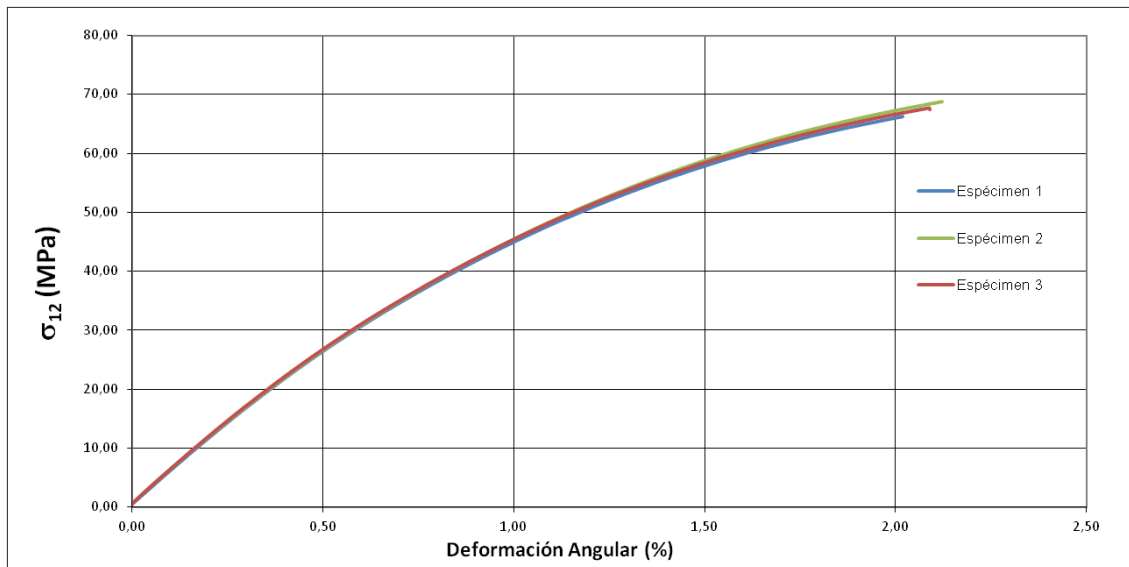


Figura 59: Tensión de cizalladura frente a deformación angular tipología 1

Como se puede observar en el gráfico (Figura 59) la evolución es claramente no lineal por lo cual el módulo no se mantendrá constante, variará dependiendo de los puntos que se tomen para calcularlo disminuyendo conforme aumenta la deformación de la probeta y la tensión que soporta. En este trabajo nos centraremos en el cálculo del módulo tangente para pequeñas deformaciones, dónde la evolución es prácticamente lineal y además calcularemos un módulo secante que nos dará una idea de la evolución media del módulo de cizalladura. El intervalo de variación para γ_{12} empleado en el cálculo del módulo tangente será de entre 0,01% y 0,20% y para el módulo secante 0,15% y 0,55%.

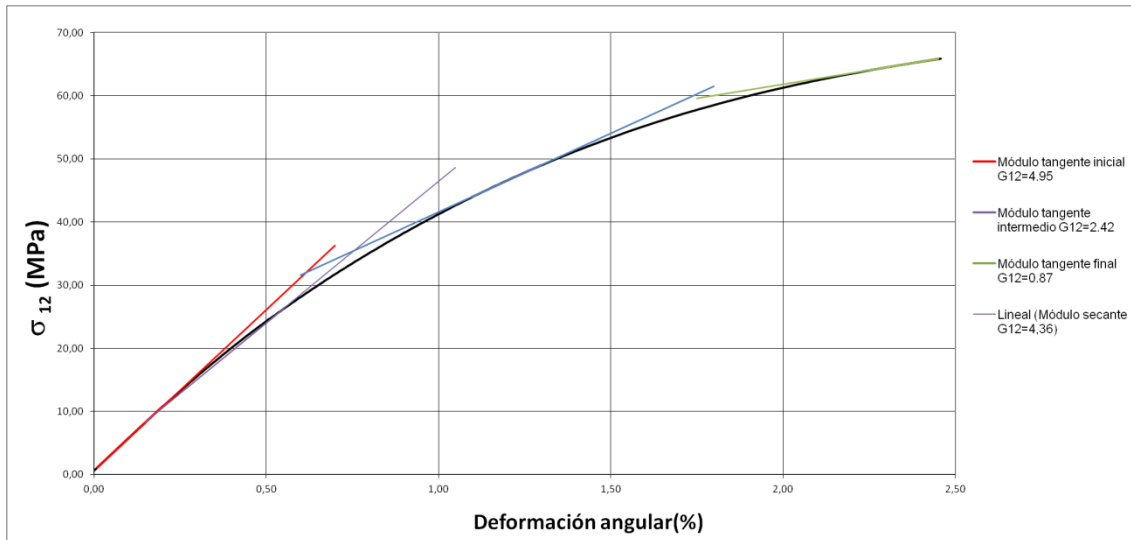


Figura 60: Ejemplo de evolución del módulo de cizalladura

Los resultados individuales obtenidos para el módulo tangente de cortadura son los recogidos en la Tabla 25:

Probeta Nº	Bandas triaxiales		Medida de E_x	
	G_{12}^{apa} (GPa)	G_{12}^{cor} (GPa)	G_{12}^{*apa} (GPa)	G_{12}^{*cor} (GPa)
1	5,59	4,88	4,52	4,23
2	5,62	4,91	4,70	4,40
3	5,69	4,97	5,02	4,71

Tabla 25: Valores individuales del módulo de cizalladura tangencial tipología 1

Con los resultados de las probetas de forma individual se realiza un estudio estadístico con objeto de comprobar la representatividad de los resultados.

Series n=3	Bandas triaxiales		Medida de E_x	
	G_{12}^{apa} (GPa)	G_{12}^{cor} (GPa)	G_{12}^{*apa} (GPa)	G_{12}^{*cor} (GPa)
min	5,59	4,88	4,52	4,23
máx	5,69	4,97	5,02	4,71
Valor medio	5,63	4,92	4,75	4,45
s	0,05	0,05	0,25	0,24
cv%	0,91	0,95	5,31	5,50

Tabla 26: Valores medios del módulo de cizalladura tangencial tipología 1

Observando la Tabla 26, se puede comprobar cómo los resultados son muy uniformes teniendo un coeficiente de variación para el módulo aparente y corregido menor a la unidad. Además se

pone de manifiesto el hecho que el G_{12} calculado a partir de las propiedades del material tiene una mayor dispersión (superior 5) 5,31% frente a 0,91%.

A continuación se repiten los cálculos para el módulo secante. Los datos individuales se muestran en la Tabla 27.

Probeta Nº	Bandas triaxiales		Medida de E_x	
	G_{12}^{apa} (GPa)	G_{12}^{cor} (GPa)	G_{12}^{*apa} (GPa)	G_{12}^{*cor} (GPa)
1	4,90	4,26	4,12	3,84
2	4,89	4,25	4,13	3,85
3	4,92	4,28	4,41	4,12

Tabla 27: Valores individuales del módulo de cizalladura secante tipología 1

Con los resultados de las probetas de forma individual se realiza un estudio estadístico con objeto de comprobar la representatividad de los resultados.

Series n=3	Bandas triaxiales		Medida de E_x	
	G_{12}^{apa} (GPa)	G_{12}^{cor} (GPa)	G_{12}^{*apa} (GPa)	G_{12}^{*cor} (GPa)
min	4,89	4,25	4,12	3,84
máx	4,92	4,28	4,41	4,12
Valor medio	4,90	4,26	4,22	3,93
s	0,01	0,01	0,17	0,16
cv%	0,30	0,31	4,00	4,14

Tabla 28: Valores medios del módulo de cizalladura secante tipología 1

Como era de esperar, los valores del módulo de cortadura secante son inferiores a los valores obtenidos para el módulo tangente. Además hay que destacar que los valores de dispersión obtenidos para el módulo secante son menores que para el tangente ya que en el primer caso se toma un valor promedio que reduce cualquier error puntual al ser las curvas tan semejantes (Figura 59).

5.1.2 Cálculo de G_{12} para la tipología de probetas 2

La Figura 61 muestra una gráfica de la evolución de σ_{12} frente a γ_{12} para los tres especímenes de la tipología de probetas 2.

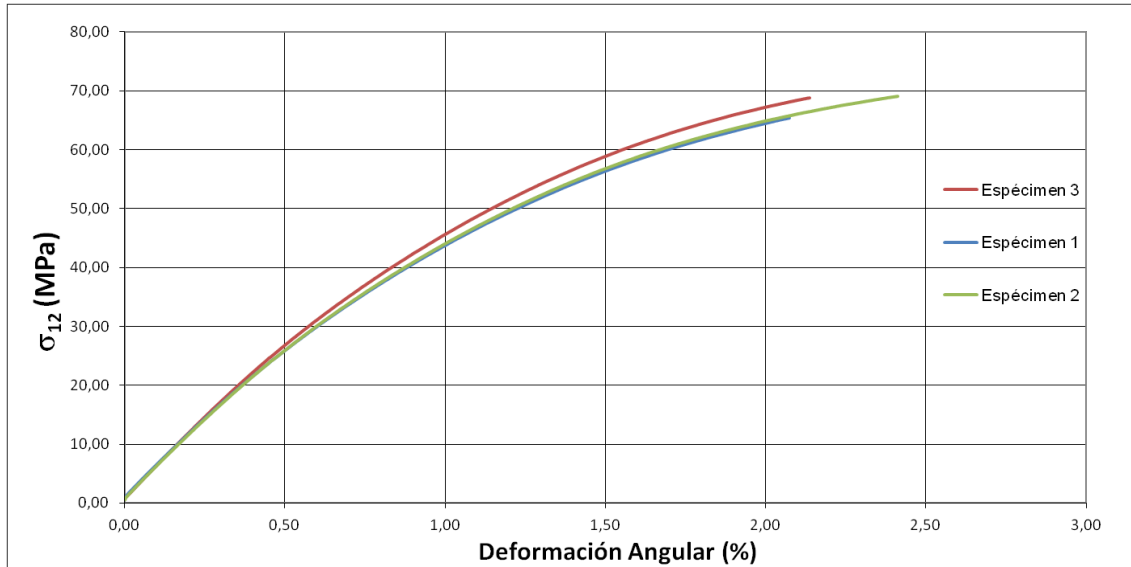


Figura 61: Tensión de cizalladura frente a deformación angular tipología 2

Los resultados individuales para obtenidos para el módulo tangente de cortadura son los recogidos en la Tabla 29:

Probeta N ^o	Bandas triaxiales		Medida de E_x	
	G_{12}^{apa} (GPa)	G_{12}^{cor} (GPa)	G_{12}^* (GPa)	G_{12}^{*cor} (GPa)
1	5,42	5,09	4,94	4,75
2	5,44	5,11	5,05	4,85
3	5,58	5,24	5,07	5,07

Tabla 29: Valores individuales del módulo de cizalladura tangencial tipología 2

Con los resultados de las probetas de forma individual se realiza un estudio estadístico con objeto de comprobar la representatividad de los resultados.

Series n=3	Bandas triaxiales		Medida de E_x	
	G_{12}^{apa} (GPa)	G_{12}^{cor} (GPa)	G_{12}^* (GPa)	G_{12}^{*cor} (GPa)
min	5,42	5,09	4,94	4,75
máx	5,58	5,24	5,27	5,07
Valor medio	5,48	5,14	5,09	4,89
s	0,09	0,08	0,17	0,16
cv%	1,61	1,62	3,33	3,37

Tabla 30: Valores medios del módulo de cizalladura tangencial tipología 2

En la Tabla 30, se observa cómo los resultados tienen poca dispersión y se pueden considerar uniformes. Por otro lado se mantiene el hecho de que el G_{12} calculado a partir de las propiedades del material tiene una mayor dispersión, aproximadamente del doble para este caso.

A continuación se repiten los cálculos para el módulo secante. Los datos individuales se muestran en la Tabla 31.

Probeta Nº	Bandas triaxiales		Medida de E_x	
	G_{12}^{apa} (GPa)	G_{12}^{cor} (GPa)	G_{12}^* (GPa)	G_{12}^{*cor} (GPa)
1	4,70	4,41	4,31	4,14
2	4,75	4,45	4,45	4,27
3	4,94	4,64	4,75	4,56

Tabla 31: Valores individuales del módulo de cizalladura secante tipología 2

Con los resultados de las probetas de forma individual se realiza un estudio estadístico con objeto de comprobar la representatividad de los resultados.

Series n=3	Bandas triaxiales		Medida de E_x	
	G_{12}^{apa} (GPa)	G_{12}^{cor} (GPa)	G_{12}^{*apa} (GPa)	G_{12}^{*cor} (GPa)
min	4,70	4,41	4,31	4,14
máx	4,90	4,64	4,75	4,56
Valor medio	4,80	4,50	4,50	4,32
s	0,13	0,12	0,22	0,21
cv%	2,70	2,70	4,91	4,97

Tabla 32: Valores medios del módulo de cizalladura secante tipología 2

Los valores del módulo de cortadura secante son inferiores a los valores obtenidos para el módulo tangente, como cabría esperar. Adicionalmente reseñar que se sigue comprobando que la dispersión de G_{12}^{*apa} es mayor que la calculada mediante las bandas triaxiales (32).

5.1.3 Cálculo de G_{12} para la tipología de probetas 3

La evolución de σ_{12} frente a γ_{12} para los tres especímenes de la tipología de probetas 3 están representados en la Figura 62.

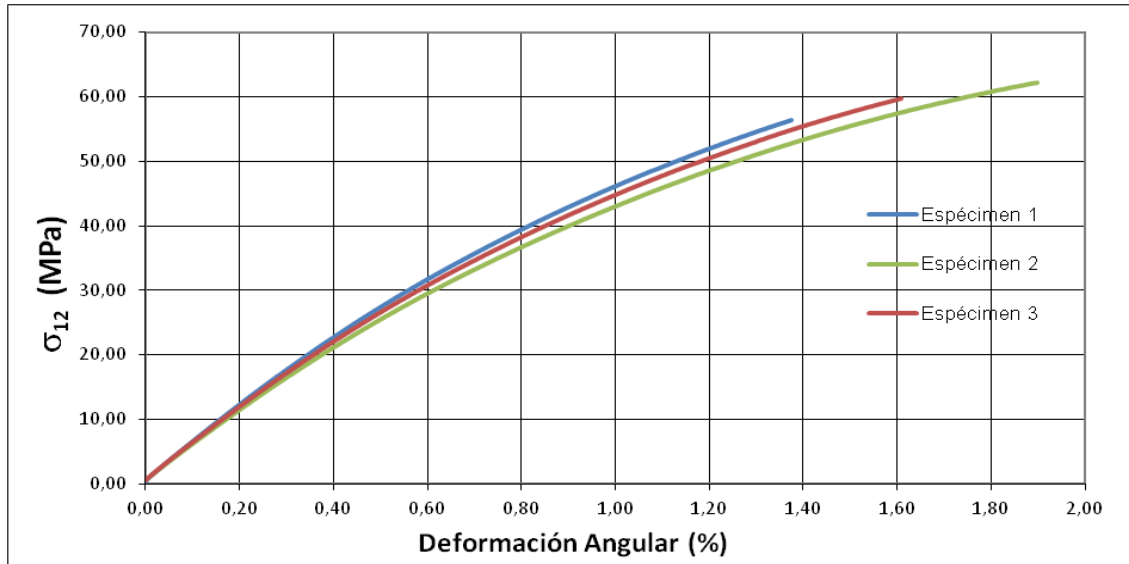


Figura 62: Tensión de cizalladura frente a deformación angular tipología 3

Los resultados individuales obtenidos para el módulo tangente de cortadura son los recogidos en la Tabla 33:

Probeta Nº	Bandas triaxiales		Medida de E_x	
	G_{12}^{apa} (GPa)	G_{12}^{cor} (GPa)	G_{12}^* (GPa)	G_{12}^{*cor} (GPa)
1	5,87	5,52	5,31	5,16
2	5,43	5,10	4,72	4,57
3	5,66	5,32	4,81	4,67

Tabla 33: Valores individuales del módulo de cizalladura tangencial tipología 3

Con los resultados de las probetas de forma individual se realiza un estudio estadístico con objeto de comprobar la representatividad de los resultados.

Series n=3	Bandas triaxiales		Medida de E_x	
	G_{12}^{apa} (GPa)	G_{12}^{cor} (GPa)	G_{12}^* (GPa)	G_{12}^{*cor} (GPa)
min	5,43	5,10	4,72	4,57
máx	5,87	5,52	5,31	5,16
Valor medio	5,65	5,31	4,95	4,80
s	0,22	0,21	0,32	0,32
cv%	3,93	4,01	6,47	6,57

Tabla 34: Valores medios del módulo de cizalladura tangencial tipología 3

Si observamos la Tabla 34, se puede comprobar cómo los resultados aun teniendo más dispersión que la tipología 1 siguen siendo muy uniformes teniendo un coeficiente de variación para el módulo aparente y corregido del orden de 4. Además se cumple el hecho que el G_{12} calculado a partir de las propiedades del material tiene una mayor dispersión, 4% frente a 6,5%.

A continuación se repiten los cálculos para el módulo secante. Los datos individuales se muestran en la Tabla 35.

Probeta Nº	Bandas triaxiales		Medida de E_x	
	G_{12}^{apa} (GPa)	G_{12}^{cor} (GPa)	G_{12}^* (GPa)	G_{12}^{*cor} (GPa)
1	5,03	4,72	4,63	4,49
2	4,67	4,37	4,14	4,01
3	4,86	4,55	4,25	4,11

Tabla 35: Valores individuales del módulo de cizalladura secante tipología 3

Con los resultados de las probetas de forma individual se realiza un estudio estadístico con objeto de comprobar la representatividad de los resultados.

Series n=3	Bandas triaxiales		Medida de E_x	
	G_{12}^{apa} (GPa)	G_{12}^{cor} (GPa)	G_{12}^* (GPa)	G_{12}^{*cor} (GPa)
min	4,67	4,37	4,14	4,01
máx	5,03	4,72	4,63	4,49
Valor medio	4,85	4,55	4,34	4,20
s	0,18	0,17	0,26	0,25
cv%	3,76	3,82	5,93	6,02

Tabla 36: Valores medios del módulo de cizalladura secante tipología 3

Previsiblemente, los valores del módulo de cortadura secante son menores a los valores obtenidos para el módulo tangente (Tabla 36). Finalmente reseñar que el coeficiente de variación para G_{12}^* sigue siendo superior cuando lo comparamos con el obtenido a partir de la lectura de las bandas extensométricas, 4% respecto a 6%.

5.1.4 Cálculo de G_{12} para la tipología de probetas 4

La evolución de σ_{12} frente a γ_{12} para los tres especímenes de la tipología de probetas 4 están representados en la Figura 63.

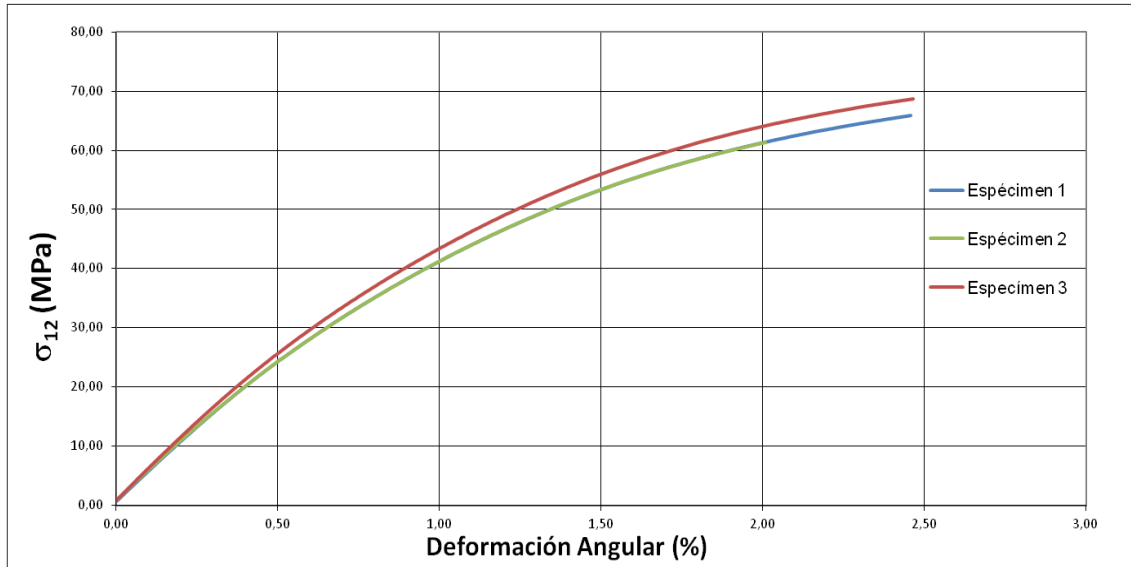


Figura 63: Tensión de cizalladura frente a deformación angular tipología 4

Los resultados individuales obtenidos para el módulo tangente de cortadura son los recogidos en la Tabla 37:

Probeta N°	Bandas triaxiales		Medida de E_x	
	G_{12}^{apa} (GPa)	G_{12}^{cor} (GPa)	G_{12}^* (GPa)	G_{12}^{*cor} (GPa)
1	5,10	4,95	4,61	4,52
2	5,05	4,91	4,57	4,49
3	5,36	5,21	4,92	4,83

Tabla 37: Valores individuales del módulo de cizalladura tangencial tipología 4

Con los resultados de las probetas de forma individual se realiza un estudio estadístico con objeto de comprobar la representatividad de los resultados.

Series n=3	Bandas triaxiales		Medida de E_x	
	G_{12}^{apa} (GPa)	G_{12}^{cor} (GPa)	G_{12}^* (GPa)	G_{12}^{*cor} (GPa)
min	5,05	4,91	4,57	4,49
máx	5,36	5,21	4,92	4,83
Valor medio	5,17	5,02	4,70	4,61
s	0,17	0,16	0,19	0,19
cv%	3,27	3,28	4,06	4,08

Tabla 38: Valores medios del módulo de cizalladura tangencial tipología 4

Observando la Tabla 38, se puede comprobar cómo los resultados son similares a las tipologías anteriores manteniéndose muy uniformes, teniendo un coeficiente de variación para el módulo aparente y corregido del orden de 3,5%. Además se cumple que el G_{12} calculado a partir de las propiedades del material tiene ligeramente mayor diseminación.

A continuación se repiten los cálculos para el módulo secante. Los datos individuales se muestran en la Tabla 39.

Probeta Nº	Bandas triaxiales		Medida de E_x	
	G_{12}^{apa} (GPa)	G_{12}^{cor} (GPa)	G_{12}^* (GPa)	G_{12}^{*cor} (GPa)
1	4,49	4,36	4,08	4,00
2	4,45	4,32	4,08	4,00
3	4,70	4,56	4,35	4,27

Tabla 39: Valores individuales del módulo de cizalladura secante tipología 4

Con los resultados de las probetas de forma individual se realiza un estudio estadístico con objeto de comprobar la representatividad de los resultados.

Series n=3	Bandas triaxiales		Medida de E_x	
	G_{12}^{apa} (GPa)	G_{12}^{cor} (GPa)	G_{12}^* (GPa)	G_{12}^{*cor} (GPa)
min	4,45	4,32	4,08	4,00
máx	4,70	4,56	4,35	4,27
Valor medio	4,54	4,41	4,17	4,09
s	0,14	0,13	0,15	0,15
cv%	2,99	2,99	3,70	3,72

Tabla 40: Valores medios del módulo de cizalladura secante tipología 4

Como se venía comprobando y se ha explicado anteriormente, los valores del módulo de cortadura secante son menores a los valores obtenidos para el módulo tangente. Por otro lado destacar que los valores de dispersión obtenidos en este caso para el módulo secante son inferiores que para el módulo tangente. Finalmente reseñar que el coeficiente de variación para G_{12}^* sigue siendo superior cuando lo comparamos con el obtenido a partir de la lectura de las bandas extensométricas 3% respecto a 3,7%, aunque en este caso no está tan evidenciado (Tabla 40).

5.2 Análisis de resultados obtenidos para G_{12}

Tras obtener los valores medios del módulo a cizalladura para las 4 tipologías de probetas, se muestran los resultados de todas las tipologías de forma conjunta con el objetivo de evaluar globalmente los ensayos y obtener las propiedades de rigidez a cortadura del material. Estos

resultados se muestran en la Tabla 41 para los valores del módulo tangente y en la Tabla 42 para los valores del módulo secante.

Tipología	Ratio	θ	Bandas triaxiales		Medida de E_x	
			G_{12}^{apa} (GPa)	G_{12}^{cor} (GPa)	G_{12}^* (GPa)	G_{12}^{*cor} (GPa)
1	10	10°	5,63	4,92	4,75	4,45
2	10	15°	5,48	5,14	5,09	4,89
3	15	10°	5,65	5,31	4,95	4,80
4	15	15°	5,17	5,02	4,70	4,61

Tabla 41: Recopilación valores medios del módulo de cizalladura tangente para todas las tipologías

Tipología	Ratio	θ	Bandas triaxiales		Medida de E_x	
			G_{12}^{apa} (GPa)	G_{12}^{cor} (GPa)	G_{12}^* (GPa)	G_{12}^{*cor} (GPa)
1	10	10°	4,90	4,26	4,22	3,93
2	10	15°	4,80	4,50	4,50	4,32
3	15	10°	4,85	4,55	4,34	4,20
4	15	15°	4,54	4,41	4,17	4,09

Tabla 42: Recopilación valores medios del módulo de cizalladura secante para todas las tipologías

A la vista de los resultados, se observan como los valores obtenidos coincide con el esperado, recogidos por la normal del material ($4,5 \pm 1$ GPa).

Por otro lado queda evidenciado que la evaluación del módulo de cortadura intralaminar mediante el cálculo directo aplicando la relación entre tensión y deformación tangencial es la mejor opción, ya que la dispersión de los resultados por este método es menor y tras aplicar el factor de corrección, los datos tienden a converger al verse reducido el coeficiente de variación del módulo G_{12}^{apa} frente al G_{12}^{cor} . Este hecho no se comprueba para el módulo de cortadura evaluado a partir de las propiedades del material.

Destacar que como cabría prever para los especímenes con un ángulo de orientación de la fibra de 10° (tipologías 1 y 3), los resultados del módulo de cortadura aparente son superiores que para las orientaciones de fibra de 15°, esto es debido a que un menor ángulo de orientación de la fibra hace que la rigidez a tracción en sentido longitudinal de la probeta (E_x) sea mayor y por tanto aumenta el módulo de cortadura aparente.

Otro punto a tratar es cuál es la mejor orientación de las dos ensayadas en este trabajo para evaluar el módulo de cortadura tanto para el valor tangente como el secante. Para dilucidar esta pregunta habría que suponer dos casos:

- En el supuesto que no se emplease el factor de corrección, la orientación que da un valor más próximo al valor teórico del material es la orientación de 15°.
- En el supuesto que sí se emplease el factor de corrección ambas orientaciones 10° y 15° tienen el mismo grado de aproximación al valor real del material. Sin embargo la dispersión de los valores del ensayo es menor para los especímenes con orientación de fibra de 15° lo que haría decantarse por esta última orientación.

Finalmente en cuanto a la elección del ratio a emplear en los especímenes para la evaluación del módulo a cortadura tangencial y secante, también es necesario discernir dos escenarios:

- En el supuesto que no se emplease el factor de corrección, el ratio con el que se obtiene un resultado más próximo al teórico es el ratio 15.
- En el caso que si se emplease el factor de corrección, los dos ratios producen un mismo grado de certeza. Sin embargo la dispersión de los valores del ensayo es menor para los especímenes con un ratio de 10 lo que haría decantarse por este último.

No obstante lo anterior, el número de probetas ensayadas no ha sido lo suficientemente grande como para poder sacar conclusiones de carácter general en relación a la dispersión de resultados. Los comentarios anteriores solamente ponen en evidencia los resultados estadísticos obtenidos para la muestra ensayada.

5.3 Análisis de la resistencia a cortadura S

Puesto que las cargas que actúan sobre un laminado en una aplicación real provocan en general un estado tensional completo en el que aparecen todos los términos del tensor de tensiones; σ_{11} , σ_{22} y σ_{12} para nuestro caso particular. Se hace necesario emplear un criterio de fallo del laminado que relacione las componentes del estado tensional y prediga la carga rotura. De este modo, la evaluación de la tensión de cortadura que provoca el fallo del material se realiza de forma indirecta a partir de los resultados obtenidos de los ensayos.

Los criterios de fallo que se emplearán en este trabajo son:

- Criterio de máxima deformación.
- Criterio de Tsai-Hill [18].
- Criterio de Hashin-Rotem [6].

5.3.1 Criterio de máxima deformación

El criterio de rotura de máxima deformación para materiales compuestos es una extensión del criterio de plastificación para materiales isótropos de Saint-Venant-Poncelet. Según este

criterio, las deformaciones longitudinales y tangenciales en el interior de la lámina no pueden superar unos determinados valores. Si llamamos:

$X_{\varepsilon_t}(X_{\varepsilon_c}) =$ Deformación longitudinal a tracción (o compresión) máxima en la dirección 1

$Y_{\varepsilon_t}(Y_{\varepsilon_c}) =$ Deformación longitudinal a tracción (o compresión) máxima en la dirección 2

$S_\varepsilon =$ Deformación de corte máxima en el plano 1-2.

Las condiciones para que la lámina no rompa son:

- Para esfuerzos longitudinales:

$$\varepsilon_1 < X_{\varepsilon_t} ; \varepsilon_1 > X_{\varepsilon_c} \quad (25)$$

- Para esfuerzos transversales:

$$\varepsilon_2 > Y_{\varepsilon_c} ; \varepsilon_2 < Y_{\varepsilon_t} \quad (26)$$

- Para esfuerzos de cortadura:

$$|\gamma_{máx}| < S_\varepsilon \quad (27)$$

Para determinar las expresiones anteriores del criterio es necesario emplear la ley de comportamiento y suponer un comportamiento elástico-lineal hasta el fallo de la lámina. Con esta suposición la expresión del criterio en tensiones queda:

$$\begin{aligned} \sigma &< \frac{X}{\cos^2 \theta - \nu_{12} \sin^2 \theta} \\ \sigma &< \frac{Y}{\sin^2 \theta - \nu_{21} \cos^2 \theta} \\ \sigma &< \frac{S}{\cos \theta \sin \theta} \end{aligned} \quad (28)$$

5.3.2 Criterio de Tsai-Hill

Hill estableció un criterio de plastificación para materiales anisótropos basado en el de Von Mises cuya validez comprobó para algunos materiales metálicos. Este criterio hace intervenir una serie de parámetros de plastificación F, G, H, L, M y N. Su expresión general es:

$$(G + H)\sigma_x^2 + (F + H)\sigma_y^2 + (F + G)\sigma_z^2 - 2H\sigma_x\sigma_y - 2G\sigma_x\sigma_z - 2F\sigma_y\sigma_z + 2L\tau_{yz}^2 + 2M\tau_{xz}^2 + 2N\tau_{xy}^2 = 1 \quad (29)$$

Si se particularizara este criterio para el caso de materiales isótropos se comprobaría que es enteramente equivalente al de Von Mises. Si se admitiera un comportamiento del material elástico-lineal hasta rotura, el criterio anterior podría ser considerado como un criterio de rotura en el caso de los materiales compuestos. Tsai relacionó los parámetros F, G, H, L, M y N con las

resistencias mecánicas en dirección de las fibras, X, en dirección transversal a ellas, Y, de la resistencia de la lámina en dirección perpendicular a la misma, Z y de la resistencia a cortadura plana, S, e interlaminar S_{xz} y S_{yz} . Para el cálculo de los parámetros Tsai supuso que sobre la lámina actuaban estados de carga simples, de este modo la expresión general del criterio de Tsai-Hill [16] quedaría:

$$\begin{aligned} \frac{1}{X^2} \sigma_x^2 + \frac{1}{Y^2} \sigma_y^2 + \frac{1}{Z^2} \sigma_z^2 - \left(\frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} - \frac{1}{Z^2} \right) \sigma_x \sigma_y - \left(\frac{1}{X^2} + \frac{1}{Z^2} - \frac{1}{Y^2} \right) \sigma_x \sigma_z \\ - \left(\frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2} - \frac{1}{X^2} \right) \sigma_y \sigma_z + \frac{1}{S_{yz}^2} \tau_{yz}^2 + \frac{1}{S_{xz}^2} \tau_{xz}^2 + \frac{1}{S^2} \tau_{xy}^2 = 1 \end{aligned} \quad (30)$$

Si particularizamos la expresión general del criterio para el caso plano de una lámina de fibra unidireccional trabajando fuera de los ejes de ortotropía y admitiendo que $Z=Y$ obtendríamos la siguiente expresión para el criterio de fallo de Tsai-Hill:

$$\frac{\cos^4 \theta}{X^2} + \left(\frac{1}{S^2} - \frac{1}{X^2} \right) \cos^2 \theta \sin^2 \theta + \frac{\sin^4 \theta}{Y^2} = \frac{1}{\sigma^2} \quad (31)$$

5.3.3 Criterio de Hashin-Rotem

Hashin propone que el criterio para predecir el fallo de un material compuesto ha de basarse necesariamente en los mecanismos de fallo del mismo y no ser simplemente una extrapolación de criterios existentes para otros materiales como en los casos anteriores.

Bajo esta idea el autor propuso inicialmente un criterio para un estado biaxial de tensión. Las hipótesis en las que se basan su propuesta son las siguientes:

Consideración separada de los distintos modos de fallo:

- Fallo fibra: a tracción y a compresión
- Fallo de la matriz: a tracción y a compresión

En el modo de fallo de la matriz se consideran las componentes del vector tensión en el plano de fallo como responsables del mismo. La interacción entre las distintas componentes que intervienen en un modo se supone cuadrática. Se utiliza este tipo de interacción por ser sencilla y quedar descartada la interacción lineal [6].

Las expresiones del criterio en ejes principales de ortotropía son las siguientes:

- Fallo de la fibra en tracción (FFT)

$$\sigma_{11} = X_T \quad (32)$$

- Fallo de la fibra en compresión (FFC)

$$|\sigma_{11}| = X_C \quad (33)$$

- Fallo de la matriz en tracción (FMT)

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_T}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 = 1 \quad (34)$$

- Fallo de la matriz en compresión (FMC)

$$\left(\frac{\sigma_{22}}{Y_C}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{12}}{S}\right)^2 = 1 \quad (35)$$

Las expresiones del criterio en ejes cualesquiera son las siguientes:

- Fallo de la fibra en tracción (FFT)

$$\sigma_x = \frac{X_T}{(\cos \theta)^2} \quad (36)$$

- Fallo de la fibra en compresión (FFC)

$$|\sigma_x| = \frac{X_C}{(\cos \theta)^2} \quad (37)$$

- Fallo de la matriz en tracción (FMT)

$$\sigma_x = \frac{1}{\sqrt{\frac{(\sin \theta)^4}{Y_T^2} + \frac{(\sin \theta)^2 (\cos \theta)^2}{S^2}}} \quad (38)$$

- Fallo de la matriz en compresión (FMC)

$$|\sigma_x| = \frac{1}{\sqrt{\frac{(\sin \theta)^4}{Y_C^2} + \frac{(\sin \theta)^2 (\cos \theta)^2}{S^2}}} \quad (39)$$

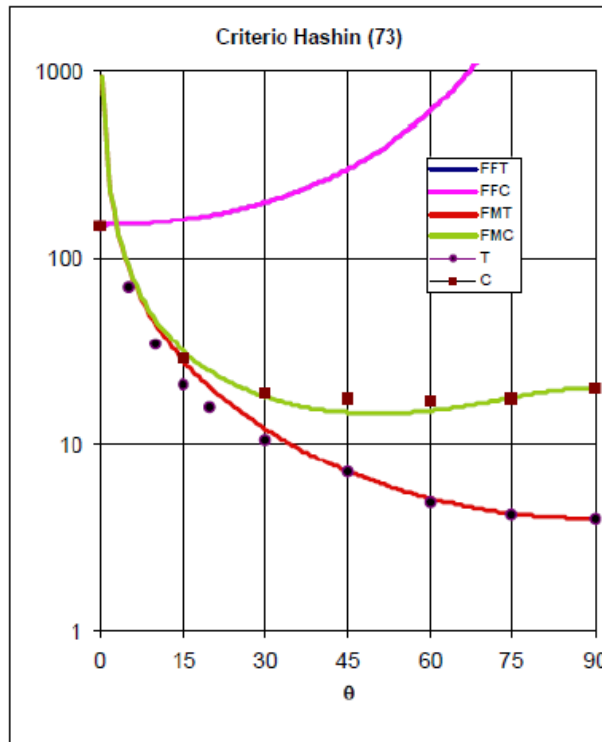


Figura 64: Comparación de los resultados experimentales con la predicción del criterio de Hashin-Rotem [6]

5.4 Cálculo de la resistencia a cortadura

La evaluación de la resistencia a cortadura tras haber obtenido los datos experimentales de los ensayos, se realizará bajo tres hipótesis diferentes del estado tensional del espécimen.

La primera suposición consiste en considerar que la probeta rompe en el centro debido únicamente a un esfuerzo de tensión tangencial pura. Este caso se trataría del problema ideal (Figura 14 a) dónde aun existiendo un acoplamiento entre deformaciones y tensiones tangenciales, está permitida la libre deformación del espécimen por lo que el estado tensional es uniforme (2). Bajo esta hipótesis, pese a existir un estado tensional completo, σ_{11} , σ_{22} y σ_{12} , el fallo de la probeta se provoca exclusivamente por la aplicación de una tensión de cortadura máxima.

La segunda aproximación versaría sobre el problema ideal (Figura 14 a). En esta hipótesis, la tensión tangencial tendría gran influencia sobre la rotura del espécimen sin embargo no sería la única componente del tensor de tensiones involucrada en el fallo. Para poder evaluar cómo se relacionan estas componentes y obtener la tensión que provoca el fallo, se emplearán los criterios de máxima deformación, Tsai-Hill y Hashin-Rotem.

La tercera hipótesis intenta, ya que se observa que las probetas no fallan por el centro, evaluar las componentes del tensor de tensiones en el punto de rotura. Con esa idea se emplea una

solución analítica al problema de Pagano-Halpin [12], (Figura 14 a), ya que como se comentó anteriormente, reproduce de manera aproximada la situación real. De este modo conociendo la solución del problema de Pagano y las tensiones y deformaciones en el centro de la probeta, donde estaban situadas las bandas extensométricas, se puede inferir el estado tensional en la zona de rotura. Así volviendo a emplear los criterios de fallo antes mencionados se puede calcular la resistencia a cizalladura.

Resaltar que si se emplea el criterio de máxima deformación las dos primeras hipótesis ofrecen el mismo resultado como se puede apreciar en las expresiones de las tensiones del problema ideal (2) y de la fórmula para la rotura por tensión tangencial del criterio (28).

Las propiedades de rigidez y resistencia que se emplearán en los criterios de fallo, son las obtenidas anteriormente de forma experimental en los ensayos de tracción longitudinal 0° y tracción transversal a las fibras 90°. Estas propiedades se resumen en la Tabla 43.

Propiedades	E_{11} (GPa)	E_{22} (GPa)	ν_{12}	X_T (MPa)	Y_T (MPa)
Valor	153	8,5	0.33	2780	59

Tabla 43: Propiedades de rigidez y resistencia

5.4.1 Resistencia a cortadura de las probetas con tipología 1

Una vez se ha explicado cómo se va a calcular la resistencia a cortadura intralaminar, se muestran los resultados obtenidos para cada una de los especímenes suponiendo la solución al problema ideal; hipótesis primera y segunda y la solución analítica al problema de Pagano en la zona de rotura de la probeta; hipótesis tercera (Tabla 44) y los tres criterios de fallo explicados anteriormente.

Probeta nº	Criterio de fallo			Solución
	Máxima deformación	Tsai-Hill	Hashin-Rotem	
1	66,6	68,6	68,0	Ideal
2	68,9	71,1	70,3	
3	67,7	69,8	69,1	
1	98,8	105,7	106,1	Analítica
2	105,5	113,9	111,1	
3	101,3	108,7	106,2	

Tabla 44: Valores individuales de la resistencia a cortadura para tipología 1

Una vez mostrados los valores individuales obtenidos se muestra la Tabla 45 con un estudio estadístico de los resultados.

Series n=3	Criterio de fallo			
	Máxima deformación	Tsai-Hill	Hashin-Rotem	Solución
Media	67,7	69,8	69,1	Ideal
Desv	1,1	1,1	1,18	
c.v. (%)	1,64	1,57	1,71	
Media	101,9	109,5	107,8	Analítica
Desv	3,35	4,17	2,85	
c.v. (%)	3,29	3,81	2,65	

Tabla 45: Valores individuales de la resistencia a cortadura para tipología 1

5.4.2 Resistencia a cortadura de las probetas con tipología 2

Los resultados obtenidos para la resistencia a cortadura de las probetas con tipología 2, se resumen en la siguiente Tabla 46:

Probeta nº	Criterio de fallo			
	Máxima deformación	Tsai-Hill	Hashin-Rotem	Solución
1	65,8	69,2	68,9	Ideal
2	69,2	73,2	72,8	
3	68,8	72,7	74,4	
1	102,4	116,8	115,5	Analítica
2	107,9	125,2	123,6	
3	111,2	130,4	128,6	

Tabla 46: Valores individuales de la resistencia a cortadura para tipología 2

Una vez mostrados los valores individuales obtenidos, se muestra la Tabla 47 con un estudio estadístico de los resultados.

Series n=3	Criterio de fallo			
	Máxima deformación	Tsai-Hill	Hashin-Rotem	Solución
Media	67,9	71,7	71,4	Ideal
Desv	1,86	1,91	2,16	
c.v. (%)	2,74	2,66	3,02	
Media	107,2	124,1	122,5	Analítica
Desv	4,45	6,86	6,61	
c.v. (%)	4,15	5,53	5,39	

Tabla 47: Valores individuales de la resistencia a cortadura para tipología 2

5.4.3 Resistencia a cortadura de las probetas con tipología 3

La Tabla 48 resume los resultados obtenidos para la resistencia a cizalladura de los especímenes con tipología 3.

Probeta nº	Criterio de fallo			
	Máxima deformación	Tsai-Hill	Hashin-Rotem	Solución
1	72,4	75,0	74,2	Ideal
2	71,1	73,5	72,8	
3	70,0	72,4	71,6	
1	98,1	104,8	102,6	Analítica
2	99,5	106,5	104,1	
3	94,6	100,6	98,6	

Tabla 48: Valores individuales de la resistencia a cortadura para tipología 3

Una vez mostrados los valores individuales obtenidos se expone en la Tabla 49 con un estudio estadístico de los resultados.

Series n=3	Criterio de fallo			
	Máxima deformación	Tsai-Hill	Hashin-Rotem	Solución
Media	71,2	73,6	72,8	Ideal
Desv	1,19	1,21	1,28	
c.v. (%)	1,68	1,64	1,76	
Media	97,4	104,0	101,8	Analítica
Desv	2,51	3,04	2,86	
c.v. (%)	2,57	2,92	2,81	

Tabla 49: Valores individuales de la resistencia a cortadura para tipología 3

5.4.4 Resistencia a cortadura de las probetas con tipología 4

Finalmente en la Tabla 50 están resumidos los resultados obtenidos para la resistencia a cizalladura de los especímenes con tipología 3.

Probeta nº	Criterio de fallo			
	Máxima deformación	Tsai-Hill	Hashin-Rotem	Solución
1	66,2	69,6	69,3	Ideal
2	61,5	64,3	64,1	
3	68,9	72,8	72,5	
1	90,3	99,7	98,9	Analítica
2	86,1	94,1	93,5	
3	95,3	106,6	105,6	

Tabla 50: Valores individuales de la resistencia a cortadura para tipología 4

Una vez mostrados los valores individuales obtenidos se expone en la Tabla 51 un estudio estadístico de los resultados.

Series n=3	Criterio de fallo			Solución
	Máxima deformación	Tsai-Hill	Hashin-Rotem	
Media	65,5	68,9	68,6	Ideal
Desv	3,71	3,56	4,25	
c.v. (%)	5,67	5,17	6,20	
Media	90,6	100,2	99,3	Analítica
Desv	4,62	6,25	6,10	
c.v. (%)	5,11	6,24	6,14	

Tabla 51: Valores individuales de la resistencia a cortadura para tipología 4

5.5 Análisis de resultados obtenidos para S

Tras obtener los resultados para todos los especímenes de forma individual, se resumen los valores medios obtenidos para cada una de las tipologías al objeto de evaluar globalmente los ensayos y obtener las propiedades de resistencia a cortadura intralaminar del material (Tabla 52).

Tipología	Criterio de fallo					
	Ratio	θ	Máxima deformación	Tsai-Hill	Hashin-Rotem	Solución
1	10	10º	67,7	69,8	69,1	Ideal
2	10	15º	67,9	71,7	71,4	
3	15	10º	71,2	73,6	72,8	
4	15	15º	65,5	68,9	68,6	
1	10	10º	101,9	109,5	107,8	Analítica
2	10	15º	107,2	124,1	122,5	
3	15	10º	97,4	104,0	101,8	
4	15	15º	90,6	100,2	99,3	

Tabla 52: Valores medios de la resistencia a cizalladura para todas las tipologías

Contemplando los resultados, se manifiesta como claramente los valores de resistencia obtenidos para la solución del problema ideal son mucho menores que los obtenidos para la solución del problema analítico de Pagano-Halpin particularizada para la zona de rotura. Este hecho era evidente ya que la tensión nominal en los dos problemas es la misma y mientras que en el problema de Pagano existen concentradores de tensión que aumentan el valor de la tensión que es introducida en el criterio de fallo; no ocurre lo mismo en el problema ideal cuyas tensiones son uniformes en todo el espécimen.

Dado que la diferencia entre los resultados es muy notoria dependiendo donde apliquemos el criterio (en el centro de la probeta las soluciones de Pagano y la ideal para los ratios considerados difieren poco), para dar el valor de resistencia del material se empleará la solución del problema de Pagano particularizada en la zona de rotura. Así se advierte como los datos obtenidos coinciden con los valores esperados para el material, mayor de 90 MPa.

Cabe destacar que a la vista de los resultados que la diferencia entre la solución de Pagano y el problema ideal se reduce al aumentar el ratio del espécimen (Tabla 52), [4], [6], [15].

En cuanto a la selección del criterio para evaluar la resistencia a cizalladura vemos como el valor que arrojan todos es bastante coincidente, mientras los criterios de fallo de Tsai-Hill y Hashin-Rotem son muy similares, el criterio de Máxima Deformación es más conservador. Por otro lado los coeficientes de variación son prácticamente idénticos para todos los criterios empleados. Por estos motivos la selección de cualquiera de estos criterios de forma individual o un promedio de los tres sería acertada para la evaluación de la resistencia a cortadura.

Finalmente, para discernir cual es la mejor tipología de espécimen de los que se han ensayado para obtener la resistencia a cortadura del material, se analizan los resultados en función del ángulo y del ratio de las probetas.

En lo referente al ángulo de orientación se evidencia que el ángulo que mejor aproxima al valor medio obtenido para la resistencia a cortadura es el de 10° . Por otro lado, se comprueba como la orientación de 10° es la que menor dispersión de resultados tiene y menor variabilidad entre criterios ofrece. Además si representásemos el criterio de Tsai Hill para el material estudiado (Figura 65) observamos como para el valor de 10° el cociente *fallo por tensión tangencial/fallo por tensión normal*, es de 7 mientras que para una orientación de 15° ese mismo cociente es de 4, lo que quiere decir que los valores obtenidos para un ángulo de 10° son más representativos del valor de la resistencia a cortadura del material.

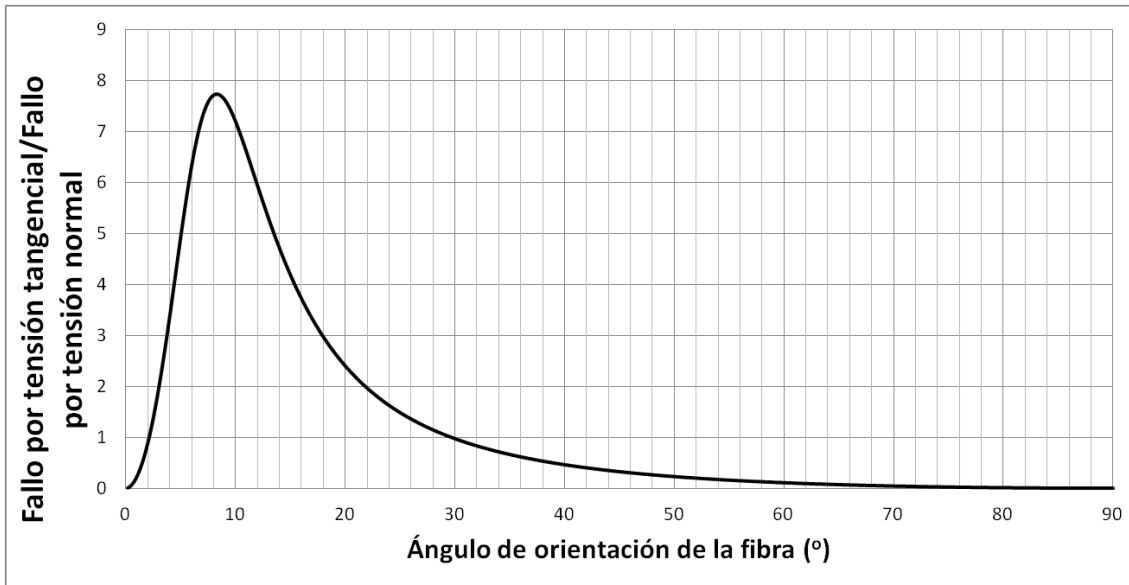


Figura 65: Contribución de la tensión tangencial al fallo para XT/S=47 e YT/S=27

Finalmente para ver que ratio de espécimen da mejores resultados para calcular la resistencia a cortadura, se interpretan los resultados obtenidos para cada una de las distintas tipologías agrupadas por el ratio. Se observa que para las probetas de ratio 10, la resistencia a cortadura tiende a ser sobre estimada respecto a los especímenes de ratio 15. Además se comprueba que los especímenes con el ratio superior, son los que menos variabilidad de resultados ofrecen entre criterios de fallo empleados.

Terminando, como se ha explicado anteriormente en la solución al problema de Pagano, la tensión no es uniforme en toda la probeta si no que existen concentradores de tensión. Dado que al aumentar el ratio del espécimen la solución de Pagano se acerca más a la solución empotrada [4], [7], [15], se acepta que los resultados obtenidos para la resistencia a cortadura del material son más representativos en los especímenes de ratio 15 ya que la rotura se produce por una tensión tangencial más uniforme y no a un concentrador puntual.

5.6 Selección de la tipología óptima

Concluyendo, tras el análisis de los resultados, se va a intentar vislumbrar cuál es la tipología de probeta óptima para el cálculo de ambas propiedades de cortadura intralaminar del material, resistencia y rigidez. Para ello vamos a determinar las variables más importantes para el cálculo de cada una de las propiedades y llegaremos a una solución de compromiso.

Agrupación	Tipologías		G_{12}^{cor} (GPa)	Resistencia a cortadura promedio (MPa)
Ratio 10	1 y 2	Media	5,03	109,17
		Desv	0,14	7,15
		c.v. (%)	2,72	6,54
Ratio 15	3 y 4	Media	5,17	98,89
		Desv	0,23	5,76
		c.v. (%)	4,50	5,83
Ángulo 10	1 y 3	Media	5,12	103,72
		Desv	0,26	4,91
		c.v. (%)	5,00	4,74
Ángulo 15	2 y 4	Media	5,08	104,33
		Desv	0,13	10,77
		c.v. (%)	2,64	10,32
Todas	1,2,3,4	Media	5,10	104,02
		Desv	0,20	8,25
		c.v. (%)	3,83	7,94

Tabla 53: Valores de resistencia y módulo agrupados por ratio y orientación

En la Tabla 53: Valores de resistencia y módulo agrupados por ratio y orientación, se han agrupado los resultados según el ángulo de orientación y el ratio de las probetas, así podemos comprobar de manera general como afectan los parámetros al resultado del ensayo. De esta forma observamos como la influencia tanto del ángulo, como del ratio sobre el valor medio del módulo a cortadura es pequeña y ambos dan el mismo grado de aproximación como se comentó anteriormente. Comprobamos que el peso del ángulo sobre la media de la resistencia a cizalladura es pequeña (apenas una desviación de 0,3 MPa según el ángulo empleado). Sin embargo el ratio es muy influyente y como se discutió considera más representativo del valor real del material los resultados obtenidos para ratio 15.

Bajo las consideraciones anteriores solo habría que comprobar que tipología nos ofrece una menor dispersión de resultados. Asimismo se vislumbra que para la resistencia, un ángulo de 10°, nos da mucha menos dispersión que una orientación de 15°, 4,75% frente a 10,77% respectivamente. Y dado que la dispersión para G_{12}^{cor} con esta orientación es razonable (5%), se considera que la tipología óptima para el cálculo de las ambas propiedades de forma simultánea es la 3, es decir una orientación de 10° y un ratio de 15.

6. CONCLUSIONES

Aunque el número de probetas ensayadas ha sido bajo como para extraer conclusiones generales, del estudio realizado podríamos constatar lo siguiente:

- 1- La determinación del módulo de cortadura a partir de la lectura de 3 galgas es una mejor opción que la de obtener el módulo de forma indirecta mediante una sola banda
- 2- Los especímenes con mayor ángulo de orientación de la fibra, tienen menor módulo aparente de cortadura intralaminar y más cercano al verdadero valor del módulo. En ese sentido, si no se emplean factores de corrección la orientación 15º es mejor que la de 10º.
- 3- A medida que aumenta el ratio, el módulo calculado sin factor de corrección se aproxima más al verdadero.
- 4- La selección del criterio de fallo no es determinante para calcular la resistencia a cizalladura intralaminar, al arrojar resultados similares los tres criterios empleados.
- 5- La estimación de la resistencia a cortadura (S) a partir del estado tensional en el centro de la probeta da un valor muy por debajo del valor real de resistencia esperado.
- 6- Se propone estimar la resistencia a cortadura a partir del estado tensional de un problema aproximado (problema de Pagano y Halpin) particularizado para la zona de rotura, información esta que se obtiene del ensayo.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. AIMS-05-01-002. "Airbus material specification: Carbon fibre reinforced epoxy prepreg unidirectional tape/180°C-curing class. Intermediate modulus fibre structural material.", 2013.
- [2]. ASTM D3039/D3039M-14. "Standard Test Method for Tensile Properties of Fiber-Resin Composites".
- [3]. Chamis C.C. and Sinclair J.H., "Ten-deg off-axis test for shear properties in fiber composites", *Experimental Mechanics*, Vol. 17 (9), pp. 339-346, 1977.
- [4]. Christos C. C. and Sinclair J.H., "10° Off-Axis tensile test for Intralaminar shear characterization of fiber composites", NASA Technical Note D-8215, Abril 1976.
- [5]. IPS 05-01-002-03. "Individual Product Specification Unidirectional tape/180°C curing class Intermediate modulus fibre (268 and 194 g/m²)" issue 4, Marzo 2012.
- [6]. Hashin Z. and Rotem A., "A fatigue failure criterion for fiber reinforced materials"; *J. Compos. Mater.*, no. 7, pp. 7448-7464, 1973.
- [7]. Marín, J.C., Tesis Doctoral "Determinación del Módulo de Cortadura Intralaminar en Compuestos Grafito-Epoxi mediante el Ensayo Off-Axis", Escuela Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla, 1998.
- [8]. Marín J.C., Cañas J., París F., Morton J., "Determination of G₁₂ by means of the off-axis tension test. Part I: Review of gripping systems and correction factors", *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 33(1), pp. 87-100, 2002.
- [9]. Marín J.C., Cañas J., París F., Morton J., "Determination of G₁₂ by means of the off-axis tension test. Part I: A self consistent approach to the application of correction factors", *Composites Part A: applied science and manufacturing*, 33(1), pp. 101-111, 2002.
- [10]. Morozov E., Vasiliev V., "Determination of the shear modulus of orthotropic materials from off-axis tension tests", *Composite Structures*, 62, pp. 379-382, 2003.
- [11]. Odegard G., Kumosa M., "Determination of shear strength of unidirectional composite materials with the Iosipescu and 10° off-axis shear tests", *Composites Science and Technology*, vol.60 (16), p 2917-2943, 2000.
- [12]. Pagano N.J. and Halpin J.C., "Influence of End Constraint in the Testing of Anisotropic Bodies", *J. Composite Materials*, Vol. 2, No. 1, pp. 18-31, 1968.
- [13]. París, F., "Teoría de la Elasticidad", Ed. GERM, ISBN: 84-88783-32-9, 2000 (3ª Edición).
- [14]. París F., Cañas J., Marín J.C. y Barroso A., "Introducción al análisis y diseño con materiales compuestos", Sección de publicaciones Escuela Técnica Superior de Ingenieros Universidad de Sevilla, ISBN: 978-84-88783-92-9.

- [15]. Pindera M.J. and Herakovich C.T., "Shear Characterization of Unidirectional Composites with the Off-Axis Tension Test", *Experimental Mechanics*, Vol. 26, No. 1, pp. 103-112, 1986.
- [16]. Sun C.T. and Berreth S.P., "A new end tab design for off-axis tension test of composite materials", *Journal of Composite Materials*, 22 (8), pp. 766-779, 1988.
- [17]. Sun C.T. and Chung I., "An Oblique End-Tab Design for Testing Off-Axis Composite Specimens", *Composites*, Vol. 24, No. 8, pp.619-623, 1993.
- [18]. Tsai S.W., *Composites Design, Think Composites*, 1988.
- [19]. wikipedia.org, "Material compuesto", https://es.wikipedia.org/wiki/Material_compuesto, 2016
- [20]. Wu E. and Thomas R., "Note on the Off-Axis Test of a Composite", *J. of Comp. Mat.*, Vol.2, No.4, p.523, 1968.