

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de Tecnologías  
Industriales

**Evaluación experimental de la calidad de  
una unión encolada composite-composite  
mediante ensayos de pelado**

Autora: M<sup>a</sup> del Mar Castro Orta

Tutor: José Cañas Delgado

Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017





Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

# **Evaluación experimental de la calidad de una unión encolada composite-composite mediante ensayos de pelado**

Autora:

M<sup>a</sup> del Mar Castro Orta

Tutor:

José Cañas Delgado

Catedrático de Universidad

Grupo de Elasticidad y Resistencia de materiales  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2017



Trabajo Fin de Grado: Evaluación experimental de la calidad de una unión encolada composite-composite mediante ensayos de pelado.

Autora: M<sup>a</sup> del Mar Castro Orta

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, 2017

El Secretario del Tribunal



*A mis padres*









# AGRADECIMIENTOS

---

Este trabajo refleja el final de una etapa, una etapa educativa que agradeceré constantemente a mis padres, por apostar siempre por mi formación e inculcarme el valor que tiene la educación para que una persona llegue a ser la dueña de su propia vida.

En segundo lugar, no por ello menos importante, dar las gracias a Pepe, mi tutor, junto a Federico París, por brindarme la oportunidad de conocer el amplio sector aeronáutico y abrirme las puertas al mundo laboral habiendo depositado su confianza en mi trabajo. Esta investigación no hubiera sido posible sin la ayuda de mis compañeros del laboratorio, en particular, agradecer a Antonio Cañas por enseñarme, con paciencia y entusiasmo, todo lo necesario para trabajar en el laboratorio. A Jesús y Miguel por guiarme con detalle en todo el proceso de fabricación y a José Ramón e Isabel por ayudarme a solucionar los problemas encontrados en el camino, así como mis compañeros.

A Cristi, mi hermana, darle las gracias por su apoyo diario y transmitirme su alegría constante junto a su amor y cariño.

Agradecer a mis profesores por haber contribuido a la formación de la ingeniera que soy hoy, por transmitirme la motivación y el entusiasmo por trabajar y apostar por lo que realmente te haga feliz.

Por último, no puedo olvidar a mis amigos y compañeros con los que he caminado todos estos años de dedicación y esfuerzo. Me han demostrado que el apoyo y compañerismo es fundamental para llegar al éxito.

*M<sup>a</sup> del Mar Castro Orta*

*Sevilla, 2017*



# RESUMEN

---

La evaluación de la calidad de las uniones encoladas composite-composite es un problema de vital importancia para el sector aeronáutico ya que una unión defectuosa no solo paraliza el proceso productivo, sino que su reparación lleva asociado unos costes a veces de muy alta cuantía. Actualmente la calidad de la unión se lleva a cabo mediante un ensayo de tenacidad a fractura interlaminar midiéndose para ello el  $G_{IC}$  en una probeta encolada teóricamente bajo las mismas condiciones que la pieza real. La medida de  $G_{IC}$  se realiza mediante el ensayo DCB o bien mediante el ensayo de pelado a tambor Drum Peel. Ambos ensayos no se pueden llevar a cabo sobre la pieza real o bien no son susceptibles de llevarlos a cabo "in situ". En este trabajo se presenta un dispositivo que permite llevar a cabo el ensayo de pelado sobre la pieza real siendo los resultados obtenidos comparables con los que se obtendrían con los procedimientos habituales de DCB y Drum Peel.

Para comprobar la validez del dispositivo experimental desarrollado, se ha llevado a cabo una campaña experimental consistente en ensayar laminados no simétricos composite-composite con las diferentes técnicas comparando los valores de  $G_{IC}$  obtenidos, así como los modos de fallo asociados. Un estudio numérico llevado a cabo en otro trabajo avala que la evaluación de  $G_{IC}$  a partir de los resultados experimentales es adecuada.



# ABSTRACT

---

The evaluation of the quality of composite-composite bonded joints is a major problem for the aeronautical sector given by the fact that a defective joint not only could paralyze the productive process, but it could also involve very high restoration costs. Currently, the quality of the bond is quantified by an interlaminar fracture toughness test. This test measures  $G_{IC}$  in a test piece that is bonded theoretically under the same conditions as the actual piece. The measurement of  $G_{IC}$  is performed by the DCB test or by the Drum Peel test. Both tests cannot be carried out on the actual part or "in situ". The present article shows a device that carries out the peeling test on the real part allowing to obtain results comparable to those that could be obtained with the traditional procedures of DCB and Drum Peel.

In order to verify the validity of the new device that has been designed, an experimental campaign has been carried out to test non-symmetrical composite-composite laminates with different techniques, by comparing the different  $G_{IC}$  values obtained. A numerical study carried out in another paper confirms that the evaluation of  $G_{IC}$  obtained with the experimental results is adequate.





<b>AGRADECIMIENTOS</b> .....	<b>i</b>
<b>RESUMEN</b> .....	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>v</b>
<b>ÍNDICE</b> .....	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b> .....	<b>ix</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>xi</b>
<b>NOTACIÓN</b> .....	<b>xiii</b>
<b>1 INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
1.1. <i>Objetivos</i> .....	1
1.2. <i>Estructura de la investigación</i> .....	2
<b>2 CÁLCULO DE <math>G_c</math></b> .....	<b>3</b>
2.1. <i>Ensayo DCB</i> .....	4
2.2. <i>Ensayo Climbing Drum Peel</i> .....	5
<b>3 UNA NUEVA PROPUESTA DE ENSAYO</b> .....	<b>8</b>
3.1. <i>Equipo autónomo de pelado: Horizontal Drum Peel</i> .....	8
3.2. <i>Análisis mecánico del HDP</i> .....	12
3.2. <i>Procedimiento del ensayo HDP</i> .....	13
<b>4 PREPARACIÓN DE MUESTRAS</b> .....	<b>16</b>
4.1. <i>Materiales empleados</i> .....	16
4.2. <i>Proceso de fabricación</i> .....	18
4.2.1. <i>Apilado</i> .....	18
4.2.2. <i>Bolsa de vacío</i> .....	19
4.2.3. <i>Curado</i> .....	20
4.2.4. <i>Co-bonding</i> .....	20
4.2.5. <i>Segundo curado</i> .....	20
4.2.6. <i>Corte de muestras</i> .....	21
4.2.7. <i>Probetas para el ensayo a tracción</i> .....	22
<b>5 RESULTADOS EXPERIMENTALES</b> .....	<b>25</b>
5.1. <i>Caracterización de los materiales</i> .....	25
5.1.1. <i><math>E_{11}</math> del laminado</i> .....	25
5.1.2. <i>Adhesivo</i> .....	27
5.2. <i>Ensayos con cinta</i> .....	32
5.2.1. <i>Muestras de referencia</i> .....	32

5.2.1.1. Muestras simétricas [8+8].....	32
5.2.1.2. Muestras simétricas [2+2].....	34
5.2.2. Configuraciones no simétricas compatibles.....	37
5.2.2.1. Ensayo DCB.....	37
5.2.2.2. Ensayo Climbing Drum Peel .....	39
5.2.2.3. Ensayo Horizontal Drum Peel.....	42
5.2.3. Configuraciones no simétricas. Muestras incompatibles.....	44
5.2.3.1. Ensayo DCB.....	44
5.2.3.2. Ensayo Climbing Drum Peel .....	46
5.2.3.3. Ensayo Horizontal Drum Peel.....	48
5.3. <i>Ensayos con tejido</i> .....	50
5.3.1. Serie 1 .....	50
5.3.2. Serie 2 .....	53
<b>6 CONCLUSIONES .....</b>	<b>56</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>60</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1: Condiciones del proceso de curado (AIMS 05-27-002)	20
Tabla 2: Ciclo de Curado (IPS 10-01-006-02)	21
Tabla 3: Resultados del módulo de elasticidad longitudinal en la dirección de la fibra	26
Tabla 4: Resultados obtenidos de resistencia a cortadura para probetas simétricas	28
Tabla 5: Resultados de resistencia a tracción del adhesivo	30
Tabla 6: Resultados obtenidos para probetas simétricas [8+8] según AITM1-0053	33
Tabla 7: Resultados obtenidos de $G_{IC}$ para muestras simétricas [2+2]	35
Tabla 8: Resultados obtenidos de $G_{IC}$ para muestras compatibles	38
Tabla 9: Resultados obtenidos con CDP para probetas no simétricas compatibles	40
Tabla 10: Resultados obtenidos con HDP para probetas no simétricas compatibles	42
Tabla 11: Resultados obtenidos de $G_{IC}$ para muestras incompatibles	45
Tabla 12: Resultados obtenidos con CDP para probetas no simétricas incompatibles	46
Tabla 13: Resultados obtenidos con HDP para probetas no simétricas incompatibles	48
Tabla 14: Propiedades de los materiales de las muestras de tejido	50
Tabla 15: Resultados obtenidos con el CDP y HDP para la serie 1	50
Tabla 16: Resultados obtenidos con el HDP y CDP para la serie 2	53
Tabla 17: Resumen de los resultados para cinta	56
Tabla 18: Resumen de resultados para el tejido	57



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1: Modos de fractura.	3
Figura 2: Ensayo DCB.	4
Figura 3: Fabricación de probetas según la norma AITM1-0053.	4
Figura 4: Procedimiento del ensayo DCB.	5
Figura 5: Ensayo Climbing Drum Peel.	5
Figura 6: Medidas de las muestras para CDP.	6
Figura 7: Análisis mecánico del Drum Peel.	6
Figura 8: Idea inicial del nuevo dispositivo de pelado.	8
Figura 9: Primer prototipo.	8
Figura 10: Prototipo 2.	9
Figura 11: Prototipo 3.	9
Figura 12: Equipo final de pelado horizontal.	10
Figura 13: Despegue de la probeta del tambor.	10
Figura 14: VTP.	11
Figura 15: Lugar de ensayo en detalle.	11
Figura 16: Diseño del nuevo equipo.	12
Figura 17: Análisis mecánico del Horizontal Drum Peel.	12
Figura 18: Fabricación de muestras para el ensayo HDP.	14
Figura 19: Útil de la probeta y cinta adhesiva.	14
Figura 20: Inicio del ensayo HDP.	14
Figura 21: Lab-View para el procesamiento de datos.	15
Figura 22: Prepreg empleado.	16
Figura 23: Adhesivo FM300K.05.	17
Figura 24: Tejidos pelables empleados.	17
Figura 25: Diseño de los paneles que se van a fabricar.	18
Figura 26: Bolsa de vacío con cuatro paneles.	19
Figura 27: Autoclave del Laboratorio de Elasticidad y Resistencia de Materiales.	21
Figura 28: Disco de corte.	22
Figura 29: Probeta para ensayar a tracción plana.	23

Figura 30: Bolsa de vacío para probetas del ensayo a tracción.	23
Figura 31: Eliminación del rebose del adhesivo.	23
Figura 32: Muestras antes de ensayar a tracción.	24
Figura 33: Ensayo a tracción del laminado.	26
Figura 34: Muestras para el ensayo de resistencia a cortadura	27
Figura 35: Ensayo de cortadura.	28
Figura 36: Modos de fallo de resistencia a cortadura.	29
Figura 37: Muestras para hallar la resistencia a tracción.	29
Figura 38: Ensayo a tracción plana.	30
Figura 39: Delaminación del espécimen 2.	31
Figura 40: Rotura cohesiva del espécimen 1.	31
Figura 41: Modos de fallo del espécimen 1,3 y 2 de izquierda a derecha.	31
Figura 42: Preparación del ensayo $G_{IC}$ según AITM1-0053.	32
Figura 43: Ensayo AITM1-0053.	32
Figura 44: DCB con cámara ampliadora.	33
Figura 45: Mecanismos de fallo de las probetas simétricas [8+8] para $G_{IC}$ .	34
Figura 46: Grandes desplazamientos en el ensayo DCB.	35
Figura 47: Modos de fallo de muestras simétricas [2+2].	36
Figura 48: Ensayo AITM1-0053 para probeta no simétrica.	37
Figura 49: Desarrollo del ensayo DCB.	37
Figura 50: Modos de fallo del ensayo DCB para probetas no simétricas compatible.	39
Figura 51: Ensayo CDP.	40
Figura 52: Modos de fallo al realizar CDP en probetas compatibles.	41
Figura 53: Comienzo del pelado, comienzo del despegue.	42
Figura 54: Evolución del ensayo para el espécimen 2, manteniéndose el patrón de despegue.	43
Figura 55: Modos de fallo para el HDP para probetas compatibles.	44
Figura 56: Modos de fallo para DCB de muestras incompatibles.	46
Figura 57: Modos de fallo tras el CDP para probetas incompatibles.	48
Figura 58: Ensayo HDP para el espécimen 3 incompatible.	48
Figura 59: Modos de fallo en HDP para probetas incompatibles.	50
Figura 60: Modos de fallo de la serie 1 (tejido).	53
Figura 61: Modos de fallo de la serie 2.	55

# NOTACIÓN

---

HDP	Horizontal Drum Peel
CDP	Climbing Drum Peel
DCB	Double Cantilever Beam
$G_{IC}$	Tenacidad a fractura en modo I
$G_{IIC}$	Tenacidad a fractura en modo II
$G_C$	Tenacidad a fractura en modo mixto
$\tau$	Resistencia a cortadura
$\sigma$	Resistencia a tracción
U	Energía empleada en propagar la grieta
$\Delta a$	Variación de la longitud de grieta
b	Ancho del espécimen
h	Espesor del espécimen
t	Espesor del laminado delgado
$F_d$	Fuerza de pelado + liado (debonding)
$F_w$	Fuerza de liado (winding)
$M_d$	Momento de pelado + liado (debonding)
$M_w$	Momento de liado (winding)
$E_{11}$	Módulo de elasticidad longitudinal asociado a la dirección de la fibra
$\varepsilon$	Deformación





# 1 INTRODUCCIÓN

---

*Il piacere più nobile è la gioia della comprensione.*

*- Leonardo da Vinci -*

El impulso de los materiales compuestos en el ámbito aeronáutico y aeroespacial está en pleno auge. Es un terreno en continuo desarrollo e investigación para poder conocer a la perfección el comportamiento de materiales compuestos en diversas situaciones, así como optimizar su producción con una alta calidad. Los adhesivos adquieren una enorme importancia dentro de esta área ya que se emplean en numerosas funciones, por lo que es de vital importancia conocer el estado de uniones encoladas tras su fabricación. A día de hoy, no existe un equipo autónomo que sea capaz de evaluar el estado de estas uniones, lo que conseguiría disminuir considerablemente los costes en una cadena productiva donde sea necesario conocer la calidad de dichas uniones. Por ello, se diseña un dispositivo con estos requerimientos, con el objetivo de facilitar la realización de estos ensayos. Este trabajo trata de evaluar la validez de los resultados obtenidos por el nuevo dispositivo de pelado a tambor en el Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales (GERM). La función del dispositivo es pelar uniones encoladas composite-composite no simétricas con un tambor que pela horizontalmente la probeta, obteniendo la fuerza necesaria para el pelado. Para estudiar la validez del dispositivo se realizan una serie de ensayos de intercomparación con otros métodos ya existentes.

## 1.1. Objetivos

En esta investigación se desea estudiar dos objetivos principalmente. En primer lugar, determinar la validez de los resultados proporcionados por el nuevo dispositivo de pelado, Horizontal Drum Peel, comparando dichos resultados con otros ensayos de pelado ya existentes. Se realizará una campaña experimental donde se compararán resultados obtenidos empleando cinta a 0° y empleando un tejido a 45°. Se espera conseguir resultados semejantes de tenacidad a fractura interlaminar para así lanzar el dispositivo al mercado con la idea de optimizar los procesos productivos esencialmente en el sector aeronáutico. Conseguir un equipo autónomo de pelado permitiría reducir los costes de tiempo en la cadena productiva a la hora de tener que evaluar la calidad de las uniones encoladas.

En segundo lugar, se quiere establecer las consecuencias en la calidad del encolado en caso de emplear dos tipos de tejido pelable preimpregnado para las muestras con cinta. Uno de ellos categorizado como compatible por proporcionar una textura de adhesión adecuada y presentar la calidad de la unión requerida por el sector, mientras el otro pelable se categoriza como incompatible ya que se parte de la hipótesis de que no proporciona una textura apropiada para el posterior encolado. Se analizará esta hipótesis inicial al comparar ambas

opciones en muestras en las que el único cambio es haber empleado estos dos tejidos pelables diferentes.

En un segundo plano, se debe tener en cuenta que dicha campaña experimental ayuda considerablemente a detectar posibles mejoras en el dispositivo ya existente. Así, se conseguirá optimizar el prototipo empleado en la mayor medida posible y evolucionar el diseño hacia un dispositivo flexible y adaptable a distintas situaciones.

## **1.2. Estructura de la investigación**

Se divide la investigación en tres partes fundamentales cronológicamente: fabricación de muestras, experimentación y proceso y análisis de resultados. La primera etapa comienza con el diseño de los paneles que se necesitan para obtener todas las probetas para la segunda etapa. El proceso de fabricación solo incluye a las muestras con cinta, ya que las muestras con tejido son enviadas por AIRBUS para realizar una campaña experimental. Consiste en obtener las probetas necesarias para ensayar partiendo de los materiales frescos que el fabricante proporciona. Se realizarán los paneles mediante el proceso de curado co-bonding con el teflón localizado en las zonas adecuadas y, posteriormente, se cortan las probetas de cada panel con el ancho y largo requerido.

La experimentación se puede dividir en tres fases: caracterización del material, ensayos con cinta y ensayos con tejido. Dentro de la segunda fase donde trabajaremos con la cinta tendremos tres etapas: ensayos de muestras simétricas, no simétricas compatibles y no simétricas incompatibles. En la fase 1 se ensayan probetas simétricas con fibras a 0° con tejido pelable compatible. Los ensayos realizados son para obtener valores de resistencia a la cortadura,  $\tau$ , y resistencia a tracción,  $\sigma$ , del adhesivo en muestras simétricas de cinta. En segundo lugar, se ensayan probetas simétricas para hallar la tenacidad a fractura interlaminar como valor de referencia para las muestras de cinta, las cuales se han fabricado en esta investigación. De este punto en adelante, se realizan los mismos ensayos, solo que las probetas tienen diferentes sustratos, cinta y tejido. Se experimentan probetas no-simétricas según tres ensayos distintos que permiten obtener la tenacidad a fractura interlaminar. Los métodos convencionales hasta el momento son los ensayos DCB y Climbing Drum Peel, a los que se añade los ensayos con el nuevo dispositivo Horizontal Drum Peel.

Finalmente, con la recopilación de resultados obtenidos, se procesan y analizan haciendo posible determinar la validez y utilidad del nuevo dispositivo presentado para promover la utilización del mismo por el sector aeronáutico y se consiga una optimización de tiempo y dinero a la hora de la evaluación de uniones encoladas. Así como conocer las consecuencias de emplear distintos tipos de pelable a la hora de la fabricación de dichas uniones.

## 2 CÁLCULO DE $G_C$

---

Conocer el comportamiento de propagación de grieta para uniones encoladas es de vital importancia en el sector aeronáutico. Por ello, se llevan a cabo una serie de ensayos para analizar el estado del encolado y predecir su comportamiento frente a las posibles tensiones a las que pueda estar sometido a lo largo de su vida.

La propagación de una grieta entre láminas de material compuesto (AITM-1.0005 [2]) o entre dos láminas unidas mediante adhesivo (AITM-1.0053 [4]) está controlada por la tenacidad a fractura interlaminar. La medida de la tenacidad se define como la energía liberada por cada unidad de área abierta de grieta ( $G_C$ ).

$$G_C = \frac{\Delta U}{\Delta A} = \frac{\Delta U}{b\Delta a}$$

Siendo  $U$  la energía empleada en propagar la grieta en función de la carga y del desplazamiento asociado;  $a$  la longitud de grieta; y  $b$  el ancho del espécimen.

Se estudian dos modos de propagación de grieta, I y II. El modo I consiste en abrir la grieta en dirección normal al plano de la grieta. Este modo presenta simetría respecto al plano de la grieta por lo que también es conocido como *symmetric plane problem of fracture*. El modo II se realiza en dirección paralela a la grieta, de modo que se aplica un esfuerzo cortante al espécimen.



Figura 1: Modos de fractura.

Para el caso de configuraciones simétricas (idénticos laminados a ambos lados de la grieta) el valor de  $G_C$  calculado coincide con  $G_{IC}$ . Existen varios métodos para medir la tenacidad a fractura, sin embargo, la dificultad de algunos de ellos radica en la necesidad de saber con precisión la longitud de la grieta, aunque algunos procedimientos de medida automáticos se han propuesto en algunos artículos [14], lo habitual sigue siendo realizar una medida visual durante la realización del ensayo. Los recursos para medir la profundidad de una grieta durante un ensayo son bastante limitados, por lo tanto, es una fuente de error considerable a la hora de conocer la tenacidad de un material. Por ello, el objetivo es crear un nuevo ensayo que optimice los problemas en los procedimientos ya existentes, en particular que no se necesite medir la grieta y que se pueda realizar in-situ.

## 2.1. Ensayo DCB

El ensayo convencional para medir la tenacidad a fractura es Double Cantilever Beam (DCB). Se empleará la norma AITM1-0053 [4] para la realización de esta investigación.

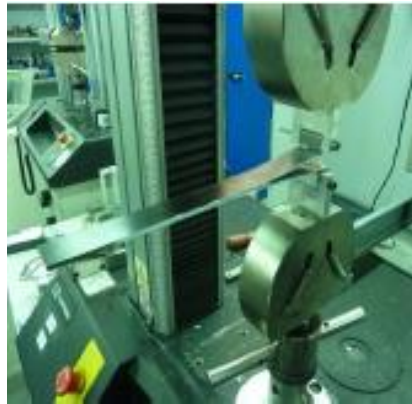


Figura 2: Ensayo DCB.

La fabricación de las probetas está explicada en la norma exhaustivamente, de modo que serán como se muestra en la Figura 3. En este estudio se realiza el ensayo a probetas simétricas [8+8] así como asimétricas [8+2]. Cada muestra consta de una zona con PTFE de entre 0,02 mm a 0,03 mm de espesor la cual será la pre-grieta necesaria para comenzar el ensayo.

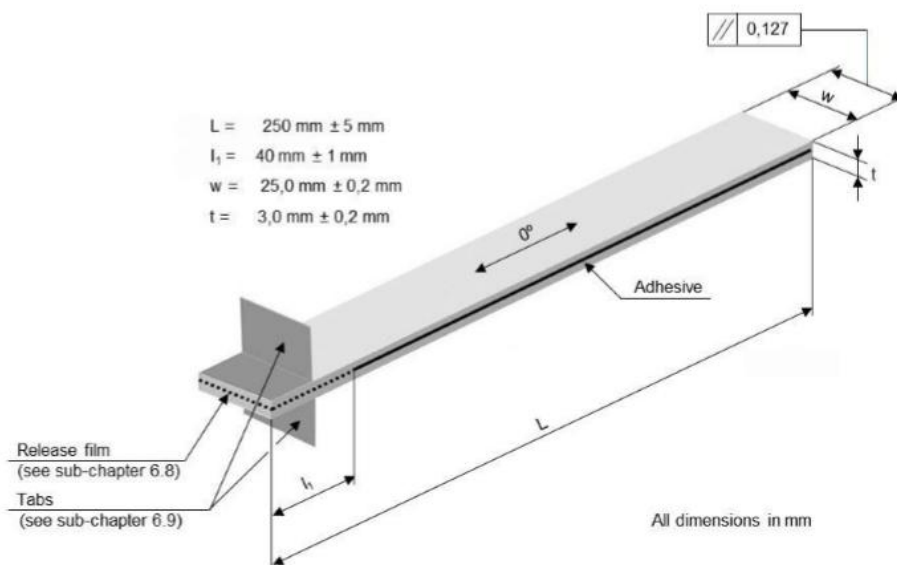


Figura 3: Fabricación de probetas según la norma AITM1-0053.

Para proceder al ensayo es necesario medir el espesor y el ancho de las muestras con un calibre. Se deben tomar tres puntos significativos de la misma para obtener la media. Se debe controlar el acondicionamiento de la sala donde se realice el ensayo de manera que la temperatura sea  $23^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ . El ensayo consiste en someter a una probeta pre-agrietada a una fuerza de pelado hasta conseguir la propagación de la grieta. Durante la propagación se registra

la fuerza y el desplazamiento de la cruceta y se anota la longitud de grieta para diferentes niveles de carga.

El objetivo es obtener  $G_{IC}$ , el cual se calcula de los datos obtenidos. La energía empleada para propagar la grieta una longitud  $L$  se obtiene del área encerrada en la gráfica que representa la extensión de cruceta frente a carga aplicada entre los puntos  $a$  y  $b$ .

$$G_{IC} = \frac{A}{b \cdot L} \cdot 10^3$$

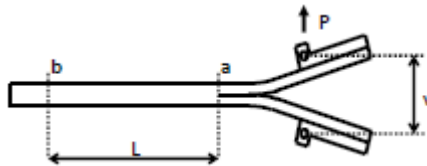


Figura 4: Procedimiento del ensayo DCB.

Este procedimiento es una manera de obtener la tenacidad a fractura en modo I,  $G_{IC}$ , mediante un ensayo sencillo de realizar. El DCB es el ensayo de referencia ya que se obtiene modo I puro si la probeta es simétrica y si la grieta crece igual por ambos lados. En caso de no tener simetría en el ensayo, aunque predomina el modo I, no se puede determinar  $G_{IC}$  con la expresión que proporciona la norma. Adicionalmente a este inconveniente, presenta dificultades para realizarse el ensayo in situ lo que supone un tiempo considerable. Por último, como ya se ha mencionado, el principal problema es medir la grieta con exactitud durante el ensayo, por ello, se trata de buscar otras alternativas para conocer  $G_C$ .

## 2.2. Ensayo Climbing Drum Peel

El ensayo de pelado a tambor, Climbing Drum Peel, aparece con la idea de mejorar los inconvenientes que presenta el ensayo DCB y de poder evaluar uniones no simétricas sobre todo cuando una de las partes a pelar tiene poca rigidez (pequeño espesor).



Figura 5: Ensayo Climbing Drum Peel.

Según la norma UNE-EN2243-3 [9], las medidas de las probetas deben ser como se muestra en Figura 6.

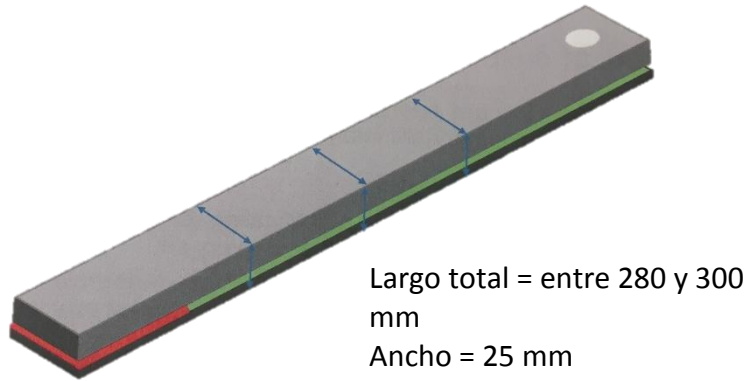


Figura 6: Medidas de las muestras para CDP.

El ensayo consta de dos fases: la primera de “Pelado y Liado” (Peeling & Rolling), y la segunda de únicamente “Liado” (Rolling). En la fase 1 se pela la probeta a medida que el tambor la va enrollando, por lo tanto, la carga que se obtiene corresponde a ambos efectos, al pelado y al liado del tambor. La segunda fase consiste en liar la probeta en el tambor, por lo que se obtiene la carga de liado. Una vez realizadas ambas etapas, se consigue la fuerza de pelado restando las cargas obtenidas. A partir de las fuerzas de pelado se determina la tenacidad a fractura ( $G_C$ ), para ello es necesario realizar un análisis mecánico del mismo.

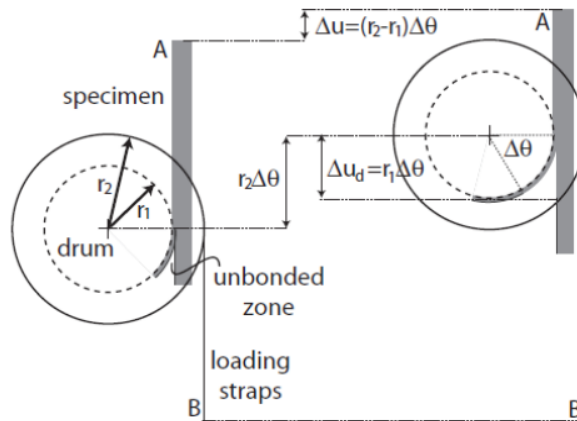


Figura 7: Análisis mecánico del Drum Peel.

Partiendo de la definición de la tenacidad a fractura interlaminar:  $G_C = \frac{\Delta U}{b\Delta a}$ , se necesita definir la energía en el proceso de pelado:

$$\Delta U = F_d - F_w \cdot \Delta u$$

Donde  $\Delta u$  es el desplazamiento de cruceta expresado como  $\Delta u = R_2 - R_1 \cdot \Delta\theta$ . Adicionalmente, la longitud de grieta coincide con la zona que se despega alrededor del tambor, tal y como se aprecia en la Figura 7:

$$\Delta a = \Delta u_d = R_1 \cdot \Delta\theta$$

Se obtiene finalmente  $G_C$  como:

$$G_c = \frac{F_d - F_w \cdot (R_2 - R_1)}{b \cdot R_1}$$

Siendo  $F_d$  y  $F_w$  las fuerzas de Pelado y Liado,  $R_2$  y  $R_1$  los radios del tambor y  $b$  el ancho del espécimen.

Aunque no se requiera formalmente obtener la expresión de la fuerza de liado, la misma puede ser usada bien para evaluar  $EI$  o bien para comprobar el resultado experimental. La fuerza de liado puede obtenerse a partir del momento de pelado:

$$\frac{M_w}{EI} = \frac{1}{R_1 + \frac{t}{2}}$$

$$M_w = F_{1w} \cdot R_2 - R_1 - W \cdot x \cdot R_1$$

Por lo tanto, despejando  $F_w$ , se obtiene:

$$F_w = \frac{EI + W \cdot R_2 + \frac{e}{2} \cdot R_1 + \frac{t}{2}}{R_2 - R_1 + \frac{e - t}{2} \cdot R_1 + \frac{t}{2}}$$

El tambor que se va a emplear en esta investigación consta de las siguientes características:

<b>D<sub>1</sub></b>	150,01 mm
<b>D<sub>2</sub></b>	187,7 mm
<b>Peso</b>	25,51 N

Gracias a esta nueva propuesta de ensayo se consigue obtener  $G_c$  sin necesidad de medir la grieta; además de ser un ensayo sencillo de realizar. Sin embargo, no se puede despreciar que el Drum Peel provoca un modo mixto de fractura, siendo imposible hallar  $G_{IC}$  mediante este ensayo, pero obteniendo en su lugar  $G_c$ . No obstante lo anterior, estudios numéricos realizados [10] ponen de manifiesto que la mixicidad de modos es pequeña y que predominantemente se origina modo I por lo que el valor de  $G_c$  está próximo al de  $G_{IC}$ . El inconveniente del ensayo radica en su imposibilidad para llevarlo a cabo in situ.

# 3 UNA NUEVA PROPUESTA DE ENSAYO

---

## 3.1. Equipo autónomo de pelado: Horizontal Drum Peel

El GERM desarrolló un equipo que permite realizar un ensayo in situ sobre una lámina de pequeño espesor encolada a una piel con objeto de determinar  $G_C$ . El principal objetivo es que se puedan realizar los ensayos de forma autónoma y sencilla, tanto el procedimiento experimental como el procesamiento de resultados. En particular, se desea eliminar la necesidad de medir la longitud de la grieta por su elevada dificultad de detección e inexactitud. Con estas exigencias, se presenta una propuesta de ensayo basado en un pelado con tambor horizontal, tal y como se observa en la Figura 8.

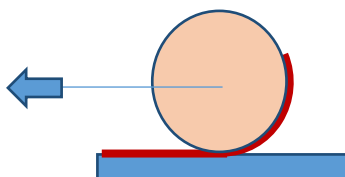


Figura 8: Idea inicial del nuevo dispositivo de pelado.

La idea primitiva era similar al ensayo Drum Peel pero en posición horizontal. El arrastre del tambor se realizaría mediante un actuador eléctrico provisto de célula de carga y captador de desplazamiento. El empuje del actuador sobre el eje obligaría a mover el piñón, solidario al tambor, sobre la cremallera lo que originaría el giro del tambor. Unas guías lineales garantizarían el centrado durante el desplazamiento y evitarían cualquier desplazamiento vertical que pudiera originarse.

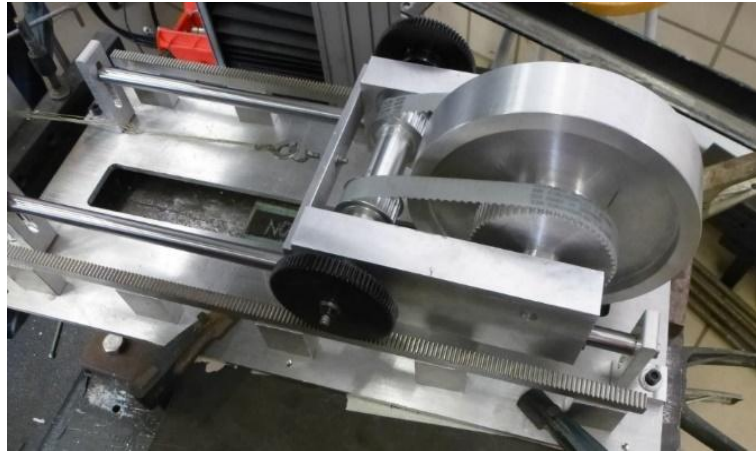


Figura 9: Primer prototipo.

Este prototipo presentaba un problema grave, el movimiento de traslación era diferente al desplazamiento lineal del tambor, por lo tanto, se está sometiendo la probeta a tracción

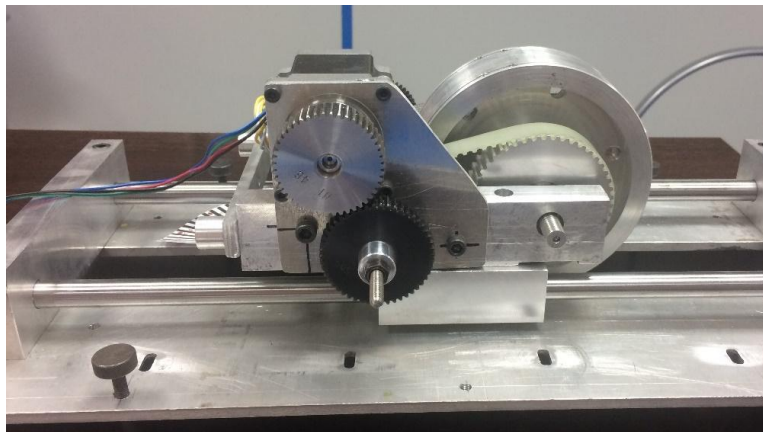


durante el ensayo. Para superar este inconveniente, se evoluciona a un segundo modelo en el que se usa un mecanismo algo más complejo. Se emplea un piñón más una correa dentada, que jugando con relaciones de transmisión permita que el desplazamiento horizontal sea igual que el desarrollo circunferencial que originaría la rotación del tambor (Figura 10).



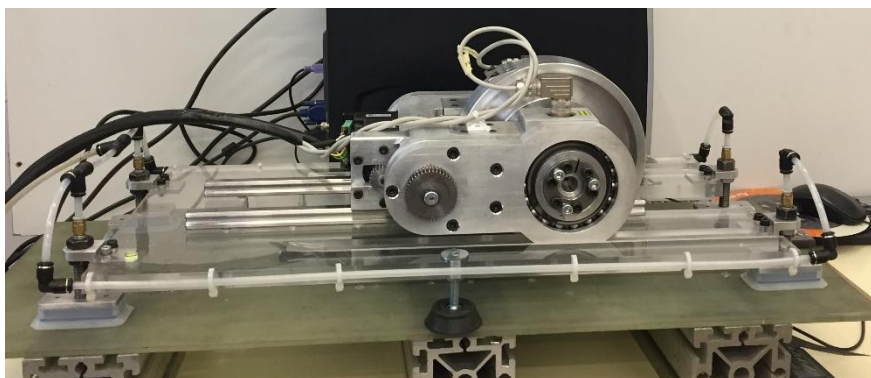
**Figura 10: Prototipo 2.**

Dicho dispositivo resulta válido, pero al jugar un papel importante la relación entre el avance y el liado, el diámetro del tambor debería ser variable ya que el radio a considerar es la suma del radio del tambor y de la mitad del espesor del espécimen. Para soslayar dicho inconveniente se consideró que el avance no estuviese condicionado, para ello se propuso eliminar la cremallera y sustituir el actuador por un motor que hiciese girar el tambor, el avance es automático y se produce a medida que la piel se enrolla al tambor (Figura 11).



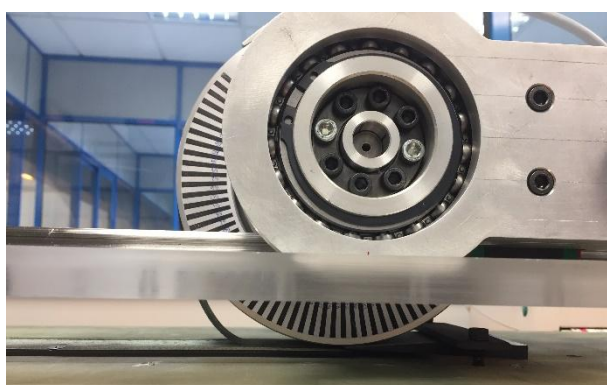
**Figura 11: Prototipo 3.**

Los resultados satisfactorios obtenidos con el prototipo 3 hicieron evolucionar esta idea hasta el equipo final HDP (Patente No 201730163) mostrado en la. La rotación del tambor se provoca mediante un motor que mueve una cadena cinemática para conseguir una velocidad adecuada de rotación. Una célula de torsión mide el par necesario para pelar/liar la piel sobre el tambor. A partir de la medida del par se calcula el valor de  $G_c$  realizando un análisis mecánico que se detalla en el próximo punto.



**Figura 12: Equipo final de pelado horizontal.**

Para conocer en profundidad el comportamiento del espécimen durante la realización del ensayo y poder fijar de forma adecuada las dimensiones del tambor, la capacidad de la célula de carga y la potencia del motor, se realizaron simulaciones numéricas que permitieron además ver la influencia que tenían los diferentes parámetros asociados al ensayo (rigidez de las láminas, propiedades del adhesivo...) [10]. Además, el estudio numérico puso de manifiesto que en el proceso de enrollado la capa de laminado se separa del tambor tendiendo a la curvatura crítica. Esta curvatura es independiente del radio del tambor, depende únicamente del material en cuestión. Si a la piel le imponemos un giro, obtendremos un momento,  $M$ , constante. Cuando alcance un determinado valor, momento crítico  $M_{CR}$ , función de la rigidez de la piel de las propiedades del adhesivo, se producirá el despegue de la piel por rotura del adhesivo en modo I predominante.

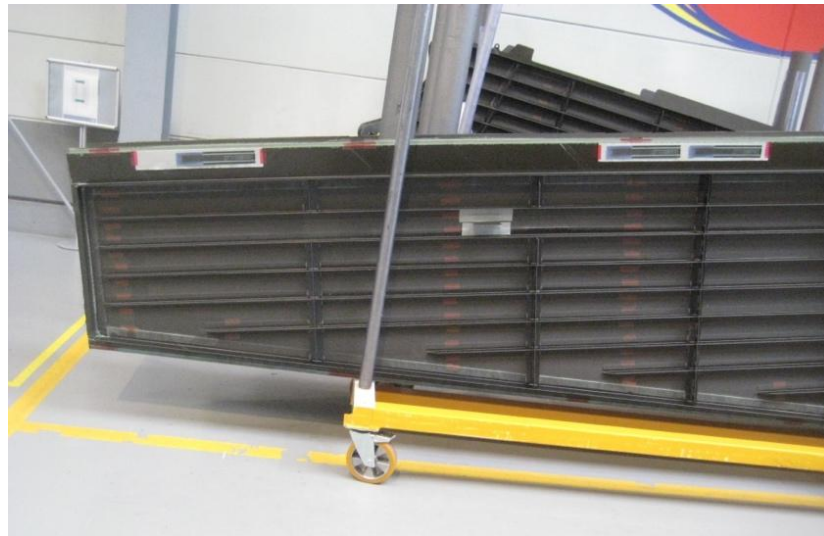


**Figura 13: Despegue de la probeta del tambor.**

El despegue no supone ningún problema y se produce siempre que el radio del tambor sea distinto al crítico (que es función de la rigidez de las láminas y de las propiedades del adhesivo) si el radio del tambor es superior al crítico el patrón de despegue se mantiene constante durante el proceso de pelado no ocurriendo así si es inferior al crítico. Por otro lado, conviene también un radio de tambor grande para así minimizar las tensiones de flexión que se originarían en la piel liada. En base a lo anterior y de la realización de un estudio paramétrico para los valores de rigideces y de propiedades de adhesivos se consideró que el diámetro de tambor más adecuado fuese superior 150 mm adoptándose 190 mm.

Este último dispositivo mostrado con el cual se ha realizado esta investigación, Figura 12, está evolucionando actualmente para adecuarse a los nuevos requisitos propuestos. Se

desea emplear el equipo en el VTP (Vertical Tale Plane), Figura 14, en el proceso productivo del mismo de modo que se ensayen las tres probetas que se observan directamente sobre la pieza real.



**Figura 14: VTP.<sup>1</sup>**

Si se analiza en detalle el lugar donde se requiere hacer el ensayo, se observa que hay un obstáculo el cual el equipo anterior no es capaz de evitar.



**Figura 15: Lugar de ensayo en detalle.<sup>2</sup>**

El larguerillo tan próximo a las muestras que se quieren ensayar no permite colocar el HDP adecuadamente, por lo que se está evolucionando a un equipo más estrecho y con menos peso para mejorar la facilidad del ensayo. El nuevo equipo se muestra a continuación:

---

<sup>1,2</sup> Imágenes facilitadas por AIRBUS.

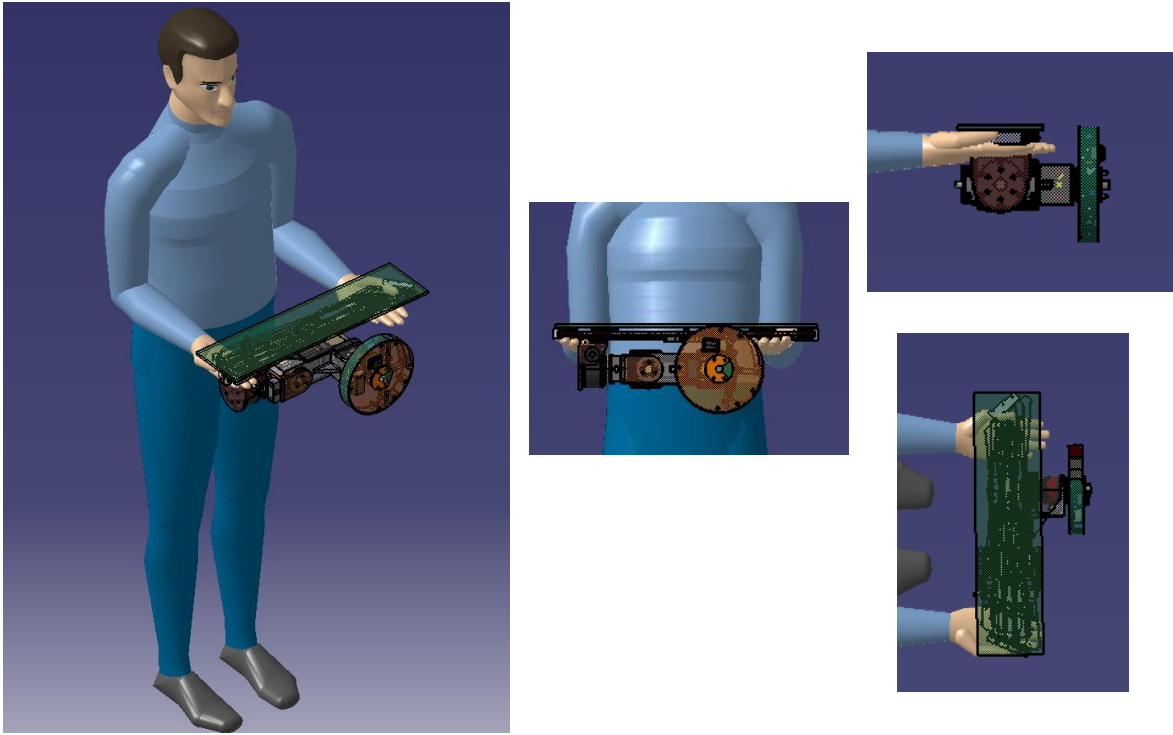


Figura 16: Diseño del nuevo equipo.

### 3.2. Análisis mecánico del HDP

Siempre que el patrón de despegue se mantenga durante el ensayo (Figura 17) no se necesita medir la grieta, ya que lo que se enrolla en el tambor es lo que aumenta la grieta. Para determinar  $G_c$  es necesario un análisis mecánico en detalle del equipo planteado. Se analiza el avance del tambor durante el pelado.

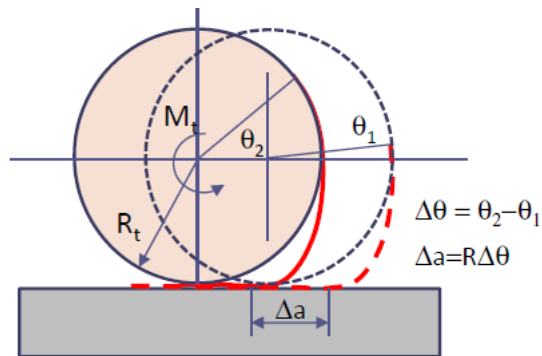


Figura 17: Análisis mecánico del Horizontal Drum Peel.

Como ya se ha explicado, la tenacidad a fractura se define como:

$$G_c = \frac{\Delta U}{\Delta A} = \frac{\Delta U}{b \Delta a}$$

Con este nuevo dispositivo el aumento de la grieta corresponde al tramo de probeta que se enrolla en el tambor, por lo tanto  $\Delta a$  se define como:

$$\Delta a = R_L \cdot \Delta\theta$$

Donde  $R_L$  es el radio total de liado:  $R_L = \frac{D_t + t}{2}$

La energía interna necesaria para el pelado es:

$$\Delta U = M_d - M_w \cdot \Delta\theta$$

El subíndice  $d$  corresponde al pelado más liado (debonding), mientras el subíndice  $w$  corresponde al liado (winding). Una vez definidos los parámetros necesarios para la obtención de  $G_C$  y simplificando su expresión lo máximo posible, se alcanza:

$$G_C = \frac{2 \cdot M_d - M_w}{b \cdot D_t + t}$$

Se observa claramente en la expresión determinada que no se precisa medir la grieta en ningún instante ya que  $G_C$  no depende de  $\Delta a$ .

Del mismo modo que se explicó en el CDP, hallar la expresión de la fuerza de liado sirve para comprobar los resultados experimentales y evaluar  $EI$ . Así,  $F_w$ , se puede obtener del balance de energía en el proceso de liado. El trabajo externo e interno se calculan de la siguiente manera:

$$W_e = M_w \cdot \theta = F_w \cdot R_L \cdot \theta$$

$$W_i = R_L \cdot \theta \cdot M \cdot q \cdot 2 = \frac{\theta \cdot EI}{2 \cdot R_L}$$

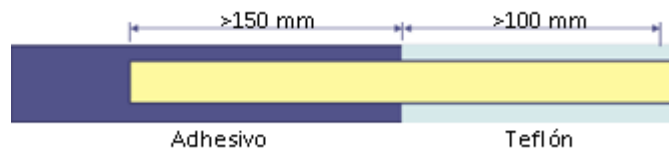
Ya que  $M = EI/RL$  y  $q = 1/RL$ . Imponiendo  $W_e = W_i$ , se obtiene la fuerza de liado  $F_w$ :

$$F_w = \frac{EI}{2 \cdot R_L^2}$$

Se puede observar durante todo el análisis la dependencia de la tenacidad a fractura del radio de liado, es decir, del diámetro del tambor y del espesor del laminado delgado.

### 3.2. Procedimiento del ensayo HDP

Para utilizar el Horizontal Drum Peel, se necesitan probetas con un tramo suficientemente largo no pegado que permita hallar el momento de liado y otro tramo para el pelado. Se propone emplear probetas de 25 mm de ancho ( $b$ ) con una zona no pegada, usualmente se emplea teflón, de al menos 100 mm y una zona con adhesivo de 150 mm como mínimo.



**Figura 18: Fabricación de muestras para el ensayo HDP.**

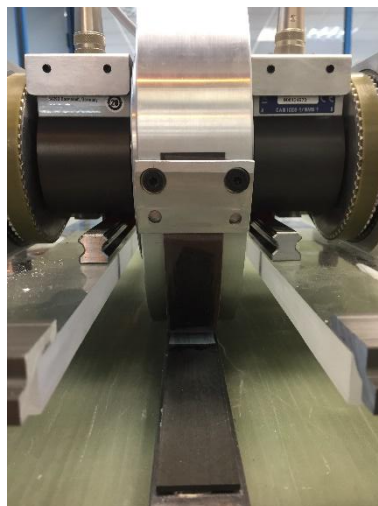
El procedimiento se realiza en un solo test, obteniendo el momento torsor frente al desplazamiento en todo momento. Se consigue el momento de liado ( $M_w$ ) en el primer tramo de probeta y en el segundo, donde se encuentra el adhesivo, se halla el momento de pelado+liado ( $M_d$ ). El HDP impone un giro y tiene un desplazamiento libre. Se realiza el ensayo a una velocidad de 60 mm/min de liado de la probeta en el tambor, por lo tanto, la velocidad de giro del tambor es de  $\omega = 0.1$  rpm.

La preparación del ensayo para las pruebas es sencilla. Se mide el ancho y el espesor de la probeta previamente. Se comienza pegando la probeta por la cara de 8 capas a una pletina, anteriormente limpiada con acetona adecuadamente, con una cinta de doble cara (Figura 19).



**Figura 19: Útil de la probeta y cinta adhesiva.**

Una vez pegada la probeta al útil, se coloca en la superficie donde se realiza el ensayo con dos tornillos. A continuación, se agarra la probeta por la zona de pequeño espesor al tambor por la pestaña que presenta.



**Figura 20: Inicio del ensayo HDP.**

Tras preparar el ensayo, se puede instalar el software de control de Lab-View para el procesamiento de datos en el ordenador que se vaya utilizar. Para comenzar, se introducen en

el ordenador la velocidad del ensayo, ancho y espesor de la muestra, así como el diámetro del tambor. El propio software calcula el valor de  $G_c$  para un rango de valores que se eligen manualmente.

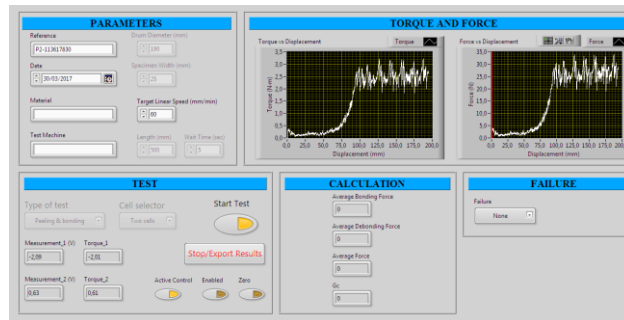


Figura 21: Lab-View para el procesamiento de datos.

Es un equipo totalmente autónomo, se fija a cualquier superficie con unas ventosas en los extremos del dispositivo. Se puede regular la altura para adecuarse lo mejor posible a las irregularidades u obstáculos que se encuentren alrededor de la probeta que se quiera ensayar.

# 4 PREPARACIÓN DE MUESTRAS

---

La preparación de muestras se realiza en varias fases, según las probetas necesarias para cada parte de la investigación. La primera fase se trata de caracterizar el material empleado. Se fabrican probetas de cinta a 0° simétrico [8+8] y [2+2] con adhesivo FM300 K.05 mediante el proceso de curado de co-bonding, con tejido pelable preimpregnado Z-24.259 (EA9895).

Adicionalmente, dentro de la primera fase, se debe diseñar un ensayo capaz de determinar la resistencia a tracción,  $\sigma$ . No es una tarea sencilla por el propio desarrollo del ensayo, necesitamos conseguir tracción plana en el adhesivo y que la rotura sea cohesiva. Se explicará detalladamente este ensayo más adelante.

La segunda fase consiste en fabricar probetas no simétricas [8+2] del mismo material anterior para hallar la tenacidad a fractura interlaminar  $G_C$  mediante los ensayos explicados anteriormente. Y, por último, en la tercera fase se fabrican muestras para realizar los mismos ensayos que en la segunda fase con el mismo adherente pero con un tejido pelable preimpregnado diferente, Z-24.252 (Hexforce T0098). A esta tercera serie de probetas las denominamos incompatibles por el Peel Ply que se emplea.

## 4.1. Materiales empleados

El prepreg empleado para todas las probetas es UD/M21/35%/268/T700GC-12K/300, fabricado por HexPly (IPS 05-01-001-06 [11]), el cual hace referencia a:

- UD: Fibra unidireccional
- M21: tipo de resina epoxi impregnada en la fibra de carbono
- 35%: Contenido en peso de resina con una tolerancia de  $\pm 2\%$
- 268: Peso de la fibra en  $g/m^2$
- T700GC-12K: Designación de la fibra. Fibra de carbono de modulo elástico intermedio con 12000 filamentos
- 300: Anchura del rollo en mm



Figura 22: Prepreg empleado.

Para la fabricación de todas las muestras se necesitan los laminados a 0°.



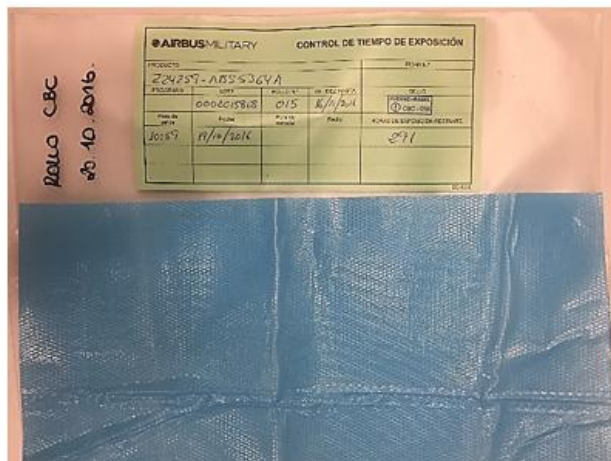
El adhesivo utilizado es el mismo en todas las muestras, FM 300K.05 (IPS10-01-006-02 [12]), el cual es el objeto del estudio. La designación del material hace referencia a K (knit) y  $0.05 \text{ lb/ft}^2$  ( $\approx 250 \text{ g/m}^2$ ). Es fabricado por Cytec.



Figura 23: Adhesivo FM300K.05.

Por último, se han empleado dos tipos de Peel Ply según se fabriquen muestras compatibles, Z-24.259 (Figura 24a), o incompatibles, Z-24.252 (Figura 24b). El Peel Ply compatible es fabricado por Hexcel Composites, es un tejido pelable de poliéster preimpregnado en resina epoxi para la preparación superficial de materiales de fibra de carbono previa al encolado. Sus propiedades son:

- Peso superficial:  $158 \pm 10 \text{ g/m}^2$
- Contenido en resina:  $43 \pm 4\%$  en peso
- Espesor por capa:  $0,130 \text{ mm}$



(a) Compatible



(b) Incompatible

Figura 24: Tejidos pelables empleados.

El Peel Ply incompatible es denominado tejido sangrador pelable fabricado por Tygavac Advanced Mat., su especificación de compra es AIMS 12-01-002. Es un tejido pelable de nylon, de trama fina, recubierto con agente desmoldeante. No se recomienda emplear este

tejido en elementos que vayan a ser encolados posteriormente, por ello lo calificamos como incompatible. Tiene un espesor de 0,100 mm.

## 4.2. Proceso de fabricación

El primer paso es diseñar el número de paneles que se necesitan para conseguir optimizar el material empleado. Para ello hay que tener en cuenta la norma de los ensayos que se van a realizar para conocer las medidas necesarias para las probetas que se obtendrán de cada panel. Tras este análisis previo se decide fabricar 3 paneles de los cuales se obtienen todas las muestras necesarias. Al diseñar hay que sobredimensionar los paneles para tener en cuenta las pérdidas de los bordes, recantado, y el espesor del disco de corte.

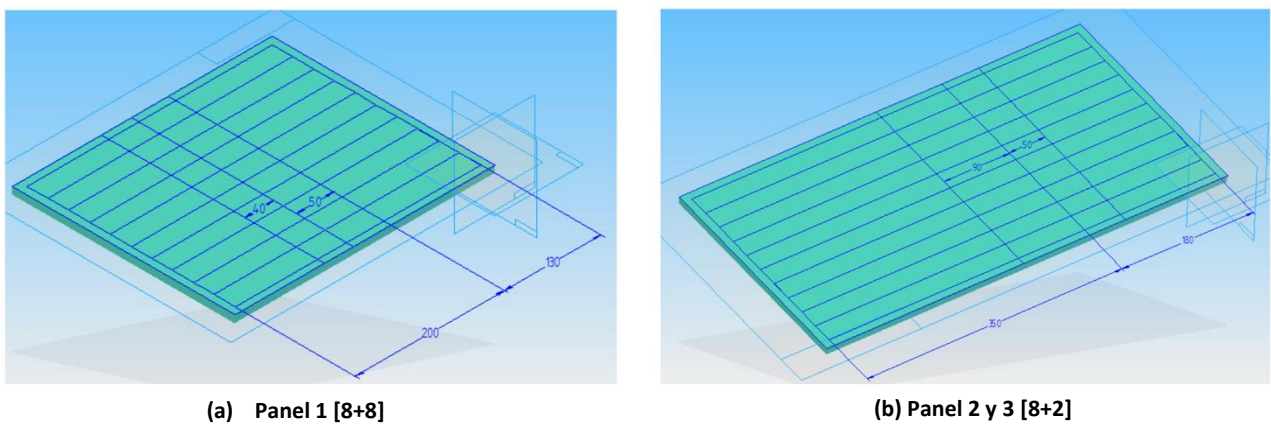


Figura 25: Diseño de los paneles que se van a fabricar.

Del panel 1 se tienen las probetas necesarias para la caracterización del adhesivo, 5 probetas para realizar DCB y 5 probetas para realizar el ensayo a cortadura. Del segundo panel se obtienen las muestras para realizar el Climbing Drum Peel, Horizontal Drum Peel y DCB con el Peel Ply compatible. El tercer panel es igual que el segundo, pero con el Peel Ply incompatible.

Durante la investigación, debido a los resultados que se estaban obteniendo, se decidió hacer un cuarto panel para obtener 5 muestras simétricas [2+2] de 350 mm de largo y una zona con teflón en el extremo del panel de 60 mm para realizar el ensayo DCB a esta configuración. El proceso de curado fue igual que el resto co-bonding.

El proceso de fabricación comienza en el momento que se solicita el material necesario al fabricante y llega al laboratorio. La empresa manda los rollos necesarios y se cortan y empaquetan según las necesidades. Una vez disponemos de los materiales necesarios, se comienza la fabricación de los paneles.

### 4.2.1. Apilado

Cada panel se fabrica de manera similar. Se comienza con el apilado de 8 láminas de carbono prepreg, con la longitud necesaria según el panel. Se realiza manualmente, lámina a

lámina. Hay que ser muy riguroso con la orientación de las láminas, de modo que se tengan probetas a 0°. El apilado se empieza colocando la primera lámina con la cara desprotegida hacia arriba y sobre ella se posiciona la siguiente lámina con la cara desprotegida hacia abajo. Antes de quitar el papel protector se aplica presión y calor para favorecer la adherencia entre capas.

Una vez se tenga el laminado se procede a la precompactación, donde se desea hacer vacío para eliminar todo el aire entre láminas y así tener un laminado más uniforme y unido. Por último, se coloca el Peel Ply, incompatible o compatible según el panel en cuestión, por ambas caras del panel para mantener la simetría para el proceso de curado. Se deben evitar las arrugas o pliegues en esta superficie, así como tocar el pelable lo menos posible para conseguir la mayor uniformidad posible.

#### 4.2.2. Bolsa de vacío

A continuación, se hace la bolsa de vacío donde irá el panel para su curado en el Autoclave. La bolsa de vacío tiene una serie de elementos fundamentales para el proceso de curado. Primero se debe limpiar exhaustivamente la plancha metálica donde se va a preparar la bolsa con acetona. Una vez limpia, se rodea el borde con cromato sin despegar aun el papel protector. Se coloca PTFE cubriendo la zona de la plancha interior al cromato, sin arrugas. Encima se posiciona el panel o paneles que se vayan a curar, teniendo en cuenta que se debe dejar espacio para las tomas de vacío que no pueden estar encima del material a curar. Una vez colocados los paneles, se cubre con PTFE de nuevo y encima se pone airwave. Justo encima del airwave se colocan dos tomas de vacío. Finalmente, se cierra la bolsa con PTFE grueso pegándolo con el cromato empleado al principio del proceso de hacer la bolsa de vacío. Para terminar, se colocan las tomas de vacío por fuera, teniendo cuidado al hacer el agujero



Figura 26: Bolsa de vacío con cuatro paneles.

necesario para enroscarlas con la parte ya colocada después del airwave.

Una vez finalizada la bolsa, se debe comprobar que no tiene pérdidas al hacer vacío.

### 4.2.3. Curado

El siguiente paso del proceso de fabricación ya es curar las primeras bolsas de vacío en el Autoclave. Según el material que se esté empleando, se debe realizar un proceso de curado u otro. Como en esta investigación se emplean los mismos materiales, el proceso de curado es el mismo y, por ello, se pueden curar más de un panel a la vez. En este caso, según las especificaciones del material, se realiza un ciclo de 180°C con las siguientes características:

Tabla 1: Condiciones del proceso de curado (AIMS 05-27-002)

Cure type	Autoclave		
Cure conditions	Heating rate	°C/min	0.2 - 5.0
	Cure temperature	°C	180 +10/-5
	Cure time	Min	120 - 240
	Cure pressure	MPa	0.15 – 1.1
		Bar	1.5 - 11
	Cooling rate	°C/min	0.2 - 3.5
	Vacuum (abs)	MPa	0.005 - 0.1

### 4.2.4. Co-bonding

Al salir los paneles del Autoclave, se procede al siguiente paso. La fabricación de los paneles se realiza mediante un proceso de curado co-bonding, lo que significa que se cura el panel con un laminado previamente curado pero el adhesivo y el otro laminado están frescos. Para ello, lo primero es retirar el Peel Ply solo por la cara del panel donde se coloque el adhesivo, el cual mejora la superficie de contacto entre el sustrato y adhesivo para facilitar la unión. Una vez esté al descubierto, se pone el adhesivo sin que sobresalga del panel ya que en el proceso de curado el adhesivo fluye. Encima del adhesivo se debe apilar de nuevo el número de capas necesarias, 8 para el caso del panel simétrico y 2 en caso del no-simétrico. El proceso de apilado es igual al ya explicado en el punto 4.2.1. Apilado. Posteriormente, solo queda poner una nueva capa de Peel Ply para mantener la simetría al curar por la zona fresca. Cuando estén listos los paneles, se vuelve a realizar una bolsa de vacío tal y cómo se explica en 4.2.2. Bolsa de vacío.

### 4.2.5. Segundo curado

Con los paneles preparados, se procede al curado según la especificación del adhesivo empleado [12]. El ciclo de curado tiene las siguientes características:

**Tabla 2: Ciclo de Curado (IPS 10-01-006-02)**

Nº	Characteristic	Units	Requirements	
			Parts manufacturing	Release tests specimens manufacturing
1	Cure equipment	-	Autoclave	Autoclave
2	Heating rate	°C/min	0.2 to 5 <sup>1)</sup>	2 ± 1
3	Cure temperature	°C	170 to 185 <sup>1)</sup>	170 to 185
4	Cure time	min	60 to 180 <sup>1)</sup>	60 to 180
5	Bonding pressure in autoclave	kPa	100 to 1000 <sup>1)</sup>	300 ± 100
6	Cooling rate <sup>2)</sup>	°C/min	< 3 <sup>1)</sup>	2 ± 0.5
7	Vacuum pressure <sup>3)</sup>	kPa	5 to 100	> 95

Notes:  
 1) Process conditions to be adapted if agreed in an appropriate process instruction  
 2) Cool down (under pressure) to ≤ 80°C  
 3) Vent to atmosphere if agreed in an appropriate process instruction

Una vez se conoce las condiciones de curado se introducen las bolsas de vacío en el Autoclave para comenzar el co-bonding. Antes de empezar el curado, hay que comprobar que las bolsas no tienen pérdidas de vacío.



**Figura 27: Autoclave del Laboratorio de Elasticidad y Resistencia de Materiales.**

#### 4.2.6. Corte de muestras

Una vez se tienen los paneles curados, lo primero que hay que hacer es retirar el film de Peel Ply que hay en ambas caras. A continuación, se procede al recantado para eliminar los bordes de los paneles donde sobresale resina y no hay un buen estado superficial. Después, se cortan las probetas con las medidas diseñadas en el disco de corte. El disco consta de granos de diamante alrededor del mismo lo que permite cortar el carbono por abrasión refrigerando con agua constantemente.



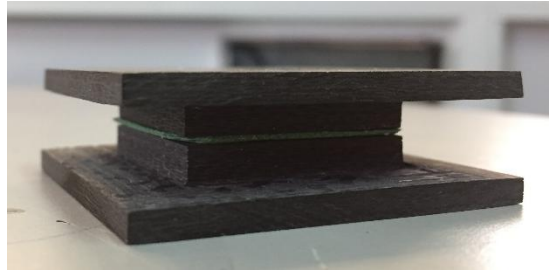
**Figura 28: Disco de corte.**

Hay que ser ordenado a la hora de cortar las probetas e identificarlas correctamente para no tener complicaciones posteriormente. Si se observa que alguna probeta esté en mal estado, se elimina de la campaña experimental.

#### **4.2.7. Probetas para el ensayo a tracción**

Se ha decidido explicar el proceso de fabricación de las probetas para realizar el ensayo de tracción plana al adhesivo en un apartado independiente por ser distinto al resto y no seguir ninguna norma en concreto. El objetivo de este ensayo es determinar la tensión de rotura a tracción del adhesivo, ello implica un fallo cohesivo en el modo de rotura para así estar caracterizando el adhesivo propiamente. En caso de fallo adhesivo, se estará analizando la adherencia entre el sustrato y el adhesivo, lo cual no es el propósito. Adicionalmente, se debe evitar la rotura entre el útil y el sustrato, lo cual es otra posibilidad bastante probable.

Para garantizar los requisitos necesarios de este ensayo se decide fabricar probetas como se muestra en la Figura 29. Se decide disminuir la sección de unión adhesiva para garantizar la rotura por esta zona, así como se emplean varias capas de adhesivo para asegurar un fallo cohesivo. Las probetas se fabrican mediante un proceso de curado de bonding, el sustrato previamente curado se somete al ciclo de curado con el adhesivo fresco. Puesto que se desea hallar una característica del adhesivo, se emplea el mismo que se ha utilizado en toda la investigación. Sin embargo, el adherente empleado es distinto por ahorro de tiempo en la fabricación, utilizando tejido a 45° de carbono. Siempre que se tenga un fallo cohesivo no influirá el sustrato en la rotura.



**Figura 29: Probeta para ensayar a tracción plana.**

La bolsa de vacío realizada para estas probetas es diferente al resto. Para empezar se curan las probetas con el útil pegado por ambas caras empleando el mismo adhesivo. Las probetas salen del Autoclave listas para ser ensayadas, sin un proceso de recantado ni corte. Adicionalmente, para la bolsa de vacío, las probetas ya con el útil pegado, se envuelven en airwave y se meten en una bolsa de teflón pegada cerrada con cromato, colocando previamente al cierre las tomas de vacío.



**Figura 30: Bolsa de vacío para probetas del ensayo a tracción.**

Durante el proceso de curado, el adhesivo fluye y se observa el rebose del mismo por la probeta, antes de ensayarlas se procede a quitar este rebose en el torno (Figura 31) para conocer con exactitud el área de pegado. Una vez retirado el adhesivo sobrante, se puede comenzar el ensayo.



**Figura 31: Eliminación del rebose del adhesivo.**

A continuación, se muestra el aspecto final de las tres muestras que se ensayan, una vez curadas y eliminado el rebose de adhesivo que fluyo durante el curado:



**Figura 32: Muestras antes de ensayar a tracción.**



# 5 RESULTADOS EXPERIMENTALES

---

La experimentación se divide en 3 fases: Caracterización de los materiales, pelado de muestras compatibles y pelado de muestras incompatibles.

## 5.1. Caracterización de los materiales

Aunque para el objetivo principal de este trabajo no se requeriría la caracterización de los materiales empleados, se ha considerado conveniente obtenerlas con objeto de poder alimentar los modelos numéricos de simulación que el Grupo de Elasticidad está llevando a cabo en otros trabajos.

Las propiedades que se van a obtener son tanto para el laminado como para el adhesivo empleado y son:

Laminado de carbono (Cinta Unidireccional)

-Módulo de Elasticidad en dirección de las fibras ( $E_{11}$ )

Adhesivo (tipo film)

- Cortadura simple ( $\tau$ )

- Tracción Plana ( $\sigma$ )

### 5.1.1. $E_{11}$ del laminado

Para hallar el módulo de elasticidad longitudinal en la dirección de la fibra, se emplean cuatro probetas de solo dos capas. Como solo se desea conocer el módulo, no se aplican las normas habituales para el ensayo de tracción (ASTM D3039). El ensayo consiste en colocar la probeta en la máquina Instron 4482 con el extensómetro colocado en ella longitudinalmente y ensayarla a tracción.

Antes de comenzar el ensayo hay que medir el espesor y el ancho del espécimen los cuales son necesarios porque el ensayo proporciona la carga, el desplazamiento de cruceta y la apertura del extensómetro. Con estos datos se calcula la tensión y la deformación de la siguiente manera:

$$\sigma = \frac{F}{b \cdot h} \quad ; \quad \varepsilon = \frac{L}{L_0}$$

Donde F es la carga obtenida del ensayo, L la apertura del extensómetro recogida de la toma de datos, y  $L_0$  la apertura inicial del extensómetro la cual es de 50 mm.



**Figura 33: Ensayo a tracción del laminado.**

Los resultados obtenidos para los laminados se muestran a continuación:

**Tabla 3: Resultados del módulo de elasticidad longitudinal en la dirección de la fibra**

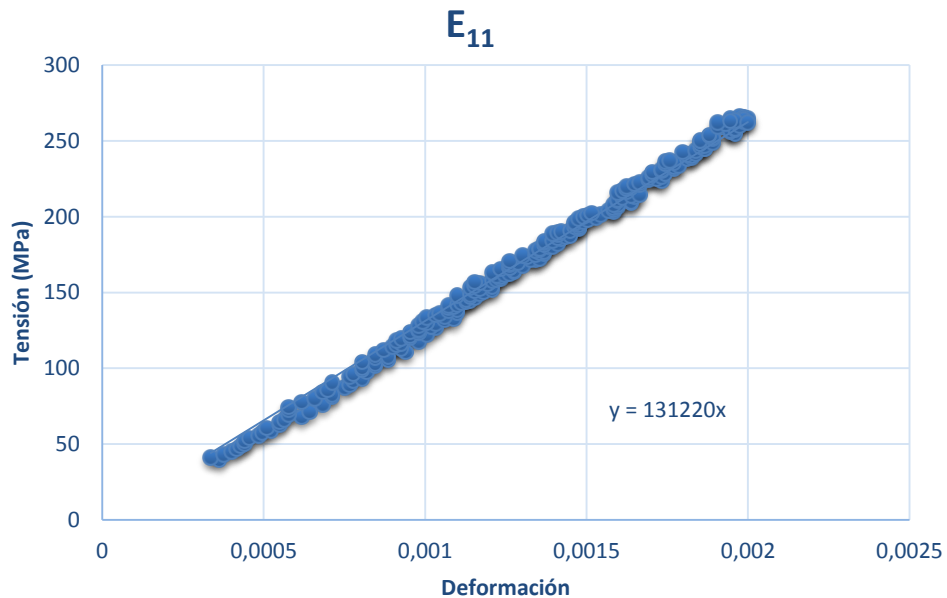
<b>Probeta</b>	<b>Ancho (mm)</b>	<b>Espesor (mm)</b>	<b><math>E_{11}</math> (GPa)</b>
1	25,28	0,6	131,22
2	25,31	0,5	140,26
3	25,27	0,60	137,53
4	25,14	0,58	127,25
<b>Promedio</b>			<b>134,07</b>
<b>CV (%)</b>			<b>4,41</b>

Se obtiene un valor de  $E_{11}$ :

$$E_{11} = 134,07 \text{ GPa}$$

Si se comparan con los datos que se tienen de la bibliografía, son totalmente aceptables ya que se exige de valor mínimo 133 GPa [11].

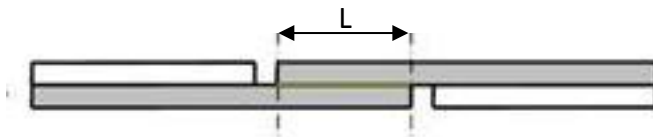
Los resultados procesados para hallar el módulo elástico para el laminado 1 se muestran en la gráfica siguiente:



### 5.1.2. Adhesivo

Respecto al adhesivo se quiere la resistencia a cortadura  $\tau$  y la resistencia a tracción  $\sigma$ . Para ello, se necesitan muestras simétricas [8+8] con el Peel Ply compatible.

Para hallar la resistencia a cortadura del adhesivo se sigue la norma AITM1-0019 [3], en la misma se especifican varias maneras de realizar el ensayo, en este caso se realiza el caso de *Slotted single lap shear*. En este caso las probetas son con dos muescas tal y como se ve en la Figura 34.



**Figura 34: Muestras para el ensayo de resistencia a cortadura**

En el ensayo se obtiene la carga de rotura, lo que permite hallar la resistencia a cortadura del siguiente modo:

$$\tau = \frac{F}{L \cdot b}$$

Donde F es la carga a la que rompe obtenida del ensayo, L la longitud entre las muescas (Figura 34) y b el ancho del espécimen. Siguiendo la norma se procede a realizar el ensayo con tres probetas del siguiente modo:

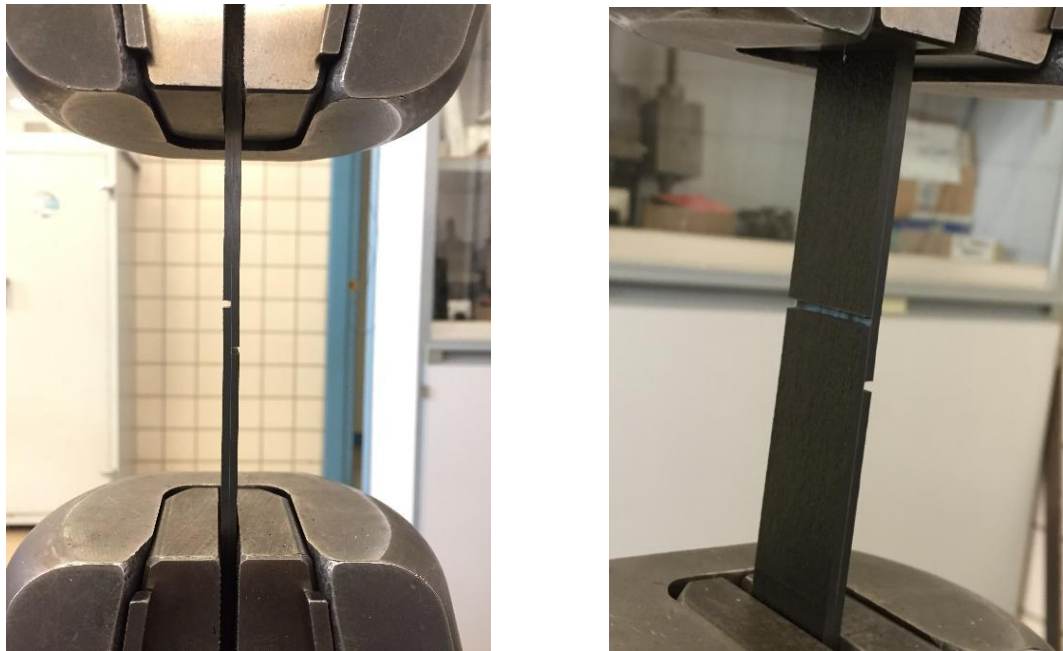


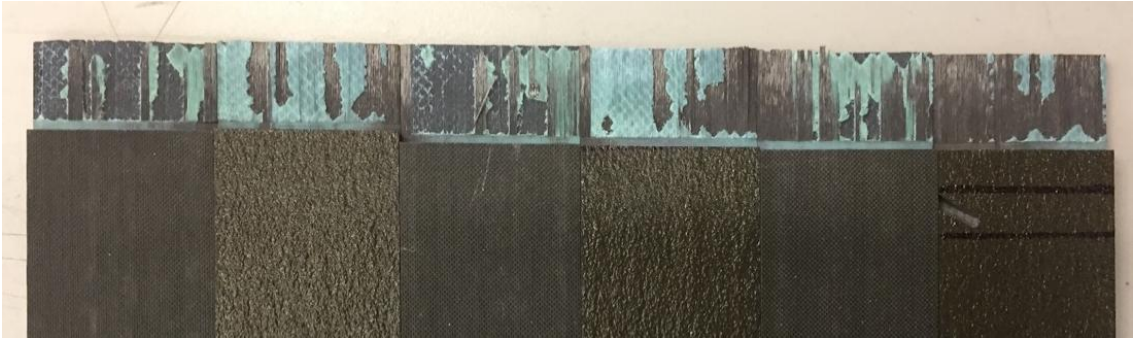
Figura 35: Ensayo de cortadura.

Los resultados obtenidos son:

Tabla 4: Resultados obtenidos de resistencia a cortadura para probetas simétricas

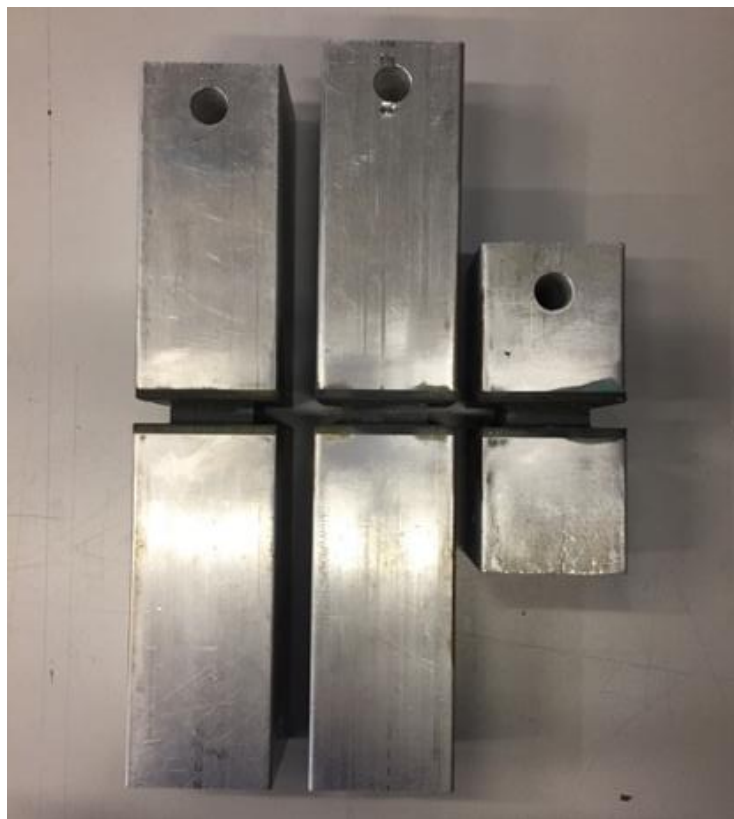
Espécimen	Ancho (mm)	L (mm)	Fuerza (N)	$\tau$ (MPa)
1	25,17	10,71	8994,78	33,37
2	25,16	12,46	10889,10	34,74
3	25,15	12,39	10908,72	35,00
<b>Promedio</b>				<b>34,37</b>
<b>CV %</b>				<b>2,55</b>

El resultado promedio obtenido de resistencia a cortadura es completamente comparable al que se encuentra en la bibliografía [12] de 27 MPa como valor mínimo. Siempre que esté por encima del valor mínimo requerido, se tienen buenas condiciones de funcionamiento. Sin embargo, en la bibliografía se muestran resultados para fallos cohesivos, mientras que en estos casos se observa, en la Figura 36, cómo ha habido delaminación en la rotura y parte de fallo adhesivo.



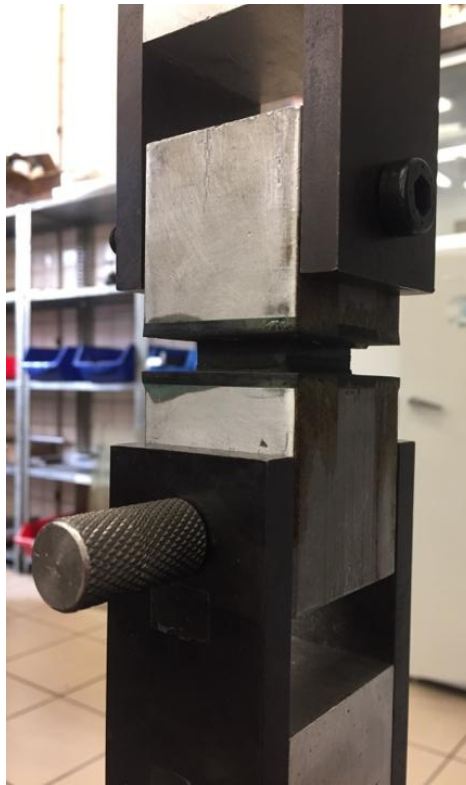
**Figura 36: Modos de fallo de resistencia a cortadura.**

Finalmente, se desea hallar la resistencia a tracción del adhesivo. Para ello se diseña una probeta como la explicada en el punto 4.2.7. y se ensaya a tracción. Las muestras al salir del Autoclave se muestran a continuación:



**Figura 37: Muestras para hallar la resistencia a tracción.**

Este ensayo se realiza sin seguir ninguna norma en concreto puesto que solo se quiere hallar el valor de resistencia a tracción plana del adhesivo. Como se ha explicado anteriormente, se han diseñado unas muestras muy características para asegurar la rotura cohesiva composite-composite. Antes de empezar, se debe medir con precisión el área estrecha donde se espera que rompa el material.



**Figura 38: Ensayo a tracción plana.**

A la hora de realizar los ensayos se encontró un problema, las tres muestras rompieron por la unión composite-aluminio a una carga bastante baja. Como se ha explicado esto no es lo se estaba buscando, y se dedujo que el fallo fue causado por el incorrecto estado de la superficie de aluminio. Por lo tanto, se decidió repetir las uniones composite-aluminio con adhesivo en frío. Una vez preparadas de nuevo los tres especímenes se realizaron los ensayos de nuevo consiguiendo los siguientes resultados de resistencia a tracción:

**Tabla 5: Resultados de resistencia a tracción del adhesivo**

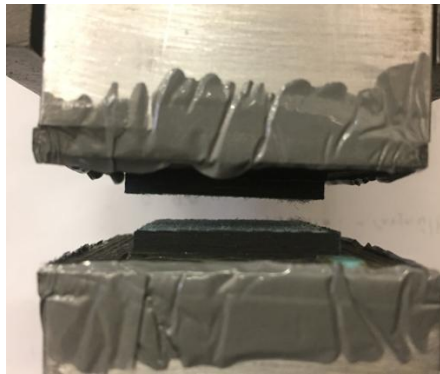
<b>Especímen</b>	<b>Área (mm<sup>2</sup>)</b>	<b>Fuerza (N)</b>	<b>Tensión (MPa)</b>
1	882,98	14096,97	<b>15,97</b>
2	891,02	-	-
3	896,40	15794,10	<b>17,62</b>
<b>Valor medio</b>			<b>16,79</b>
<b>CV (%)</b>			<b>6,97</b>

En el ensayo del segundo espécimen no se consiguió el objetivo buscado puesto que el fallo fue por delaminación en lugar de cohesivo, por lo tanto, la tensión de rotura no es característica de la resistencia a tracción plana del adhesivo, por ello no se incluye en la tabla.



**Figura 39: Delaminación del espécimen 2.**

Con los otros dos ensayos, que transcurrieron sin problemas, se obtiene un valor promedio de la resistencia a tracción mostrado en la tabla. La rotura si fue tal y como se esperaba, cohesiva composite-composite.



**Figura 40: Rotura cohesiva del espécimen 1.**

De igual modo fue la rotura del tercer espécimen. Los modos de fallos son los ya comentados y pueden observarse más claro en la siguiente figura:



**Figura 41: Modos de fallo del espécimen 1,3 y 2 de izquierda a derecha.**

Una vez finalizada la caracterización de los materiales, se procede a la comparación de los ensayos de tenacidad a fractura con los distintos tipos de probetas.

## 5.2. Ensayos con cinta

Los ensayos realizados con cinta a  $0^\circ$  se pueden dividir en 3 tipos, para comenzar se harán unos ensayos con muestras simétricas con el objetivo de que sirvan de referencia. El resto de ensayos se hacen a muestras no simétricas.

### 5.2.1. Muestras de referencia

#### 5.2.1.1. Muestras simétricas [8+8]

Para hallar  $G_{IC}$  se sigue la norma AITM1-0053 [4]. Es necesario marcar la probeta en las longitudes de grieta especificadas por la norma como se observa en la Figura 42.

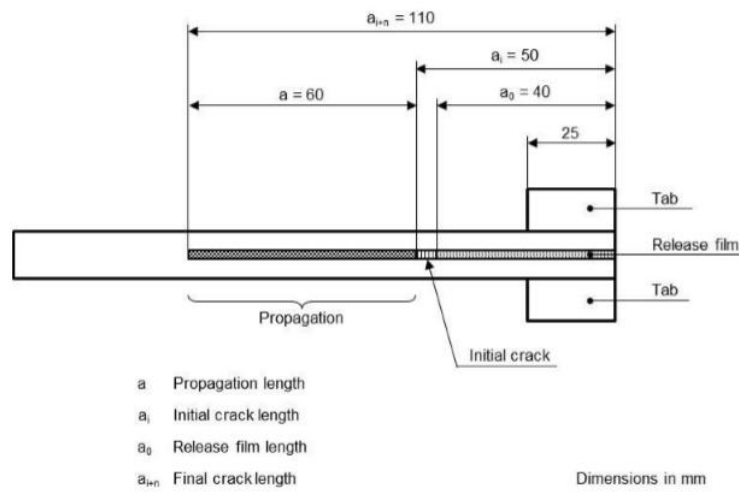


Figura 42: Preparación del ensayo  $G_{IC}$  según AITM1-0053.

Se ha realizado el ensayo a 5 probetas idénticas tal y como se observa a continuación:

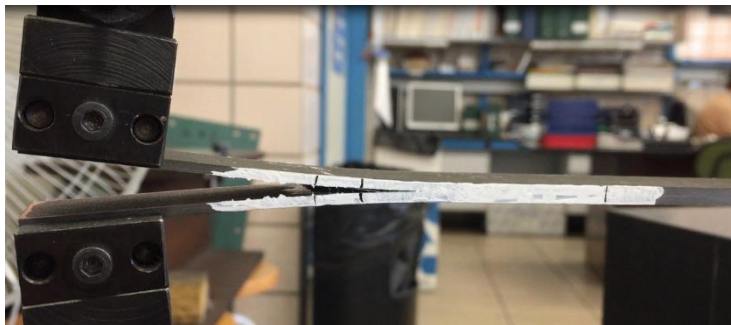


Figura 43: Ensayo AITM1-0053.

Se observa en la figura anterior como se ha pintado la probeta de blanco y se han marcado los puntos donde la propagación de grieta tiene interés. De este modo es más sencillo detectar la grieta visualmente con ayuda de una cámara con aumento de la imagen. Se intenta reducir el error del ensayo lo menos posible. Tras realizar los 5 ensayos de manera análoga, se obtienen los siguientes resultados:



Tabla 6: Resultados obtenidos para probetas simétricas [8+8] según AITM1-0053

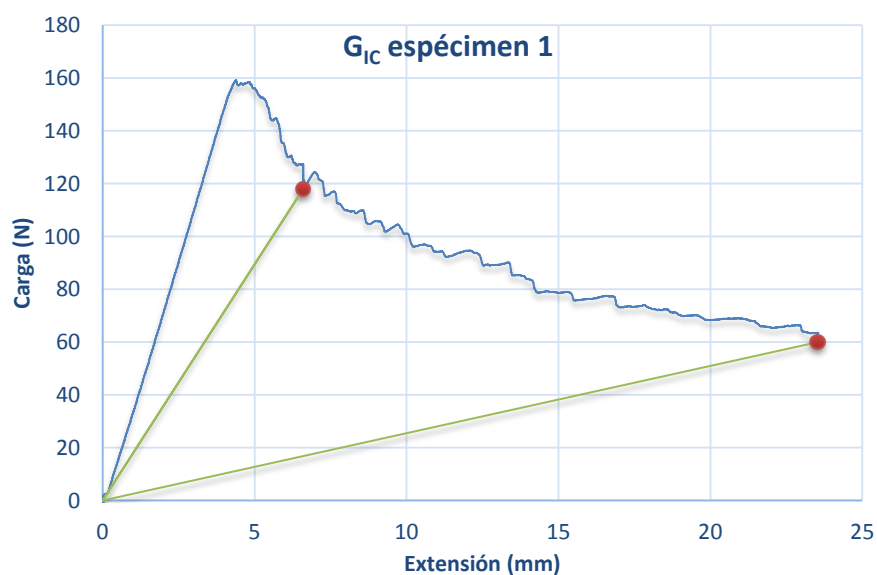
Espécimen	Ancho (mm)	$G_{IC}$ (J/m <sup>2</sup> )
1	25,19	745,0
2	25,16	766,3
3	25,21	765,3
4	25,23	778,7
5	25,03	696,3
<b>Promedio</b>		<b>750,3</b>
<b>CV %</b>		<b>4,3</b>

Se observa unos resultados con repetividad alta y con un coeficiente de variación muy bajo para el error habitual de este ensayo. El uso de la cámara ha reducido considerablemente el error.



Figura 44: DCB con cámara ampliadora.

Se muestra a continuación la gráfica obtenida durante el ensayo del espécimen 1:



Para obtener el valor de  $G_{IC}$  se ha desarrollado, dentro del contexto de este proyecto, una aplicación en Excel que implementa los procedimientos contemplados tanto en la norma ASTM como en la AITM. El valor de la tenacidad a fractura  $G_{IC}$  se halla obteniendo el área encerrada en la gráfica entre los dos puntos rojos, los cuales representan un crecimiento de grieta de  $\Delta a = 60$  mm, tal y como especifica la norma AITM [4]. El modo de fallo de cada espécimen se observa en la Figura 45.



**Figura 45: Mecanismos de fallo de las probetas simétricas [8+8] para  $G_{IC}$ .**

Los valores obtenidos de  $G_{IC}$  son algo superiores a los que obtendremos con otros procedimientos de ensayo y sobre configuraciones no simétricas en las que en principio esperaríamos unos valores de  $G_C$  superiores a  $G_{IC}$ . Para intentar dilucidar la causa de esta aparente anomalía se han llevado a cabo ensayos DCB sobre otra configuración simétrica, pero empleando un espesor de lámina igual al espesor de la lámina delgada (2 capas) que emplearemos en las configuraciones no simétricas [8+2].

#### **5.2.1.2. Muestras simétricas [2+2]**

El pequeño espesor de los laminados hace que las muestras tengan mucha menos rigidez que en el caso anterior. Esto supone tener grandes desplazamientos al realizar el ensayo DCB, obteniéndose deformadas sensiblemente diferentes a las de caso anterior [8+8] como se muestra en la Figura 46.



**Figura 46: Grandes desplazamientos en el ensayo DCB.**

Los procedimientos de cálculo empleados para el caso simétrico [8+8] no resultan de aplicación para este caso. Siguiendo el trabajo de Bazhenov [5] el valor de  $G_{IC}$  cuando la gráfica Fuerza-Desplazamiento se torna horizontal viene dado por:

$$G_{IC} = \frac{2P}{b}$$

Donde  $P$  es la carga “asintótica” constante necesaria para el pelado y  $b$  el ancho del espécimen. La gran ventaja de emplear probetas de poca rigidez es que si se consigue la zona horizontal durante el ensayo, no requiere medir la longitud de grieta. Con estas pautas se procede a realizar el ensayo obteniendo los siguientes resultados:

**Tabla 7: Resultados obtenidos de  $G_{IC}$  para muestras simétricas [2+2]**

<b>Espécimen</b>	<b>Ancho (mm)</b>	<b><math>G_{IC}</math> (J/m<sup>2</sup>)</b>
1	24,93	505,96
2	24,93	516,69
3	24,94	486,39
4	24,91	474,54
	<b>Promedio</b>	<b>495,90</b>
	<b>CV %</b>	<b>3,8</b>

Los resultados obtenidos para estas muestras son mucho más bajos que para las muestras simétricas [8+8], este hecho puede ser debido a varias causas:

- a) El modo de fallo es diferente. En la probeta de la configuración simétrica con 8 capas se podría decir que el modo de fallo es algo intermedio entre cohesivo y adhesivo, en el caso de 2 capas el modo es claramente adhesivo.

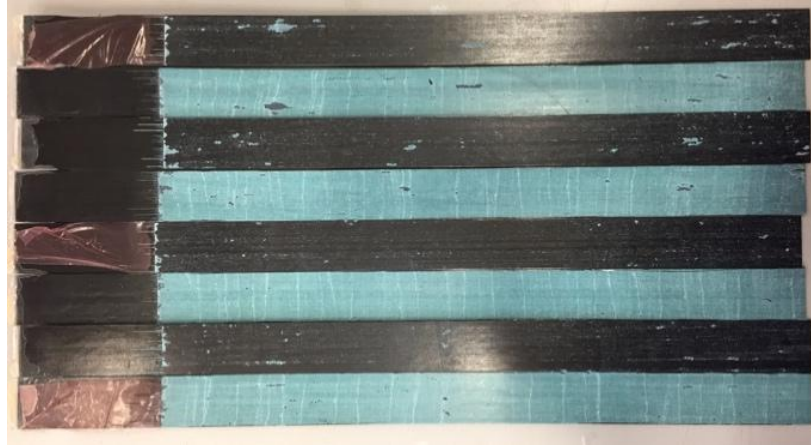
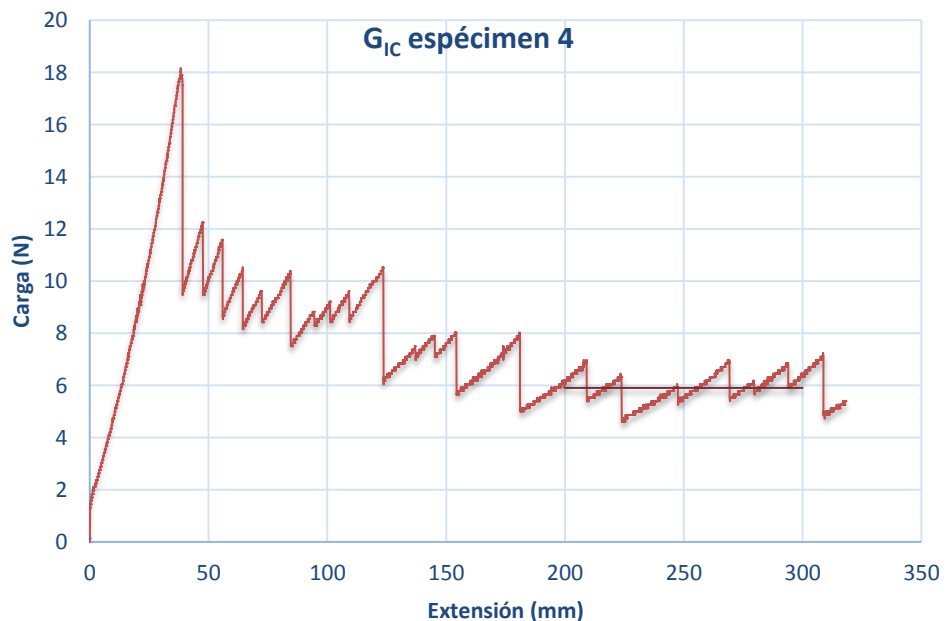


Figura 47: Modos de fallo de muestras simétricas [2+2].

- b) El espesor de la capa adhesiva es del orden de espesor de las láminas, la forma de fabricación (curado una lámina y posteriormente co-pegado adhesivo y la otra lamina) y la posible falta de uniformidad en comparación con los espesores manejados pueden estar en la raíz del diferente comportamiento. La curva Fuerza-desplazamiento esta en diente de sierra mientras que en el caso de 8 capas-8 capas es suave.



## 5.2.2. Configuraciones no simétricas compatibles

Los siguientes dos apartados tratan de evaluar ensayos de pelado a probetas no simétricas, con el pelable compatible en este caso. Se comparan tres ensayos distintos que permiten hallar la tenacidad a fractura interlaminar. Se desea determinar el vigor de los resultados obtenidos con el nuevo dispositivo de pelado, HDP.

### 5.2.2.1. Ensayo DCB

Este ensayo se caracteriza por determinar el valor de tenacidad a fractura para uniones encoladas en modo I, sin embargo, al trabajar con muestras no simétricas se puede observar en la Figura 48 que para estas configuraciones la deformada es diferente al caso simétrico (Figura 43), por lo tanto, el análisis de planteado en la norma para hallar  $G_{IC}$  tiene varios inconvenientes en estas muestras.



Figura 48: Ensayo AITM1-0053 para probeta no simétrica.

La importancia de detectar adecuadamente el crecimiento de grieta hace necesario la utilización de una cámara que muestre el desarrollo del ensayo ampliado para mejorar la precisión del ensayo. Se observa en la Figura 49 el empleo de la cámara y las imágenes que ella mostraba, lo cual ayuda considerablemente a aumentar la exactitud de resultados.



Figura 49: Desarrollo del ensayo DCB.

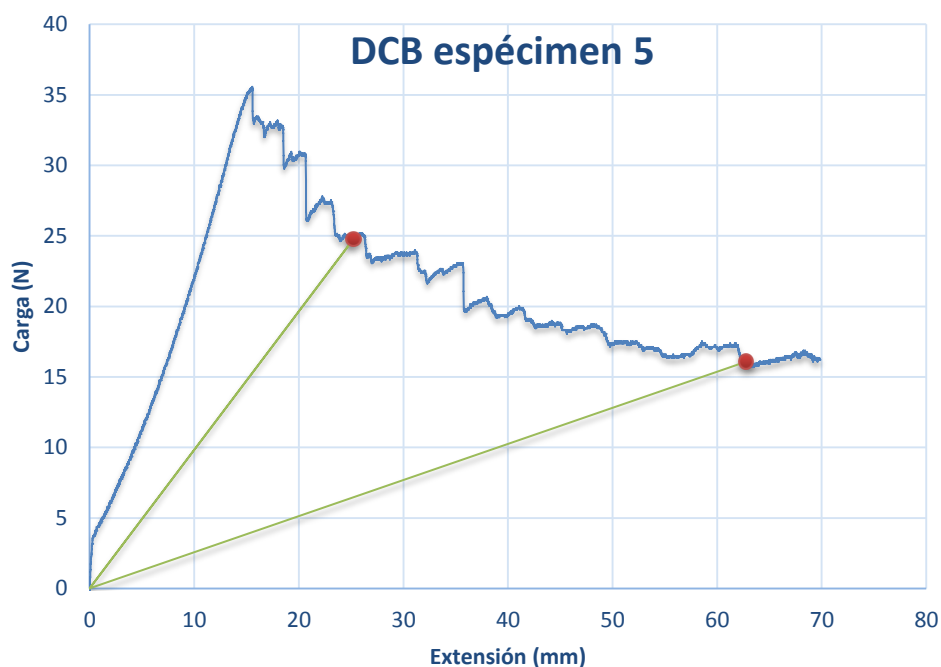
La realización del ensayo DCB a 5 probetas no simétricas compatibles proporcionan los siguientes resultados, procesándolos según se ha explicado en el punto 2.1.

**Tabla 8: Resultados obtenidos de  $G_{Ic}$  para muestras compatibles**

Espécimen	Ancho (mm)	$G_c$ (J/m <sup>2</sup> )
1	25,19	479,1
2	25,28	519,8
3	25,27	553,7
4	25,21	476,6
5	25,17	537,8
<b>Promedio</b>		<b>513,4</b>
<b>CV %</b>		<b>6,7</b>

El valor obtenido de  $G_c$  para uniones no simétricas compatibles tiene un margen de error propio del ensayo, que como se ha comentado, presenta algunos inconvenientes a la hora de detectar la grieta, lo cual aporta una fuente de error considerable. Los resultados obtenidos para las configuraciones no simétricas son obtenidos empleando el procedimiento que la norma detalla, sin embargo, no es válido para estas muestras, puesto que al no guardar la simetría el procedimiento es incorrecto<sup>3</sup>. Adicionalmente, se observa claramente en la Figura 48 como la hipótesis de pequeños desplazamientos no es válida para estas configuraciones debido a la poca rigidez del espesor pequeño. Aunque se sabe que los resultados no deben calcularse del modo que se ha hecho, los valores no deben distar excesivamente de los hallados.

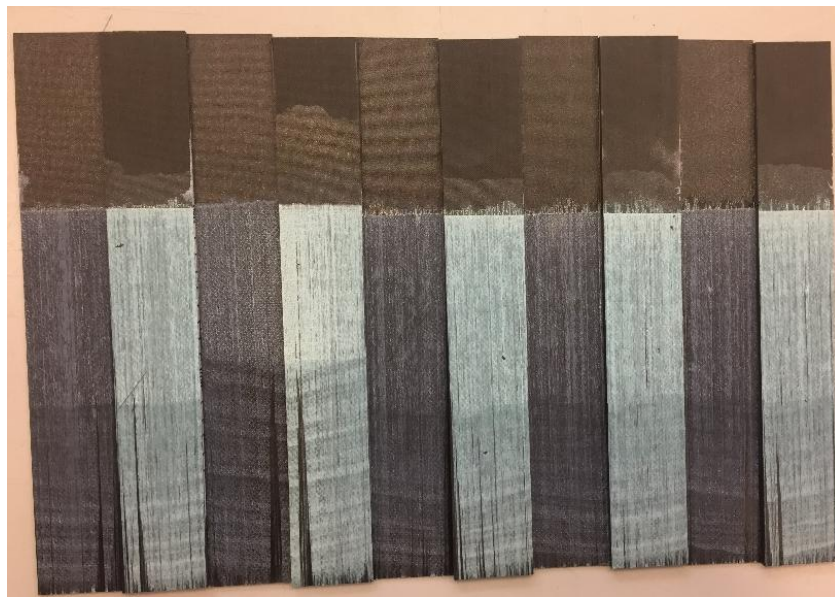
Se muestra a continuación la gráfica obtenido en el ensayo para el espécimen 5:



<sup>3</sup> El estudio de este ensayo para uniones no simétricas cae fuera del alcance este trabajo y se está llevando a cabo en otros trabajos que lleva a cabo el Grupo.

Los dos puntos rojos de la gráfica son los dos puntos donde calculamos la energía necesaria para propagar la grieta de 10mm a 70mm, tal como especifica la norma [4]; por lo tanto, la longitud de grieta es de 60mm. La energía requerida para el crecimiento de grieta es la encerrada en la gráfica por un “triángulo”.

El modo de fallo de los especímenes, al igual que en la configuración [8+8] es algo intermedio entre cohesivo y adhesivo, como se observa en la Figura 50, aunque a la vista de las diferencias de color entre las superficies nos atreveríamos a decir que es menos cohesivo que la configuración [8+8]. Además, se observa en las probetas 2, 3 y 4, como el frente de grieta no es recto, lo cual indica que la grieta no ha crecido igual por ambos lados de la probeta.



**Figura 50: Modos de fallo del ensayo DCB para probetas no simétricas compatible.**

#### **5.2.2.2. Ensayo Climbing Drum Peel**

El segundo método empleado es el CDP [9] en 5 muestras no simétricas. Como se mencionó en el punto 2.2. Ensayo Climbing Drum Peel, este procedimiento no provoca una fractura interlaminar exclusivamente en modo I, influye el modo II ligeramente, por lo tanto no se pueden esperar los mismos valores que en el ensayo  $G_{IC}$ , sino un poco superiores a ellos.

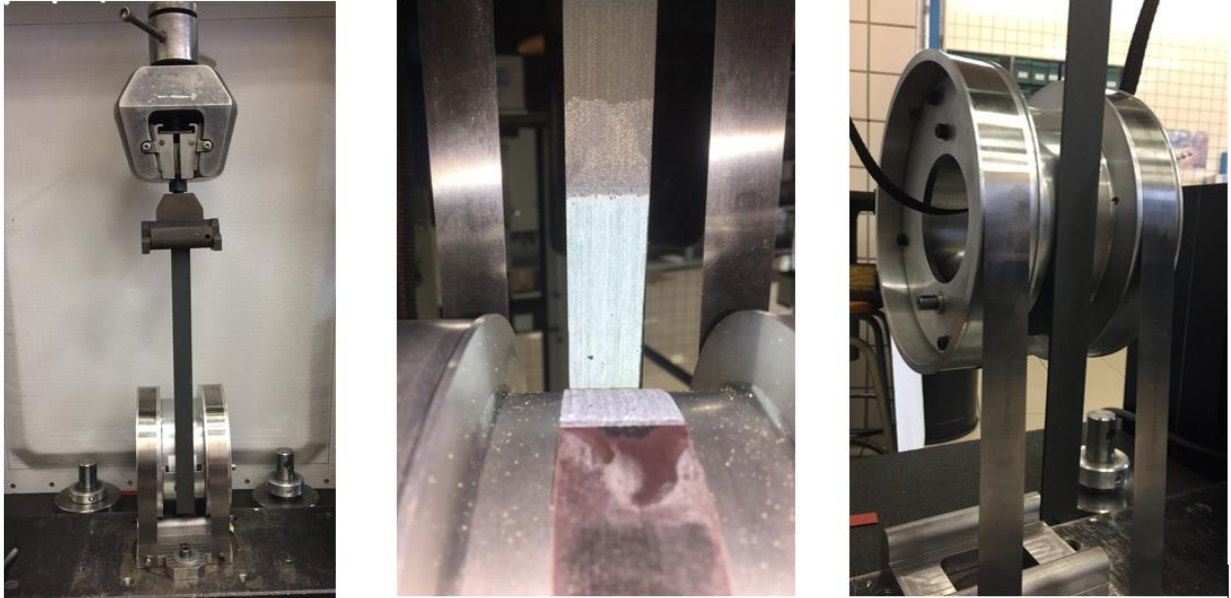


Figura 51: Ensayo CDP.

Procediendo según la norma [9] y siguiendo los pasos explicados en el punto 2.2., se hallan los siguientes resultados:

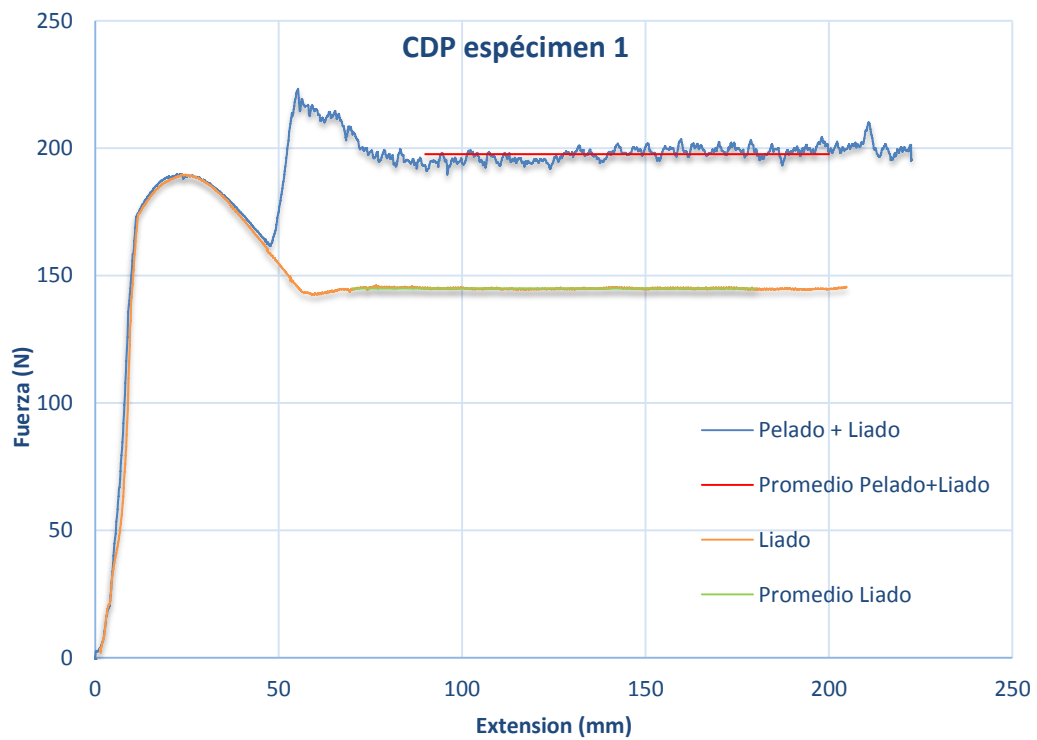
Tabla 9: Resultados obtenidos con CDP para probetas no simétricas compatibles

Espécimen	Ancho (mm)	Espesor de la piel (mm)	Fuerza (N)		Tensión de Pelado		G <sub>c</sub>
			Pelado+ Liado	Liado	Pelado	N/mm	J/m <sup>2</sup>
1	25,14	0,58	197,69	145,02	52,7	2,10	519,1
2	25,27	0,60	201,43	143,90	57,5	2,28	563,6
3	25,19	0,60	205,90	143,81	62,1	2,46	610,3
4	25,18	0,58	198,66	143,14	55,5	2,20	546,3
5	25,15	0,55	203,20	141,70	61,5	2,45	606,4
<b>Promedio</b>							<b>569,1</b>
<b>CV %</b>							<b>6,9</b>

El resultado medio obtenido es comparable con la tenacidad a fractura obtenido con el ensayo de referencia DCB, como se esperaba, el CDP es un ensayo totalmente válido para el pelado de muestras no simétricas.

A continuación, se muestra la gráfica obtenida durante el ensayo para el espécimen 1:





Se observan dos series de datos en el gráfico, en azul el rango de pelado+liado, y en naranja el liado posterior. Se calcula la media y ya se puede obtener la carga necesaria para el pelado necesaria para obtener  $G_C$ .



**Figura 52: Modos de fallo al realizar CDP en probetas compatibles.**

Los modos de fallo obtenidos de los 5 especímenes son análogos a los obtenidos para la configuración DCB no simétrica como se observa en la Figura 52.

### 5.2.2.3. Ensayo Horizontal Drum Peel

Por último, se procede a realizar el ensayo con el nuevo dispositivo presentado en este proyecto. Se pretende comparar los resultados de tenacidad a fractura interlaminar con los dos ensayos anteriores, así como analizar el funcionamiento del dispositivo. Para la realización del ensayo se siguen los pasos detallados en el punto 3.2. Procedimiento del ensayo HDP. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10: Resultados obtenidos con HDP para probetas no simétricas compatibles

Especímen	Ancho (mm)	Espesor de la piel (mm)	Momento (Nm)		$G_c$
			Pelado+ Liado	Liado	J/m <sup>2</sup>
1	25,18	0,52	1,94	0,51	598,5
2	25,18	0,53	2,09	0,48	671,6
3	25,28	0,56	1,84	0,52	549,5
4	25,18	0,56	1,97	0,54	598,6
5	25,34	0,55	1,86	0,49	568,5
			<b>Promedio</b>		<b>597,3</b>
			<b>CV %</b>		<b>7,8</b>

El resultado vuelve a ser del orden de los obtenidos en los dos ensayos anteriores. Se debe mencionar que durante el ensayo se mantiene un patrón de despegue durante todo el pelado, tal y cómo se había reportado numéricamente [10].

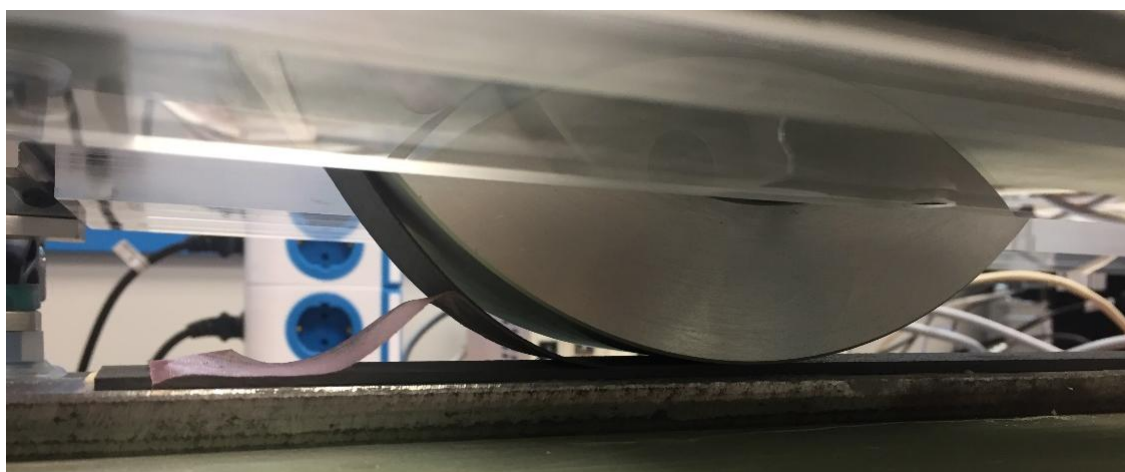


Figura 53: Comienzo del pelado, comienzo del despegue.

Si se realizan dos fotografías en distintos momentos del ensayo una vez que ya se ha comenzado el pelado, se aprecia que se mantiene constante el patrón de despegue, lo que hace posible el análisis mecánico del HDP.

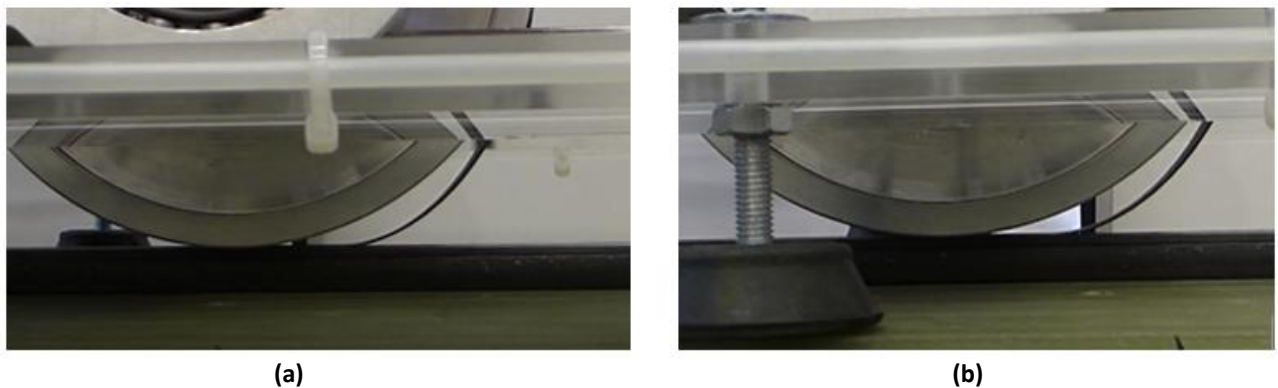
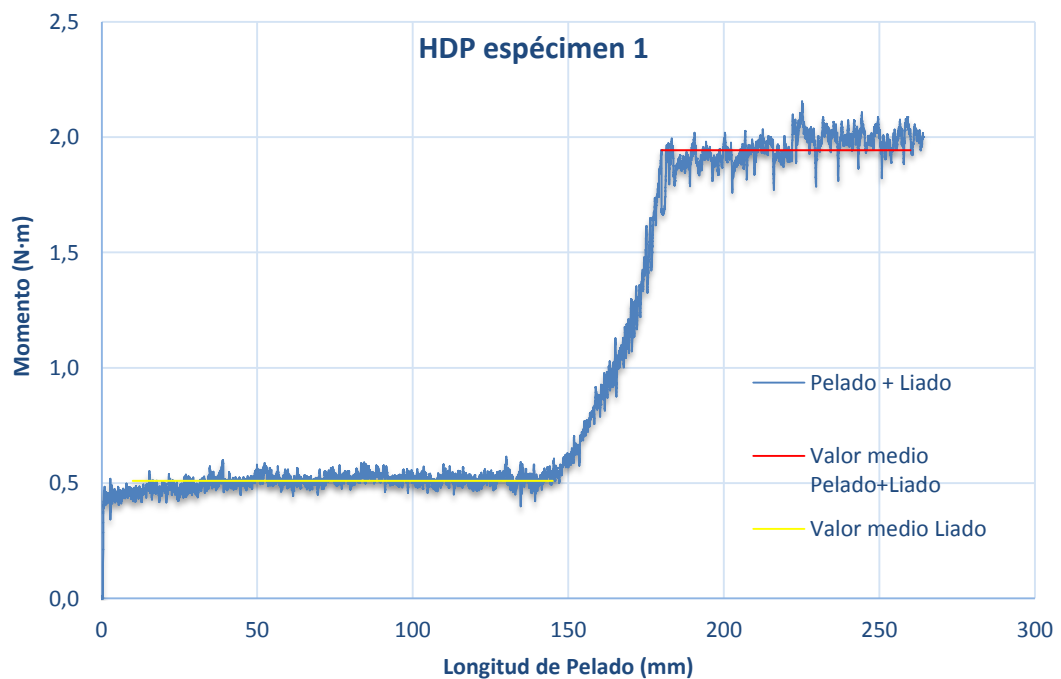


Figura 54: Evolución del ensayo para el espécimen 2, manteniéndose el patrón de despegue.

Esta comprobación es una de las más importantes que se plantea en este estudio, puesto que todo el análisis que se realiza para calcular la tenacidad a fractura, usando el HDP, depende de que el despegue sea constante, lo cual hace posible afirmar que la longitud de grieta propagada coincide con la parte de probeta que se enrolla en el tambor, y así, no es necesario medir la grieta durante el ensayo.

A continuación, se muestra los resultados obtenidos para el espécimen 1:



Se observa como el primer tramo corresponde a la zona de la probeta con teflón, en el cual se obtiene el momento de liado realizando el promedio. El segundo tramo pertenece a la parte pegada obteniéndose el momento de pelado-liado.

Los modos de fallos obtenidos para este ensayo coinciden también con los obtenidos con CDB y el DCB, como se observa en la Figura 55.



**Figura 55: Modos de fallo para el HDP para probetas compatibles.**

Se aprecia como las muestras en el HDP son ensayadas hasta el final prácticamente, mientras que en el CDP gran parte de la probeta queda desaprovechada por el mero montaje del ensayo, ya que llega un punto que el tambor choca con el útil de la mordaza superior y se tiene que parar el ensayo restando una zona de la probeta sin ensayar. Con el HDP se consigue un mayor aprovechamiento de las muestras y, por lo tanto, de material.

### **5.2.3. Configuraciones no simétricas. Muestras incompatibles**

En este caso, se siguen los mismos pasos que en el apartado 5.2.2., solo que las probetas son con el pelable incompatible. El objetivo es conseguir determinar la eficacia a la hora de emplear este Peel Ply.

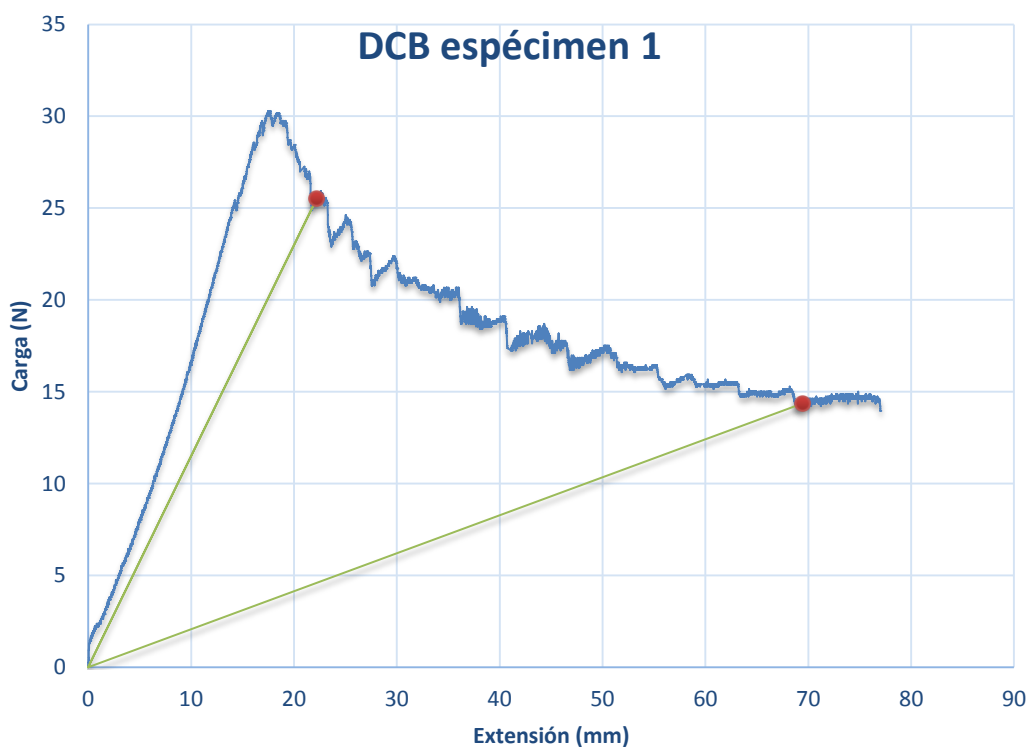
#### **5.2.3.1. Ensayo DCB**

Este ensayo se realiza del mismo modo que hemos realizado para muestras compatibles. Se sigue empleando la cámara aumentadora y las marcas en el espesor de las probetas para facilitar la detección de la grieta, como ya se ha explicado para los casos anteriores.

**Tabla 11: Resultados obtenidos de  $G_{IC}$  para muestras incompatibles**

Espécimen	Ancho (mm)	$G_C$ (J/m <sup>2</sup> )
1	25,04	540,0
2	25,26	509,0
3	25,25	463,9
4	25,28	501,7
5	25,26	443,2
<b>Promedio</b>		<b>491,6</b>
<b>CV %</b>		<b>7,8</b>

Procediendo análogamente a los ensayos realizados para muestras compatibles se obtiene un promedio cercano al hallado para ellas. Como son probetas no simétricas también tenemos un ensayo que no mantiene la simetría y no podemos hallar  $G_{IC}$ , sino  $G_C$ . Del mismo modo, el cálculo llevado a cabo para calcular la tenacidad a fractura no es válido para muestras no simétricas, no obstante, el valor hallado no debe ser muy diferente al valor real. Los datos recogidos y procesados para la muestra 1, se muestran en el siguiente gráfico:



De igual modo, se ha tomado la propagación de grieta de 60mm entre los dos puntos señalados en rojo y calculando el área recogida bajo la curva, obteniendo así un valor de  $G_c=540,0 \text{ J/m}^2$ .

A continuación, se muestran los modos de fallo de las muestras. En la Figura 56 se observa que el modo de fallo es igual al que se obtuvo con las muestras compatibles. El frente de grieta es más recto que en el caso de muestras compatibles.

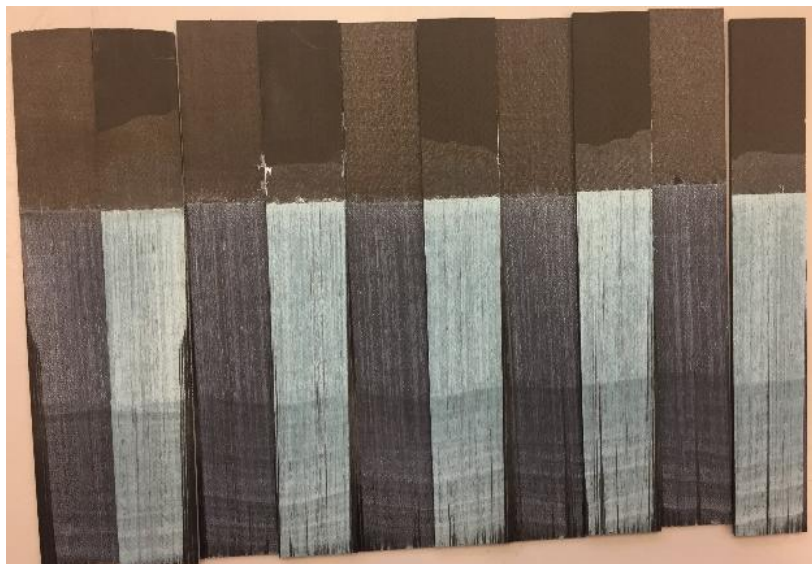


Figura 56: Modos de fallo para DCB de muestras incompatibles.

### 5.2.3.2. Ensayo Climbing Drum Peel

Para hallar los valores de  $G_c$  mediante el CDP se procede de igual manera que para muestras compatibles, siguiendo la norma [9]. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12: Resultados obtenidos con CDP para probetas no simétricas incompatibles

Espécimen	Ancho (mm)	Espesor de la piel (mm)	Fuerza (N)		Tensión de Pelado		$G_c$
			Pelado+Liado	Liado	Pelado	N/mm	
1	25,27	0,60	197,23	142,82	54,4	2,15	533,1
2	25,27	0,58	202,97	143,37	59,6	2,36	584,3
3	25,38	0,58	208,60	142,07	66,5	2,62	649,5
4	24,90	0,54	203,89	141,33	62,6	2,51	623,3
5	25,23	0,57	198,54	142,40	56,1	2,22	551,4

---

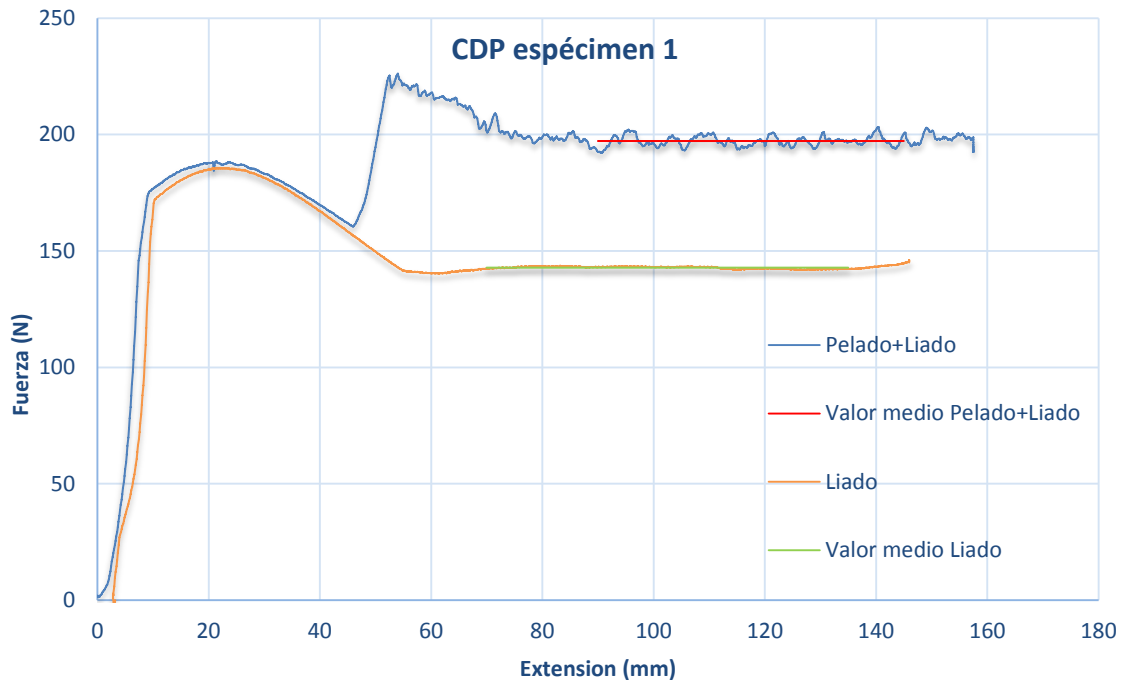
Promedio	597,5
----------	-------

CV %	8,5
------	-----

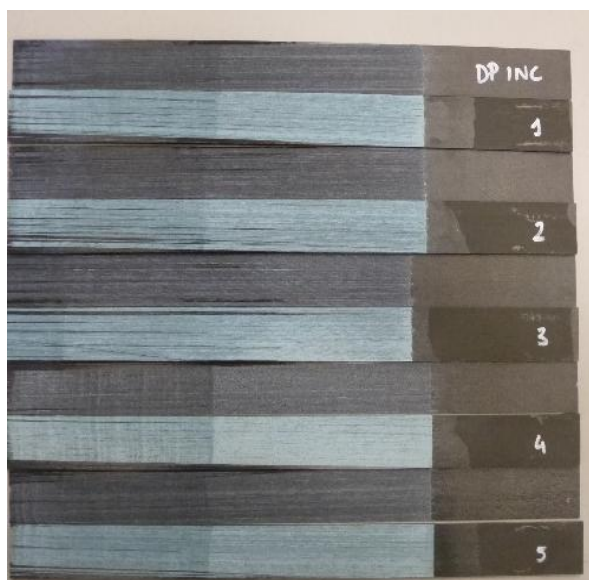
---

Los valores de tenacidad a fractura para el CDP son similares a los obtenidos para muestras compatibles y un poco superior al hallado con el DCB para estas probetas. Esta diferencia con el DCB puede estar debida al modo de hallar  $G_C$  en el DCB para las muestras no simétricas no es del todo correcto.

A continuación, se muestra el gráfico obtenido para el espécimen 1 con el CDP:



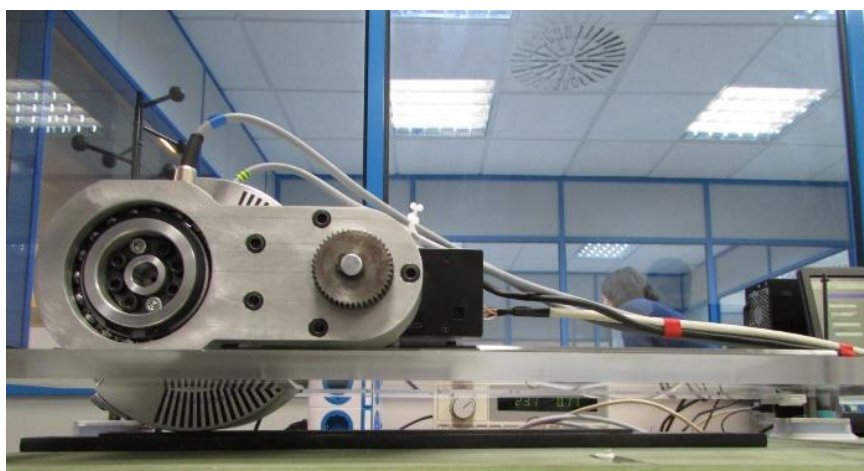
Análogo al caso de muestras compatibles, se halla  $G_C$  gracias a las cargas medias de pelado-liado y de liado. Los modos de fallo son cohesivos con tendencia a adhesivos, lo cual coincide con las roturas halladas hasta ahora en el resto de ensayos realizados:



**Figura 57: Modos de fallo tras el CDP para probetas incompatibles.**

### 5.2.3.3. Ensayo Horizontal Drum Peel

Finalmente, se desea hallar el valor de tenacidad a fractura interlaminar de muestras incompatibles con el nuevo dispositivo.



**Figura 58: Ensayo HDP para el espécimen 3 incompatible.**

La imagen muestra el dispositivo justo al comenzar el ensayo, donde está transcurriendo el liado de la probeta, por lo tanto, el tambor aún está pegado a la muestra hasta que llega al adhesivo. En este momento, el tambor se comienza a separar, aumentando el momento torsor hasta que es suficiente para comenzar a pelar. A partir de aquí, se mantiene el patrón de despegue, al igual que en el caso de muestras compatibles. Repitiendo el ensayo HDP para 5 muestras incompatibles, se hallan los siguientes resultados:

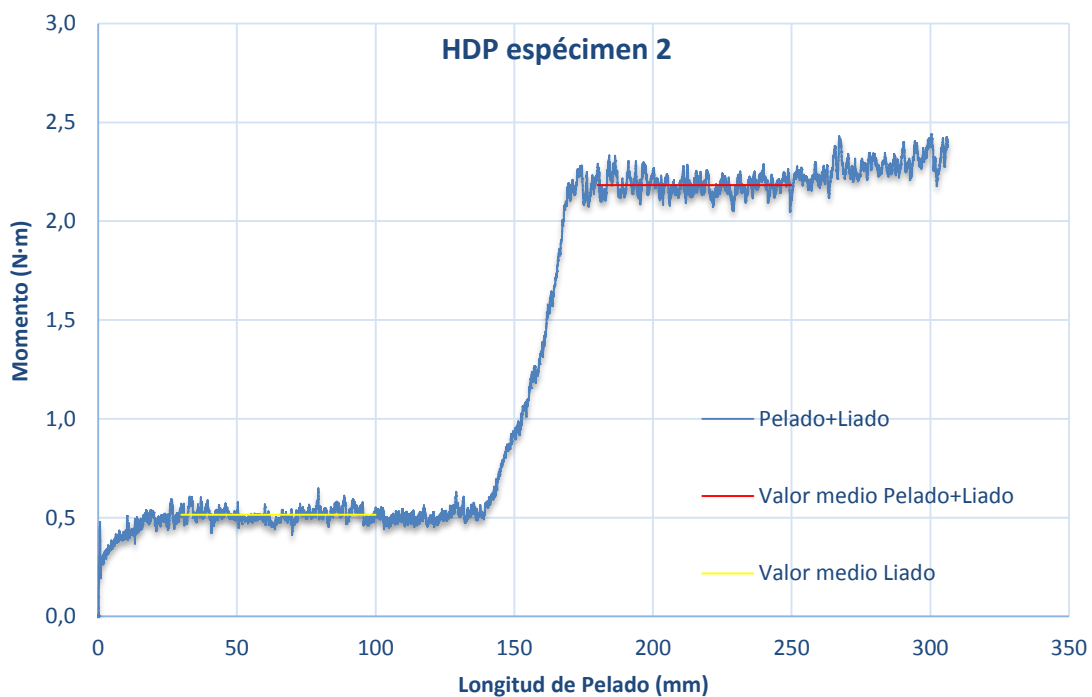
**Tabla 13: Resultados obtenidos con HDP para probetas no simétricas incompatibles**



Espécimen	Ancho (mm)	Espesor de la piel (mm)	Momento (Nm)		G <sub>c</sub>
			Pelado+Liado	Liado	J/m <sup>2</sup>
1	25,19	0,51	1,91	0,50	589,7
2	25,15	0,55	2,18	0,51	697,0
3	25,29	0,52	2,00	0,61	577,9
4	25,33	0,52	1,91	0,43	616,1
5	25,16	0,56	1,69	0,32	569,4
			<b>Promedio</b>		<b>610,0</b>
			<b>CV %</b>		<b>8,5</b>

Los resultados de tenacidad a fractura para HDP son similares a los hallados para el CDP al igual que los obtenidos para el HDP y CDP para muestras compatibles.

A continuación se muestra la gráfica para el espécimen 2:



Analizando los modos de fallo, se puede observar que son cohesivos de nuevo acercándose a ser adhesivos:



Figura 59: Modos de fallo en HDP para probetas incompatibles.

### 5.3. Ensayos con tejido

En este apartado de la investigación se estudia la tenacidad a fractura interlaminar para el mismo adhesivo que se ha empleado en las probetas con cinta. En este caso, AIRBUS manda dos series de muestras fabricadas con tejido a 45°. Su objetivo es que el dispositivo sea capaz de realizar el ensayo de pelado a tambor directamente sobre la pieza real que deseen, por lo tanto realizan una campaña experimental para determinar la validez del dispositivo llevada a cabo en esta investigación. Las características del material que se recibe son:

Tabla 14: Propiedades de los materiales de las muestras de tejido

Lámina a pelar: Hexcel C6376							Adhesivo: FM 300K.05			
$E_{11} = E_{22}$	$\nu_{12}$	$G_{12}$	Orient.	Esp. (t)	$E_x$	$\sigma_{adm}$	$t_{adm}$	$\sigma_{adm}$	$G_{1c}$	$G_{2c}$
66 GPa	0,05	4,5 GPa	$[45]_2$	0,75 mm	17 GPa	76 MPa	40 MPa	6 MPa	870 $\frac{J}{m^2}$	>2000 $\frac{J}{m^2}$

Los ensayos realizados a estas muestras son para comparar el CDP con el HDP, tal y como se había realizado para las muestras de cinta. Sin embargo, en este caso se procede de manera distinta. Para una mejor comparación de resultados, la misma probeta se ensaya mediante pelado vertical, sin pelar totalmente la probeta, y posteriormente mediante el pelado horizontal. Así, se puede comparar el valor de tenacidad a fractura de cada muestra por separado por dos métodos distintos. Este cambio respecto a los ensayos anteriores es debido a que se conoce minuciosamente la fabricación y el estado de las probetas que se han fabricado, mientras que desconocemos cómo llegan las probetas mandadas y cómo ha sido su proceso de fabricación.

#### 5.3.1. Serie 1

La serie 1 consta de 12 probetas agrupadas en 4 grupos. Los resultados obtenidos son:

Tabla 15: Resultados obtenidos con el CDP y HDP para la serie 1

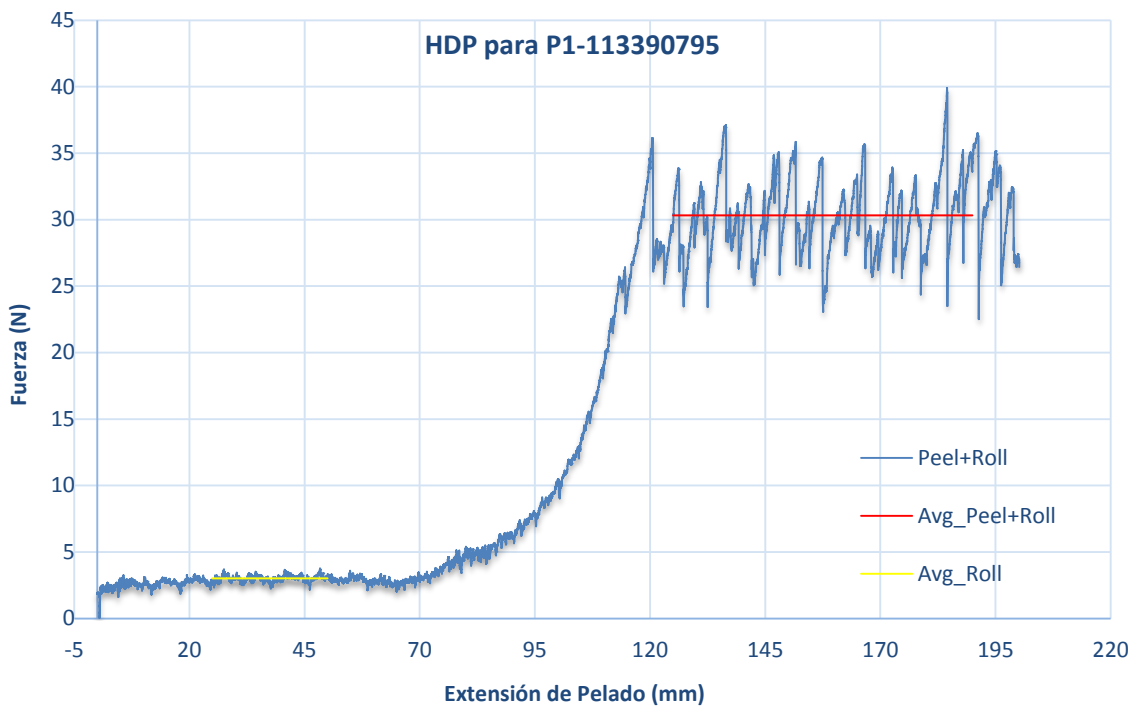
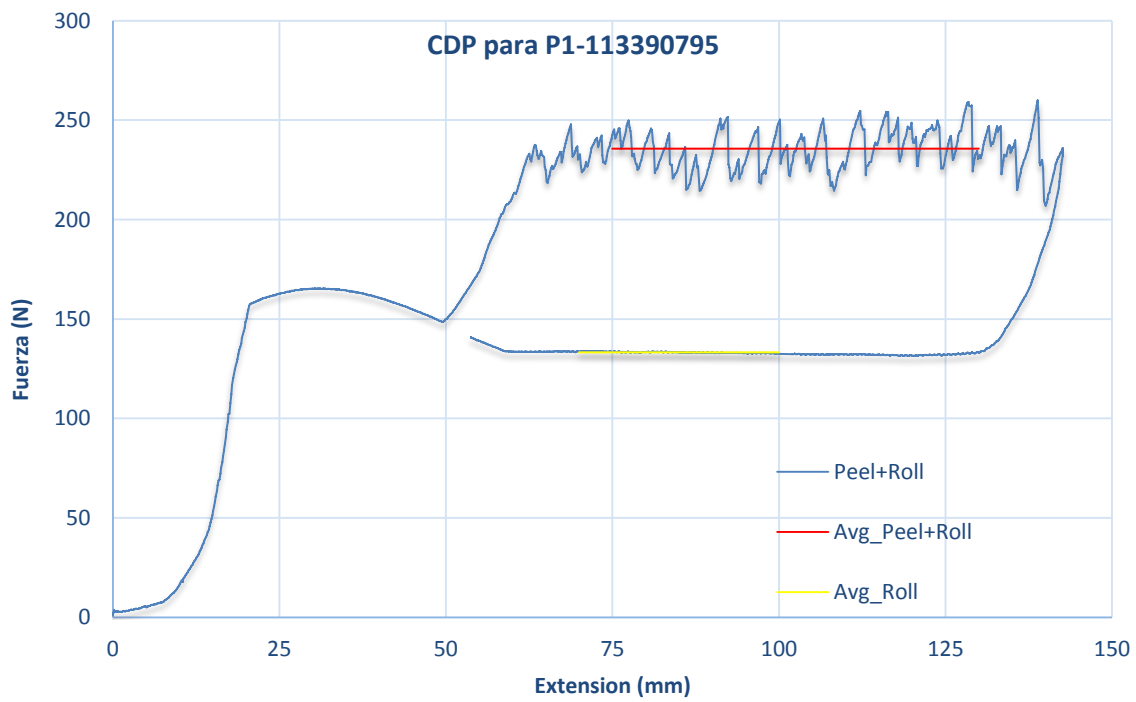
CLIMBING DRUM PEEL	HORIZONTAL DRUM PEEL
--------------------	----------------------

Probeta	b (mm)	t (mm)	F <sub>d</sub> (N)	F <sub>w</sub> (N)	G <sub>c</sub> (J/m <sup>2</sup> )	M <sub>d</sub> (Nm)	M <sub>w</sub> (Nm)	G <sub>c</sub> (J/m <sup>2</sup> )
P1-113497920	25,60	0,90	218,37	135,07	<b>797,9</b>	2,71	0,37	<b>961,7</b>
P2-113497920	25,30	0,86	224,19	133,98	<b>875,4</b>	2,70	0,25	<b>1016,8</b>
P3-113497920	25,30	0,86	217,96	137,24	<b>783,4</b>	2,75	0,17	<b>1068,7</b>
P1-113390795	25,35	0,75	235,74	133,31	<b>995,7</b>	2,89	0,29	<b>1077,2</b>
P2-113390795	25,12	0,85	217,58	133,84	<b>818,7</b>	2,76	0,53	<b>930,0</b>
P3-113390795	25,45	0,85	216,31	133,68	<b>797,4</b>	2,38	0,17	<b>909,6</b>
P1-113497927	25,21	0,90	232,49	133,60	<b>961,7</b>	2,97	0,33	<b>1099,0</b>
P2-113497927	25,31	0,89	219,68	133,50	<b>835,2</b>	3,02	0,57	<b>1017,0</b>
P3-113497927	25,44	0,85	217,01	133,25	<b>808,6</b>	2,43	0,42	<b>829,1</b>
P1-113497929	25,30	0,85	-	-	-	2,98	0,35	<b>1093,5</b>
P2-113497929	25,23	0,85	207,09	134,45	<b>707,2</b>	2,51	0,32	<b>913,2</b>
P3-113497929	25,35	0,87	222,90	134,16	<b>859,1</b>	2,65	0,25	<b>992,1</b>
<b>Valor medio</b>					<b>840,0</b>	<b>Valor medio</b>		<b>992,3</b>
<b>CV (%)</b>					<b>9,7</b>	<b>CV (%)</b>		<b>8,6</b>

Se observa un coeficiente de variación elevado debido a que todas las probetas no presentan la misma tenacidad a fractura, son parecidos porque se trabaja con los mismos materiales, pero no es alarmante que se encuentre hasta un 9,7% de variación. Lo que si se debe analizar es la variación de la tenacidad a fractura de una misma muestra realizada por el CDP y el HDP. Por lo general, se puede afirmar que hay poca variación entre ambos ensayos, aunque no se puede despreciar que todos los valores obtenidos mediante el HDP son superiores a los del CDP.

El hecho de que no aparezcan resultados para el CDP en la probeta P1-113497929 es porque se perdieron los resultados inintencionadamente. Esta falta no perjudica a la campaña puesto que se cuentan con muchas muestras para comparar resultados.

A continuación se observan las gráficas obtenidas para la probeta P1-113390795 para ambos ensayos:



El modo de fallo de estas muestras se aprecia en la Figura 60, se aprecia un fallo cohesivo con partes de delaminación. Claramente el modo de fallo es el mismo en toda la probeta, es decir, se tiene el mismo fallo en el CDP y en el HDP.



Figura 60: Modos de fallo de la serie 1 (tejido).

### 5.3.2. Serie 2

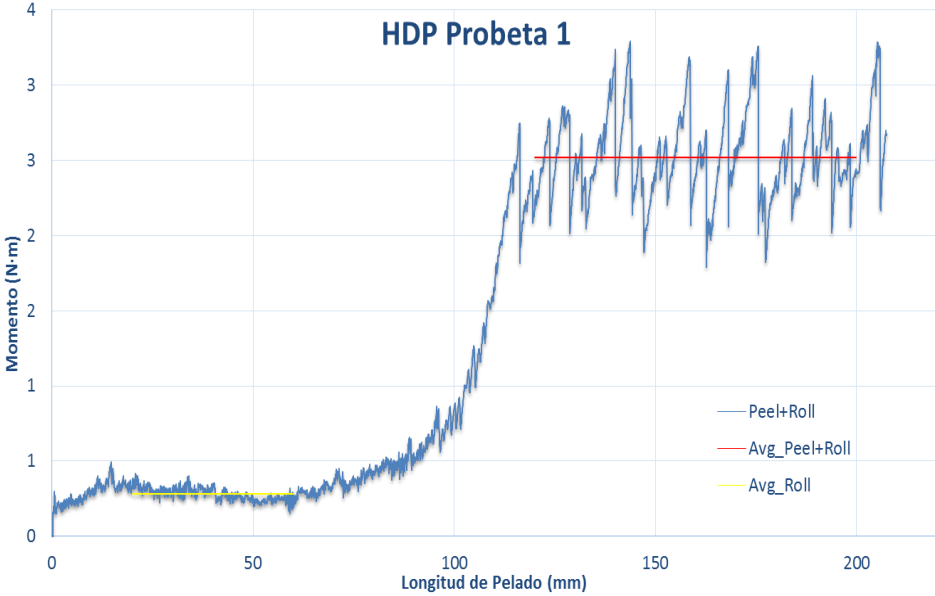
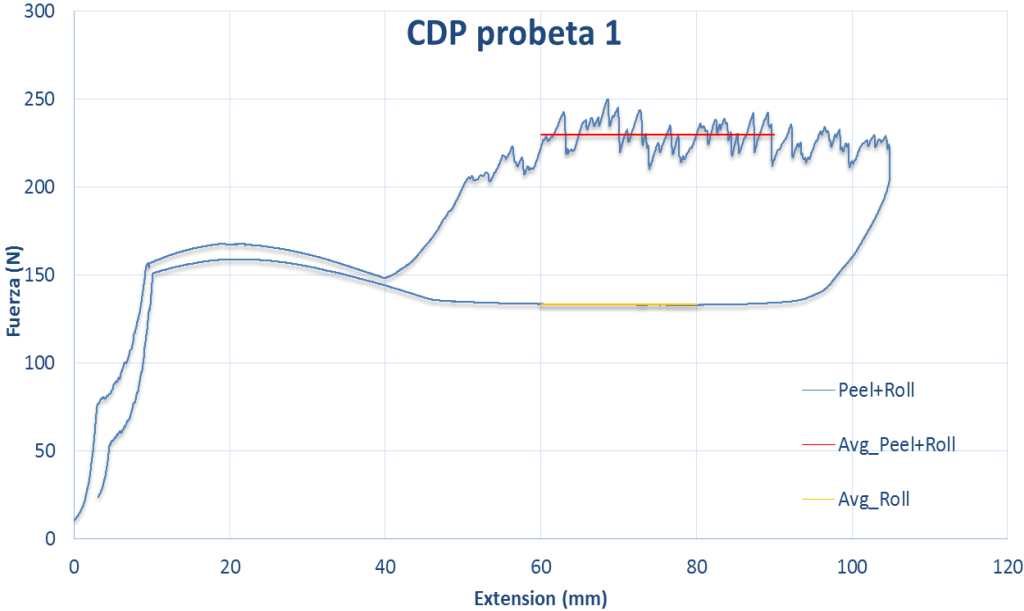
Para la segunda serie, de 5 probetas únicamente, se procede de manera similar. Los resultados obtenidos son:

Tabla 16: Resultados obtenidos con el HDP y CDP para la serie 2

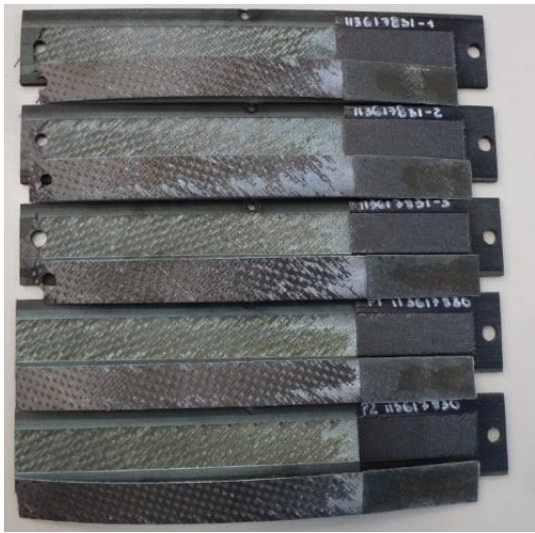
Especímen	CLIMBING DRUM PEEL					HORIZONTAL DRUM PEEL		
	b (mm)	t (mm)	$F_d$ (N)	$F_w$ (N)	$G_c$ (J/m <sup>2</sup> )	$M_d$ (Nm)	$M_w$ (Nm)	$G_c$ (J/m <sup>2</sup> )
1	25,14	0,58	229,9	133,1	931,9	2,52	0,29	919,5
2	25,27	0,60	221,1	132,4	861,2	2,85	0,49	980,7
3	25,19	0,60	232,1	131,3	975,9	2,28	0,06	918,7
4	25,18	0,58	227,3	131,4	937,6	2,49	0,10	996,8
5	25,15	0,55	230,0	132,1	956,4	2,51	0,18	972,5
			Valor Medio		932,6		Valor Medio	957,6
			CV (%)		4,7		CV (%)	3,8

Los resultados obtenidos en la serie 2 son mucho más similares y con un coeficiente de variación mucho menor. Esto puede ser porque esta segunda serie estuviera en mejor estado que la primera. Además, se debe tener en cuenta que entre ambas series se realizaron un par de mejoras en el dispositivo que pudo mejorar en cierto modo la toma de datos.

A continuación, se observan las gráficas obtenidas para la muestra 1:



El modo de fallo para esta serie es similar a la primera, se observa un fallo cohesivo con cierta delaminación en algunas zonas. De nuevo no se vuelve a encontrar diferencia entre la parte pelada por el CDP y la parte pelada por el HDP.



**Figura 61: Modos de fallo de la serie 2.**

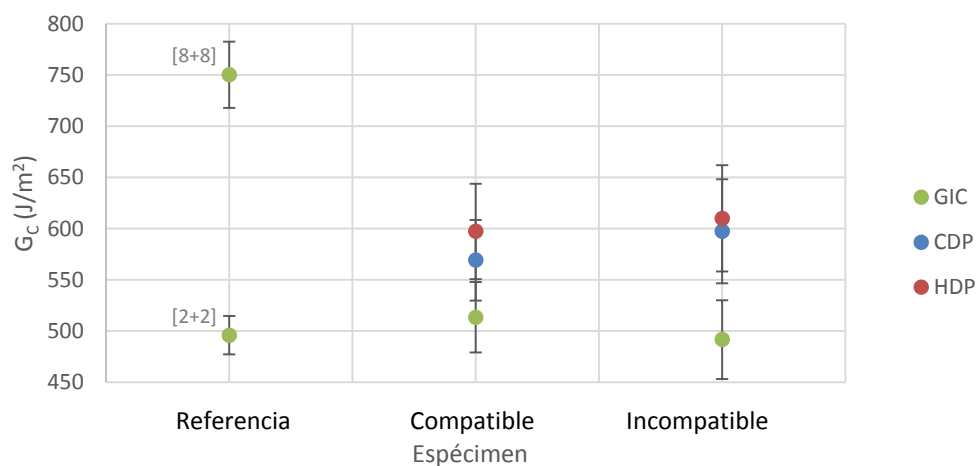
# 6 CONCLUSIONES

Para sacar conclusiones de los resultados obtenidos se dividen estas entre las muestras realizadas con cinta y tejido. Se muestra a continuación una tabla resumen y una gráfica comparativa de los resultados obtenidos para cinta:

Tabla 17: Resumen de los resultados para cinta

	DCB	CDP	HDP
Referencia [8+8]	750,3 J/m <sup>2</sup>	-	-
Referencia [2+2]	495,9 J/m <sup>2</sup>	-	-
Compatible	513,4 J/m <sup>2</sup>	569,1 J/m <sup>2</sup>	597,3 J/m <sup>2</sup>
Incompatible	491,6 J/m <sup>2</sup>	597,5 J/m <sup>2</sup>	610,0 J/m <sup>2</sup>

Comparación de resultados



Las conclusiones para los ensayos sobre cinta son:

- Los valores de  $G_c$  obtenidos para configuración simétrica parece depender del espesor de las láminas.

Tal como se ha comentado lo que realmente ocurre es que el modo de fallo es diferente, mientras que en el caso de la configuración [8+8] la rotura es una mezcla de adhesiva-cohesiva en el caso [2+2] es claramente adhesiva.



- b) Los valores de  $G_C$  en la configuración no simétrica son inferiores a los obtenidos en la configuración de referencia (8+8 DCB)
- El procedimiento de cálculo de  $G_C$  para una configuración simétrica no es de aplicación para la no simétrica. Consideramos que aunque no sea de aplicación los valores deberían ser comparables.
  - El modo de fallo obtenido en las configuraciones no simétricas es intermedio entre las configuraciones simétricas [8+8] y [2+2].
  - Los valores para la configuración no simétrica realizados con los procedimientos de pelado a tambor son comparables con los obtenidos para la configuración simétrica con capas delgadas [2+2].
  - No hay diferencias significativas entre realizar el ensayo de pelado con el procedimiento clásico CDB y el HDP.
- c) El efecto de emplear un pelable incompatible no altera de forma significativa los valores de  $G_C$ .

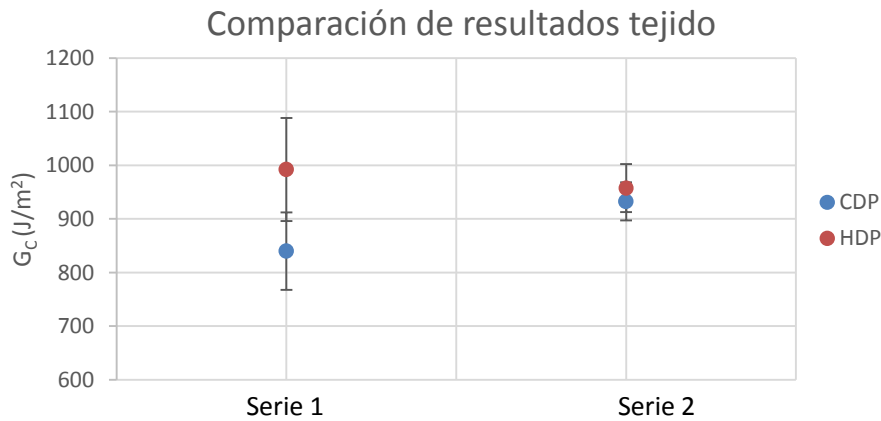
Se puede concluir que utilizar un Peel Ply incompatible no afecta a la calidad de la unión adhesiva. La tenacidad a fractura interlaminar hallada es igual para ambos tipos de muestras, por lo tanto, es indiferente la utilización de los dos pelables estudiados. Estos resultados son contrarios a los que se esperaba inicialmente, ya que el fabricante exponía claramente en la especificación del material que no se debe emplear en encolados. Asimismo, el manejo con el pelable mostraba que no tenía una superficie rugosa y adecuada para favorecer la unión, lo que refleja que no es de vital importancia el empleo de un pelable.

En lo que respecta a la campaña de ensayos sobre las dos series de tejido ensayadas y cuyos resultados se muestran en la Tabla 18, extraemos las siguientes conclusiones:

**Tabla 18: Resumen de resultados para el tejido**

	Serie 1		Serie 2	
	CDP	HDP	CDP	HDP
<b>Valor medio</b>	840,0	992,3	932,6	957,6
<b>CV (%)</b>	9,7	8,6	4,7	3,8

Gráficamente se obtiene:



- a) La serie 1 y 2 concluyen que los resultados obtenidos con el HDP son totalmente comparables con los obtenidos con el Climbing Drum Peel, lo que nos permite asegurar que el nuevo dispositivo nos proporciona un buen valor de  $G_c$  también en el caso de tejido. Si se observan las barras de error en el gráfico, se ve que los valores se solapan teniendo en cuenta el error. Se puede afirmar que el nuevo equipo HDP obtiene buenos resultados de tenacidad a fractura interlaminar para distintos tipos de sustratos. La investigación es una buena manera de determinar la validez del dispositivo puesto que se han tenido en cuenta dos tipos de muestras distintas además de haber obtenido una buena repetitividad.
- b) Los valores obtenidos por el HDP son siempre ligeramente mayores que en el CDP. Esto puede ocurrir porque en el ensayo HDP se presente algo más de modo II que en el caso de CDP, lo que haría aumentar ligeramente el valor de tenacidad a fractura.

Respecto al funcionamiento del dispositivo y el procedimiento del ensayo se hallan algunas mejoras para próximas pruebas. En primer lugar, el ensayo puede realizarse a mayor velocidad sin perjudicar los resultados obtenidos. Tras varias pruebas modificando la velocidad de avance del tambor, se concluye que la velocidad óptima es de 100 mm/min, la cual no afectará al procedimiento del y se reducirá el tiempo de ensayo. Es un aspecto a tener en cuenta puesto que uno de los principales objetivos en la investigación es optimizar el proceso productivo reduciendo considerablemente el tiempo de realización de este ensayo de vital importancia para el proceso de fabricación.

Para facilitar la manipulación del dispositivo se propone reducir el peso eliminando gran parte de su cadena cinemática, así como empleando una sola célula de carga en lugar de una. Esta propuesta es viable sin afectar al funcionamiento puesto que la cadena cinemática se encuentra en el dispositivo por el mero desarrollo del diseño del mismo. En los primeros prototipos el movimiento del tambor se debía a la cadena cinemática diseñada, sin embargo, al evolucionar el prototipo hasta el dispositivo final, se decide imponer directamente el par al tambor, tal y como se explica detalladamente en el punto 3 de esta investigación. Por lo tanto, el dispositivo final puede prescindir de la cadena cinemática, lo que haría reducir considerablemente el peso y tamaño.

Actualmente, el HDP consta de cuatro ventosas para fijar el dispositivo a la superficie de pelado. Dichas ventosas necesitan conectarse a un sistema de vacío para poder fijarse, lo cual

obliga a tener una toma de vacío cerca del lugar donde se realice el ensayo. Para tener el dispositivo más autónomo posible se propone buscar unas ventosas que puedan hacer vacío de manera independiente.

En relación con trabajos futuros que pueden abordarse se destacan:

- a) Ver el efecto sobre  $G_C$  y sobre el modo de fallo que tiene la configuración de la probeta y la forma de fabricación. En este sentido se podrían ensayar diferentes configuraciones simétricas [2+2], [4+4] y [8+8] fabricadas mediante co-bonding y también bonding.
- b) Desarrollar fórmulas para evaluar  $G_C$  en uniones no simétricas mediante el ensayo DCB.

# REFERENCIAS

---

- [1] ADAMS, Dan; Zack BLUTH y Ryan BRAEGGER, 2013. "Development and Evaluation of Fracture Mechanics Test Methods for Sandwich Composites". *Technical Review, University of Utah*. Disponible en: [http://www.niar.wichita.edu/coe/cecam/Development\\_and\\_Evaluation\\_of\\_Fracture\\_Mechanics\\_Test\\_Methods\\_for\\_Sandwich\\_Composites-Adams.pdf](http://www.niar.wichita.edu/coe/cecam/Development_and_Evaluation_of_Fracture_Mechanics_Test_Methods_for_Sandwich_Composites-Adams.pdf)
- [2] AITM 1-0005. "Fibre reinforced plastics - Determination of interlaminar fracture toughness energy - Mode I -  $G_{Ic}$ ".
- [3] AITM 1-0019. "Determination of Tensile Lap Shear Strength of Composite Joints". Blagnac, Francia.
- [4] AITM 1-0053. "Carbon fiber reinforced plastics. Determination of fracture toughness energy of bonded joints. Mode I. GIC test". Noviembre 2015, Blagnac, 31707, Francia.
- [5] BAZHENOV, S.L. "Strong bending in the DCB interlaminar test of thin, E-glass woven-fabric-reinforced laminates". *COMPOSITES*, volumen 22, número 4, julio 1991. Institute of Chemical Physics, Moscow, USSR.
- [6] BLACKMAN, Bamber R.K. y Anthony J. KINLOCH, 2003. "Protocol for the Determination of the Mode I Adhesive Fracture Energy,  $G_{Ic}$ , of Structural Adhesives using the Double Cantilever Beam (DCB) and Tapered Double Cantilever Beam (TDCB) Specimens". *Engineering Fracture Mechanics*, 70(2):233-248, Versión 00-08. Disponible en: 10.1016/S0013-7944(02)00031-0
- [7] DAGHIA, F. y F. CLUZEL, 2015. "The Climbing Drum Peel Test: An alternative to the Double Cantilever Beam for the determination of fracture toughness of monolithic laminates". *Elsevier, Composites: Part A* no78, pg. 70–83. Disponible en: 10.1016/j.compositesa.2015.07.010
- [8] DAMIEN BUSCA, M., 2014. "Identification du comportement de composites en fatigue bi-axiale". Tesis doctoral en la Institut National Polytechnique de Toulouse, Mécanique des Matériaux.
- [9] EN2243-3 (norma ICS 49.025.50); "Aerospace series – Non-metallic materials – Structural adhesives – Test method – Part 3: Peeling test metal honeycomb core". Bruselas.
- [10] ESTEFANI A., L. TÁVARA, A. BLÁZQUEZ, J. CAÑAS, y F. PARÍS. "Ensayos numéricos de uniones adhesivas composite-composite para la determinación de la tenacidad a la fractura". *MATCOMP* 17.
- [11] IPS05-01-001-06. "Unidirectional Tape/ 180° Curing Class / Standard Modulus Fibre (268 and 134 g/m<sup>2</sup>).". Blagnac, France.
- [12] IPS10-01-006-02. "Structural adhesive systems-Film-Epoxy for composite bonding (135°C performance), 180°C cure. FM 300M and FM 300K.". Blagnac, Francia.
- [13] NETTLES, Alan T; Elizabeth D. GREGORY y Justin R. JACKSON, 2007. "Using the Climbing Drum Peel (CDP) Test to Obtain a  $G_{Ic}$  value for Core/Facesheet Bonds". *Journal of Composite Materials* [en línea], 41(24):2863-2876. Disponible en: 10.1177/0021998307079974
- [14] OLMO, R., A. Ureña, 2015. "Seguimiento automático de la grieta en el ensayo de  $G_{Ic}$ ". *Materiales Compuestos 15* [en línea], Actas del XI congreso nacional de materiales compuestos, pg. 319-324. Disponible en: <http://www.aemac.org/wp/wp-content/uploads/2015/10/Actas-Matcomp15.pdf>

- [15] PARÍS, Federico, 2000. *Teoría de la elasticidad*. Sevilla: Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales.
- [16] PARÍS, Federico y Vladislav MANTIC, 2014. *Mecánica de Sólidos: Mecánica de la Fractura*. Sevilla: Escuela Técnica Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla.
- [17] PARÍS, Federico, et al., 2015. *Introducción al análisis y diseño con materiales compuestos*. Sevilla: Escuela Técnica Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla.
- [18] PAVELKO, V., K. LAPSA, y P. PAVLOVSKIS, 2016. "Determination of the mode I interlaminar fracture toughness by using a nonlinear double-cantilever beam specimen". *Mechanics of Composite Materials*, Vol. 52, No. 3, July, 2016 (Russian Original Vol. 52, No. 3, May-June, 2016). Disponible en: DOI 10.1007/s11029-016-9587-y.
- [19] WILLIAMS, J.G, 1985. "Large Displacement and End Block Effects in the 'DCB' Interlaminar Test in Modes I and II". Department of Mechanical Engineering, Imperial College of Science and Technology, London.

