

# Trabajo Fin de Máster

## Máster en Ingeniería Industrial

### Un nuevo procedimiento para evaluar la calidad de encolados composite-composite

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

Sevilla, 2019





Trabajo Fin de Máster  
Máster en Ingeniería Industrial

# **Un nuevo procedimiento para evaluar la calidad de encolados composite-composite**

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, 2019







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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal





*A mi abuela*



# AGRADECIMIENTOS

---

En primer lugar, 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, así como mis compañeros.

A Agu por recorrer este largo camino junto a mi incondicionalmente, su apoyo y cariño han sido fundamentales durante estos años.

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

Este trabajo refleja el final de una etapa, una etapa educativa que agradeceré a mis padres siempre, 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 vida.

*M<sup>a</sup> del Mar Castro Orta  
Sevilla, 2019*



La evaluación de la calidad de las uniones encoladas composite-composite es un problema de vital importancia para la industria en general y para el sector aeronáutico en particular. Una unión defectuosa no solo paraliza el proceso productivo, sino que su reparación lleva asociados unos costes a veces de muy alta cuantía. Actualmente, la calidad de la unión se lleva a cabo mediante ensayos de tenacidad a fractura interlaminar, midiéndose para ello el  $G_C$  (tasa de liberación de energía liberada al propagar una grieta) en una probeta encolada teóricamente bajo las mismas condiciones que la pieza real. Habitualmente la medida de  $G_C$  se realiza mediante el ensayo DCB (Double Cantilever Beam), ensayo que presenta algunos inconvenientes cuando el espécimen a ensayar es no simétrico y cuando la rigidez de los adherentes es baja. Como alternativa al DCB se está empleando el ensayo de pelado a tambor, Climbing Drum Peel (CDP) que solventa algunos de los inconvenientes anteriores. Ambos ensayos, sin embargo, no son susceptibles de llevarlos a cabo “in situ”. Por ello, se comenzó a desarrollar una nueva alternativa de pelado que solventara estas dificultades, Horizontal Drum Peel (HDP), que permite llevar a cabo un ensayo de pelado directamente sobre la pieza real.

En este trabajo se analizan las mejoras del último modelo desarrollado del HDP. A su vez, se presenta un nuevo dispositivo, Horizontal Open Displacement (HOD), que simplifica en varios aspectos el ensayo HDP. Se desarrolla una campaña experimental para contrastar de manera cuantitativa estas dos nuevas alternativas de ensayo con el ensayo de referencia CDP.



# 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. Usually the measurement of  $G_C$  is carried out by the DCB (Double Cantilever Beam) test, which presents some weaknesses when the specimen to be tested is not symmetrical and when the toughness of the adherents is low. As an alternative to DCB, the drum peeling test is used, Climbing Drum Peel (CDP), which solves some of the above disadvantages. Both trials, however, are not likely to perform them "in situ." Therefore, a new peeling alternative was developed to solve these difficulties, Horizontal Drum Peel (HDP), which allows to carry out a peeling test directly on the real piece.

In this work, the improvements of the new model of HDP are analyzed. At the same time, a new device, Horizontal Open Displacement (HOD) is presented, which simplifies the HDP test in several aspects. A test campaign is developed to evaluate quantitatively these two new test alternatives with the CDP reference test.





# ÍNDICE

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>v</b>
<b>Resumen</b>	<b>vii</b>
<b>Abstract</b>	<b>ix</b>
<b>Índice</b>	<b>xi</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xv</b>
<b>Índice de Gráficos</b>	<b>xix</b>
<b>Notación</b>	<b>xxi</b>
<b>1 Introducción y antecedentes</b>	<b>1</b>
<b>2 Objetivos</b>	<b>5</b>
<b>3 Determinación de la Tenacidad a Fractura</b>	<b>7</b>
<b>4 Ensayo Horizontal Drum Peel</b>	<b>15</b>
4.1 Trabajo previo	15
4.2 Desarrollo de HDP 2.0	18
Efecto de la desalineación de la muestra	23
Efecto de la dirección del ensayo	24
Importancia del modo de fallo	29
Desarrollo del nuevo software	31
4.3 Procedimiento HDP	31
<b>5 Nueva propuesta de ensayo para evaluar <math>G_c</math></b>	<b>37</b>
5.1 Cálculo de $G_c$	37
5.2 Estudio analítico del ensayo HOD	38
5.3 Diseño del HOD	40
5.4 Procedimiento del ensayo HOD	44
<b>6 Experimentación</b>	<b>48</b>
6.1 Preparación de muestras	48
6.2 Caracterización de los materiales	52
6.2.1 Cinta	53
6.2.2 Tejido	54
6.2.3 Adhesivo	55
6.3 Aspectos prácticos asociados a los ensayos para hallar $G_c$	56
<b>7 Resultados</b>	<b>60</b>
7.1 Resultados para muestras de cinta	60
7.1.1 Climbing Drum Peel	61

7.1.2 Horizontal Drum Peel	63
7.1.3 Horizontal Open Displacement	64
<b>7.2 Resultados para muestras de tejido</b>	<b>68</b>
7.2.1 Climbing Drum Peel	68
7.2.2 Horizontal Drum Peel	70
7.2.3 Horizontal Open Displacement	72
<b>8 Conclusiones</b>	<b>76</b>
8.1 Trabajos futuros	79
<b>Referencias</b>	<b>80</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1: Valores de $G_{IC}$ obtenidos de la simulación numérica.	11
Tabla 2: Valores de $G_{IC}$ corregidos con el factor F.	11
Tabla 3: Comprobación del nuevo dispositivo HDP 2.0. – Ensayo CDP.	19
Tabla 4: Comprobación del nuevo dispositivo HDP 2.0. – Ensayo HDP 2.0.	19
Tabla 5: Efecto de la desalineación de la muestra en HDP.	23
Tabla 6: Influencia de la dirección del ensayo HDP 2.0.	25
Tabla 7: Características de cada modo de fallo.	30
Tabla 8: Resultados para muestras de cinta.	60
Tabla 9: Resultados para muestras de cinta con el CDP.	61
Tabla 10: Resultados obtenidos para cinta con el HDP.	63
Tabla 11: Resultados obtenidos para cinta con el HOD.	64
Tabla 12: Resultados para muestras de tejido.	68
Tabla 13: Resultados obtenidos de muestras de tejido con el CDP.	68
Tabla 14: Resultados obtenidos de muestras de tejido con HDP.	70
Tabla 15: Resultados obtenidos de muestras de tejido con HOD.	72
Tabla 16: Resumen de resultados para muestras de cinta.	76
Tabla 17: Resumen de resultados para muestras de tejido.	78



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1: Alternativas de preparación de probetas para evaluar la tenacidad a fractura.	2
Figura 2: Elemento aeronáutico con laminado similar a los de los larguerillos encolado a la piel en la zona de recanteo [Combinación 3].	3
Figura 3: Unión co-encolada (Cañas J. et al.,2018 [16]).	3
Figura 4: Encolado secundario (Cañas J. et al.,2018 [16]).	4
Figura 5: Ensayo $G_{IC}$ . (Cañas J. et al.,2018 [16])	7
Figura 6: Ensayo DCB. (Cañas J. et al.,2018 [16]).	8
Figura 7: Curva Fuerza-desplazamiento en el ensayo DCB. (Cañas J. et al.,2018 [16]).	8
Figura 8: Gráfica para corregir “a” y dimensiones del sistema de agarre. (Cañas J. et al.,2018 [16]).	10
Figura 9: Ensayo de pelado a tambor (CDP).	12
Figura 10: Gráfica tipo de un ensayo de pelado tambor (CDP).	12
Figura 11: Análisis mecánico del CDP. (Daghia, F. et al, 2015 [17])	13
Figura 12: Evolución del equipo para pelado in-situ.	16
Figura 13: Esquema para al análisis mecánico del dispositivo de pelado horizontal.	17
Figura 14: Dispositivo HDP Patente P201730163.	17
Figura 15: Diseño nuevo de HDP.	18
Figura 16: Nuevo dispositivo HDP.	18
Figura 17: Configuración de muestras para validar HDP 2.0.	19
Figura 18: Posibles direcciones del ensayo HDP 2.0.	24
Figura 19: Definición de zonas de fallo.	30
Figura 20: Modos de fallo: Adhesión(3) o interfase fresco-fresco (1), Cohesión(2) y Delaminación(0/5) (de izq.a dcha.)	31
Figura 21: Conexión.	31
Figura 22: Caja de control ON.	32
Figura 23: interfaz del software HDP 2.0.	32
Figura 24: Parámetros de la muestra.	32
Figura 25: Añadir límites del material.	33
Figura 26: Seleccionar dirección del ensayo.	33
Figura 27: Agarre de las muestras al tambor.	33
Figura 28: Selección del tramo para hallar el momento medio de liado.	34
Figura 29: Imagen del modo de fallo.	34
Figura 30:Ventana emergente para exportar resultados.	34
Figura 31: Ensayo HOD.	35

Figura 32: Idea del ensayo HOD.	37
Figura 33: Variables del ensayo HOD.	38
Figura 34: Estudio analítico del HOD. Variables.	38
Figura 35: Esfuerzos en el vértice de la grieta.	39
Figura 36: Diseño HOD.	40
Figura 37: Modelo del carrito de pelado.	41
Figura 38: Planta, alzado y perfil del carrito de pelado.	41
Figura 39: Plano del motor Kelvin.	41
Figura 40: Soporte del motor.	42
Figura 41: Soporte del motor explicativo.	42
Figura 42: Vistas del conjunto completo HOD.	43
Figura 43: Carrito de pelado.	43
Figura 44: Soporte con el motor.	43
Figura 45: Soporte con ruedas guías.	44
Figura 46: Segundo carrito de pelado.	44
Figura 47: Requerimiento de probetas para el ensayo HOD.	44
Figura 48: Preparación de la bolsa de vacío para el panel de adhesivo.	48
Figura 49: Bolsa de vacío del panel de adhesivo preparada para el proceso de curado.	49
Figura 50: Caras del panel de adhesivo.	49
Figura 51: Apilado del laminado rígido del panel de tejido.	50
Figura 52: Laminado prepeg de 8 capas de cinta.	50
Figura 53: Bolsa de vacío con los paneles de prepeg.	50
Figura 54: Esquema de bolsa de vacío.	51
Figura 55: Curado del panel de cinta.	51
Figura 56: Colocación del adhesivo y el teflón para el co-encolado.	51
Figura 57: Bolsa de vacío en el autoclave antes de proceder al segundo curado.	52
Figura 58: Galgas extensiométricas en las probetas para caracterizar los materiales.	53
Figura 59: Ensayo de tracción a la muestra de tejido.	54
Figura 60: Probeta de adhesivo.	55
Figura 61: Sujeción de la probeta al tambor.	56
Figura 62: Alineación de la muestra durante el ensayo.	57
Figura 63: Ensayo HDP.	57
Figura 64: Ensayo HOD.	58
Figura 65: Modo de fallo de las muestras de cinta tras el CDP.	62
Figura 66: Modo de fallo de las muestras de cinta tras el HDP.	64
Figura 67: Modo de fallo de las muestras de cinta tras el HOD.	66
Figura 68: Ampliación de la magnitud de saltos del ensayo CDP 1, 2 y 3.	67

Figura 69: Ampliación de la magnitud de saltos del ensayo HDP 1, 2 y 3.	67
Figura 70: Ampliación de la magnitud de saltos del ensayo HOD 1, 2 y 3.	67
Figura 71: Modo de fallo de las muestras de tejido.	74
Figura 72: Ampliación de la magnitud de saltos del ensayo CDP 1, 2 y 3.	74
Figura 73: Ampliación de la magnitud de saltos del ensayo HDP 1, 2 y 3.	75
Figura 74: Ampliación de la magnitud de saltos del ensayo HOD 1, 2 y 3.	75
Figura 75: Modos de fallo muestras de cinta.	77
Figura 76: Modo de fallo de muestras de tejido.	78





# ÍNDICE DE GRÁFICOS

---

Gráfico 1: Espécimen 1-CDP.	20
Gráfico 2: Espécimen 2-CDP.	20
Gráfico 3: Espécimen 3-CDP.	21
Gráfico 4: Espécimen 1-HDP 2.0.	21
Gráfico 5: Espécimen 2-HDP 2.0.	22
Gráfico 6: Espécimen 3-HDP 2.0.	22
Gráfico 7.1: Muestras para comprobar el efecto de la desalineación de la muestra en el HDP.	23
Gráfico 7.2: Muestras para comprobar el efecto de la desalineación de la muestra en el HDP.	24
Gráfico 8: Espécimen 1.	25
Gráfico 9: Espéimen 2.	26
Gráfico 10: Espécimen 3.	26
Gráfico 11: Espécimen 4.	27
Gráfico 12: Espécimen 5.	27
Gráfico 13: Espécimen 6.	28
Gráfico 14: Espécimen 7.	28
Gráfico 15: Espécimen 8.	29
Gráfico 16: Ensayo a tracción de la muestra de cinta.	53
Gráfico 17: Ensayo a tracción de muestra de tejido.	54
Gráfico 18: Ensayo a tracción de la muestra de adhesivo.	55
Gráfico 19: Resultados de la muestra 1 de cinta con CDP.	61
Gráfico 20: Resultados de la muestra 2 de cinta con CDP.	61
Gráfico 21: Resultados de la muestra 3 de cinta con CDP.	62
Gráfico 22: Resultados de la muestra 1 de cinta con HDP.	63
Gráfico 23: Resultados de la muestra 2 de cinta con HDP.	63
Gráfico 24: Resultados de la muestra 3 de cinta con HDP.	64
Gráfico 25: Resultados de la muestra 1 de cinta con HOD.	65
Gráfico 26: Resultados de la muestra 2 de cinta con HOD.	65
Gráfico 27: Resultados de la muestra 3 de cinta con HOD.	66
Gráfico 28: Resultados de la muestra 1 de tejido con CDP.	69
Gráfico 29: Resultados de la muestra 2 de tejido con CDP.	69
Gráfico 30: Resultados de la muestra 3 de tejido con CDP.	70
Gráfico 31: Resultados de la muestra 1 de tejido con HDP.	71
Gráfico 32: Resultados de la muestra 2 de tejido con HDP.	71

Gráfico 33: Resultados de la muestra 3 de tejido con HDP.	72
Gráfico 34: Resultados de la muestra 1 de tejido con HOD.	73
Gráfico 35: Resultados de la muestra 2 de tejido con HOD.	73
Gráfico 36: Resultados de la muestra 3 de tejido con HOD.	74
Gráfico 37: Comparación de los resultados obtenidos con cinta.	77
Gráfico 38: Comparación de los resultados obtenidos con tejido.	78

# NOTACIÓN

---

a	Longitud de grieta
CDP	Climbing Drum Peel
DCB	Double Cantilever Beam
E	Módulo de Young
G <sub>c</sub>	Tenacidad a fractura
G <sub>IC</sub>	Tenacidad a fractura en modo I
HDP	Horizontal Drum Peel
HOD	Horizontal Open Displacement
HTP	Horizontal Tale Plane
NDT	Ensayos no destructivos (Nondestructive tests)
P	Carga de pelado
VTP	Vertical Tale Plane
δ	Desplazamiento de cruceta
ν	Coefficiente de Poisson



# 1 INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

---

El empleo de materiales compuestos en el sector aeroespacial tiene hoy por hoy un papel muy relevante en los nuevos desarrollos y en los nuevos modelos de aeronaves. Las uniones encoladas composite-composite ocupan un lugar privilegiado, basta decir que en el Airbus A350, el cual consta de más del 50% en peso de material compuesto, se estima que la longitud total de las líneas de encolado es superior a 5 km. A raíz de este notable uso de uniones encoladas en el A350, se comienzan a emplear dichas uniones en aviones posteriores. Su uso principal está en el ala, VTP (Vertical Tale Plane) y HTP (Horizontal Tale Plane). Así, va aumentando la importancia de evaluar la calidad de dichas uniones. Para asegurar el buen comportamiento en servicio de la unión, ensayos experimentales y herramientas numéricas han sido desarrollados para evaluar la capacidad portante de la misma y poner de manifiesto los diferentes modos de fallo asociados a este tipo de uniones [13][38][35].

La evaluación de la calidad de la unión encolada mediante ensayos no destructivos (NDT) solo permite determinar si las superficies de los adherentes se encuentran en contacto, pero no son capaces de comprobar si la adhesión es correcta. Por ello, las autoridades de certificación exigen para este tipo de unión la realización de ensayos mecánicos que permitan evaluar la calidad de la unión realizada. Dicha evaluación contempla si hay alguna incompatibilidad entre adherente y adhesivo, si se ha producido alguna contaminación durante el proceso o si éste ha sido inadecuado. El ensayo actualmente más extendido para este fin es el ensayo de tenacidad a fractura interlaminar donde se evalúa la energía liberada al propagar una grieta a través de la unión ( $G_C$ ). Se estudia la tenacidad a fractura porque es una propiedad que solo depende del material (adhesivo), de la preparación superficial y del proceso de curado. Para que el ensayo sea lo más representativo posible las probetas a ensayar deberían ser representativas del proceso de encolado real.

La determinación de  $G_C$  se realiza mediante un ensayo de pelado en un espécimen que tiene una grieta previa. A partir de la carga de pelado ( $P$ ) y/o el desplazamiento ( $\delta$ ) y/o la longitud de grieta ( $a$ ) se evalúa la energía que se libera por unidad de área al propagar la grieta ( $G_C$ ). Una de las aplicaciones más comunes de encolados estructurales en el sector aeronáutico es la que se lleva a cabo para formar un panel rigidizado. Dicho panel consta de una piel, normalmente curada a la que se le añaden mediante un proceso de “co-encolado” unos larguerillos. El encolado se realiza entre las alas de los larguerillos y la piel. Para evaluar la calidad de la unión se preparan unas probetas que son posteriormente ensayadas en un laboratorio. Existen varias alternativas para generar dichas probetas:

### Opción 1

La primera opción de fabricación de probetas es preparar un panel que puede ser del mismo espesor que la piel (B1) o de un espesor normalizado (B2) (normalmente entre 1,5 y 2,5 mm de espesor) mientras que se prepara y cura la piel. En paralelo, se prepara otro panel fresco con el mismo espesor que las alas de los larguerillos (A1) o del mismo espesor normalizado que el obtenido para la piel (A2). Se somete al mismo proceso de curado (co-encolado) y posteriormente, se extraen las probetas del conjunto ya encolado y se ensayan en el laboratorio. Dependiendo de las opciones de espesor adoptadas se tendrían las siguientes combinaciones de paneles:

- Combinación 1 [A1+B1]: Normalmente es un panel no simétrico en lo que respecta a los espesores de los adherentes.
- Combinación 2 [A2+B2]: Es un panel simétrico.

### Opción 2

En el mismo proceso de curado por co-encolado del panel rigidizado se colocan, en la zona que posteriormente se recanteará, un laminado de iguales características que las alas de los larguerillos (A1). Finalizado el proceso de curado y una vez recantada la pieza se guardan las zonas donde se encoló el laminado A1 y se envían al laboratorio para ensayar

- Combinación 3 [A1+Piel]

La diferencia entre la combinación 1 y la 3 es que no hay que preparar ningún panel representativo de la piel, es la propia piel de la pieza real la que hace de uno de los adherentes.

Indudablemente, la opción 2 es más representativa que la opción 1 de la pieza real, pero presenta el inconveniente que hasta que no se recantea la pieza no se dispone de las probetas para realizar los ensayos. La tendencia actual es intentar ensayar directamente sobre la pieza real antes de recantear, es decir inmediatamente después de finalizar el proceso de curado, lo que acortaría enormemente el tiempo que transcurre desde que finaliza el proceso de curado y se realizan los ensayos. De esta manera se podría saber de forma casi instantánea si la unión ha sido o no correctamente realizada. Sin embargo, no existe actualmente ningún ensayo para llevar a cabo in situ dicha evaluación.

En la Figura 1 se esquematizan las alternativas antes comentadas y en la Figura 2 se muestra una fotografía de un elemento aeronáutico representativo de la Combinación 3.

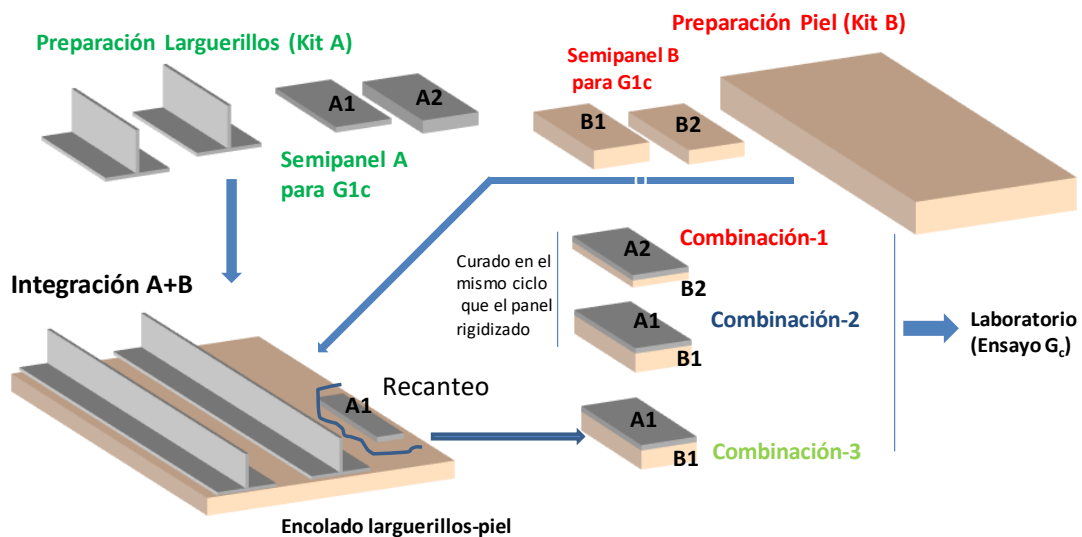


Figura 1: Alternativas de preparación de probetas para evaluar la tenacidad a fractura.



Figura 2: Elemento aeronáutico con laminado similar a los de los larguerillos encolado a la piel en la zona de recanteo [Combinación 3].

Actualmente, la medición de  $G_C$  se realiza mediante la prueba Double Cantilever Beam (DCB) [3][8][26] o mediante la prueba Climbing Drum Peel (CDP) [7][17]. Estos métodos para medir  $G_{IC}$ , son ensayos de control de producción con dos inconvenientes principales. En primer lugar, el tiempo del proceso productivo es muy elevado ya que, como se ha mencionado, se tiene que esperar a que las probetas sean recanteadas, en caso de que se trabaje la opción 2, y se manden al laboratorio y sean ensayadas. En segundo lugar, el ensayo no se realiza sobre la pieza real, sino en una probeta supuestamente en las mismas condiciones, lo cual puede suponer que dichas probetas no representen fielmente a la pieza real y obteniéndose resultados que no caracterizan adecuadamente a la unión real.

La prueba DCB y de acuerdo a la normativa actualmente vigente, solo se lleva a cabo sobre configuraciones simétricas (Combinación 2) y cuando los espesores de los adherentes están comprendidos entre 1,5 y 2,5 mm, para espesores inferiores habría que tener en cuenta el efecto de grandes desplazamientos y aunque la normativa contempla dicho efecto, su aplicación puede ser cuestionada. La prueba CDP, normalmente utilizada para encolados de sándwich, se puede utilizar para configuraciones en las que los adherentes tengan espesores diferentes, pero requiere que uno de los adherentes tenga una rigidez a flexión baja para evitar durante el proceso de liado una rotura del mismo. No obstante, ambos procedimientos no son de aplicación directa sobre la pieza real (Alternativa 2). En este trabajo se presenta dos nuevos ensayos que permite la realización in situ sobre la pieza real teniendo como única limitación el que el adherente sobre el que se actúa tenga rigidez baja.

Una de las uniones encoladas que más se lleva a cabo actualmente es la “unión co-encolada” (co-bonding) en la que el adhesivo, normalmente tipo film, se coloca entre las dos partes a unir donde una de ellas está ya curada y la otra está fresca. El ciclo de curado viene marcado por las características del material fresco.

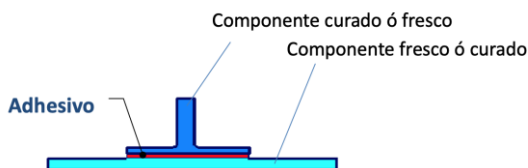


Figura 3: Unión co-encolada (Cañas J. et al., 2018 [16]).

La otra alternativa se denomina “encolado secundario” (secondary bonding), las dos piezas a unir están previamente curadas y entre ellas se coloca el adhesivo. En este caso, el ciclo de curado corresponde al adhesivo.

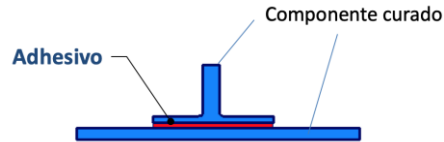


Figura 4: Encolado secundario (Cañas J. et al.,2018 [16]).

A raíz de esta problemática expuesta presentada en el sector aeronáutico para evaluar uniones encoladas, aparece el GERM<sup>1</sup> con una idea innovadora de ensayo capaz de evaluar uniones encoladas in-situ. Tras años de dedicación e investigación sobre el tema, se desarrolló y validó un nuevo ensayo de pelado, Horizontal Drum Peel[14][15][16][20]. El primer modelo presentado, fue aceptado con éxito en el sector siendo necesaria una evolución del mismo para reducir su peso y conseguir una mayor adaptabilidad del dispositivo a diferentes posiciones y lugares de ensayo.

A su vez, el avance y evaluación del ensayo, junto a la gran aceptación del HDP favorece el diseño de un segundo dispositivo de pelado, Horizontal Open Displacement (HOD), con intención de mejorar el dispositivo existente a las necesidades requeridas. El nuevo ensayo debe cubrir una serie de objetivos requeridos por el sector. Al ser un ensayo que se desea introducir en la ya existente cadena de producción de la pieza en cuestión, debe ser un ensayo in-situ y debe requerir el menor tiempo posible, al igual que el HDP. Su ejecución debe ser sencilla para el operario y el postprocesado de los resultados debe ser mínimo. Se trata, en definitiva, que operarios poco cualificados puedan llevar a cabo el ensayo con éxito. El dispositivo debe ser de fácil manejo y el software necesario para dicho ensayo también debe ser lo más sencillo posible, de modo que tras su ejecución se determine la validez del encolado de la pieza.

---

<sup>1</sup> Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales de la Universidad de Sevilla.



## 2 OBJETIVOS

---

Este trabajo tiene dos objetivos principales. En primer lugar, realizar una campaña experimental para validar el funcionamiento de la nueva versión del Horizontal Drum Peel. Con este fin, se reciben muestras que representan la piel de una pieza de material compuesto, para comprobar el estado de la unión con el ensayo de referencia Climbing Drum Peel y con el HDP. A su vez, se exponen las mejoras respecto a la antigua versión del dispositivo y se investigan las nuevas dificultades que puedan surgir durante el procedimiento del ensayo para solventarlos y determinar en qué grado afectan en el resultado del mismo.

En segundo lugar, diseñar una nueva propuesta de ensayo, Horizontal Open Displacement, que resulte más sencilla y adaptable que la anterior. Además, se pretende construir el diseño del HOD propuesto, fabricar muestras de diferentes materiales compuestos, cinta unidireccional y tejido a 45°, representando la piel de una pieza y realizar una segunda campaña experimental para validar el nuevo ensayo comparado nuevamente con el ensayo de referencia CDP y el dispositivo HDP 2.0.

Una vez expuesta la introducción y antecedentes que motivan este trabajo en el punto 1, se desarrolla, en el capítulo 3, cómo medir experimentalmente la tenacidad a fractura y se exponen las dificultades que muestra el ensayo de referencia actual DCB. En el capítulo 4, se analizan las mejoras del nuevo dispositivo HDP y en el capítulo 5, se expone la nueva propuesta de ensayo detalladamente, HOD. Por último, en los tres últimos capítulos, se detallan el proceso experimental, los resultados y conclusiones respectivamente.

En el desarrollo del trabajo, se ha profundizado en técnicas de fabricación para materiales compuestos con adhesivos, así como en el empleo de distintos materiales. Durante la experimentación, se han adquirido habilidades prácticas en el laboratorio, se llevan a cabo distintos ensayos normalizados y otros sin normalizar. Se han distinguido los riesgos al trabajar en un laboratorio y se ha aprendido a evitarlos. Finalmente, se expondrán los resultados experimentales y se discutirá sobre ellos concluyendo si el nuevo ensayo es válido para la finalidad propuesta.



# 3 DETERMINACIÓN DE LA TENACIDAD A FRACTURA

En este capítulo se expone cómo medir experimentalmente la tenacidad a fractura por ser la propiedad que desea evaluar en los nuevos ensayos que se proponen en este trabajo. A su vez, se muestran las dificultades que muestra el ensayo de referencia actual DCB.

La tenacidad a fractura es una propiedad que solo depende de la combinación adhesivo-sustrato, de la preparación superficial y del proceso de curado, por ello es la característica que se evalúa para conocer el estado de las uniones. Se determina mediante un ensayo de pelado en un espécimen que tiene una grieta previa. A partir de la carga de pelado y/o el desplazamiento y/o la longitud de grieta, se evalúa la energía que se libera por unidad de área al propagar la grieta ( $G_c$ ).

$$G_c = \frac{1}{B} \left( \frac{dW}{da} - \frac{dU}{da} \right) \quad (1)$$

Donde B es el ancho de la probeta, W es el trabajo de las cargas externas y U la energía interna de deformación.

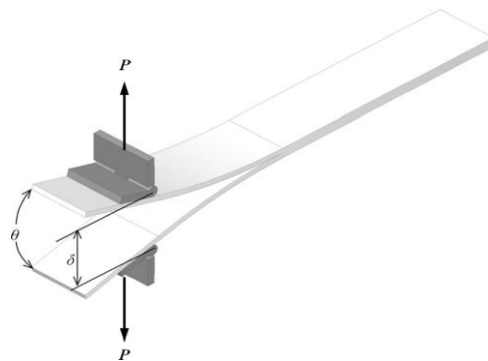


Figura 5: Ensayo  $G_{IC}$  (Cañas J. et al.,2018 [16])

Los ensayos que habitualmente se emplean son el ensayo DCB (Double Cantilever Beam) y el CDP (Climbing Drum Peel).

El ensayo, denominado DCB (Figura 6), 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 ensayo normalizado (ASTM D5228, AITM1-0053, ISO 15024) [5][8][26] se realiza

sobre configuraciones simétricas (idénticos laminados a ambos lados de la grieta) y en ese caso el valor de  $G_C$  calculado coincide con el modo I de fractura,  $G_{IC}$ .

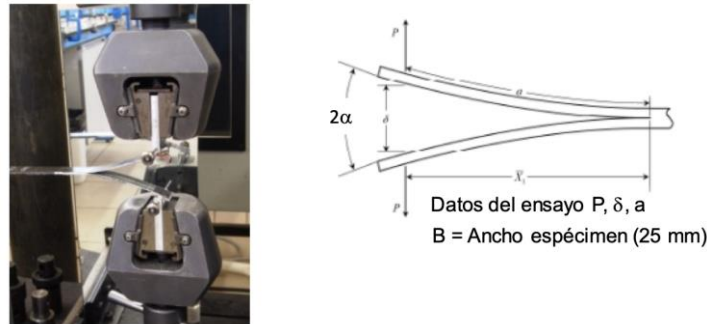


Figura 6: Ensayo DCB. (Cañas J. et al.,2018 [16]).

▪ **Cálculo de  $G_{IC}$  según AITM1-0053**

La probeta tiene un ancho de 25 mm y el espesor de los adherentes (h) es de 1,5 mm. Se considera que los desplazamientos son pequeños y a partir del registro de carga-desplazamiento (Figura 7) se evalúa  $G_{IC}$  como:

$$G_{IC} = \frac{A}{B\Delta a} \quad (2)$$

Donde A es el área comprendida entre la curva carga-desplazamiento entre dos puntos y las rectas que unen dichos puntos con el origen (energía que se requiere para propagar la grieta), B es el ancho del espécimen y  $\Delta a$  es el aumento de la longitud de grieta entre los dos puntos antes comentados (la norma toma  $\Delta a=60$  mm). En la Figura 7 se muestra una gráfica tipo de este ensayo.

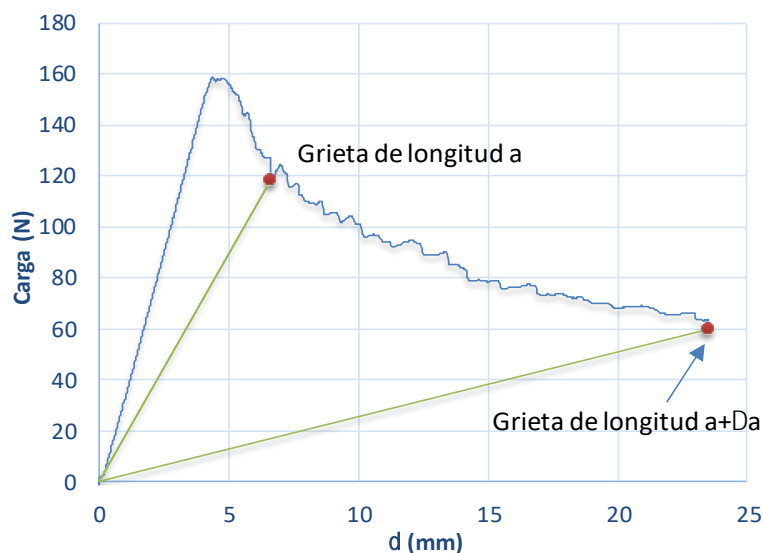


Figura 7: Curva Fuerza-desplazamiento en el ensayo DCB. (Cañas J. et al.,2018 [16]).

Los principales inconvenientes de este procedimiento son dos:

- Se requiere medir la longitud de grieta y ello puede resultar complicado sobre todo cuando la curva no es suave y va a saltos (stick-slip [36]).
- Cuando no se cumple la hipótesis de pequeños desplazamientos (espesores de adherentes pequeños < 1mm) la descarga (línea recta entre el punto de la curva y el origen) no es lineal, por lo que no es fácil determinar el área A.

▪ **Cálculo de  $G_{IC}$  según ASTM o ISO**

Aunque las norma ASTM[8] e ISO[26] son de aplicación para evaluar la energía liberada cuando progresa la grieta entre dos láminas de un laminado, el método que contemplan resulta también de aplicación para laminados encolados. El valor de  $G_{IC}$ , despreciándose la deformación debida a axil y cortante viene dada por [40][41][42]:

$$G_{IC} = \frac{M^2}{B EI} \quad (3)$$

Siendo M el momento flector existente en cada laminado en el borde de la grieta en el instante en el que se produce el crecimiento, EI la rigidez a flexión de cada uno de los laminados. Usando la hipótesis de pequeños desplazamientos (válida para  $\delta/a < 0,4$  según ASTM, siendo  $\delta$  la apertura de los adherentes en la zona de agarre) y la solución elástica de la viga en voladizo se obtiene[21] [32]:

$$M \cong Pa ; \delta = \frac{2}{3} \frac{Pa^3}{EI} \quad (4)$$

Sustituyendo en la ecuación (2) se llega a:

$$G_{IC}(P, \delta, a) = \frac{3 P \delta}{2 B a} \quad (5)$$

Nuevamente la evaluación de  $G_{IC}$  requiere no solo conocer P y  $\delta$ , sino también el valor de “a” para el  $\delta$  considerado.

Sobre la ecuación anterior, la norma ASTM [8] establece una serie de correcciones:

- Considerar que el borde de la grieta no esta empotrado: Se corrige el valor de “a” por un ajuste de resultados experimentales.  $(a+\Delta_{cor})$ . Donde  $\Delta_{cor}$  es obtenido de la intersección con el eje de ordenadas de la recta de mínimos cuadrados asociada a la gráfica longitud de grieta (a) frente a la raíz cubica de  $\delta/P$ . (Figura 8)

$$G_{IC}(P, \delta, a) = \frac{3 P}{2 B} \frac{\delta}{a + \Delta_{cor}} \frac{F}{N} \quad (6)$$

- Efecto de grandes desplazamientos: Se multiplica el valor de  $G_{IC}$  por un factor F que depende del cociente  $\delta/a$  y de las dimensiones del sistema de agarre.

$$F = 1 - \frac{3}{10} \left(\frac{\delta}{a}\right)^2 - \frac{3}{2} \left(\frac{\delta t}{a^2}\right) \quad (7)$$

- Efecto del sistema de cogida: Se corrige el valor de  $G_{IC}$  divdiéndolo por un factor N que depende de las dimensions del sistema de agarre, de “a” y de  $\delta$ .

$$N = 1 - \left(\frac{L'}{a}\right)^3 - \frac{9}{8} \left[1 - \left(\frac{L'}{a}\right)^2\right] \left(\frac{\delta t}{a^2}\right) - \frac{9}{35} \left(\frac{\delta}{a}\right)^2 \quad (8)$$

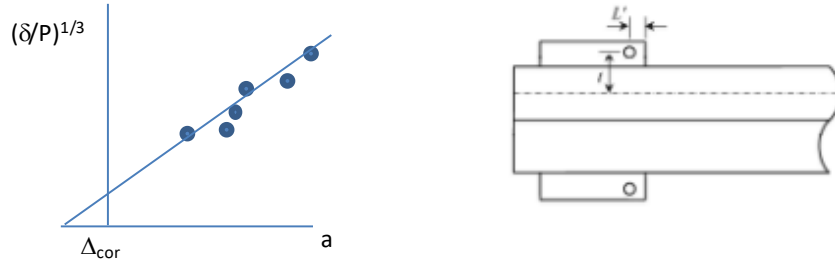


Figura 8: Gráfica para corregir “a” y dimensiones del sistema de agarre. (Cañas J. et al., 2018 [16]).

En cualquier caso, las expresiones desarrolladas requieren medir la longitud de grieta. Si se combinan de otra forma las ecuaciones (3) y (4) [11] obtenemos diferentes expresiones de  $G_{IC}$  (Ecuaciones (9) a(12)), las expresiones (9), (10) y (12) dependen de “a” pero la expresión (11) no depende de “a” lo que supondría a un gran ventaja. La desventaja de usar la expresión (10), (11) y (12) frente a la (9) es que se requiere conocer las dimensiones del espécimen ( $I=Bh^3/12$ ) así como el módulo de elasticidad longitudinal (E).

$$G_{IC}(P, \delta, a) = \frac{3 P \delta}{2 B a} \quad (9)$$

$$G_{IC}(P, a) = \frac{P^2 a^2}{B E I} \quad (10)$$

$$G_{IC}(P, \delta) = \frac{P^2}{B E I} \sqrt[3]{\left(\frac{3 E I \delta}{2 P}\right)^2} \quad (11)$$

$$G_{IC}(\delta, a) = \frac{9 E I \delta^2}{4 B a^4} \quad (12)$$

Obviamente si se mide bien el valor de  $a$  y la hipótesis de pequeños desplazamientos se satisface, todas las expresiones anteriores conducen al mismo valor de  $G_{IC}$ . Sin embargo, si los desplazamientos no son lo suficientemente pequeños, aunque la medida de  $a$  sea correcta, las expresiones (9) a (12) dan resultados diferentes y la aplicación del factor de corrección F a las expresiones anteriores conduce también a resultados muy dispares.

Simulaciones numéricas mediante modelos cohesivos en grandes desplazamientos apuntan a que el factor de corrección (F) que propone la norma es el adecuado, pero si se calcula  $G_{IC}$  con la expresión (10) y no con cualquiera de las otras, en particular con la que propone la norma (ec. (9)). Así, se han resuelto mediante el MEF casos cuya única diferencia entre ellos es el número de capas, y con ello su espesor, de los adherentes (2, 4, 8 y 16 capas). En todos ellos los adherentes son láminas unidireccionales de carbono-epoxi siendo el valor fijado de  $G_{IC}$  de  $600\text{J/m}^2$ . De la resolución numérica se obtiene la curva carga-desplazamiento (P- $\delta$ ) y también se puede conocer el valor de  $a$  para cada pareja P- $\delta$ . Los resultados medios de  $G_{IC}$  en  $\text{J/m}^2$  obtenidos para un  $\Delta a$  de 60 mm después de aplicar las expresiones (9) a (12) se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1: Valores de  $G_{IC}$  obtenidos de la simulación numérica.

CAPAS	$G_{IC}(P,\delta,a,\Delta)$ EC 6 (F=N=1)		$G_{IC}(P,\delta,a)$ EC 9		$G_{IC}(P,a)$ EC 10		$G_{IC}(P,\delta)$ EC 11		$G_{IC}(\delta,a)$ EC 12	
	$\delta_{inicial}$	$\delta_{final}$	$\delta_{inicial}$	$\delta_{final}$	$\delta_{inicial}$	$\delta_{final}$	$\delta_{inicial}$	$\delta_{final}$	$\delta_{inicial}$	$\delta_{final}$
16	605	596	623	760	597	613	603	602	613	580
8	575	561	595	696	660	696	602	603	502	451
4	605	604	647	702	624	631	611	613	587	578
2	605	612	623	658	832	841	673	681	440	445

En las ecuaciones (9), (10) y (12) se emplea  $a = a + \Delta a$  para corregir el giro de la sección en el borde de grieta. Se observa que cuando los desplazamientos son pequeños (rigidez alta de los adherentes) todas las expresiones obtienen un valor de  $G_{IC}$  muy similar, sin embargo, cuando el espesor del adherente es pequeño, los resultados son muy diferentes entre ellos y alejados del valor esperado ( $600 \text{ J/m}^2$ ). De hecho, no se cumple para todos los espesores la condición de ASTM ( $\delta/a < 0,4$ ):

Nº Capas	$\delta/a$
16	0,057
8	0,140
4	0,419
2	0,917

Si se aplica la corrección de grandes desplazamientos propuesta por la norma se obtienen los valores mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2: Valores de  $G_{IC}$  corregidos con el factor F.

Nº CAPAS	$G_{IC}(P,\delta,a,\Delta)$ EC 6		$G_{IC}(P,\delta,a)$ EC 9		$G_{IC}(P,a)$ EC 10		$G_{IC}(P,\delta)$ EC 11		$G_{IC}(\delta,a)$ EC 12	
	$\delta_{inicial}$	$\delta_{final}$	$\delta_{inicial}$	$\delta_{final}$	$\delta_{inicial}$	$\delta_{final}$	$\delta_{inicial}$	$\delta_{final}$	$\delta_{inicial}$	$\delta_{final}$
16	605	596	623	760	597	612	602	601	614	581
8	575	560	595	696	657	691	601	601	503	454
4	601	598	643	695	596	593	599	596	607	604
2	580	580	597	624	641	609	600	590	525	554

Como se puede observar, para espesores grandes el efecto de corrección es mínimo pero para espesores pequeños el cambio es importante. Solamente cuando el factor se aplica a la ec. (9) los resultados son satisfactorios. Por tanto, habría que indicar el factor de corrección que la norma propone no es de aplicación en todos los casos, solo si se evalúa  $G_{IC}$  con la ec (10), (y no como la norma propone (Ecs. (5) o (8))) si sería de aplicación.

Para el caso de espesores pequeños resulta más conveniente evaluar  $G_{IC}$  a partir de la solución elástica en grandes desplazamiento [32][40][42].

Una alternativa al ensayo DCB es el ensayo de pelado en tambor (CDP)[17]. Esta prueba se creó originalmente para evaluar las uniones encoladas entre un adherente flexible y un adherente rígido o entre la piel (laminado) y el núcleo en un panel sándwich [7]. El ensayo consiste en enrollar un laminado flexible (que pela al mismo tiempo que se enrolla) usando un tambor con dos radios diferentes ( $r_2 > r_1$ ). La probeta utilizada incluye dos laminados encolados, que pueden tener diferentes espesores siendo al menos uno de ellos un laminado delgado, y una zona pre-agrietada. El laminado delgado (laminado flexible) está fijado al tambor en su parte central que

tiene el radio más pequeño ( $r_1$ ). Las partes externas (bordes) del tambor (con mayor radio,  $r_2$ ) incluyen dos flejes de carga que aplicarán el torsor requerido para la progresión del tambor a lo largo de la probeta. Los extremos de los flejes de carga están fijados en la parte inferior de una máquina universal de ensayos, mientras que la parte final de la probeta está anclada a las mandíbulas superiores de la máquina. Una vez que el espécimen está colocado, la parte superior de la máquina, esta zona se mueve hacia arriba provocando que laminado flexible entre en contacto con la parte interior del tambor. Entonces, el tambor avanza a lo largo del espécimen y propaga la zona inicial previamente agrietada mientras que la lámina flexible se enrolla en el tambor. Una fotografía y esquema de la prueba se muestra en la Figura 9.

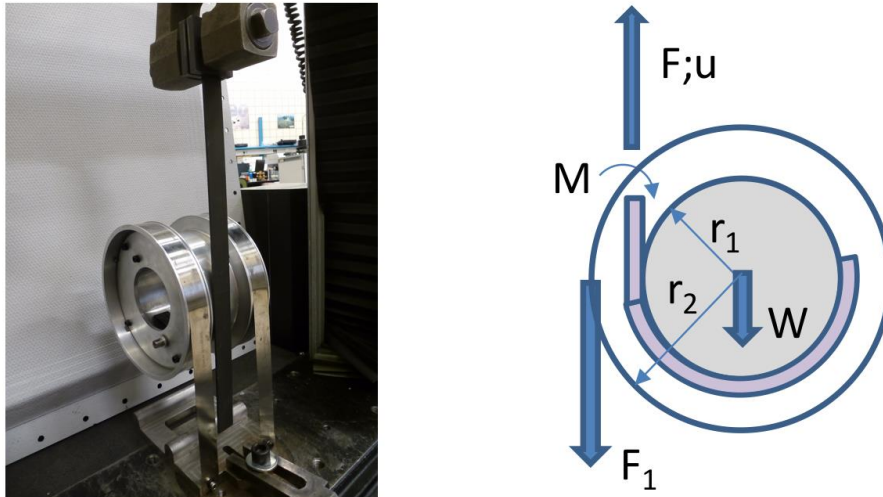


Figura 9: Ensayo de pelado a tambor (CDP).

En los gráficos de carga-desplazamiento (Figura 10) obtenidos durante las pruebas, dos cargas de niveles constantes se pueden observar claramente. Uno asociado a la carga de liado del adherente flexible ( $F_w$ ) y el otro asociado al proceso de liado + pelado ( $F_d$ ). Por lo general,  $F_w$  es calculado en una segunda etapa de la prueba una vez que una gran zona agrietada es obtenida.

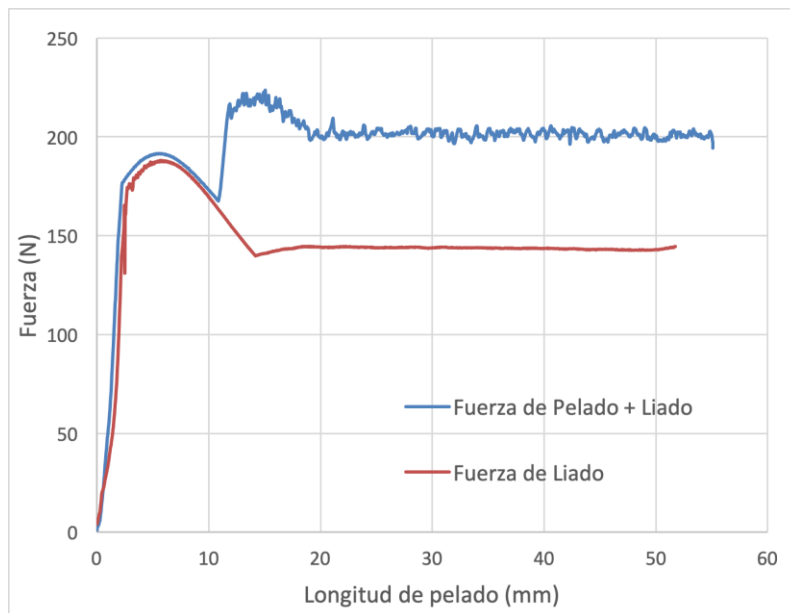


Figura 10: Gráfica tipo de un ensayo de pelado tambor (CDP).

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:



$$\Delta U = (F_d - F_w) \cdot \Delta u \quad (13)$$

Donde  $\Delta u$  es el desplazamiento de cruceta expresado como  $\Delta u = (R_2 - R_1) \cdot \Delta \theta$ .

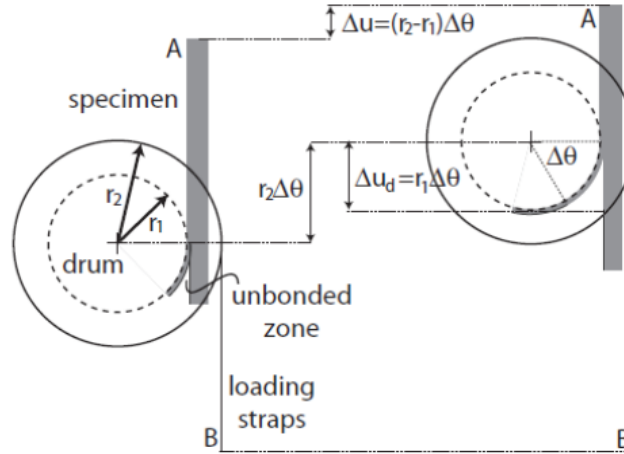


Figura 11: Análisis mecánico del CDP. (Daghia, F. et al, 2015 [17])

Adicionalmente, la longitud de grieta coincide con la zona que se despegó alrededor del tambor, tal y como se aprecia en la Figura 11:

$$\Delta a = \Delta u_d = R_1 \cdot \Delta \theta \quad (14)$$

Se obtiene finalmente  $G_C$  como:

$$G_c = \frac{(F_d - F_w) \cdot (R_2 - R_1)}{b \cdot R_1} \quad (15)$$

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:

$$\frac{M_w}{EI} = \frac{1}{R_1 + \frac{t}{2}} \quad (16)$$

$$M_w = F_{1w} \cdot (R_2 - R_1) - W \cdot x \cdot R_1 \quad (17)$$

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

$$F_w = \frac{EI + W \cdot \left(R_2 + \frac{e}{2}\right) \cdot \left(R_1 + \frac{t}{2}\right)}{\left(R_2 - R_1 + \frac{e - t}{2}\right) \cdot \left(R_1 + \frac{t}{2}\right)} \quad (18)$$

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

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

Es importante subrayar que la configuración de la prueba y la cinemática impuesta conduce a una propagación de grietas estable. Este hecho implica que no es necesario medir la longitud de la grieta. Por otro lado, está claro que la tenacidad a la fractura obtenida con esta prueba no es asociada al modo de fractura pura I como ocurría con el DCB,  $G_C \neq G_{IC}$ . No obstante lo anterior, estudios numéricos realizados 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  $G_{IC}$ . [20]

El ensayo CDP no es la única alternativa al DCB para llevar a cabo un ensayo de pelado. Glessner et al. (1989) en colaboración con la empresa General Electric, diseñaron un utillaje para propagar la grieta forzando su avance debido a una cuña. Desarrollan una metodología donde se halla la tenacidad a fractura en función de la fuerza necesaria para empujar la cuña, y abrir la grieta en consecuencia, y en ancho del espécimen ensayado.[22]

Más de una década después, Sener et al. (2002), desarrolla otro procedimiento para medir la longitud del frente de grieta de forma automática. Acoplando dos sensores de desplazamiento, mide instantáneamente la separación de los brazos de la muestra.[37]

Poco después, se desarrolla un avance forzado por cuña para materiales metálicos creando plasticidad. Separándolos brazos de la probeta deformándolos plásticamente, se determina la longitud de grieta a partir de las deformaciones permanentes que sufren los brazos de la probeta.[39]

Adams et al. (2009) comparan el ensayo DCB, la introducción de cuña según ASTM D3762-03 y el de avance forzado de cuña (forced wedge test, FWT) para examinar las uniones adhesivas.[1]

Recientemente, se ha publicado una tesis doctoral presentando el ensayo se denomina WDT (Wedge Driven Test). Es una alternativa al ensayo DCB que consiste en la propagación de la grieta mediante el avance de una cuña a velocidad constante por el plano del adhesivo.[36]

A niveles industriales, estos ensayos presentan facilidades respecto al DCB, sin embargo, el inconveniente de los ensayos radica en su imposibilidad para llevarlo a cabo in situ, pero es un ensayo rápido y sencillo de procesar. Con esta idea, se desarrolla el ensayo alternativo Horizontal Drum Peel. Posteriormente, con la experiencia e ideas desarrolladas en la investigación, se diseña el Horizontal Open Displacement.

# 4 ENSAYO HORIZONTAL DRUM PEEL

---

El principal objetivo de este ensayo es que se pueda llevar a cabo 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 desarrolló una propuesta de ensayo basado en un pelado con tambor horizontal y que permitiría evaluar la tenacidad a fractura de la Alternativa 2, explicada anteriormente, pero in-situ.

## 4.1 Trabajo previo

La idea primitiva era desarrollar un ensayo similar al Climbing Drum Peel pero en posición horizontal. El arrastre del tambor se realizaría mediante un actuador neumático 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.

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. 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 sustituirla por un actuador por motor que hiciese girar el tambor. Ahí, el avance es automático y se produce a medida que la piel se enrolla al tambor.

Los resultados satisfactorios obtenidos con el prototipo 3 hicieron evolucionar esta idea hasta el equipo HDP\_01. La rotación del tambor se provoca mediante un motor que mueve una cadena cinemática para conseguir una velocidad adecuada de rotación. Con objeto de mejorar la flexibilidad de equipo, este evolucionó hasta el equipo HDP\_02 (Patente No 201730163) [33]. En la Figura 12 se muestra las evoluciones en el diseño del equipo de pelado.

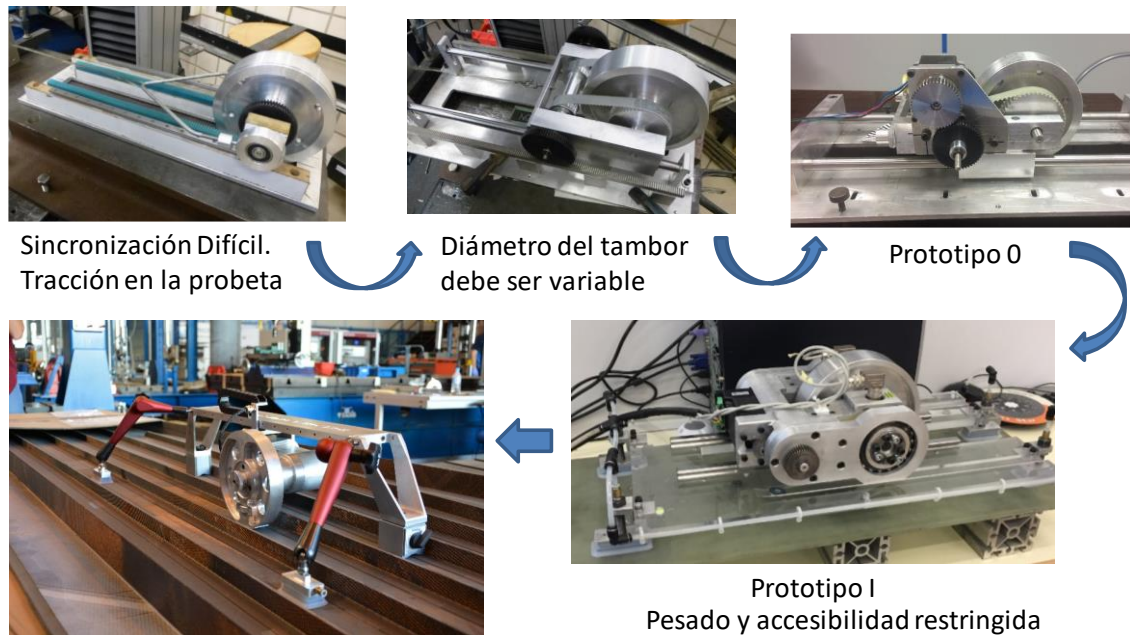


Figura 12: Evolución del equipo para pelado in-situ.

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...) [20]. 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. 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.

El despegue de la piel respecto al tambor no supone ningún problema y se produce siempre que el radio del tambor sea distinto del 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 y 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 a la realización de un estudio paramétrico para los valores de rigidez y de propiedades de adhesivos, se consideró que el diámetro de tambor más adecuado fuese superior 150 mm adoptándose 190 mm [15][20].

Para determinar  $G_C$  es necesario un análisis mecánico en detalle del equipo planteado. Con este nuevo dispositivo el aumento de la grieta corresponde al tramo de probeta que se enrolla en el tambor. Así, en relación al esquema de la Figura 13.

$$G_c = \frac{\Delta U}{\Delta A} = \frac{\Delta U}{B \Delta a} ; \Delta a = R_L \cdot \Delta \theta \quad (19)$$

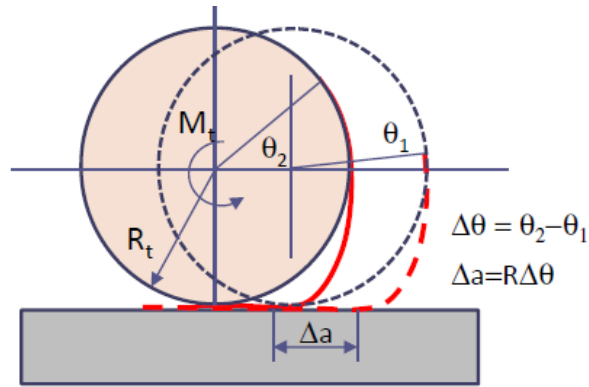


Figura 13: Esquema para el análisis mecánico del dispositivo de pelado horizontal.

Donde  $R_L$  es el radio total de liado:  $R_L = \frac{D_t+t}{2}$ . La energía interna necesaria para el pelado es:

$$\Delta U = (M_d - M_w) \cdot \Delta\theta \quad (20)$$

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

$$G_C = \frac{(M_d - M_w)}{B \cdot R_L} \quad (21)$$

Al igual que ocurre con el ensayo CDP, estudios numéricos realizados [15] ponen de manifiesto que la mixicidad de modos es pequeña y que predominantemente se origina modo I por lo que el valor de una  $G_C$  está próximo al de  $G_{IC}$ .

Tras la campaña experimental exhaustiva llevada a cabo en 2017, se concluye que los resultados entre CDP y HDP son totalmente comparables. Se desarrolla el procedimiento del ensayo definiendo las características de las muestras a ensayar, la velocidad óptima del tambor, la fórmula de cálculo de la tenacidad a fractura en función de los pares torsores y una hoja de cálculo para el postprocesado de resultados obtenidos directamente del software del HDP.

La experimentación también valida el desarrollo numérico realizado [14][15][20]. Toda la campaña se realiza con el dispositivo que se muestra en la Figura 14 con Patente P201730163.

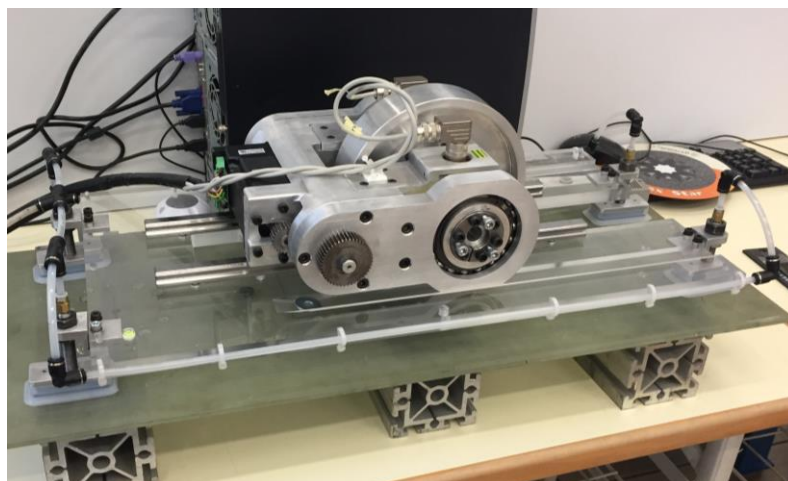


Figura 14: Dispositivo HDP Patente P201730163.

Con este dispositivo se realizó una campaña experimental extensa y detallada que proporcionó buenos resultados, [16] por lo que se siguen estudiando las mejoras para el requerimiento del ensayo. Tras analizar las dificultades que se pueden encontrar al realizar el ensayo de pelado, se exige fundamentalmente menor peso y tamaño, junto a conseguir una mayor accesibilidad y un sistema de fijación autónomo para facilitar la manipulación del operario y permita hacer el set-up rápido y sin complicaciones para un personal no cualificado para hacer ensayos de calidad. Se busca la mayor independencia posible ya que el ensayo no está diseñado para realizarse en un laboratorio, como es habitual. Con estas exigencias, se desarrolla el dispositivo de la Figura 15.

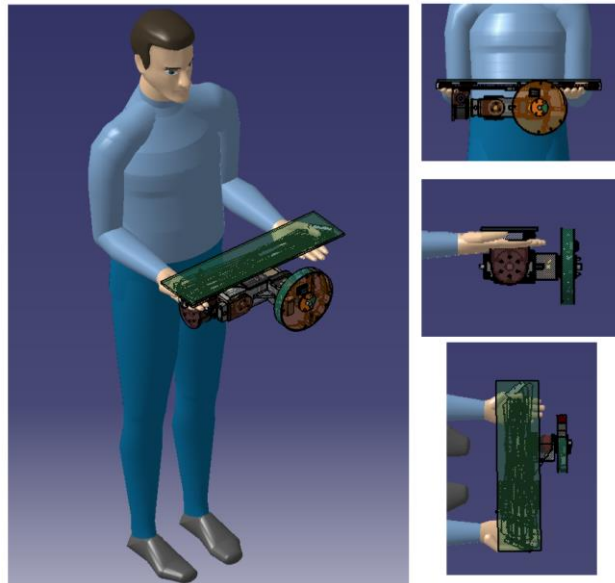


Figura 15: Diseño nuevo de HDP.

## 4.2 Desarrollo de HDP 2.0

Una vez se tiene el nuevo diseño planteado, se fabricó obteniendo el nuevo modelo HDP 2.0 (Figura 16)



Figura 16: Nuevo dispositivo HDP.

Se realizó el diseño, compra, montaje y el nuevo software del HDP 2.0. Una vez terminado, se requiere una campaña de ensayos que aseguren el correcto funcionamiento del mismo. Para ello, se llevan a cabo ensayos donde se compara el valor de tenacidad a fractura obtenidos para muestras encoladas empleando el CDP y HDP 2.0. Las muestras empleadas son fabricadas por AIRBUS, se desconocen los detalles del material compuesto y el adhesivo empleados, aunque la información proporcionada indica que la tenacidad a fractura nominal esperada es de  $600 \text{ J/m}^2$ . Todas las muestras son asimétricas [8+2] y con las dimensiones nominales que se muestran en la Figura 17.

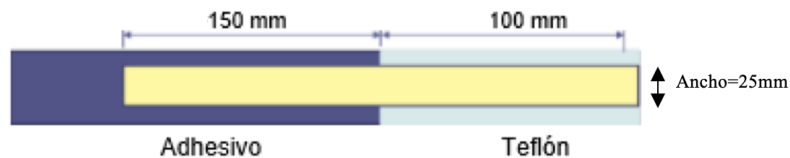


Figura 17: Configuración de muestras para validar HDP 2.0.

Los resultados de los ensayos realizados se muestran a continuación, en primer lugar, las muestras ensayadas con el CDP (Tabla 3). En segundo lugar, las muestras ensayadas con el nuevo dispositivo (Tabla 4).

Tabla 3: Comprobación del nuevo dispositivo HDP 2.0. – Ensayo CDP.

ESPÉCIMEN	ANCHO (mm)	ESPESOR DE LA PIEL (mm)	FUERZA DE PELADO + LIADO	FUERZA DE LIADO	$G_c$ ( $\text{J/m}^2$ )
ESPEC. 1	26,15	0,60	199,52 N	141,84 N	546,16
ESPEC. 2	26,05	0,65	197,26 N	140,61 N	537,52
ESPEC. 3	25,75	0,61	200,44 N	140,82 N	573,09
<b>Promedio</b>					<b>552,26</b>
<b>Desv.</b>					<b>18,55</b>
<b>CV (%)</b>					<b>3,36</b>

Tabla 4: Comprobación del nuevo dispositivo HDP 2.0. – Ensayo HDP 2.0.

ESPÉCIMEN	ANCHO (mm)	ESPESOR DE LA PIEL (mm)	FUERZA DE PELADO + LIADO	FUERZA DE LIADO	$G_c$ ( $\text{J/m}^2$ )
ESPEC. 1	26,20	0,70	1,37 Nm	0,07 Nm	521,83
ESPEC. 2	26,10	0,65	1,59 Nm	0,21 Nm	557,08
ESPEC. 3	26,20	0,70	1,28 Nm	0,06 Nm	488,78
<b>Promedio</b>					<b>522,56</b>
<b>Desv.</b>					<b>34,16</b>
<b>CV (%)</b>					<b>6,54</b>



Los resultados numéricos de la tenacidad a fractura son totalmente comparables en ambos ensayos. Las gráficas obtenidas para cada espécimen se muestran a continuación:

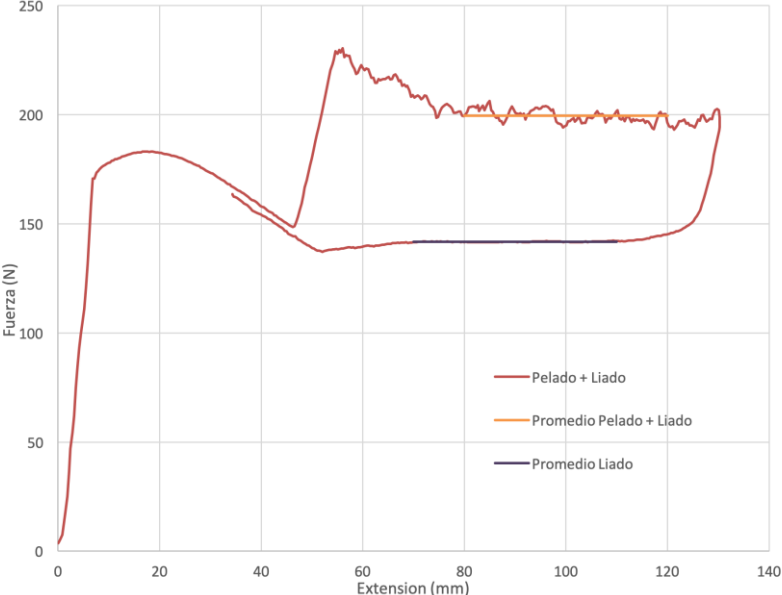


Gráfico 1: Espécimen 1-CDP.

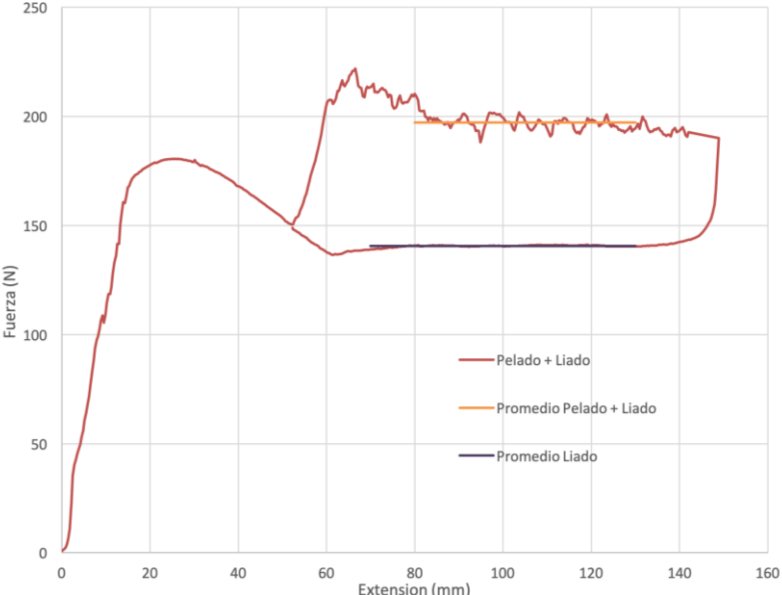


Gráfico 2: Espécimen 2-CDP.



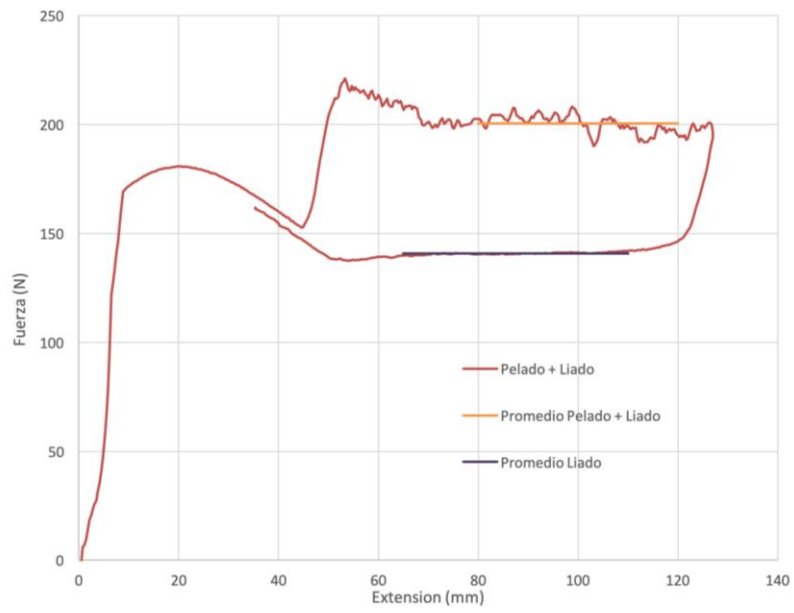


Gráfico 3: Espécimen 3-CDP.

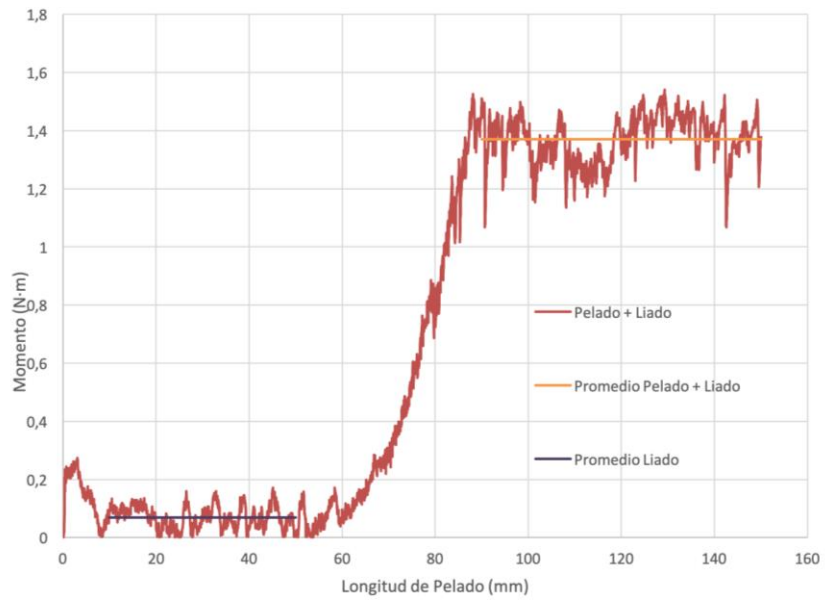


Gráfico 4: Espécimen 1-HDP 2.0.

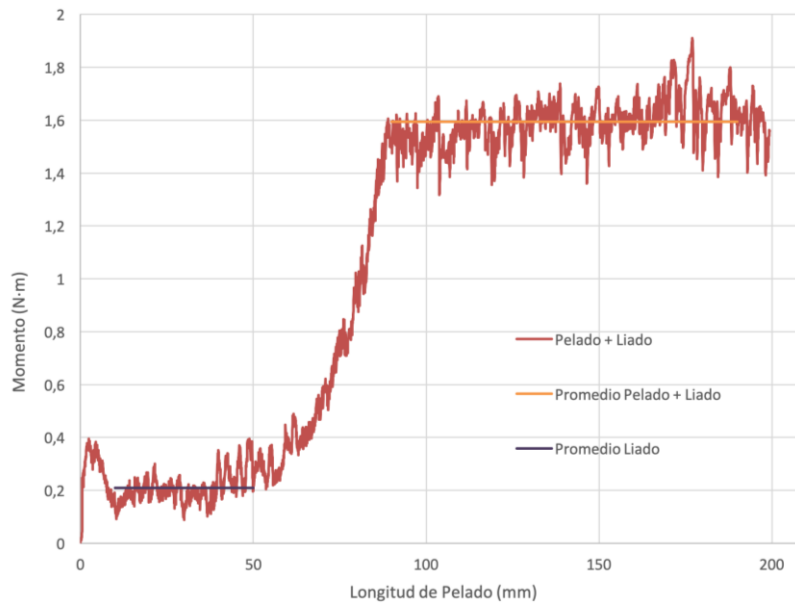


Gráfico 5: Espécimen 2-HDP 2.0.

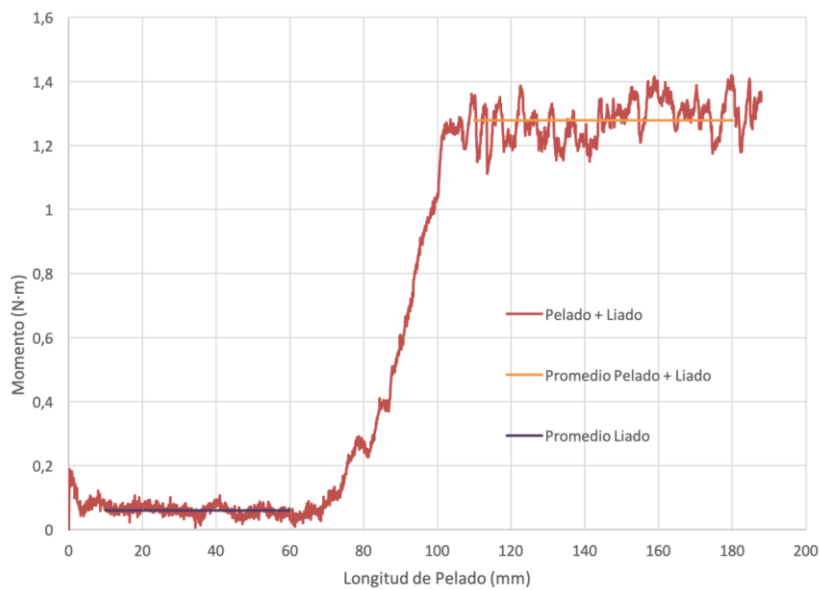


Gráfico 6: Espécimen 3-HDP 2.0.

El nuevo dispositivo HDP 2.0 proporciona valores de tenacidad a fractura comparables con los que se obtienen con el CDP, con un coeficiente de varianza de 5,5%. Es un valor suficientemente bajo que permite asegurar que el nuevo modelo es adecuado tanto como el dispositivo HDP 1.0. Aunque la tenacidad a fractura esperada de las muestras era algo mayor [600 J/m<sup>2</sup>], no supone una alarma ya que ambos ensayos proporcionan un valor del mismo orden, y se toma el resultado hallado con el CDP como referencia. La disminución en  $G_C$  puede ocurrir por problemas de fabricación. Al tener información limitada sobre las muestras, es razonable comparar los resultados de ambos ensayos, por lo que se puede asegurar un correcto funcionamiento del dispositivo.

## Efecto de la desalineación de la muestra

Un factor a tener en cuenta es el posible efecto en el ensayo que pueden provocar colocar las muestras desalineadas con el tambor, ya que es un error fácil de cometer al realizar el ensayo fuera de un laboratorio. Un ensayo que tiene como objeto ser repetido numerosas veces por operarios no cualificados debe ser normalizado para definir el procedimiento detalladamente. Ello requiere una definición del set-up y estudiar todos los posibles problemas que pueden aparecer para prevenirlos. Con este pretexto, se decide realizar unas pruebas básicas para ver la influencia del desalineamiento entre el tambor y la probeta ensayada.

Se realizan dos ensayos de referencia con la muestra bien alineada, a 0° respecto al tambor, otro con la muestra a 10° y, por último, a 40°. Se emplean el mismo lote de muestras recibido por AIRBUS para estudiar este efecto. Para asegurar el ángulo entre la probeta y el tambor se emplea un inclinómetro. El resto del ensayo se realiza como se ha explicado anteriormente.

Tabla 5: Efecto de la desalineación de la muestra en HDP.

ESPÉCIMEN	ÁNGULO	ANCHO (mm)	ESPELOR DE LA PIEL (mm)	MOMENTO (Nm)		G <sub>c</sub> (J/m <sup>2</sup> )
				PELADO + LIADO	LIADO	
SPEC. 1	0°	26,10	0,65	1,59	0,21	557,08
SPEC. 2	0°	25,36	0,56	1,66	0,18	615,65
SPEC. 3	10°	25,24	0,52	1,86	0,55	545,20
SPEC. 4	40°	25,24	0,52	1,84	0,51	556,33
<b>Promedio</b>						<b>568,56</b>
<b>Desv.</b>						<b>31,86</b>
<b>CV (%)</b>						<b>5,60</b>

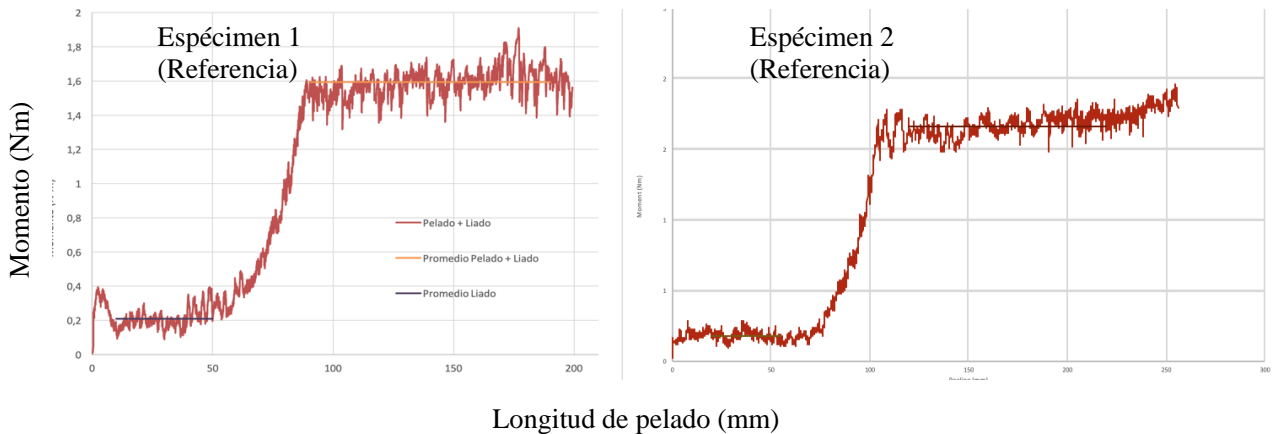


Gráfico 7.1: Muestras para comprobar el efecto de la desalineación de la muestra en el HDP.

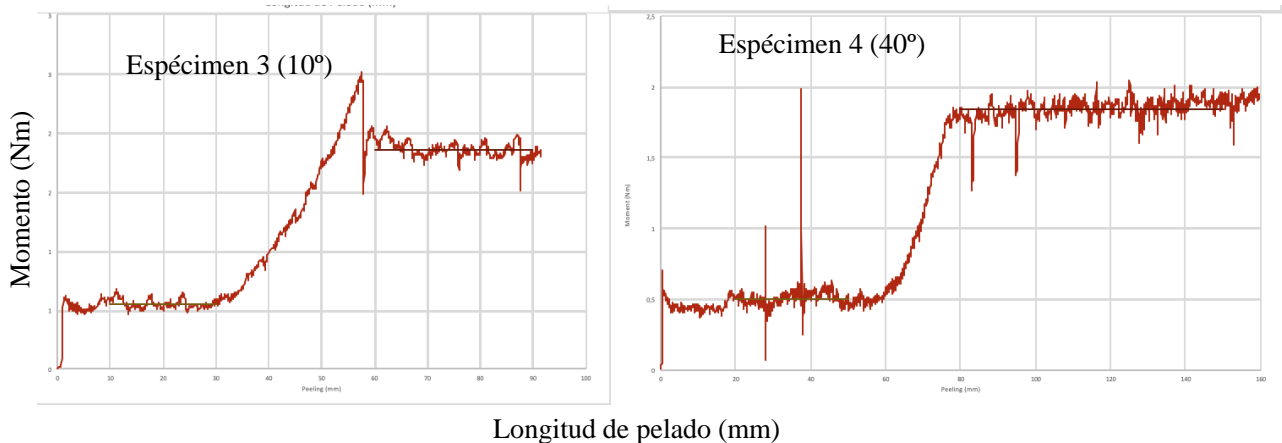


Gráfico 8.2: Muestras para comprobar el efecto de la desalineación de la muestra en el HDP.

Observando los resultados numéricos en la Tabla 5 se puede concluir que el efecto de posicionar la muestra desalineada no afecta de manera relevante al resultado final de tenacidad a fractura, sin embargo, observando el

Gráfico 8, sí se aprecian irregularidades en el ensayo. Aparecen picos en el momento indeseados en el transcurso del ensayo. El más pronunciado se ve en el momento de liado del espécimen 4 que supera el momento de pelado + liado posterior. Estas subidas aparecen porque la muestra se comienza a liar de forma abrupta e irregular al avanzar el tambor, perdiendo la estabilidad del movimiento del tambor y apareciendo estas anomalías.

Para evitar el desalineamiento entre muestra y tambor se decide instalar un láser en el dispositivo que muestre la posición de la muestra en el momento de realizar el set-up, de modo que el operario tenga perfectamente visible el lugar donde debe estar la muestra.

### Efecto de la dirección del ensayo

Una importante mejora de este dispositivo es la posible elección de la dirección del ensayo. El tambor puede girar tanto en sentido horario, lo cual supondría que la dirección del ensayo fuera a la derecha, como en sentido anti horario, donde el tambor avanzaría hacia la izquierda de la Figura 18.

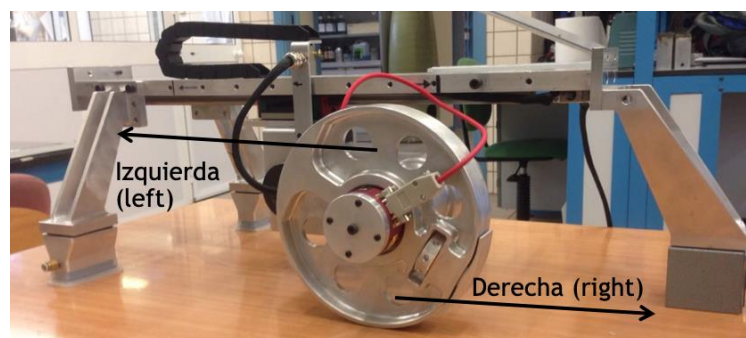


Figura 18: Posibles direcciones del ensayo HDP 2.0.

Al ser un nuevo aspecto del dispositivo, se requiere una comprobación experimental que demuestre que el sentido de pelado no influye en el transcurso del ensayo. Aunque teóricamente no debería influir, siempre pueden aparecer inconvenientes en el montaje o problemas electrónicos imprevistos.

Se procede a realizar una campaña experimental con tal objetivo. Se fabrican 8 muestras de cinta a 0° de M21E/34%/UD194/IMA-12K [25] y adhesivo film Cytek FM300K.05 [24]. Todas las

muestras son asimétricas [8+2] y con las dimensiones nominales que se muestran en la Figura 17.

Tabla 6: Influencia de la dirección del ensayo HDP 2.0.

ESPÉCIMEN	DIRECCIÓN DE ENSAYO	ANCHO (mm)	ESPESOR DE LA PIEL (mm)	MOMENTO (Nm)		APARENT $G_c$ (J/M <sup>2</sup> )
				PELADO+ LIADO	LIADO	
SPEC. 1	Izquierda	25,00	0,50	2,23	0,18	861,45
SPEC. 2		25,00	0,50	2,22	0,21	841,46
SPEC. 3		25,00	0,50	2,18	0,23	817,20
SPEC. 4		25,00	0,50	2,04	0,11	812,08
SPEC. 5	Derecha	25,00	0,50	2,40	0,26	896,04
SPEC. 6		25,00	0,50	2,40	0,25	905,10
SPEC. 7		25,00	0,50	2,29	0,09	921,31
SPEC. 8		25,00	0,50	2,24	0,10	895,28
<b>PROMEDIO</b>						<b>868,74</b>
<b>DESV.</b>						<b>41,75</b>
<b>CV (%)</b>						<b>4,81</b>

Los ensayos realizados se muestran a continuación:

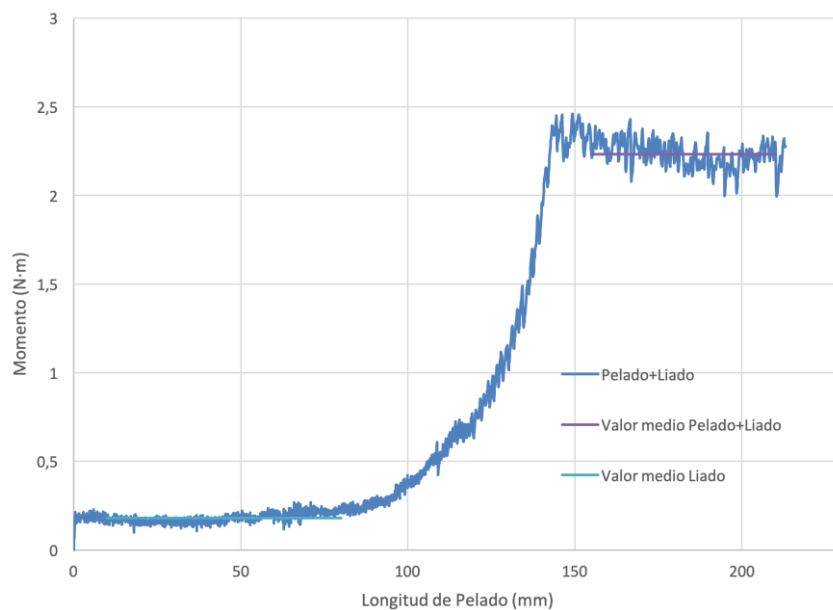


Gráfico 9: Espécimen 1.

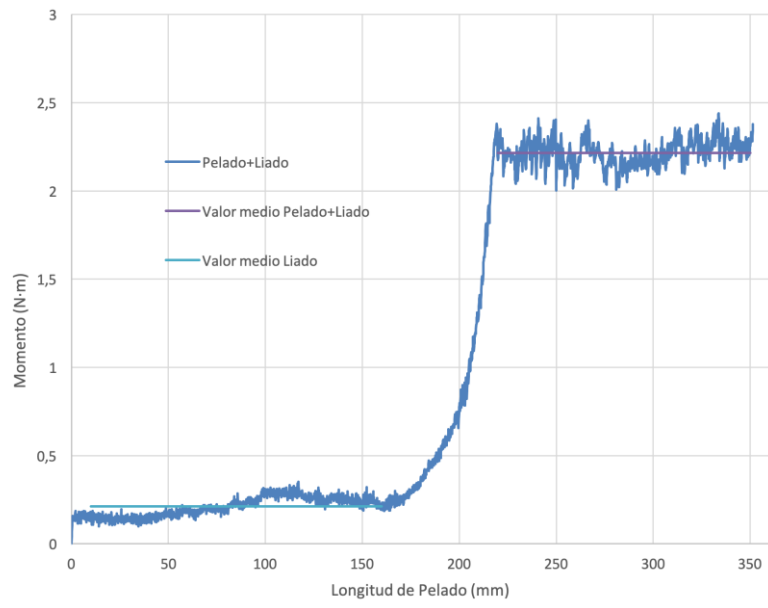


Gráfico 10: Espécimen 2.

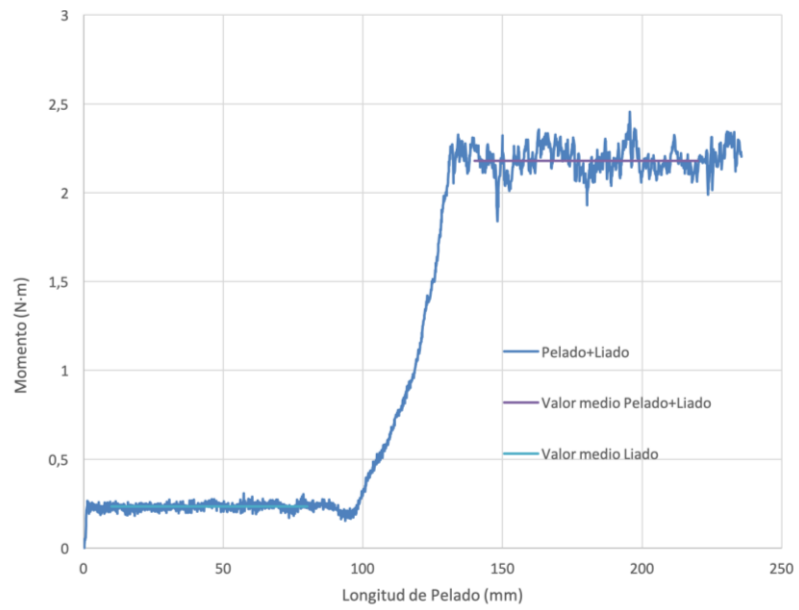


Gráfico 11: Espécimen 3.

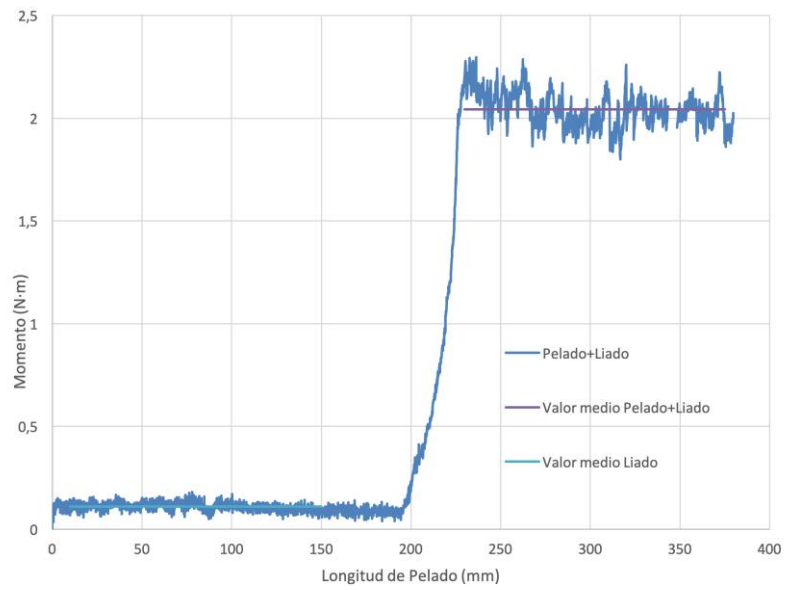


Gráfico 12: Espécimen 4.

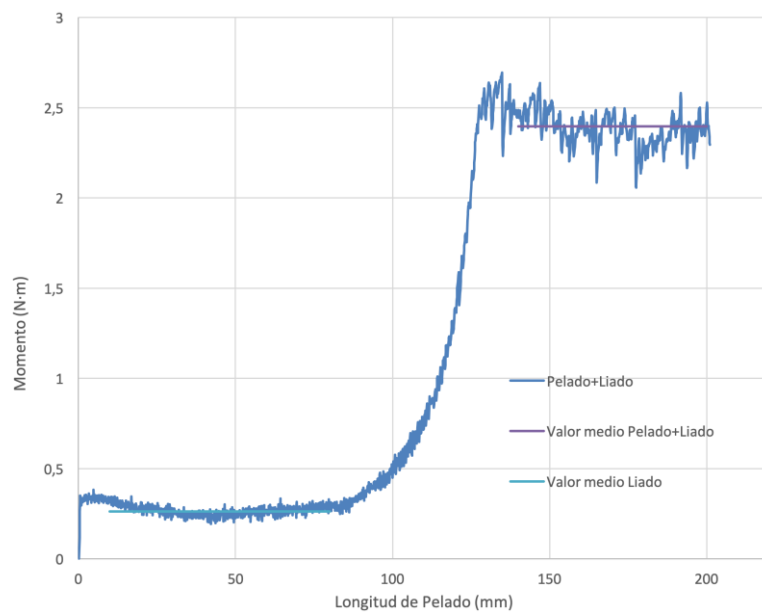


Gráfico 13: Espécimen 5.

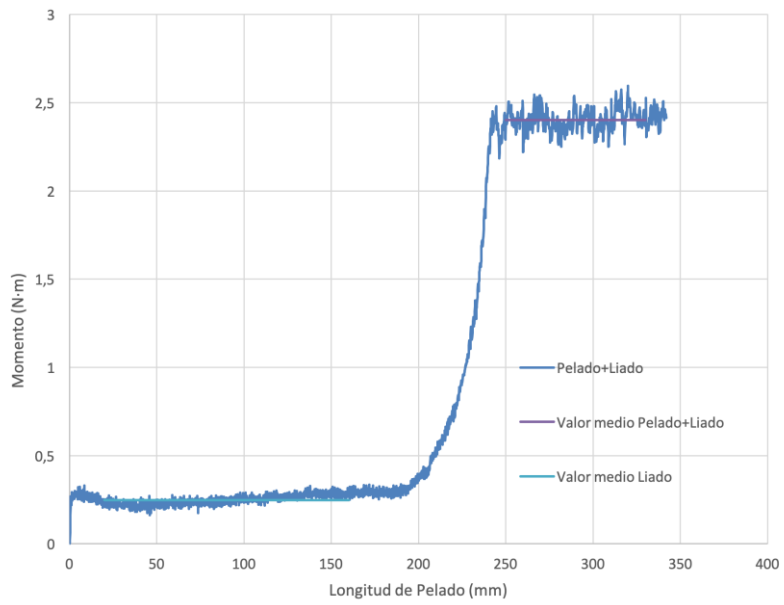


Gráfico 14: Espécimen 6.

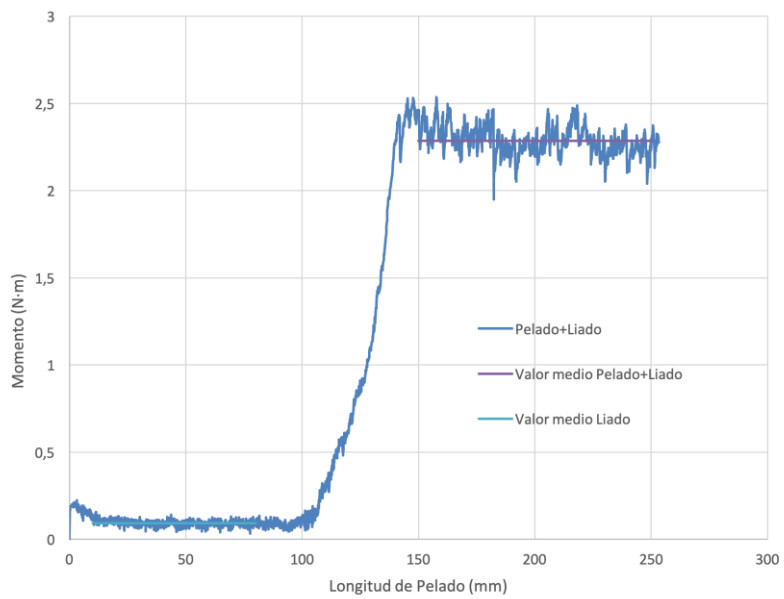


Gráfico 15: Espécimen 7.



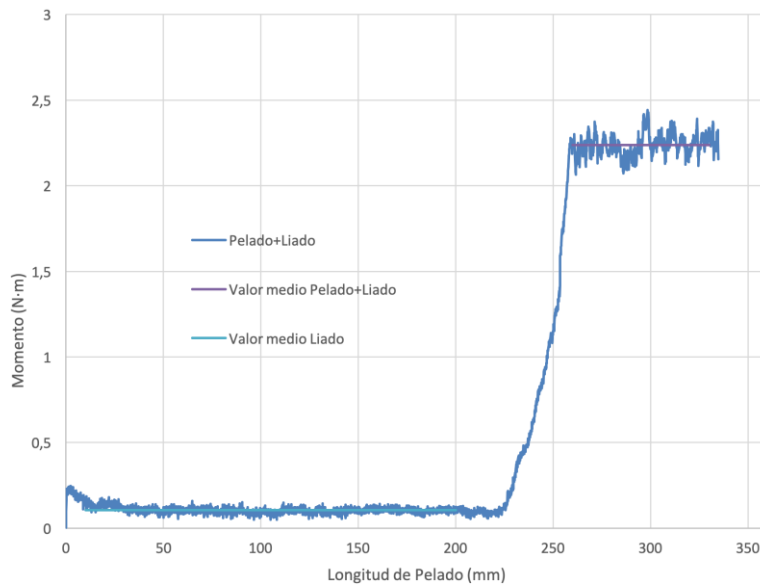


Gráfico 16: Espécimen 8.

Tras estos ensayos, se puede concluir que la dirección del tambor no influye en el procedimiento lo cual proporciona una versatilidad al dispositivo muy importante a la hora de definir el lugar y momento del ensayo en la cadena de producción. El lugar y disposición del ensayo está aún por decidir, por lo que la posible elección del sentido del ensayo facilita significativamente la futura decisión según otros factores, como por ejemplo, el momento donde se pierda menos tiempo en la cadena de producción y/o en un lugar de la planta adaptado para realizar el ensayo sin interferencia. Factores que no dependen del dispositivo en sí, por ello se desea que el HDP se adapte lo máximo posible al mayor número de circunstancias posibles para que no suponga un impedimento en la decisión de dónde y cuándo realizar el ensayo.

### Importancia del modo de fallo

Uno de los aspectos más importantes para desarrollar completamente un nuevo ensayo es poder determinar el modo de fallo tras la rotura. La idea es que este ensayo sea realizado por personal no cualificado por lo que categorizar el modo de fallo supone un problema primordial para todo el desarrollo. Para poder evaluar el modo de fallo se plantean dos opciones; el operario realizará una foto de las superficies de rotura y se guardará en el fichero de recogida de datos y posteriormente, un personal cualificado debe cerciorar que el modo de fallo está dentro de lo esperado. La segunda opción es realizar una plantilla exhaustiva de modos de fallos posible que el operario tendrá disponible para comparar cada muestra y reportarlo en el fichero de datos. Cualquiera de ambas opciones obliga a incluir una cámara en el desarrollo del nuevo software para el procesamiento de datos, ya que la imagen debe estar almacenada para cada ensayo, independientemente de quién evalúe el modo de fallo.

Al ser un nuevo ensayo, no está definida aún una norma con su procedimiento y la validez de los diferentes modos posibles de fallo. Aun así, parece razonable que se tome como referencia la norma desarrollada por AIRBUS "Classification of failure modes of composite bonded joints opened under mode I loading" [6] la cual expone los posibles modos de fallo en uniones encoladas de composite en modo I. Aunque el HDP 2.0 no presenta un modo I puro, las simulaciones numéricas realizadas aseguran que el valor de  $G_C$  que se obtiene es muy cercano a  $G_{IC}$ , como ya se ha dicho [15][16][20].

Primero, se definen las distintas zonas donde se puede producir el fallo en la muestra y posteriormente, se analiza la validez de cada opción. La definición de las distintas zonas se muestra a continuación:

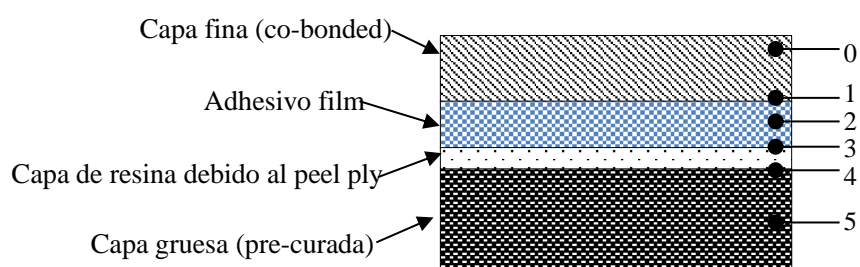


Figura 19: Definición de zonas de fallo.

Hay una diferencia respecto a la definición en la normal AITM 6-3008 [6], las muestras que se han definido para el HDP son asimétricas. Se han numerado las diferentes posibles localizaciones del fallo y se definen a continuación:

Tabla 7: Características de cada modo de fallo.

<i>Característica</i>	<i>Nº de Modo</i>
Dentro del adherente co-bonded (delaminación)	0
Interfase fresco-fresco	1
Fallo cohesivo (dentro adhesivo)	2
Adhesión	3
Interfaz adherente-fibra/resina peel ply	4
Dentro de adherente pre-curado (delaminación)	5

El fallo cohesivo es el “2”, la grieta se propaga por un plano en medio de la capa de adhesivo resultando cantidades de adhesivo similares en ambas caras. La rotura tipo “1” es en la interfase adhesivo fresco/prepeg donde hay una interacción químico-físicamente (difusión) durante el curado, lo que supone una unión fuerte. La adhesión “3” muestra una clara separación entre el adhesivo y el laminado, la grieta propaga a través de la interface entre el adhesivo y el laminado pre-curado, lo cual supone que la unión no se ha realizado correctamente. En caso de delaminación “0” y “5” se identifican claramente fibras de carbono en ambas caras de adherente. La grieta propaga a través de la resina del preimpregnado, arrancando fibras del material base del laminado. En caso de obtener un fallo de este tipo, lo más habitual es tener un modo mixto en lugar de una delaminación pura.



Figura 20: Modos de fallo: Adhesión(3) o interfase fresco-fresco (1), Cohesión(2) y Delaminación(0/5) (de izq.a dcha.)

## Desarrollo del nuevo software

El software implementado para el HDP 1.0 es adecuado pero mejorable. Como se ha explicado en el apartado anterior, se requiere la incorporación de una cámara en el dispositivo para hacer una fotografía del modo de fallo tras el ensayo que se guarde en el fichero de datos que se obtienen.

El software ya calcula la tenacidad a fractura tomando la media del rango de datos de momento de liado y momento de pelado + liado que el operario seleccione manualmente a través del programa. Aun así, es necesario incorporar una base de datos de requerimientos mínimos para los materiales que se empleen, de modo que una vez que se calcule el valor de tenacidad a fractura, como ya estaba diseñado, el software debe mostrar visiblemente si la muestra es válida o no válida de la forma más clara y sencilla posible.

Con estos requisitos se modifica el software existente mediante LabView.

## 4.3 Procedimiento HDP

Con estos cambios se desarrolla el nuevo procedimiento para el ensayo HDP 2.0.

### Conexión

En la caja de control se conectan 3 cables. El *cable 1* se conecta al dispositivo HDP, el *cable 2* USB se conecta al ordenador que se vaya a emplear con el software correspondiente, el *cable 3* se conecta a la corriente.

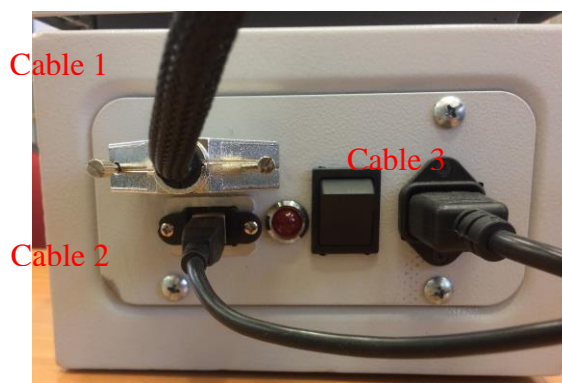


Figura 21: Conexión.

1. Pegar con cinta de doble cara la muestra por el laminado grueso a la mesa de ensayo. Para asegurar que no se mueva, se emplean prensillas en los 2 extremos de la probeta para agarrarla a la mesa de ensayo.

2. Pulsar el boton de la caja de control. Se debe encender la luz roja.



Figura 22: Caja de control ON.

3. Abrir el software HDP 2.0

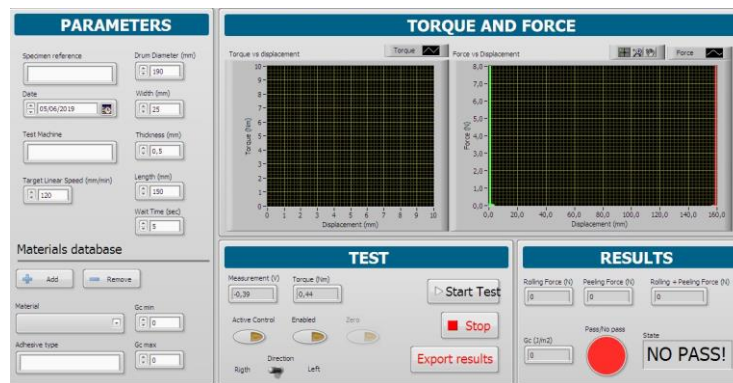


Figura 23: interfaz del software HDP 2.0.

4. Rellenar los datos sobre la muestra que solicita el software:

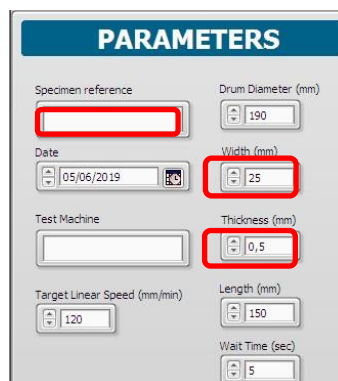


Figura 24: Parámetros de la muestra.

Para añadir los límites de tenacidad a fractura del material, pulsar Add y rellenar (este paso no es obligatorio para hacer el ensayo). La idea es que haya una base datos con los materiales que se empleen habitualmente y se pueda seleccionar el adecuado para cada ensayo.

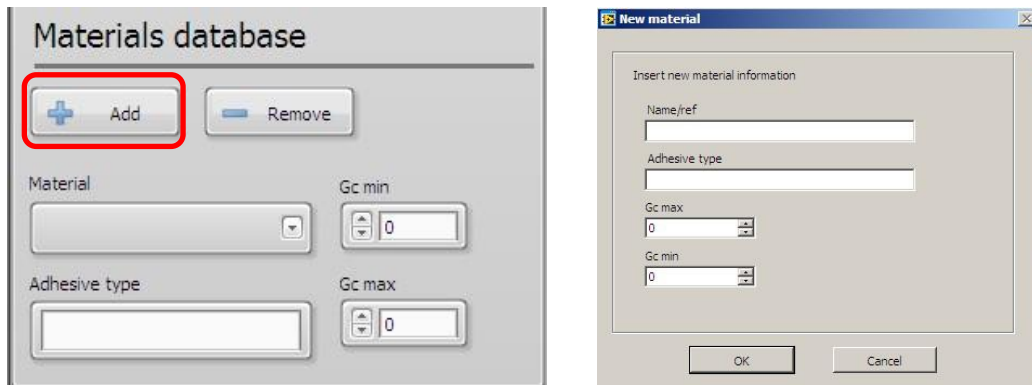


Figura 25: Añadir límites del material.

5. Seleccionar el sentido de giro del dispositivo para el ensayo.

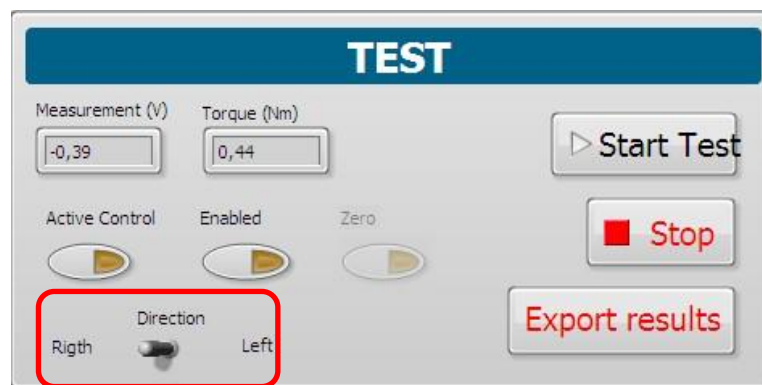


Figura 26: Seleccionar dirección del ensayo.

Es posible hacer el ensayo en ambas direcciones, pero es necesario haber colocado la muestra en el sentido deseado (ver Figura 18).

6. Pulsar “Active Control”.
7. Pulsar “Enable”.
8. Pulsar “Zero”.
9. Agarrar la parte final de la muestra con el enganche del tambor. Para cerrar/abrir el enganche se gira la rueda que hay en el tambor.



Figura 27: Agarre de las muestras al tambor.

10. Una vez este agarrada la probeta por el laminado fino al tambor, se mueve el tambor de modo que la muestra esté lo menos enrollada posible en el tambor.
11. Pulsar “Start”, en este momento comenzará el ensayo. Primero se tiene un tramo de liado y

luego aumentará el momento para pelar la muestra.

12. Para parar el ensayo, pulsar "Stop".

13. En la gráfica de la derecha aparecerán los resultados del ensayo y se podrá elegir el tramo para calcular la media de liado con las barras verdes. De igual modo, aparecen unas barras rojas que podemos mover para seleccionar el tramo de pelado. En ambos tramos, la línea discontinua debe ser la primera y la continua la segunda.



Figura 28: Selección del tramo para hallar el momento medio de liado.

Cuando se seleccionen ambos tramos, se calcula  $G_C$  automáticamente.

14. Añadir una imagen del modo de fallo importándola del PC. Aún no está implementada la cámara, la idea es que al hacer la foto se guarde automáticamente en este apartado del fichero extraíble de datos.

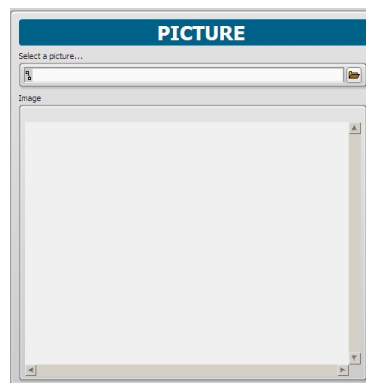


Figura 29: Imagen del modo de fallo.

15. Para exportar los resultados, pulsar "Export results". Aparecerá una ventana emergente:

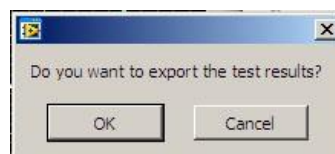


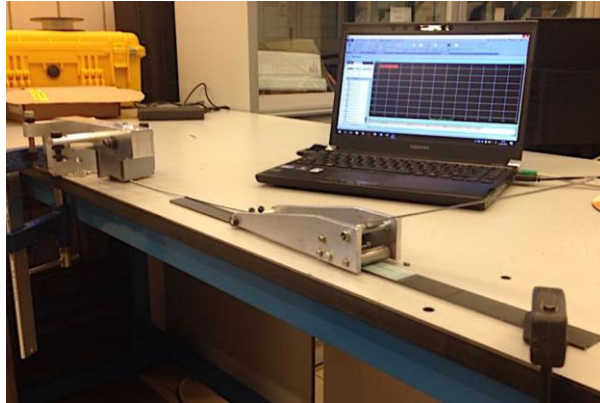
Figura 30: Ventana emergente para exportar resultados.

Pulsar "OK".

16. Seleccionar la ubicación donde se desee guardar el archivo y nombrarlo.



El desarrollo e implementación del HDP motiva nuevas ideas para el ensayo, mejoras en el procedimiento y fundamentos del mismo. Con objeto de buscar una alternativa al HDP más sencilla y con mayor flexibilidad, se desarrolla de manera propia un nuevo ensayo. Los problemas existentes en la ejecución del HDP ayudan a ver con claridad otras formas de llevarlo a cabo, de simplificarlo para que su introducción en la cadena de producción sea lo más sencillo y rápido posible. Por ello, se desarrolla este nuevo ensayo con la idea de que sea ligero, fácil de manipular y procesar los resultados. La idea principal es hallar la fuerza de pelado neta directamente del ensayo, y así calcular la tenacidad a fractura directamente.



*Figura 31: Ensayo HOD.*





# 5 NUEVA PROPUESTA DE ENSAYO PARA EVALUAR $G_C$

---

El objetivo de este nuevo ensayo es facilitar el procedimiento para calcular la tenacidad a fractura lo máximo posible, simplificando y mejorando el ensayo HDP. Para ello, se desea obtener la fuerza de pelado neta directamente del ensayo. Como ya se ha explicado, el ensayo se diseña para realizarse in-situ directamente sobre la pieza real en la que se pela la piel con un rodillo que se mueve entre los dos adherentes, registrándose la fuerza necesaria para mover el rodillo, la cual corresponde a la fuerza de pelado. El procesamiento de datos será aún más sencillo de realizar que con el HDP.

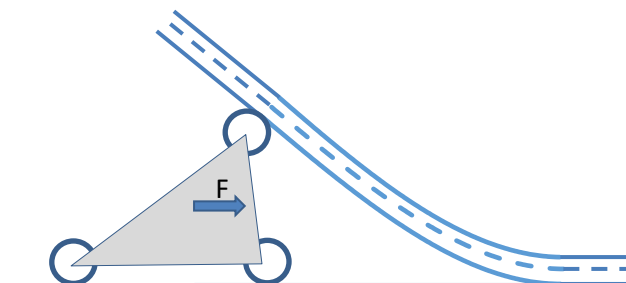


Figura 32: Idea del ensayo HOD.

En primer lugar, se desarrolla un modelo numérico del nuevo modelo que se propone [14]. Posteriormente, se diseña el dispositivo y se realiza una campaña experimental que compruebe los resultados que se obtienen, comparándolos con el ensayo de referencia CDP y el dispositivo ya verificado HDP 2.0.

## 5.1 Cálculo de $G_C$

La energía de pelado se halla a raíz de la fuerza que el rodillo requiere para avanzar:

$$\Delta U = F \cdot \Delta u \quad (22)$$

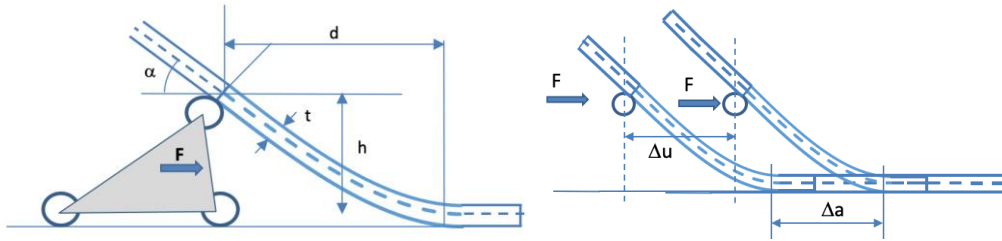


Figura 33: Variables del ensayo HOD.

En la Figura 33, se aprecia que:

$$\Delta u = \Delta a \quad (23)$$

Ya que, una vez que se comienza el pelado,  $\alpha$  (Figura 33) permanece constante<sup>2</sup>. Sabiendo la definición de tenacidad a fractura,  $G_C = \frac{\Delta U}{b\Delta a}$ , siendo U la energía almacenada en la probeta para una carga dada, se tiene:

$$G_C = \frac{F}{b} \quad (24)$$

Como se observa,  $G_C$  solo depende de la fuerza necesaria para hacer avanzar el rodillo y del ancho de la probeta, por tanto,  $G_C$  es independiente del útil de arrastre (Diámetro del rodillo y separación del rodillo respecto al adherente rígido, etc).

## 5.2 Estudio analítico del ensayo HOD

La resolución se hace según la teoría de grandes desplazamientos despreciándose las deformaciones axil y cortante.

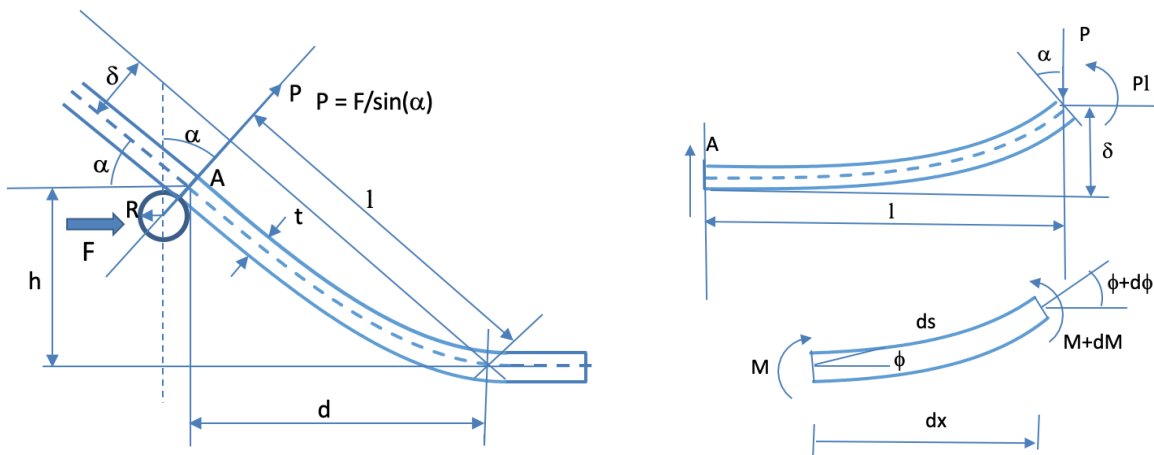


Figura 34: Estudio analítico del HOD. Variables.

Partiendo de la definición de curvatura elástica de una viga:

$$\frac{1}{R} = \frac{M}{EI} \quad (25)$$

<sup>2</sup> Ensayos numéricos realizados en el GERM y contrastados experimentalmente aseguran un ángulo  $\alpha$  constante durante el ensayo.

Dado que:

$$R = \frac{ds}{d\phi} ; \frac{ds}{dx} = \frac{1}{\cos\phi} ; \frac{dv}{dx} = \tan\phi ; M = Px \quad (26)$$

Siendo  $\phi$  es el ángulo girado por la sección que dista  $s$  del empotramiento y  $M(s)$  el momento de dicha sección.

*Sustituyendo las expresiones*

(26) en la (25):

$$R = \frac{dx}{d\phi} \cdot \frac{1}{\cos\phi} = \frac{EI}{P} \cdot \frac{1}{x} \Rightarrow \int_0^x x dx = \frac{EI}{P} \int_0^\phi \cos\phi d\phi \quad (27)$$

Integrando la ecuación anterior y teniendo en cuenta que para  $x=0$ ,  $\phi=0$ , se obtiene:

$$x = \sqrt{\frac{2EI}{P}} \sqrt{\sin\phi} \quad \text{Y por lo tanto: } R = \sqrt{\frac{EI}{2P}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\sin\phi}} \quad (28)$$

El desplazamiento vertical ( $\delta$ ) viene dado por:

$$\delta = \int_0^\alpha dv = \int_0^\alpha R \sin\phi d\phi \quad ; \quad l = x(\alpha) = \sqrt{\frac{2EI}{P}} \sqrt{\sin\alpha} \quad (29)$$

$$\delta = \sqrt{\frac{EI}{2P}} \int_0^\alpha \sqrt{\sin\phi} d\phi \quad ; \quad \frac{\delta}{l} = \int_0^\alpha \frac{\sqrt{\sin\phi} d\phi}{2\sqrt{\sin\alpha}} \quad (30)$$

Conocida  $F$  se pueden conocer los esfuerzos en el vértice de la grieta:



Figura 35: Esfuerzos en el vértice de la grieta.

Así, la tenacidad a fractura:

$$G_c = \frac{M^2}{2BEI} = \frac{P^2 l^2}{2BEI} = \frac{P \sin \alpha}{B} = \frac{F}{B} \quad (31)$$

El valor de  $M$  calculado coincide con el momento crítico, que es el cual produce el despegue de la piel por rotura del adhesivo.  $\alpha$  se calcula al resolver la ecuación

(33) teniendo en cuenta que  $H$ ,  $R$ ,  $t$  y  $F$  son datos y calculando  $I_\delta$  y  $h$  de las ecuaciones (32).

$$I_\delta = \int_0^\alpha \sqrt{\sin \phi} d\phi \quad ; \quad h = H + \left(R + \frac{t}{2}\right) \cos \sqrt{\frac{EI}{2P}} - \frac{t}{2} \quad (32)$$

$$h - \sqrt{\frac{2EI}{F}} \sin^2 \alpha - \sqrt{\frac{EI}{2F}} I_\delta \sqrt{\sin \alpha} \cos \alpha = 0 \quad (33)$$

### 5.3 Diseño del HOD

Analítica y numéricamente, el ensayo ha sido comprobado satisfactoriamente. Por lo tanto, se procede al diseño del dispositivo.

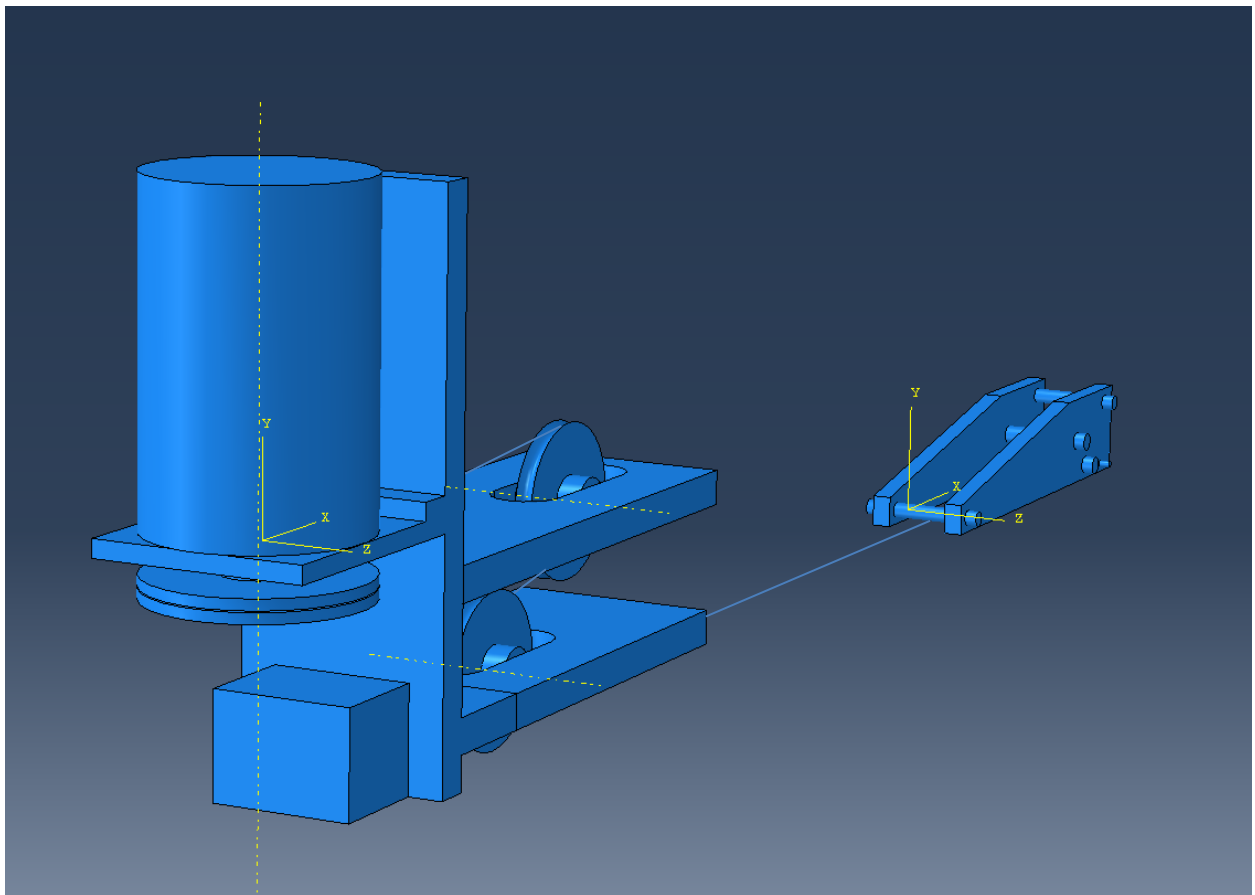


Figura 36: Diseño HOD.

Por un lado, se tiene el soporte del rodillo encargado de avanzar y pelar la piel a su paso. Se construye de aluminio y se agarra al motor a través de un dispositivo de ruedas que garantiza una trayectoria lisa y uniforme.

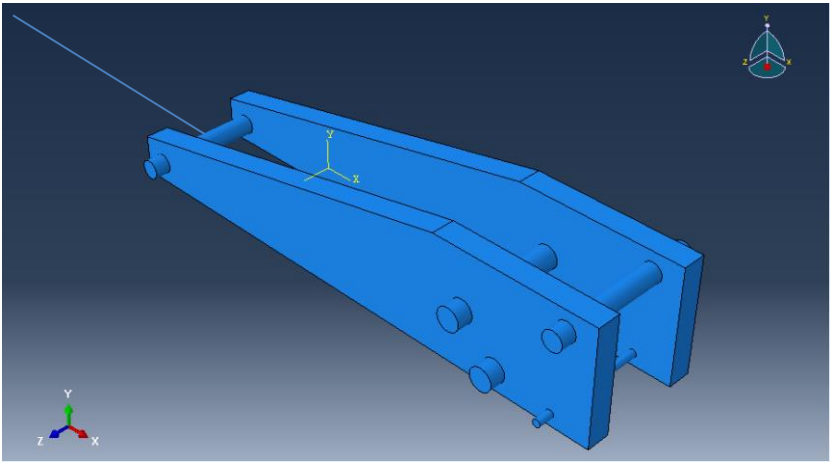


Figura 37: Modelo del carrito de pelado.

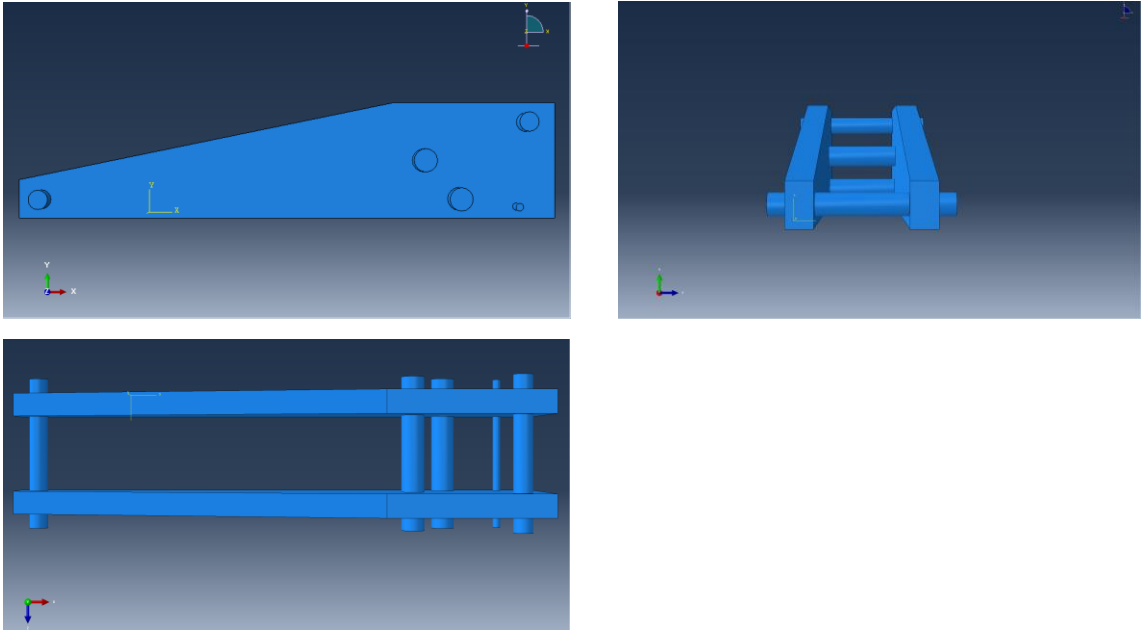


Figura 38: Planta, alzado y perfil del carrito de pelado.

El motor seleccionado para el rango de fuerzas que se estiman de pelado fue *Reductor + Motor K80-GR53.30* de Kelvin.

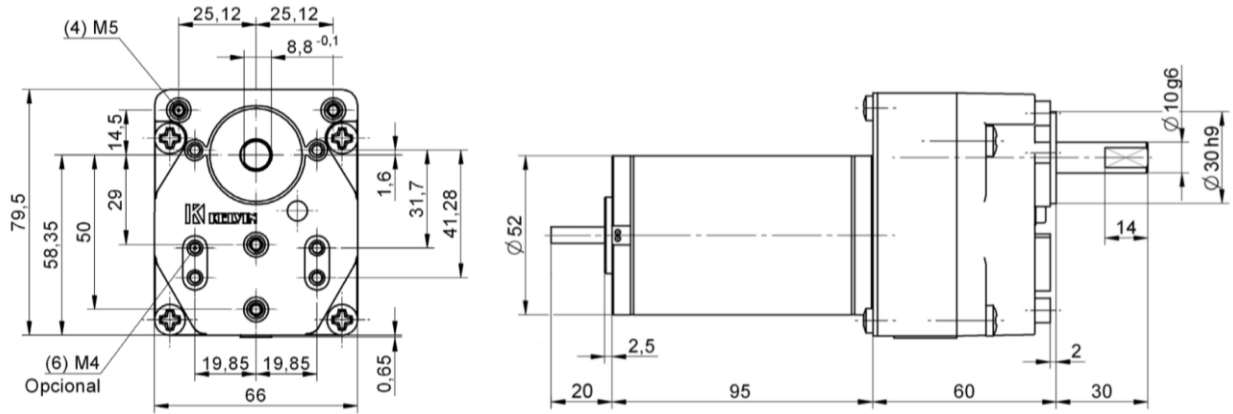


Figura 39: Plano del motor Kelvin.

Es un reductor de gran resistencia mecánica para trabajo duro e intensivo en cualquier posición, a temperatura ambiente de  $-15$  a  $50^{\circ}\text{C}$ , con par de utilización hasta  $8\text{ Nm}$ , con carga uniforme.

El soporte diseñado para el motor y la conexión entre el mismo y el carrito de pelado se muestra a continuación:

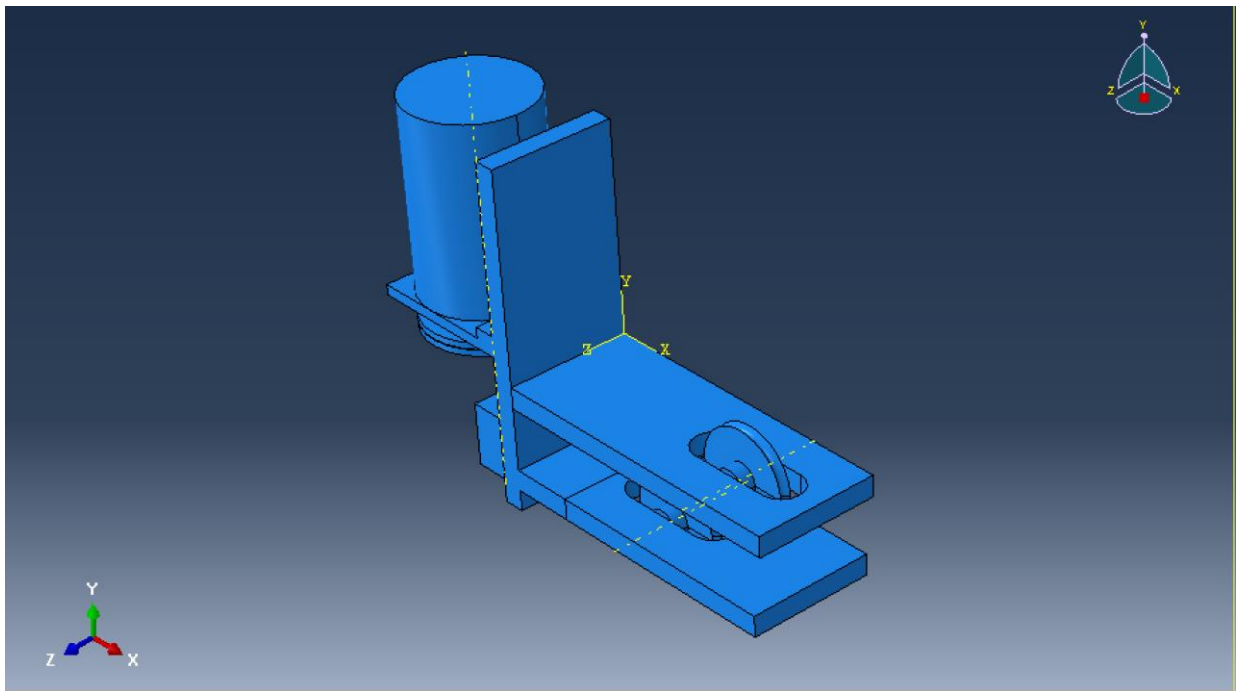


Figura 40: Soporte del motor.

A continuación, se muestra cada parte del mismo:

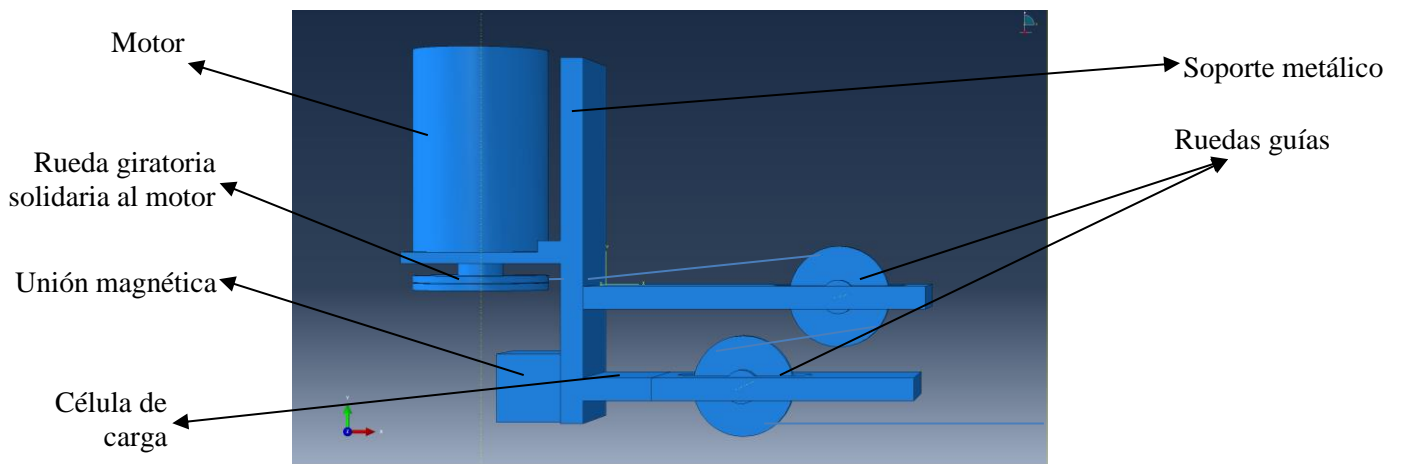


Figura 41: Soporte del motor explicativo.

El motor puede girar a ambos lados, uno de ellos supondrá enrollar la cuerda y en consecuencia tirar del carrito, y en sentido contrario supondrá lo contrario. Al activar el motor (en sentido de pelado), la rueda gira solidaria a él y se comienza a enrollar la cuerda a su alrededor de forma uniforme gracias al sistema de ruedas que guían su trayecto. La cuerda empleada es de metal para evitar la deformación de la misma. El bloque de sujeción magnética en la parte inferior del soporte es intercambiable con uno provisto de ventosas. Sin embargo, suele ser más útil la opción imantada porque se prevé que el ensayo se realice en superficies metálicas. Para la campaña experimental se instala el dispositivo sobre una plancha metálica provisional para hacer los ensayos.

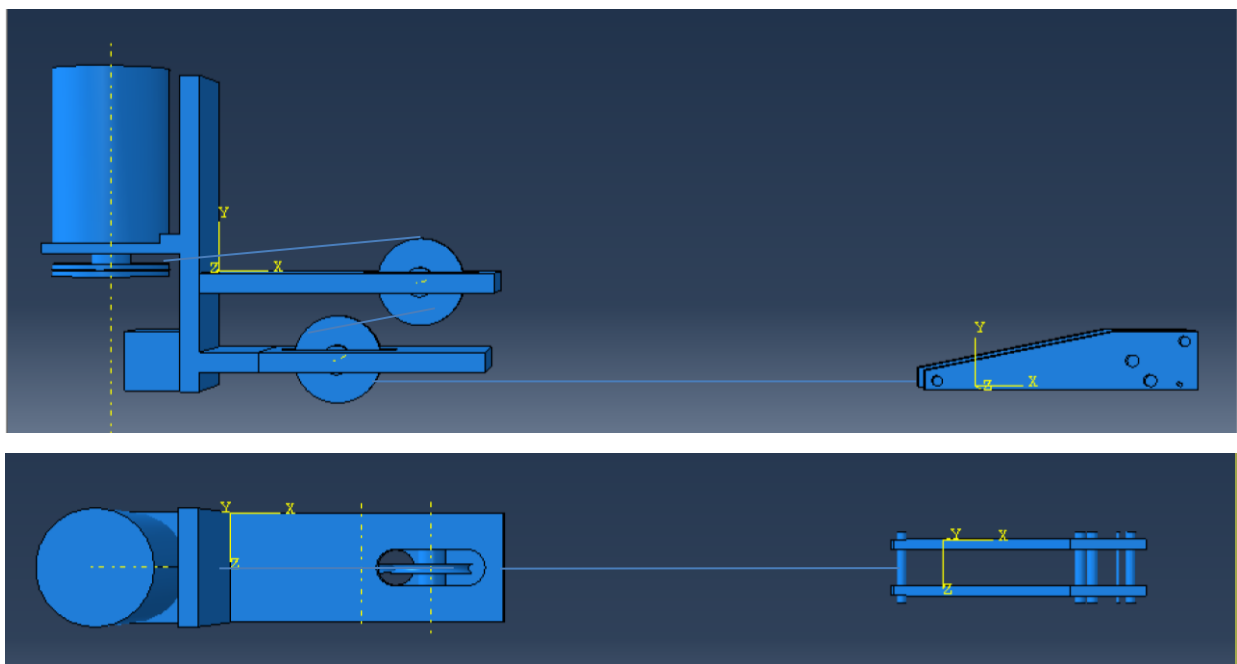
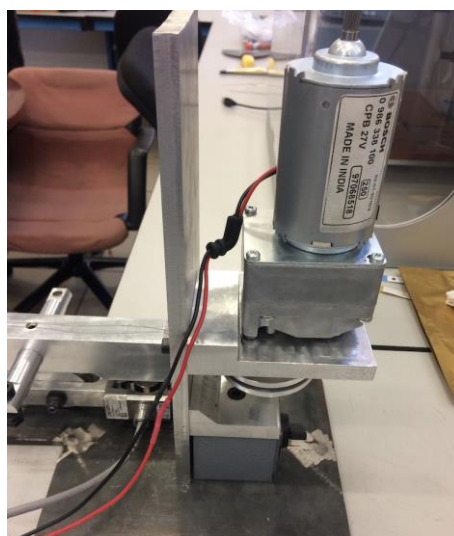


Figura 42: Vistas del conjunto completo HOD.

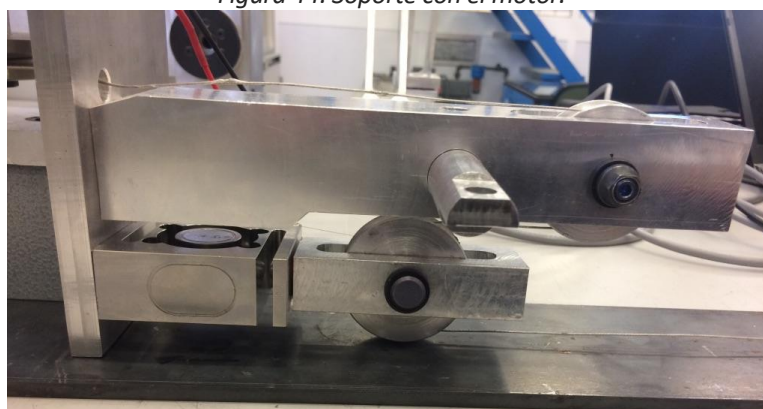
Con este diseño, se procede a la construcción del dispositivo para realizar los ensayos experimentales.



*Figura 43: Carrito de pelado.*



*Figura 44: Soporte con el motor.*



*Figura 45: Soporte con ruedas guías.*

Con este dispositivo se realizan los ensayos de la campaña. Posteriormente, se construye un segundo carrito de pelado muy similar para mejorar el rodamiento del mismo y disminuir aún más la fricción durante su desplazamiento:



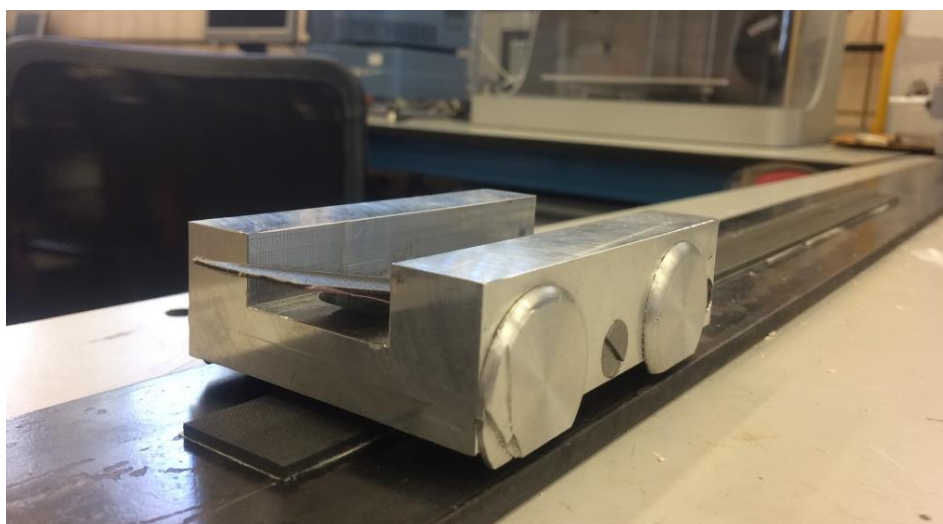


Figura 46: Segundo carrito de pelado.

## 5.4 Procedimiento del ensayo HOD

El ensayo está diseñado de modo que se ahorre la mayor cantidad de material posible. Se puede ensayar la muestra completa, sin tener desperdicio. Así, se requiere que la muestra tenga una zona encolada suficientemente extensa para tener los resultados necesarios, esto supone la fabricación de muestras según la Figura 47.

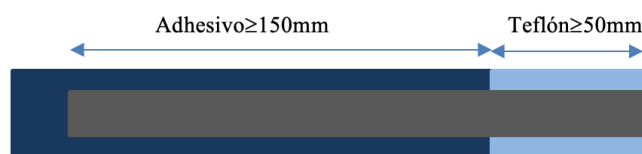
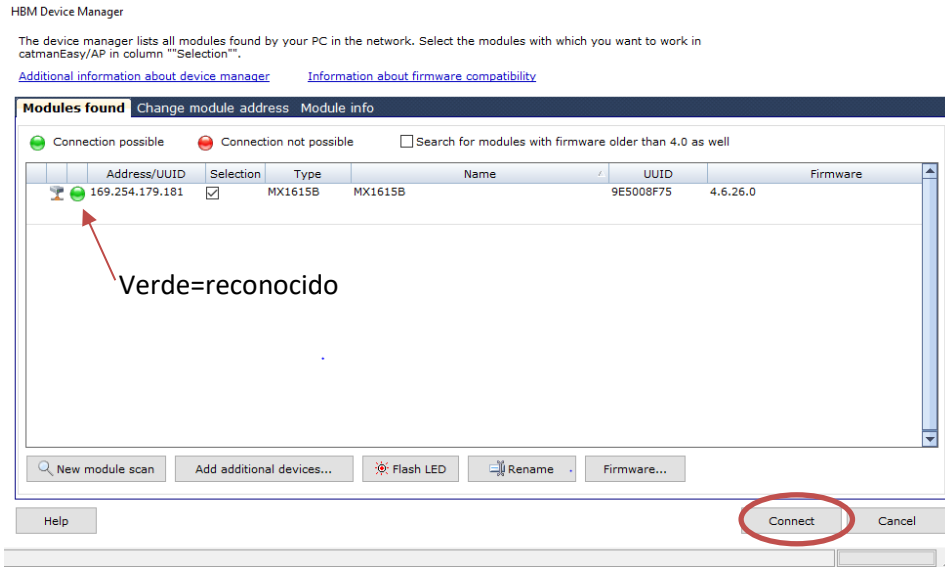


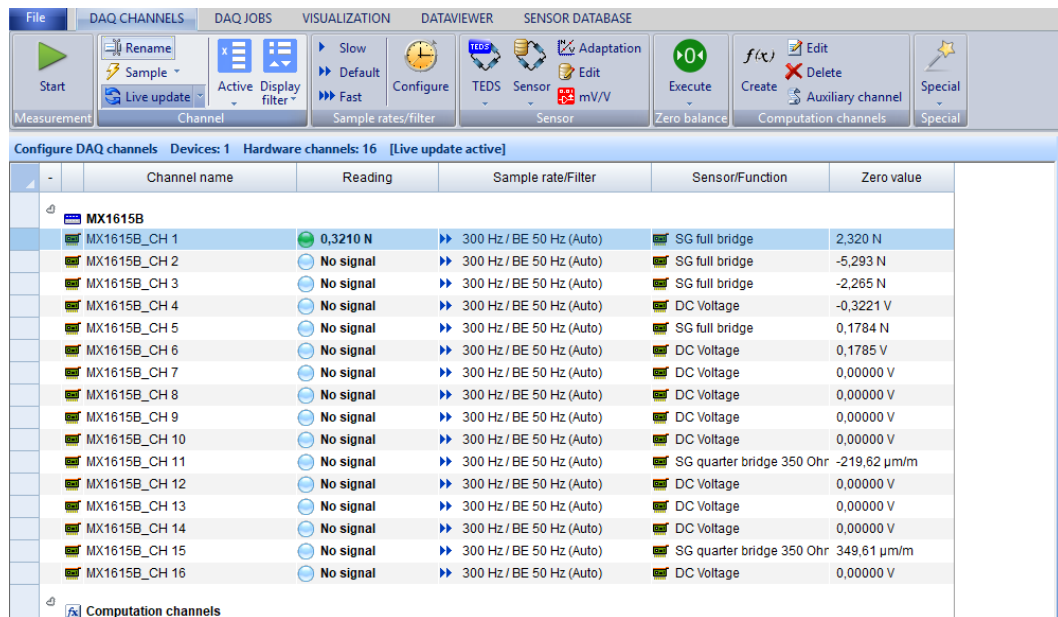
Figura 47: Requerimiento de probetas para el ensayo HOD.

### Metodología

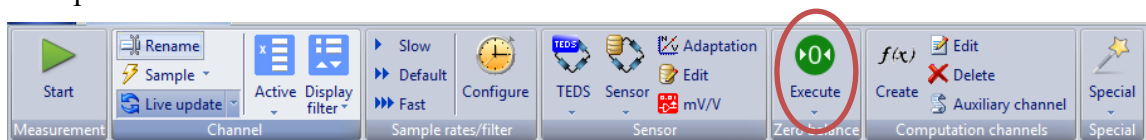
1. Limpiar con acetona la superficie de contacto con la plancha de la muestra.
2. Pegar en la plancha con cinta de doble cara en la posición indicada en la plancha, la cual asegura la alineación de la muestra con la dirección del ensayo.
3. Abrir el software Catman Easy en el portátil correspondiente al ensayo.
4. Start a new DAQ project.
5. Comprobar que el modulo HBM es reconocido por el software y pulsar “connect”.



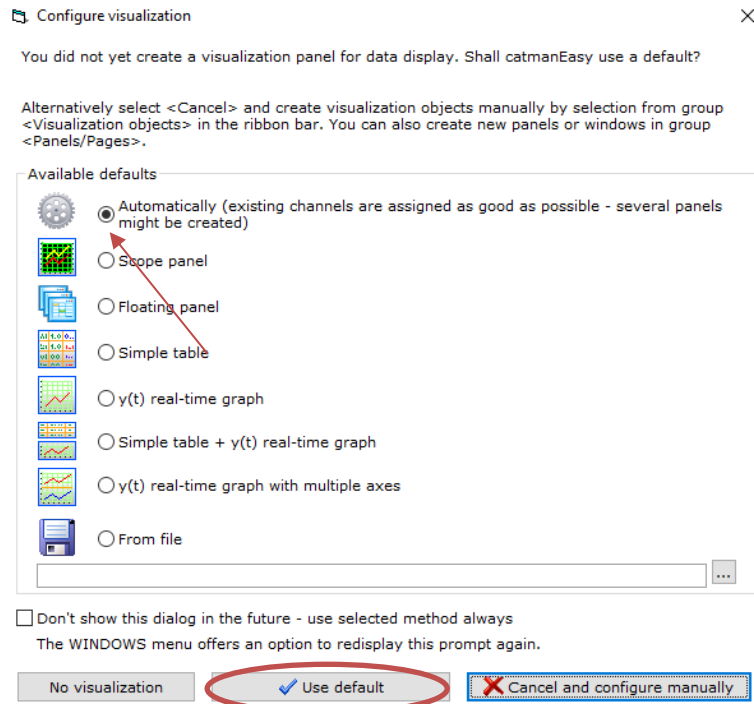
6. A continuación se abre una pantalla donde se muestran los 16 canales posibles. El dispositivo está conectado en el canal 1, el cual debe mostrar la lectura correspondiente en Newtons.



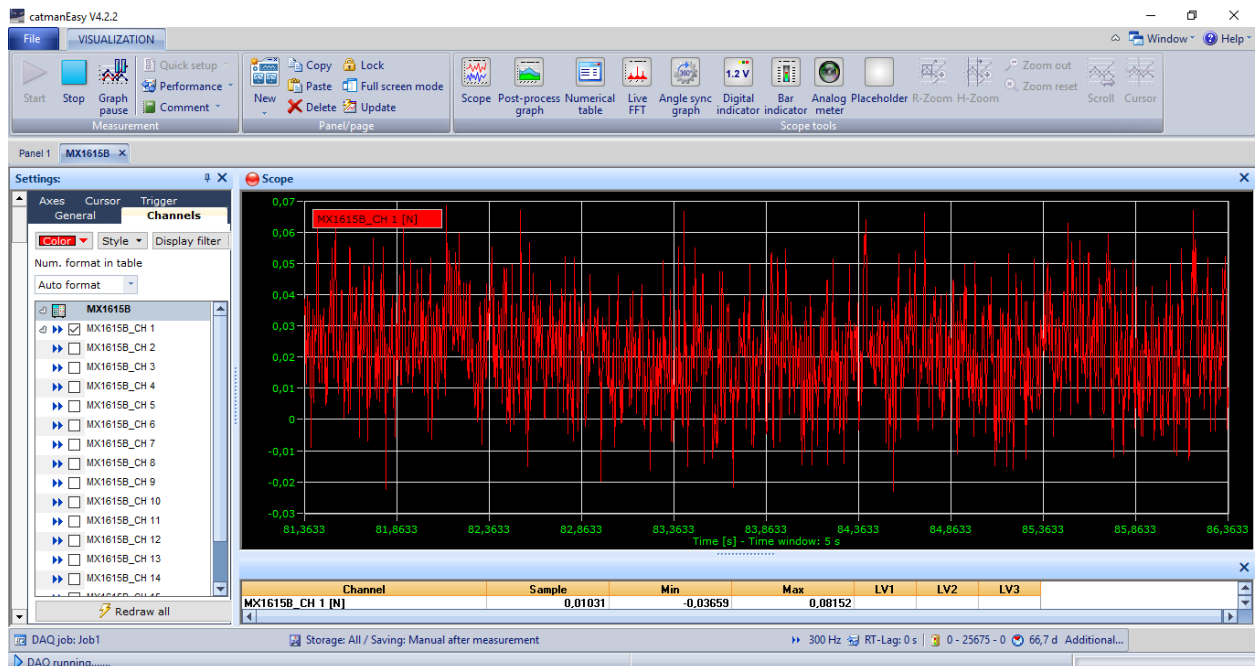
7. Se calibra pulsando “execute”. En ese momento, se comprueba que la lectura cambia a un valor próximo a 0 N.



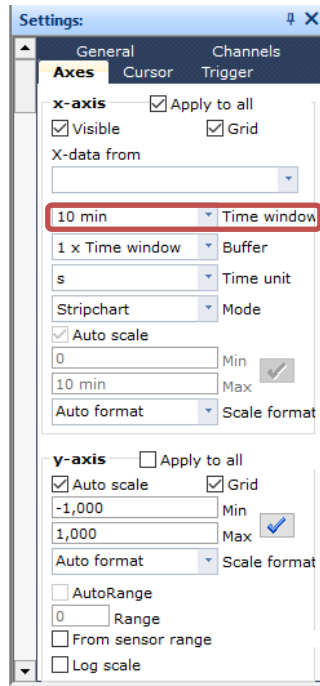
8. Pulsar “Start”. Aparece una ventana para configurar la visualización del panel durante el ensayo, en principio, se mantiene seleccionada la opción automática y se pulsa “Use default”.



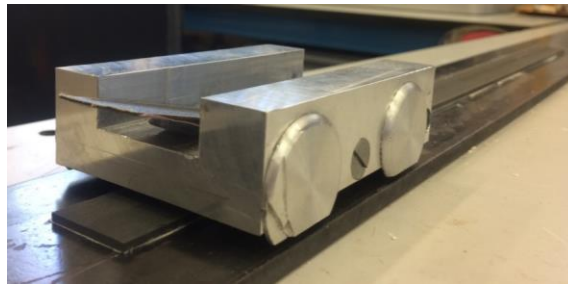
- Se abre el panel mostrando 4 canales. Como solo interesa el canal 1, se recomienda cerrar los 3 canales restantes.



- En la barra izquierda, se aconseja seleccionar “Axes” para ampliar el rango de visualización del tiempo en el gráfico. Para ello, se selecciona “10min” en la opción “Time window”.



11. Colocar el rodillo del dispositivo entre los laminados de la muestra.



O: Dirección de pelado  
I: Dirección contrario al pelado

Apagar/Encender motor

12. Para empezar el ensayo, poner en posición “O” el botón rojo izquierdo de la caja de control y encender el motor (botón rojo de la derecha de la caja de control).

13. Apagar el motor cuando termine el ensayo.

# 6 EXPERIMENTACIÓN

---

## 6.1 Preparación de muestras

Previo a la ejecución de los ensayos, se requiere la fase de fabricación de muestras. Para la investigación, se necesitan muestras para la caracterización de los materiales, así como para los ensayos para determinar la tenacidad a fractura: CDP, HDP y HOD.

Durante toda la investigación se trabaja con 3 materiales: cinta, tejido y adhesivo. La cinta empleada es HEXPLY UD/M21/35%/268/T700GC-12K [23], el tejido es 985LV37-6K [9] y el adhesivo FM300K.05 [24].

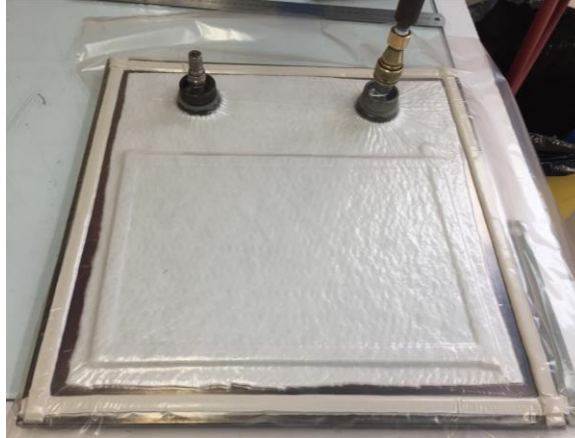
Para la caracterización, se ha fabricado una probeta de cinta a  $0^\circ$  de 9 capas, otra de tejido de 8 capas y una de adhesivo de 20 capas. Para la fabricación de las 2 primeras, se procede de manera similar: apilado de las láminas con precompactación, preparación de la bolsa de vacío, proceso de curado y corte de muestras. Sin embargo, la probeta de adhesivo no es algo habitual, así que se realizó un apilado similar a los otros con láminas de adhesivo. La manipulación del adhesivo es bastante más dificultosa ya que no se puede tocar con las manos, siempre hay que trabajar con el protector. Las láminas son más delgadas, por lo tanto, el panel requerido para obtener un espesor de la muestra considerable fue de 20 capas. Su preparación para el proceso de curado tampoco fue sencillo ya que durante el mismo, el adhesivo se vuelve viscoso a altas temperaturas y fluiría a lo largo de la bolsa de vacío. Para evitarlo, se colocan unas tiras de corcho alrededor del panel de adhesivo para mantenerlo durante el proceso.



*Figura 48: Preparación de la bolsa de vacío para el panel de adhesivo.*

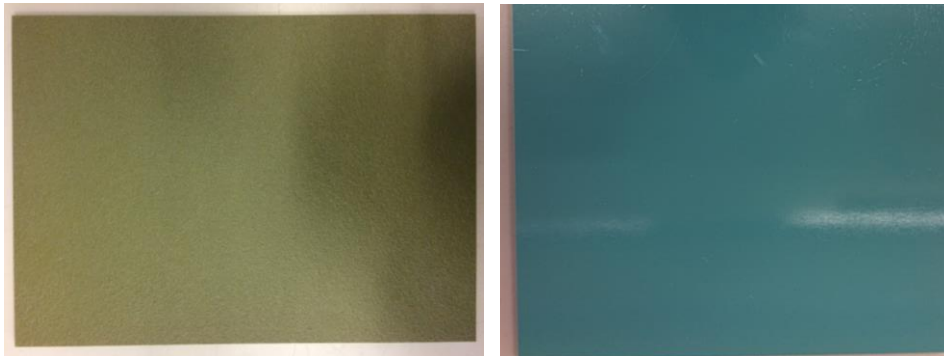
En la Figura 48 se ve la preparación de la bolsa de vacío para el panel del adhesivo. Se puede apreciar como es necesario recubrir todo el panel con teflón para que no se adhiera el panel a

ningún material. Se deben evitar las arrugas en el teflón para que no se produzcan irregularidades en la superficie de las muestras. En la imagen, aún falta la lámina de teflón encima del panel para protegerlo del airwave. Una vez que la bolsa está terminada, se compacta haciendo vacío como se muestra en la Figura 49.



*Figura 49: Bolsa de vacío del panel de adhesivo preparada para el proceso de curado.*

El panel obtenido de adhesivo tiene diferentes superficies en cada cara debido al contacto con la bolsa por una de ellas (imagen de la izquierda) y la otra con la plancha (imagen de la derecha). Sin embargo, esto no afecta a las propiedades mecánicas de la muestra.



*Figura 50: Caras del panel de adhesivo.*

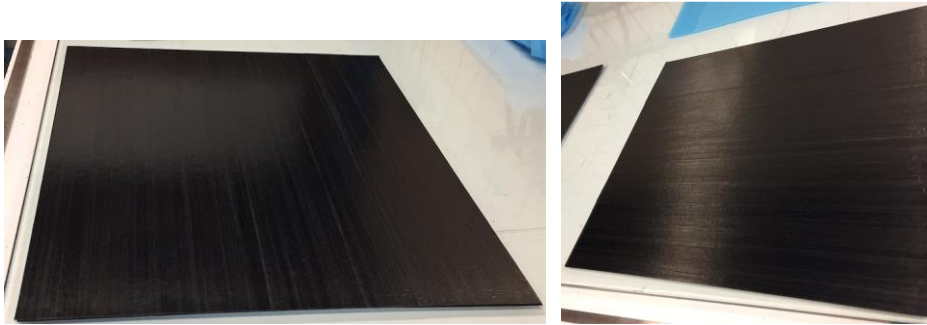
Para los ensayos, se necesitan muestras asimétricas tanto de cinta como de tejido, las cuales se obtienen de dos paneles co-encolados; [9+2] de cinta y [8+2] de tejido. Esta diferencia de la capa gruesa se debe al espesor de cada lámina, el grosor de una capa de cinta es menor que una de tejido, pero los paneles se fabrican de forma similar. Las láminas que se obtienen del fabricante, por lo general, son a 0°; en el caso del tejido, se tuvo que cortar las láminas para obtenerlas a 45°, mientras que en el caso de la cinta se fabrican en la dirección deseada. Para que la superficie de encolado sea adecuada, se emplea un tejido pelable, Z-24.259 fabricado por Hexcel Composites, el cual también hay que cortar. Aunque el interés del efecto superficial que supone el pelable es únicamente para la superficie de encolado, se coloca en ambas caras del panel para guardar la simetría a la hora del curado.





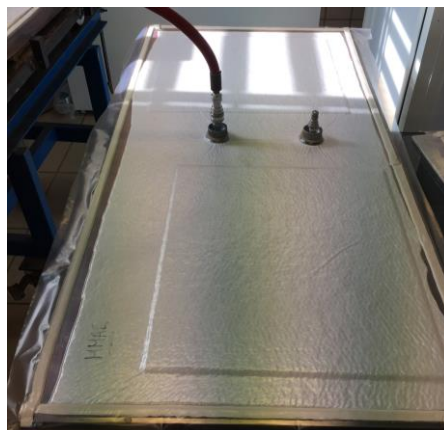
*Figura 51: Apilado del laminado rígido del panel de tejido.*

Una vez se tienen las láminas, se procede al apilado de la capa “rígida”. Para ello, se debe tener especial atención a que las láminas se coloquen de forma paralela para que las propiedades sean las esperadas. Para que el apilado sea correcto, se debe apilar con una espátula presionando las láminas al colocarlas y cada 3 láminas precompactar.



*Figura 52: Laminado prepeg de 8 capas de cinta.*

El proceso de curado para ambos materiales es el mismo, por lo tanto, se realiza una bolsa de vacío para ambos paneles para hacerlo de forma conjunta, tal y como se ve en la Figura 53. La metodología para hacer la bolsa de vacío es muy concreta. 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 aún el papel protector. Se coloca una lámina desmoldeante 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.



*Figura 53: Bolsa de vacío con los paneles de prepeg.*

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 necesario para enroscarlas con la parte ya colocada después del airwave. Hasta este punto, todo el procedimiento se lleva a cabo en la sala limpia, ya que se requiere un el mínimo grado de contaminación durante la fabricación. Una vez tenemos la bolsa de vacío, los paneles están protegidos del exterior. Una vez finalizada la bolsa, se debe comprobar que no tiene pérdidas al hacer vacío en el autoclave.

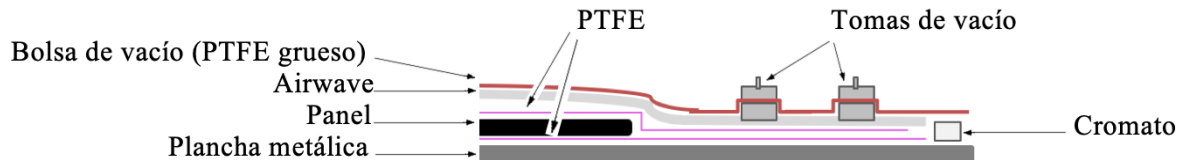


Figura 54: Esquema de bolsa de vacío.

El proceso de curado se lleva a cabo en el autoclave, según las especificaciones de los materiales se realiza un ciclo de 180° con las características que se muestran a continuación:

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	



Figura 55: Curado del panel de cinta.

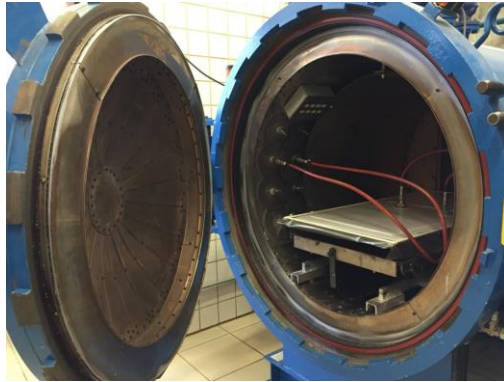
Una vez se tengan los paneles de cinta y tejido de 9 y 8 capas respectivamente, se vuelve a la sala limpia para continuar con la fabricación. Lo primero es retirar el Peel Ply, solo por la cara del panel donde se va a colocar el adhesivo, el cual mejora la superficie de contacto entre el sustrato y adhesivo para facilitar la unión. Una vez esté al descubierto, se sitúa el adhesivo sin que sobresalga del panel, ya que en el proceso de curado el adhesivo fluye, y una lámina de teflón en la zona donde se desea que no haya adhesivo tal y como se muestra en la Figura 56. El contacto entre el adhesivo y el teflón será el inicio de grieta para los ensayos, por lo que es importante que sea perpendicular a la fibra de carbono del panel de cinta y a 45° del tejido. Encima del adhesivo se debe apilar de nuevo el número de capas necesarias, en ambos paneles 2 capas.



Figura 56: Colocación del adhesivo y el teflón para el co-encolado.



Cuando los paneles estén listos, con el laminado grueso curado y el adhesivo y el laminado delgado de prepeg frescos, se vuelve a poner una lámina de pelable en la capa fresca para mantener la simetría con este material y se realiza la bolsa de vacío para el segundo curado. El ciclo necesario se muestra a continuación:



*Figura 57: Bolsa de vacío en el autoclave antes de proceder al segundo curado.*

Al terminar el proceso, los paneles están listos para ser recanteados y cortar las muestras necesarias con el disco de corte. De cada panel se obtienen 12 muestras.

## **6.2 Caracterización de los materiales**

La cinta empleada es HEXPLY UD/M21/35%/268/T700GC-12K [23], el tejido es 985LV37-6K [9] y el adhesivo FM300K.05 [24].

Se desea conocer el módulo de elasticidad de los materiales, además del coeficiente de Poisson para el adhesivo. Estos datos son necesarios para el modelo numérico que se realizan de los ensayos [16]. Para obtener resultados lo más exactos posibles, se instrumentan las muestras. Se realiza el ensayo de tracción registrando los resultados medidos con galgas. Las galgas extensiométricas son un elemento de medición muy útil ya que nos proporcionan los datos sobre las deformaciones de la probeta. Para los ensayos de cinta y tejido se necesita una galga longitudinal, ya que solo se necesita obtener la deformación en esta dirección; mientras que para el caso del adhesivo se requiere una galga que mida la deformación transversal también. Su colocación es muy minuciosa y debe hacerse correctamente para conseguir una medición apropiada. Primero, se prepara la superficie de la muestra donde se va a pegar la galga, limándola y limpiándola. Luego, se prepara la galga por la zona de pegado. Es importante la orientación de la galga para obtener los resultados que se necesitan, la galga debe estar paralela a la dirección de aplicación de la carga, es decir, paralela a la fibra en el caso de la cinta y a 45° en el caso del tejido. Una vez la galga esté pegada y el pegamento esté seco, se deben soldar los cables que conectaremos al programa que registrará el ensayo. El resultado se aprecia en la Figura 58, donde se puede ver la muestra de cinta, a la izquierda, y la de tejido, a la derecha, listas para el ensayo de tracción.

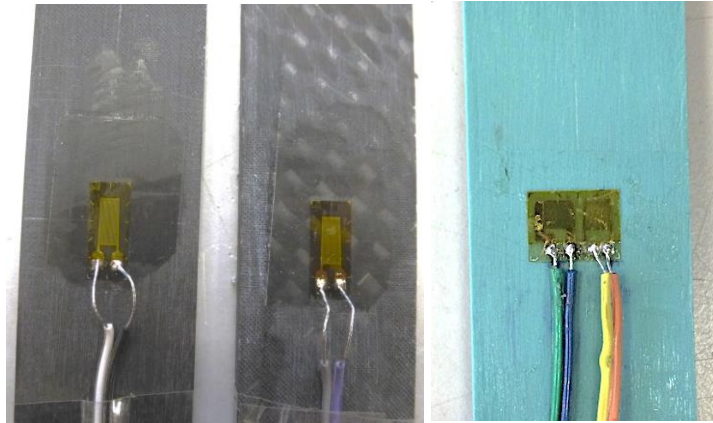


Figura 58: Galgas extensiométricas en las probetas para caracterizar los materiales.

### 6.2.1 Cinta

En el ensayo de tracción, se obtienen como resultados la carga (N) empleada y el desplazamiento de cruceta (mm). La galga nos proporciona la evolución de la deformación longitudinal ( $\mu\epsilon$ ). Para obtener el módulo de Young del ensayo, se necesitan saber los siguientes datos de la muestra:

<b>Ancho (mm)</b>	25,00
<b>Espesor (mm)</b>	2,53

Sabiendo la sección transversal de la muestra,  $63.25 \text{ mm}^2$ , y con ella la tensión aplicada (MPa), se obtienen los siguientes resultados:

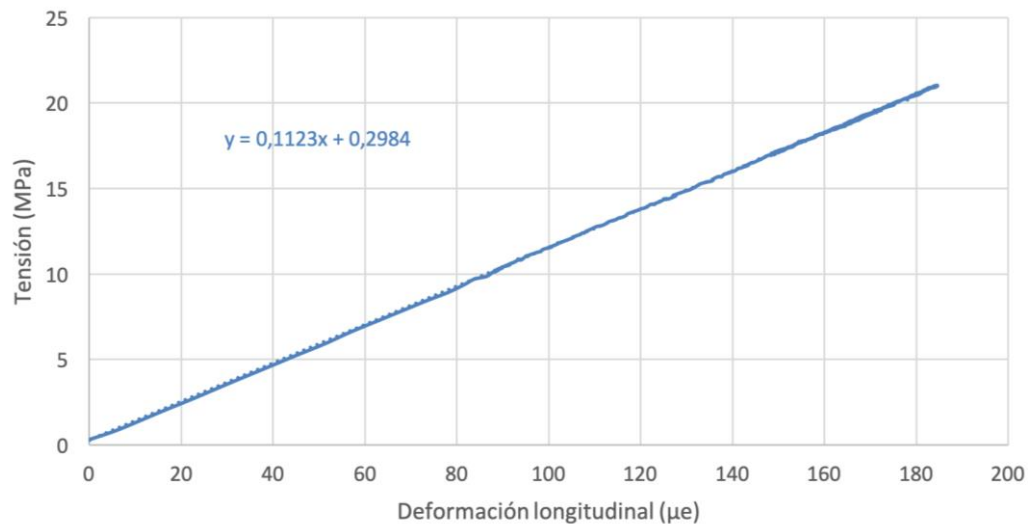


Gráfico 17: Ensayo a tracción de la muestra de cinta.

La pendiente de esta tendencia da como resultado el módulo de Young, que en las correctas unidades es:

<b>E (GPa)</b>	<b>112,3</b>
----------------	--------------

El valor mínimo esperado según la especificación del material [23] es de 130 GPa, el módulo obtenido es inferior. Sin embargo, en la especificación se calcula el módulo de Young con el espesor teórico de una capa curada, el cual es 0.25mm y el material empleado es un poco más grueso, cada capa tiene un espesor de 0.281mm. Si se calcula E con el espesor teórico, se obtiene un módulo de 126 GPa, disminuyendo el error considerablemente.

### 6.2.2 Tejido

La orientación de las fibras del tejido respecto al eje de orientación de la carga es  $\pm 45^\circ$ . Procediéndose de forma similar a como se ha explicado con la cinta, se realiza el ensayo de tracción como se ve en la Figura 59. Para el procesamiento de los datos se requieren las medidas de la muestra que se exponen a continuación:

<b>Ancho (mm)</b>	25,02
<b>Espesor (mm)</b>	3,14



Figura 59: Ensayo de tracción a la muestra de tejido.

Con estos datos se puede hallar la sección transversal, en este caso  $78,56 \text{ mm}^2$ . Los resultados obtenidos del ensayo se muestran en el Gráfico 18.

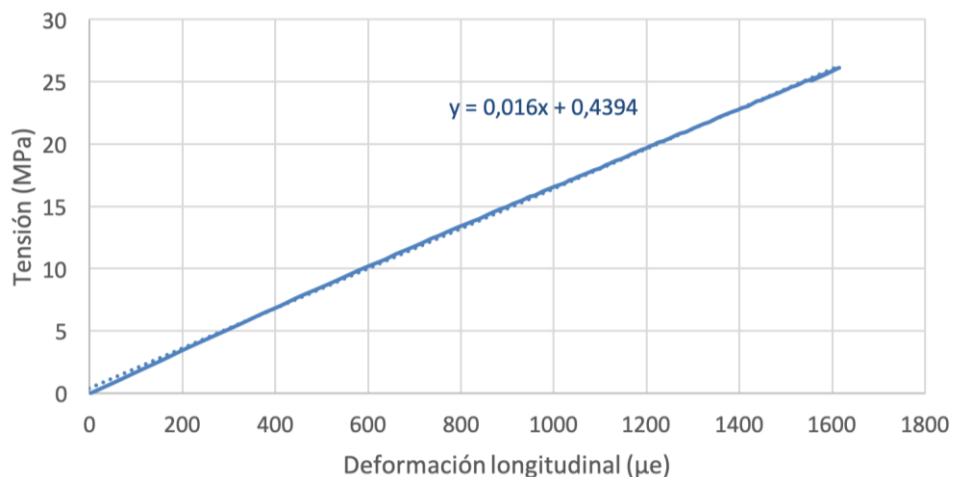


Gráfico 18: Ensayo a tracción de muestra de tejido.

Haciendo el cambio de unidades correspondiente, se halla un módulo de Young del material:

<b>E (GPa)</b>	<b>16,0</b>
----------------	-------------

El resultado obtenido no se puede comparar con los datos que aporta la especificación del material [25] debido a que los datos se refieren al tejido 0°/90° y las muestras ensayadas son a ±45°. Sin embargo, debido a la orientación se espera un E menor y así se ha hallado.

### 6.2.3 Adhesivo

Paralelamente a este trabajo experimental, se realiza un estudio numérico de los ensayos DCB, CDP, HDP y HOD [14][20]. El objetivo de caracterizar mecánicamente el adhesivo es porque el modelo virtual (cuyo desarrollo no forma parte de este proyecto) lo requiere. El adhesivo es un material al que se le solicita una correcta unión, no se requiere de él un buen comportamiento a tracción ya que no se emplea para este tipo de solicitaciones. Por lo tanto, las propiedades mecánicas que se tienen del material son de su comportamiento en uniones y no se han encontrado datos referentes a su módulo de Young en los que basar el cálculo numérico. Por ello, es útil hallar también el coeficiente de Poisson en su caracterización.

La muestra de adhesivo es de 20 capas, al ser un material delicado, se ponen tacos de vidrio en los extremos de la muestra para no dañar la zona de agarre en las mordazas durante el ensayo a tracción. Para el pegado de los tacos se emplea el adhesivo Z70.

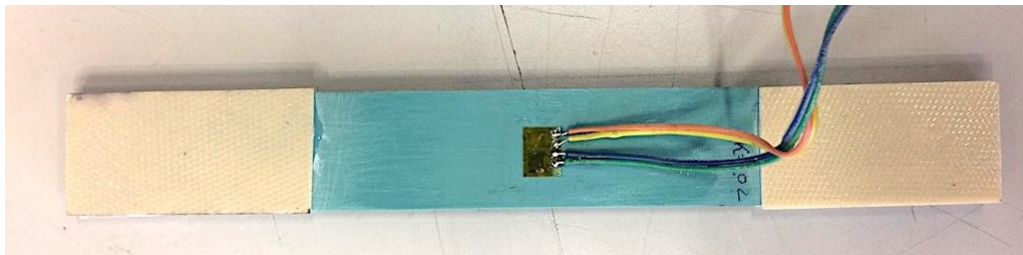


Figura 60: Probeta de adhesivo.

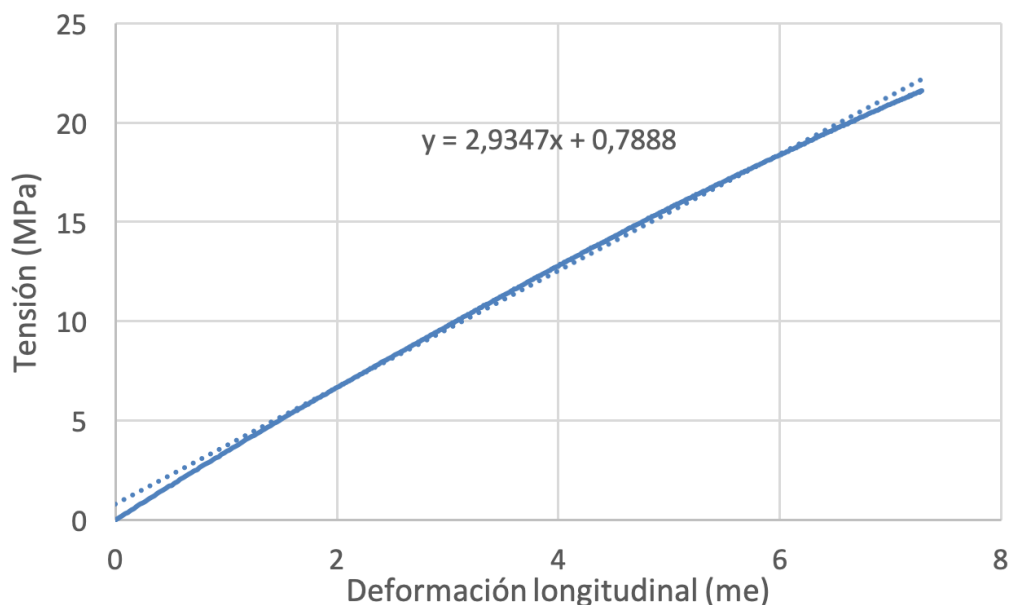


Gráfico 19: Ensayo a tracción de la muestra de adhesivo.

Los datos de la muestra de adhesivo son:

<b>Ancho (mm)</b>	25,20
<b>Espesor (mm)</b>	3,70

Para hallar el coeficiente de Poisson, se calcula para registro de datos que se obtienen de las galgas ( $\nu = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}$ ) y se hace el promedio de ellas. De este modo, las propiedades del adhesivo son:

<b>E (MPa)</b>	<b>2,93</b>
<b><math>\nu</math></b>	<b>0,412</b>

### 6.3 Aspectos prácticos asociados a los ensayos para hallar $G_c$

El ensayo normalizado de referencia para hallar la tenacidad a fractura de las distintas muestras es el Climbing Drum Peel [7]. El ensayo es rápido y sencillo de realizar, aun así hay varios aspectos que se deben tener en cuenta para no encontrar problemas. En primer lugar, el rodillo para agarrar la probeta, donde se introduce el lamina de 2 capas, puede que no sujete bien la muestra debido a su pequeño espesor y rugosidad.

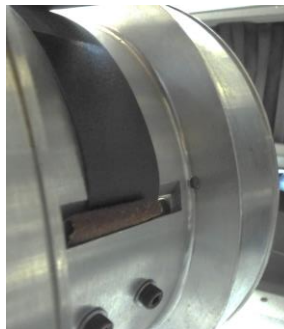


Figura 61: Sujeción de la probeta al tambor.

Para evitar este posible problema, se coloca una lámina de lija junto a la muestra para que el contacto del rodillo sea con una superficie rugosa y no se abra, tal y como se observa en Figura 61. En la imagen también se puede ver cómo la probeta se enrolla alrededor del tambor durante el ensayo. En segundo lugar, es necesario que la muestra esté vertical y el tambor bien alineado con la máquina de tracción. Para ello es útil el uso de escuadras y un nivel para la preparación del ensayo.

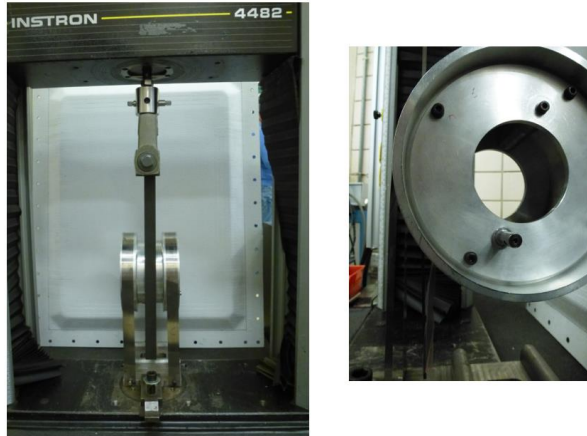


Figura 62: Alineación de la muestra durante el ensayo.

Otro aspecto a tener en cuenta es que el tambor va subiendo por encima del frente de grieta, esto requiere especial atención al final del ensayo, donde el tambor puede tocar el útil de sujeción superior de la muestra, ya que se podría dañar la máquina y el tambor. Por esta razón, al acabar el ensayo, una gran parte de la muestra no habrá sido ensayada lo cual supone un desperdicio de material considerable.

En segundo lugar, se emplea el HDP como ensayo de comparación ya que se demostró en trabajos previos que los resultados obtenidos con esta técnica son totalmente comparables a los que se hallan con el CDP. Por ello, se ensayan 3 probetas de cada tipo mediante este ensayo.

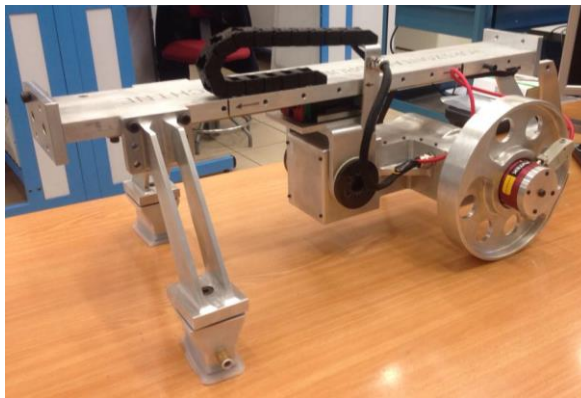


Figura 63: Ensayo HDP.

El procedimiento se realiza en un solo test, obteniendo el momento torsor frente al desplazamiento en todo momento. Se consigue el momento de liado en el primer tramo de probeta y en el segundo, donde se encuentra el adhesivo, se halla el momento de pelado+liado. 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 rígida (mayor número de capas) a la mesa de ensayo, anteriormente limpiada con acetona adecuadamente, con una cinta de doble cara y asegurando los extremos con sargentos. El dispositivo es totalmente autónomo ya que la idea es emplearlo en diferentes superficies por lo que consta de unas ventosas que permiten su adaptabilidad.

Tras preparar el ensayo, se emplea 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.

Por último, se emplea el HOD que es el dispositivo que se desea verificar. Al igual que en el resto de ensayos, se emplean 3 muestras de cada tipo y se procede según se explicó en el apartado 4.3.



*Figura 64: Ensayo HOD.*







# 7 RESULTADOS

La exposición de resultados se dividirá según el material de las muestras y, a su vez, según el ensayo empleado para el cálculo de la tenacidad a fractura de la unión.

## 7.1 Resultados para muestras de cinta

Se muestra a continuación todos los resultados para muestras de cinta permitiendo una visualización global de resultados:

Tabla 8: Resultados para muestras de cinta.

<i>Espécimen</i>	<i>Ancho (mm)</i>	<i>Espesor de la piel (mm)</i>	<i>Pelado + Liado</i>	<i>Liado</i>	<i>G<sub>c</sub> (J/m<sup>2</sup>)</i>	<i>G<sub>c</sub> Promedio (J/m<sup>2</sup>)</i>	<i>CV (%)</i>
<b>CDP Cinta 1</b>	24,64	0,60	208,49 N	127,94 N	809,58	<b>828,50</b>	<b>1,99</b>
<b>CDP Cinta 2</b>	25,18	0,60	223,62 N	138,25 N	839,59		
<b>CDP Cinta 3</b>	25,10	0,60	231,52 N	146,76 N	836,33		
<b>HDP Cinta 1</b>	24,64	0,60	2,03 Nm	0,30 Nm	736,45	<b>717,21</b>	<b>3,05</b>
<b>HDP Cinta 2</b>	25,18	0,60	1,92 Nm	0,19 Nm	721,76		
<b>HDP Cinta 3</b>	25,12	0,60	2,11 Nm	0,46 Nm	693,43		
<b>HOD Cinta 1</b>	25,10	0,60	23,40 N	-	932,22	<b>953,36</b>	<b>2,00</b>
<b>HOD Cinta 2</b>	23,98	0,60	22,99 N	-	958,56		
<b>HOD Cinta 3</b>	25,08	0,60	24,31 N	-	969,31		

Con una visión general de todos los datos obtenidos y procesados, se continúa analizando por ensayos para mostrar las gráficas obtenidas de cada muestra ensayada.

### 7.1.1 Climbing Drum Peel

Respecto al CDP, se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 9: Resultados para muestras de cinta con el CDP.

Espécimen	Ancho (mm)	Espesor de la piel (mm)	Fuerza Pelado + Liado (N)	Fuerza Liado (N)	$G_c$ (J/m <sup>2</sup> )	$G_c$ Promedio (J/m <sup>2</sup> )	CV (%)
CDP Cinta 1	24,64	0,60	208,49	127,94	809,58		
CDP Cinta 2	25,18	0,60	223,62	138,25	839,59	<b>828,50</b>	<b>1,99</b>
CDP Cinta 3	25,10	0,60	231,52	146,76	836,33		

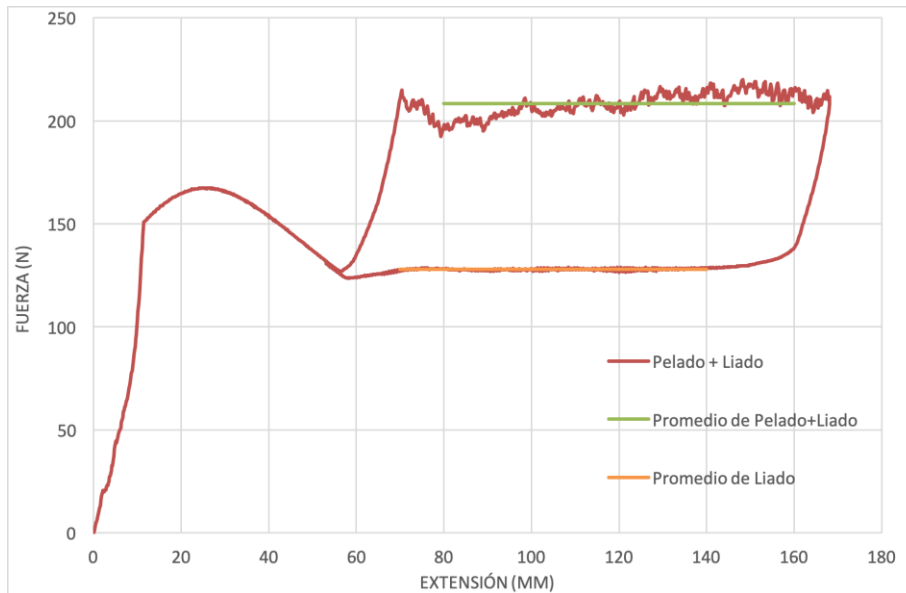


Gráfico 20: Resultados de la muestra 1 de cinta con CDP.

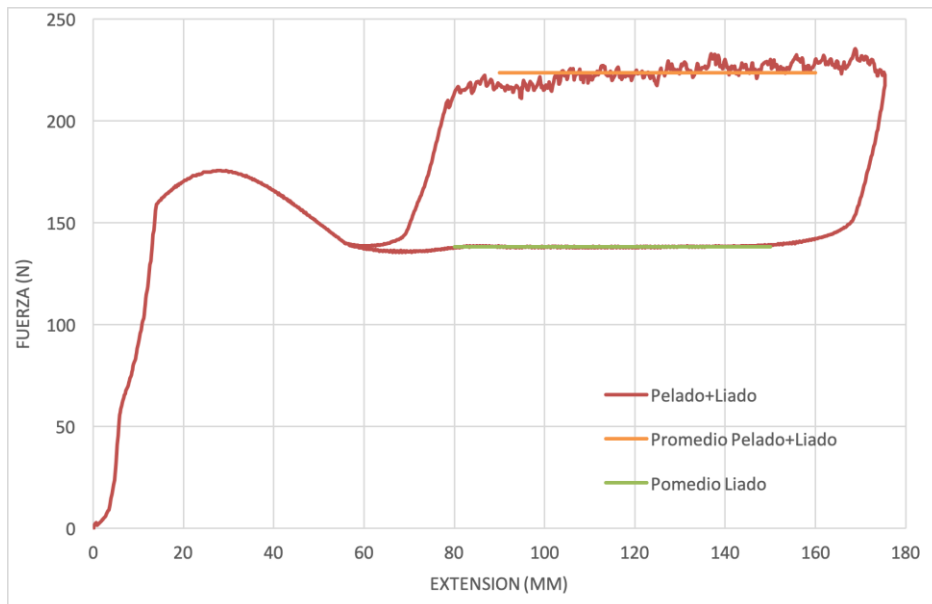


Gráfico 21: Resultados de la muestra 2 de cinta con CDP.

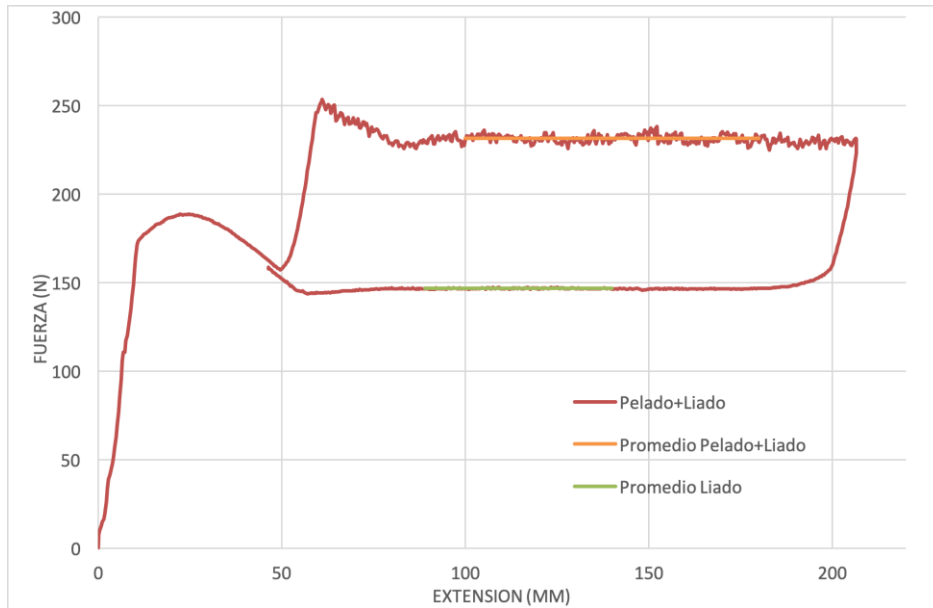


Gráfico 22: Resultados de la muestra 3 de cinta con CDP.

Como se puede apreciar en las gráficas y los datos, la tenacidad a fractura obtenida para las 3 probetas es la misma, considerando siempre pequeños errores que hacen variar levemente el valor final de  $G_C$  para cada muestra pero que no suponen una diferencia considerable. Los resultados finales son adecuados. Sin embargo, en las gráficas se puede ver como la curva de inicio del ensayo, así como la recta media de liado y de pelado+liado están desplazadas una respecto a la otra. Esto ocurre debido a que las condiciones iniciales del ensayo varían en la preparación del ensayo. Es común tener una sobrecarga al iniciar el ensayo y no iniciar desde el mismo nivel de carga, sin embargo, es un hecho que no tiene relevancia porque lo importante es que la diferencia entre la carga media de pelado+liado y la carga media de liado se mantengan constantes, y el traslado de la gráfica no perjudica a esta diferencia, que es la que da el valor de tenacidad a fractura.

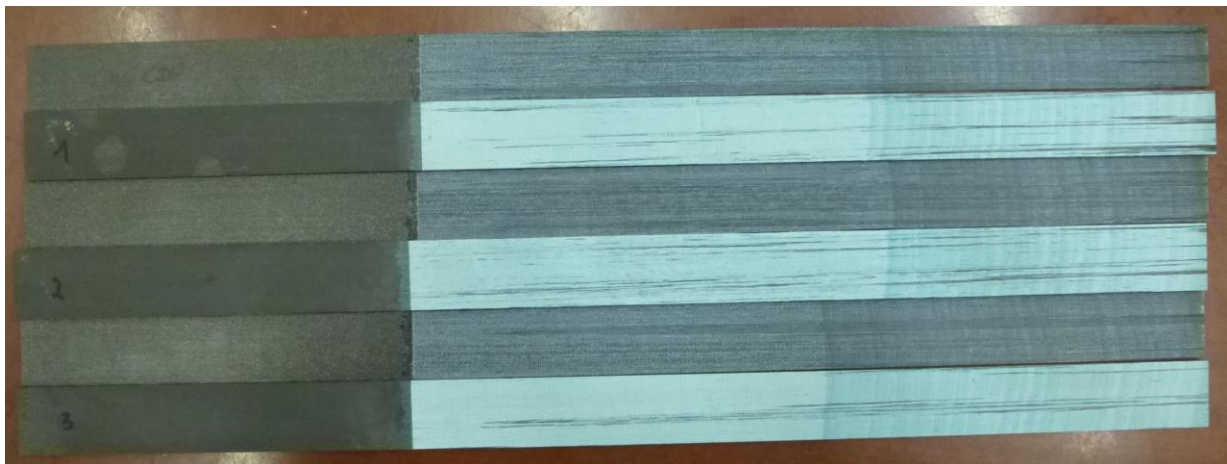


Figura 65: Modo de fallo de las muestras de cinta tras el CDP.

Se muestra en la Figura 65 el modo de fallo obtenido tras ensayar las 3 muestras con el CDP. En ella, se observa un modo de fallo 1, interfase fresco-fresco, idéntico en todas las probetas. El adhesivo queda sobre el adherente que fue curado previamente.

### 7.1.2 Horizontal Drum Peel

A continuación, se procede a analizar los resultados obtenidos con el HDP:

Tabla 10: Resultados obtenidos para cinta con el HDP.

Espécimen	Ancho (mm)	Espesor de la piel (mm)	Momento Pelado + Liado (N·m)	Momento Liado (N·m)	G <sub>c</sub> (J/m <sup>2</sup> )	G <sub>c</sub> Promedio (J/m <sup>2</sup> )	CV (%)
HDP Cinta 1	24,64	0,60	2,03	0,30	736,45	717,21	3,05
HDP Cinta 2	25,18	0,60	1,92	0,19	721,76		
HDP Cinta 3	25,12	0,60	2,11	0,46	693,43		

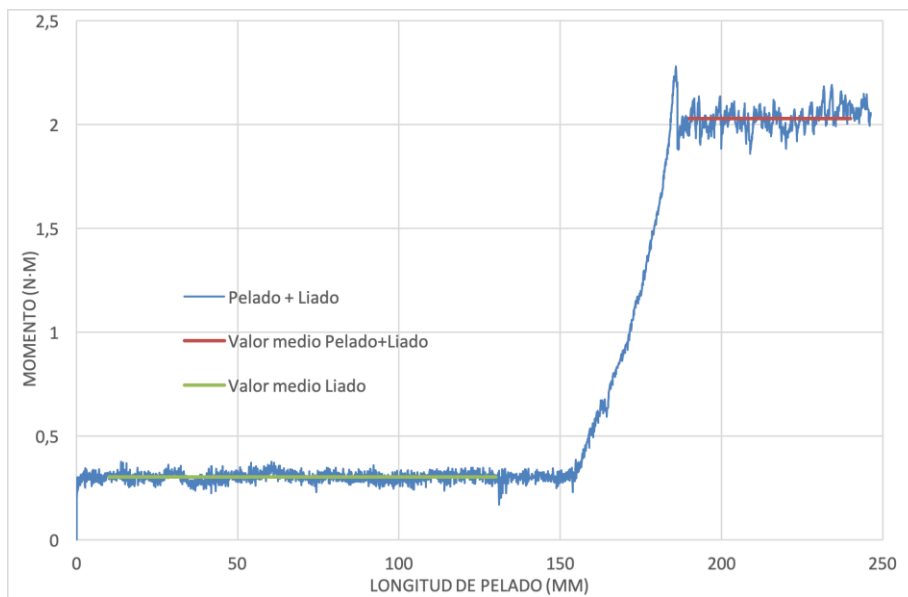


Gráfico 23: Resultados de la muestra 1 de cinta con HDP.

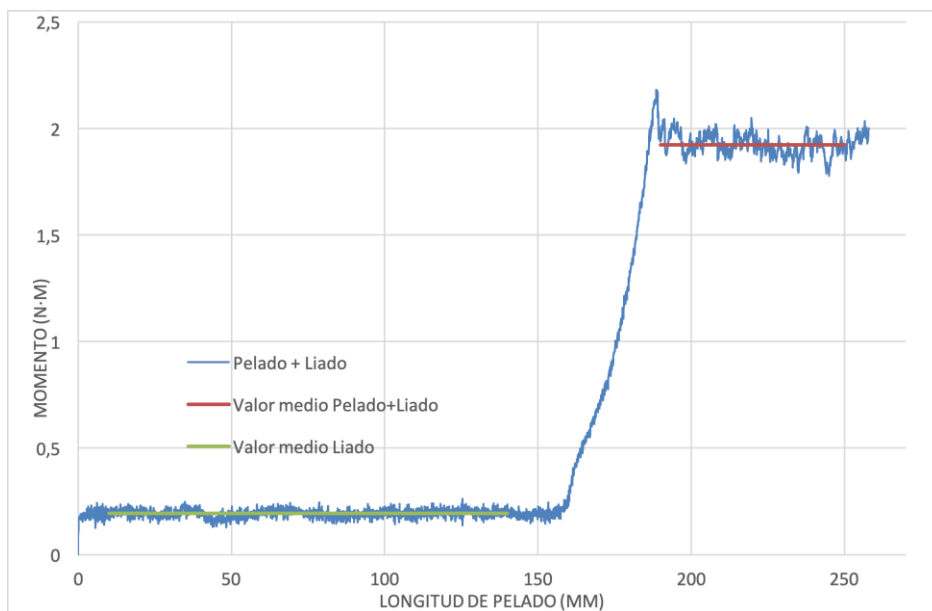


Gráfico 24: Resultados de la muestra 2 de cinta con HDP.

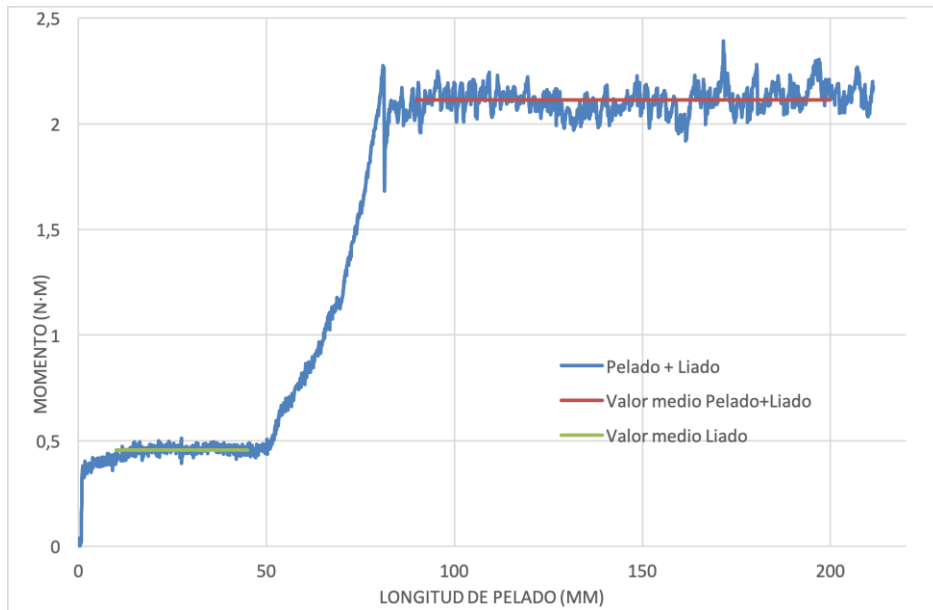


Gráfico 25: Resultados de la muestra 3 de cinta con HDP.

En este ensayo hay una diferencia fundamental respecto al resto, la medida que se obtiene es el momento necesario para el despegue, en lugar de la fuerza. Sin embargo, el dato relevante de cada ensayo vuelve a ser la diferencia entre el pelado+liado y el liado, obteniendo el momento de pelado neto necesario para propagar la grieta.

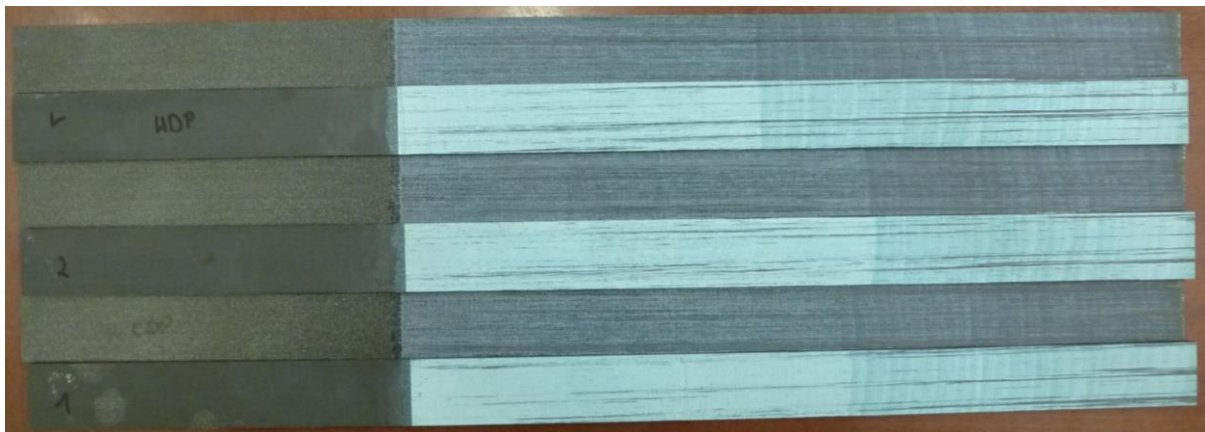


Figura 66: Modo de fallo de las muestras de cinta tras el HDP.

El modo de fallo es igual al obtenido para CDP, lo cual nos permite comparar de manera adecuada los resultados obtenidos para ambos ensayos.

### 7.1.3 Horizontal Open Displacement

A continuación, se muestran los resultados que se obtienen para los ensayos de cinta con el HOD:

Tabla 11: Resultados obtenidos para cinta con el HOD.

Espécimen	Ancho (mm)	Espesor de la piel (mm)	Fuerza Pelado + Liado (N)	$G_c$ (J/m <sup>2</sup> )	$G_c$ Promedio (J/m <sup>2</sup> )	CV (%)
-----------	------------	-------------------------	---------------------------	---------------------------	------------------------------------	--------

<b>HOD Cinta 1</b>	25,10	0,60	23,40	932,22		
<b>HOD Cinta 2</b>	23,98	0,60	22,99	958,56	953,36	2,00
<b>HOD Cinta 3</b>	25,08	0,60	24,31	969,31		

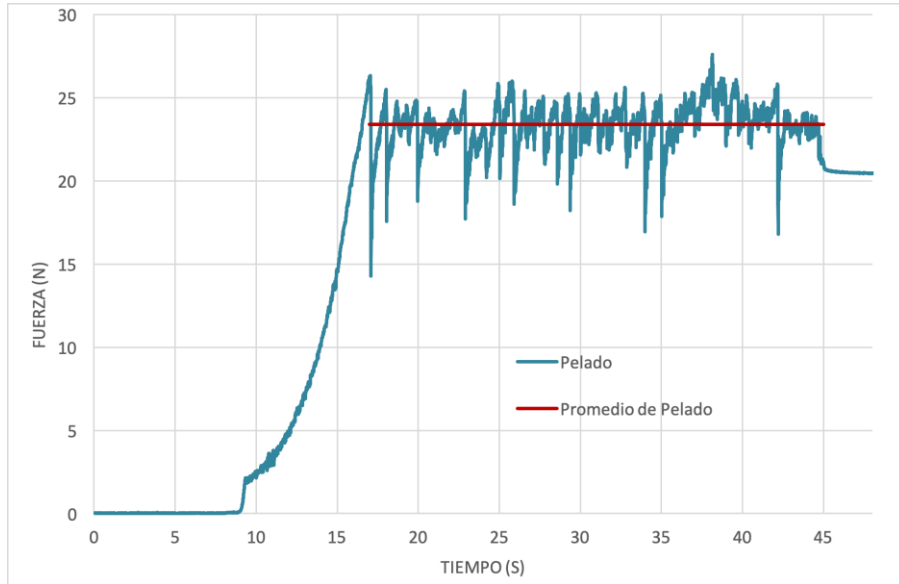


Gráfico 26: Resultados de la muestra 1 de cinta con HOD.

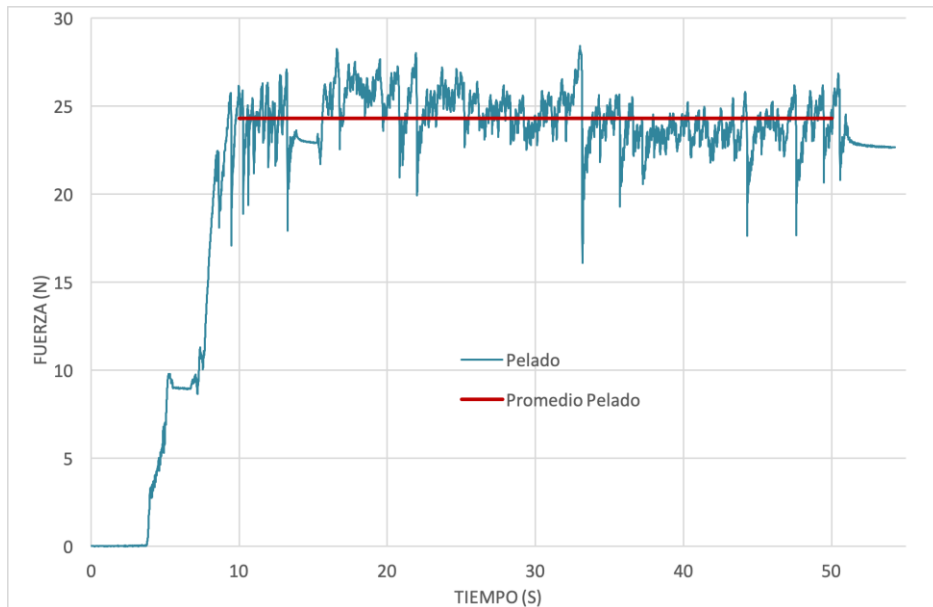


Gráfico 27: Resultados de la muestra 2 de cinta con HOD.

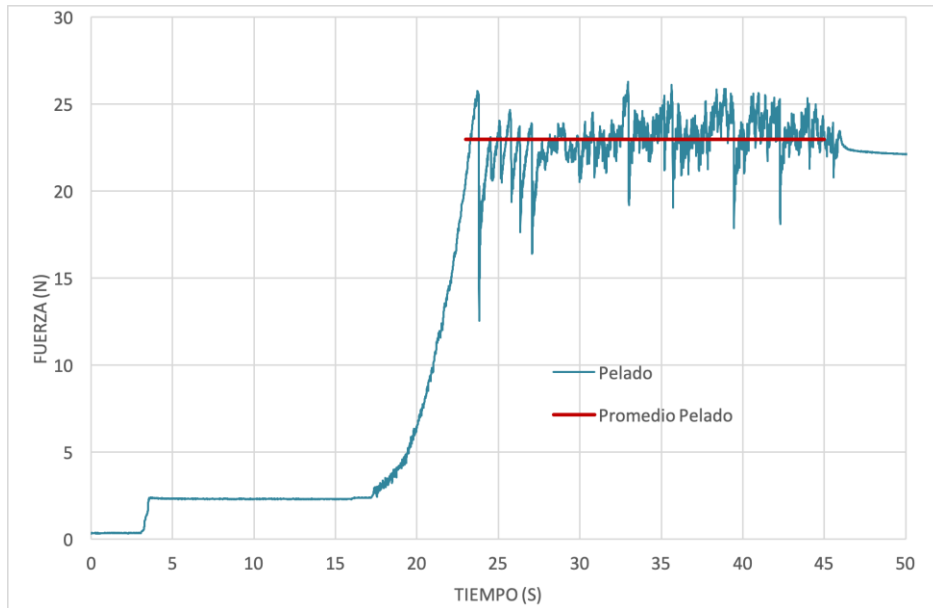


Gráfico 28: Resultados de la muestra 3 de cinta con HOD.

En este ensayo, se observa que no se tiene fuerza de liado, directamente se halla la fuerza de pelado neta. Durante el ensayo no hay ninguna zona de liado, lo cual permite un ahorro considerable de material por no requerir una zona suficientemente extensa que permita hallar una carga de liado con la que comparar.

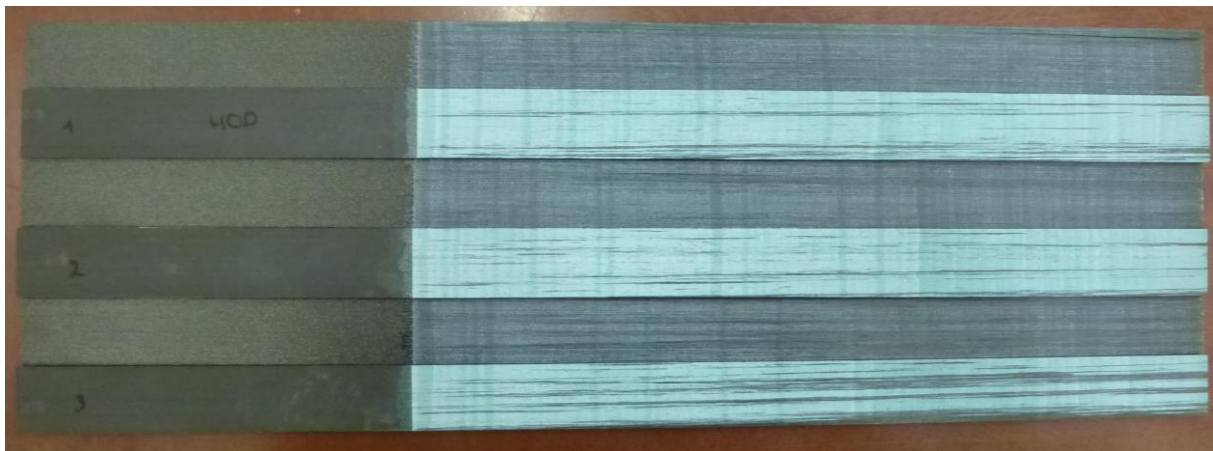


Figura 67: Modo de fallo de las muestras de cinta tras el HOD.

El modo de fallo vuelve a ser muy similar a los anteriores, aunque se aprecia una ligera delaminación.

Los ensayos de pelado tradicionalmente siempre han presentado una curva con saltos, tanto en DCB como CDP, ya que se está despegando el adhesivo y este proceso no ocurre de forma uniforme. Los saltos que se muestran en los gráficos son comunes en estos ensayos según la bibliografía (stick-slip [36]), sin embargo, al presentar gráficas en orden de magnitud muy dispares, conviene comparar el rango de estos saltos en los 3 ensayos.

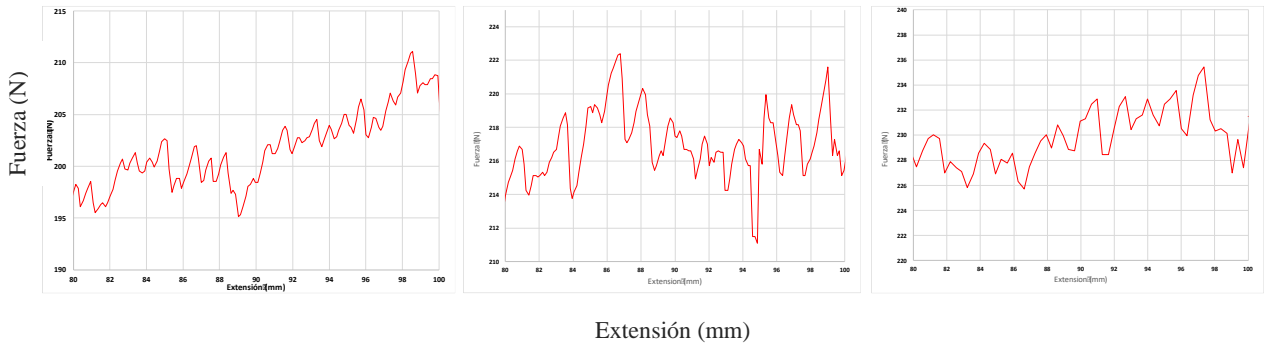


Figura 68: Ampliación de la magnitud de saltos del ensayo CDP 1, 2 y 3.

Se observa que los saltos máximos presentados en la zona elegida aleatoriamente de cada muestra del CDP son de 16 N, 11 N y 9 N, respectivamente.

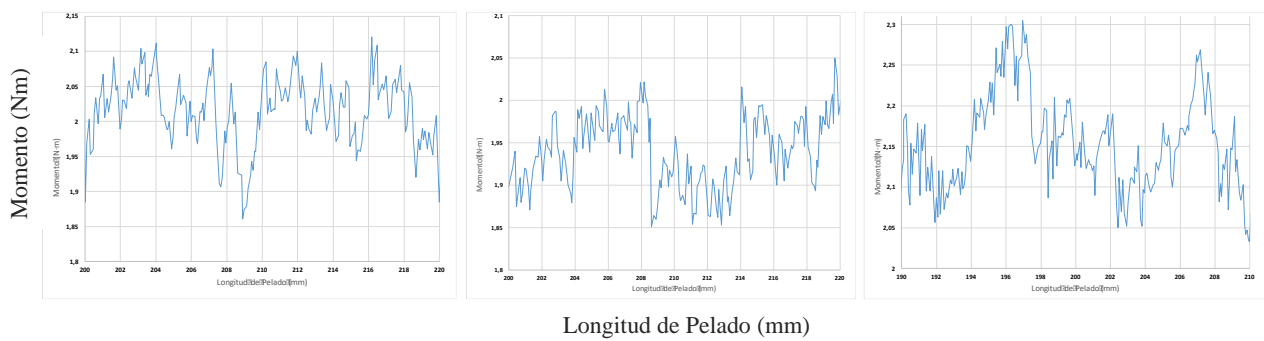


Figura 69: Ampliación de la magnitud de saltos del ensayo HDP 1, 2 y 3.

En el caso del HDP, los saltos corresponden a 0.27 Nm, 0.2 Nm y 0.25 Nm. Teniendo en cuenta que el diámetro del tambor es de 189.7 mm y tomando el espesor nominal de la piel de 0.6 mm, en fuerza se tendrían saltos de 2.84 N, 2.10 N y 2.63 N.

Finalmente, para HOD se tiene:

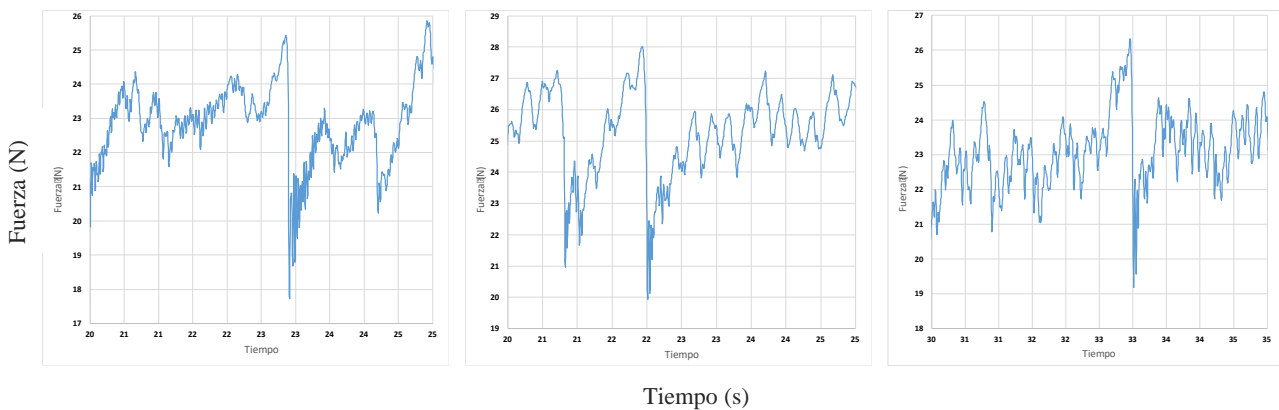


Figura 70: Ampliación de la magnitud de saltos del ensayo HOD 1, 2 y 3.

Los saltos son de 8 N, 8 N y 7 N. Comparando los saltos en cada ensayo, se observa que el CDP presenta las diferencias mayores, por lo tanto, no deben ser una alarma los saltos en el HDP y el HOD, ya que el ensayo CDP está ya normalizado y adaptado en los procesos de calidad aeronáutica.



## 7.2 Resultados para muestras de tejido

Una vez finalizados los resultados para las muestras de cinta, se exponen los obtenidos para el tejido:

Tabla 12: Resultados para muestras de tejido.

Espécimen	Ancho (mm)	Espesor de la piel (mm)	Pelado + Liado	Liado	$G_c$ (J/m <sup>2</sup> )	$G_c$ Promedio (J/m <sup>2</sup> )	CV (%)
CDP Tejido 1	25,03	0,80	247,69 N	81,02 N	1637,94	<b>1627,78</b>	<b>0,95</b>
CDP Tejido 2	25,22	0,80	274,08 N	109,03 N	1609,98		
CDP Tejido 3	25,14	0,80	306,54 N	139,44 N	1635,41		
HDP Tejido 1	25,03	0,80	3,03 Nm	0,30 Nm	1144,47	<b>1239,90</b>	<b>6,75</b>
HDP Tejido 2	25,22	0,80	3,48 Nm	0,36 Nm	1300,93		
HDP Tejido 3	25,14	0,80	3,36 Nm	0,30 Nm	1274,30		
HOD Tejido 1	25,03	0,80	34,41 N	0,00	1374,61	<b>1326,71</b>	<b>3,40</b>
HOD Tejido 2	25,22	0,80	32,40 N	0,00	1284,89		
HOD Tejido 3	25,14	0,80	33,20 N	0,00	1320,63		

### 7.2.1 Climbing Drum Peel

A continuación, se muestran los resultados del tejido con el CDP:

Tabla 13: Resultados obtenidos de muestras de tejido con el CDP.

Espécimen	Ancho (mm)	Espesor de la piel (mm)	Fuerza Pelado + Liado (N)	Fuerza Liado (N)	$G_c$ (J/m <sup>2</sup> )	$G_c$ Promedio (J/m <sup>2</sup> )	CV (%)
CDP Tejido 1	25,03	0,80	247,69	81,02	1637,94	<b>1627,78</b>	<b>0,95</b>
CDP Tejido 2	25,22	0,80	274,08	109,03	1609,98		
CDP Tejido 3	25,14	0,80	306,54	139,44	1635,41		

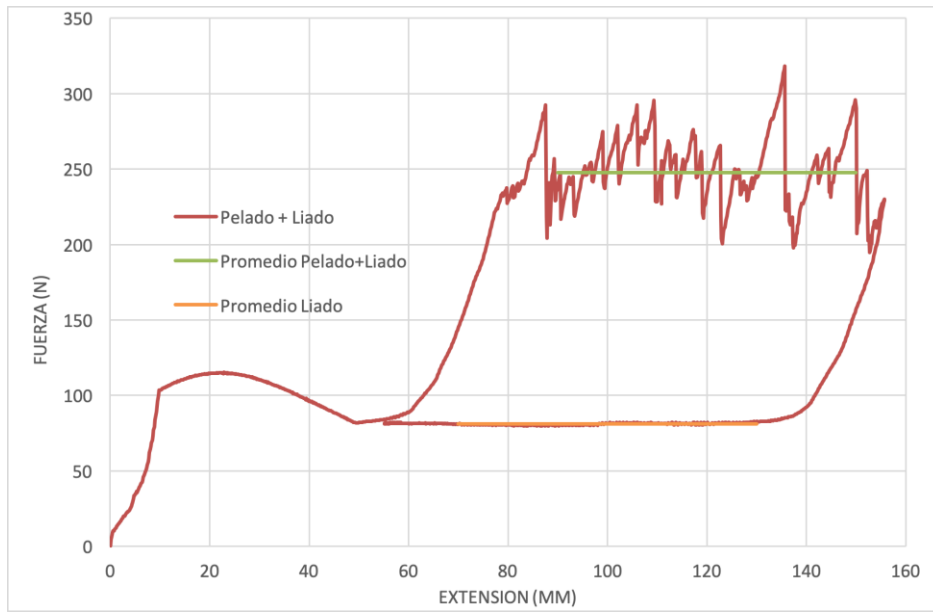


Gráfico 29: Resultados de la muestra 1 de tejido con CDP.

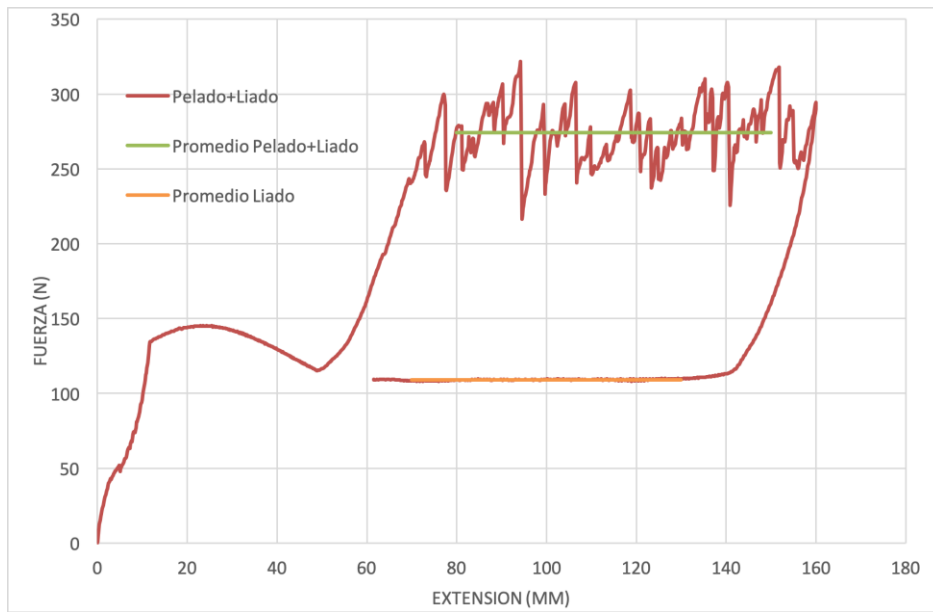


Gráfico 30: Resultados de la muestra 2 de tejido con CDP.

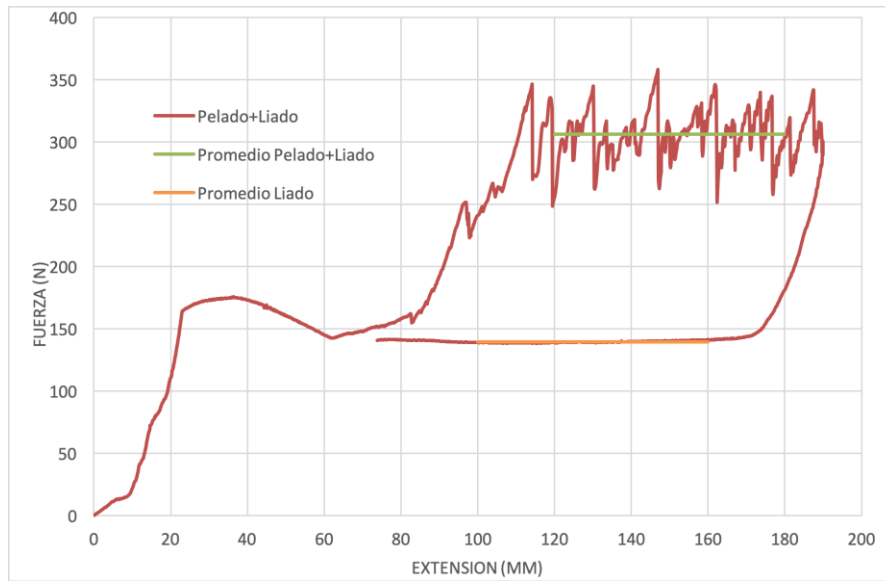


Gráfico 31: Resultados de la muestra 3 de tejido con CDP.

### 7.2.2 Horizontal Drum Peel

Para el tejido se decidió realizar los 3 ensayos en las 3 mismas muestras puesto que tras realizar el CDP las probetas disponían de una zona encolada suficientemente larga para volver a ser ensayadas. Esto asegura una comparación aún más adecuada entre ensayos ya que se tiene la certeza de que la fabricación de las muestras es idéntica.

A continuación, se muestran los resultados con HDP de las muestras de tejido:

Tabla 14: Resultados obtenidos de muestras de tejido con HDP.

<i>Espécimen</i>	<i>Ancho (mm)</i>	<i>Espesor de la piel (mm)</i>	<i>Momento Pelado + Liado (N·m)</i>	<i>Momento Liado (N·m)</i>	<i>G<sub>c</sub> (J/m<sup>2</sup>)</i>	<i>G<sub>c</sub> Promedio (J/m<sup>2</sup>)</i>	<i>CV (%)</i>
<i>HDP Tejido 1</i>	25,03	0,80	3,03	0,30	1144,47	<b>1239,90</b>	<b>6,75</b>
<i>HDP Tejido 2</i>	25,22	0,80	3,48	0,36	1300,93		
<i>HDP Tejido 3</i>	25,14	0,80	3,36	0,30	1274,30		

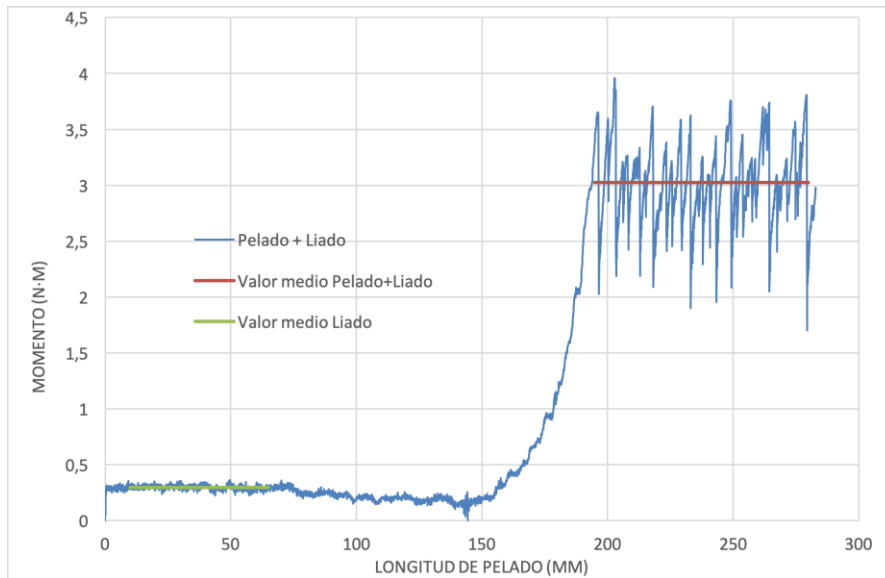


Gráfico 32: Resultados de la muestra 1 de tejido con HDP.

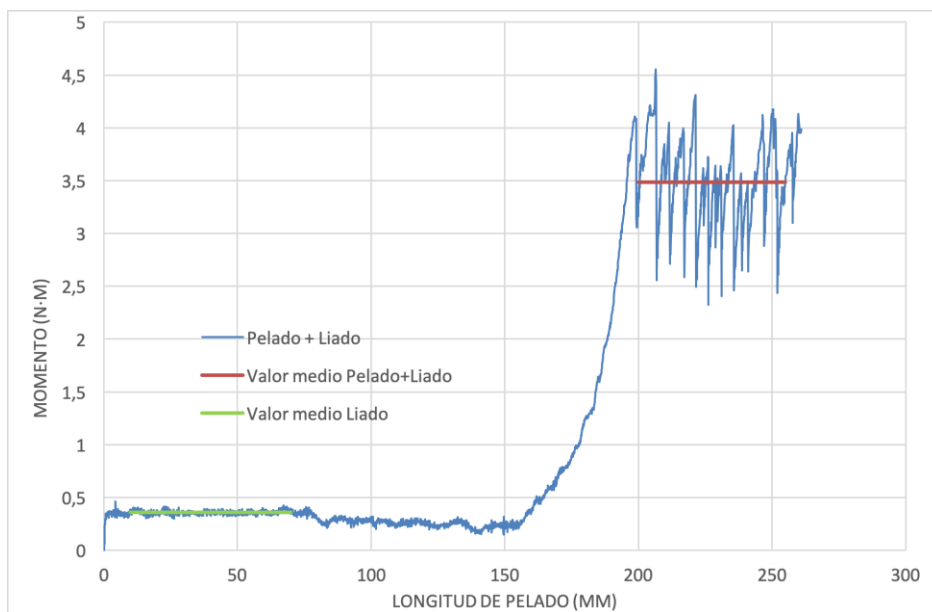


Gráfico 33: Resultados de la muestra 2 de tejido con HDP.

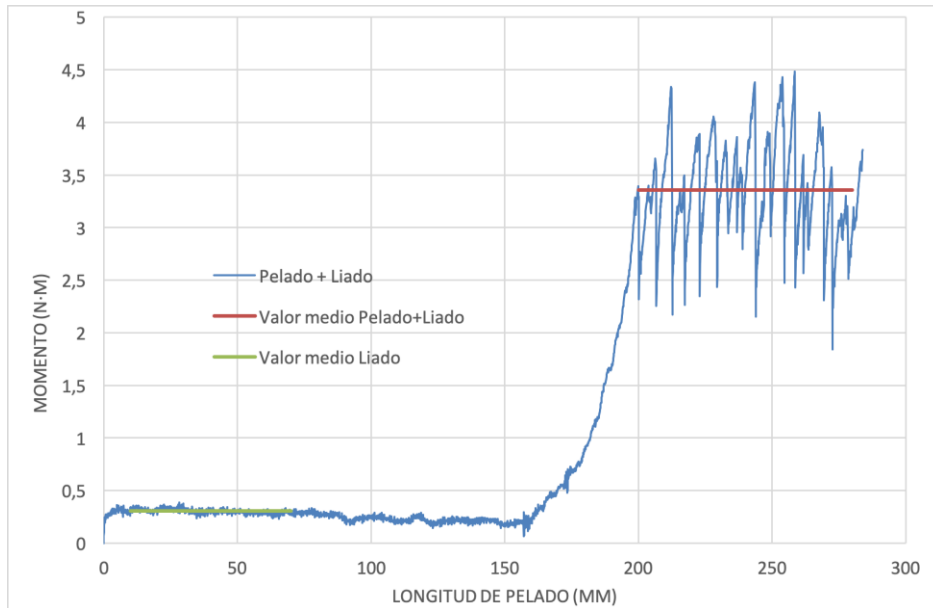


Gráfico 34: Resultados de la muestra 3 de tejido con HDP.

### 7.2.3 Horizontal Open Displacement

A continuación, se procede a analizar los resultados obtenidos con el HOD:

Tabla 15: Resultados obtenidos de muestras de tejido con HOD.

Espécimen	Ancho (mm)	Espesor de la piel (mm)	Fuerza Pelado + Liado (N)	$G_c$ (J/m <sup>2</sup> )	$G_c$ Promedio (J/m <sup>2</sup> )	CV (%)
HOD Tejido 1	25,03	0,80	34,41	1374,61		
HOD Tejido 2	25,22	0,80	32,40	1284,89	<b>1326,71</b>	<b>3,40</b>
HOD Tejido 3	25,14	0,80	33,20	1320,63		

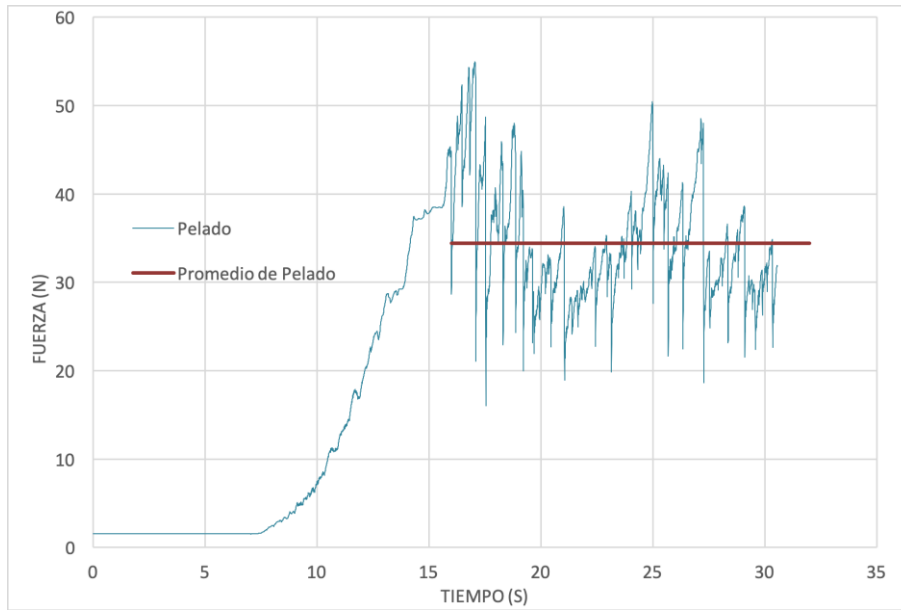


Gráfico 35: Resultados de la muestra 1 de tejido con HOD.

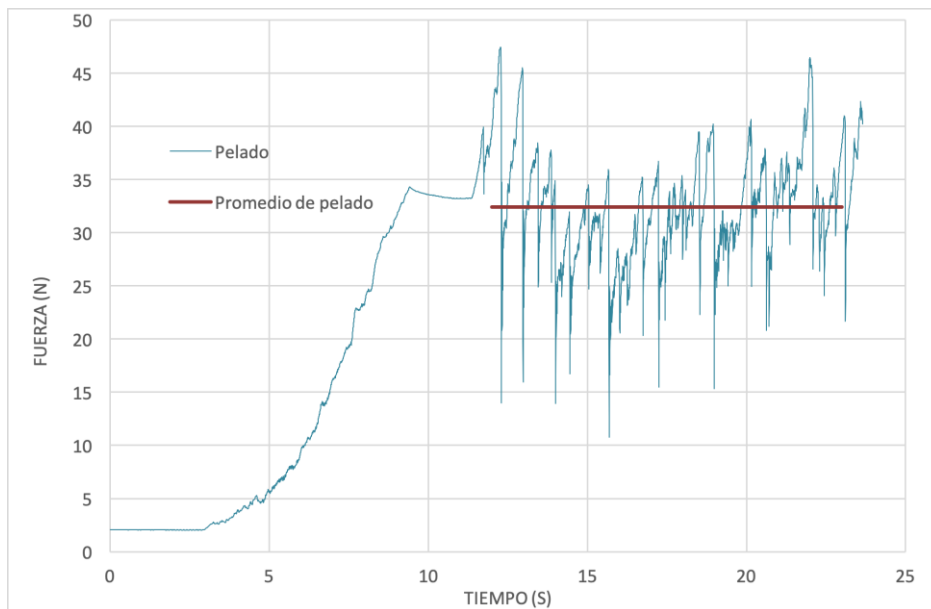


Gráfico 36: Resultados de la muestra 2 de tejido con HOD.

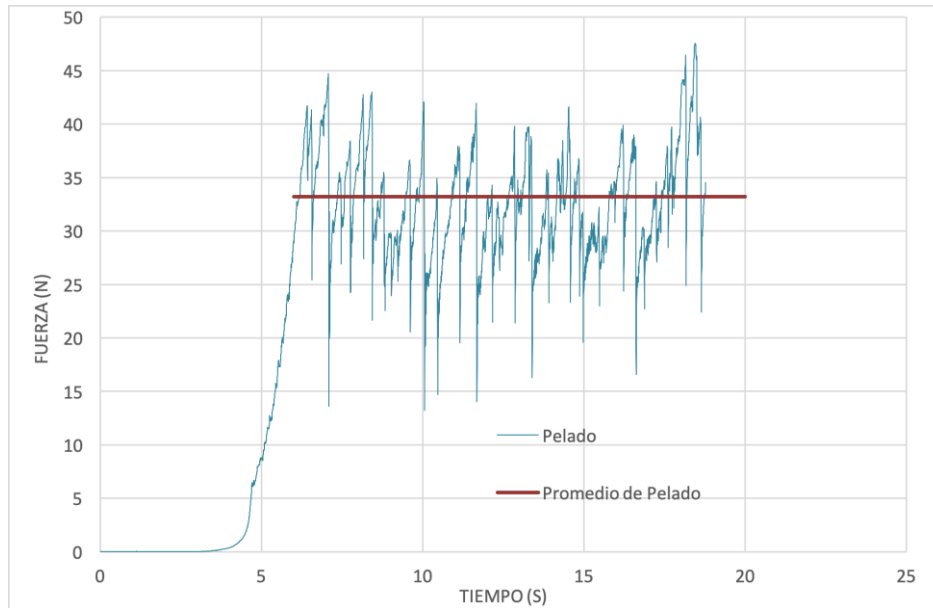


Gráfico 37: Resultados de la muestra 3 de tejido con HOD.

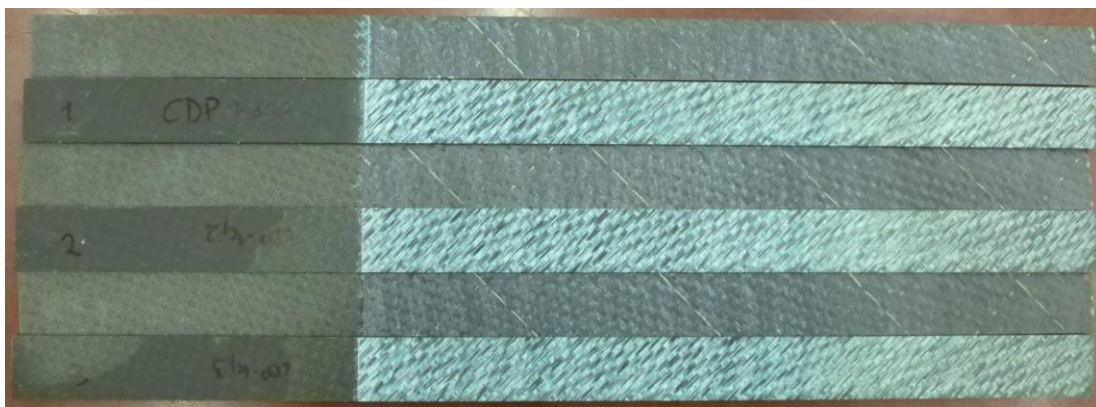


Figura 71: Modo de fallo de las muestras de tejido.

El modo de fallo, al igual que el obtenido en la cinta, es interfase fresco-fresco en todos los ensayos.

El tejido presenta aún más discontinuidades en el pelado que la cinta debido al carbono entrelazado que hace un contacto más heterogéneo. De igual modo, se comparan los ensayos.

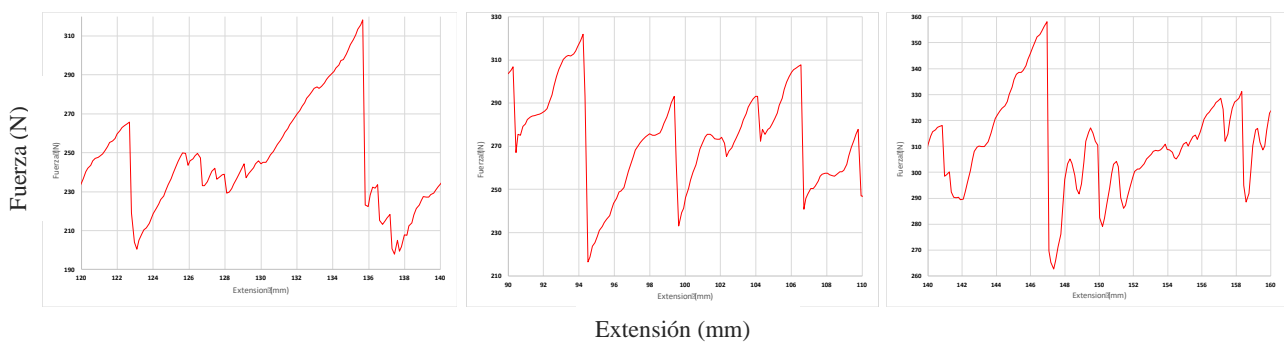


Figura 72: Ampliación de la magnitud de saltos del ensayo CDP 1, 2 y 3.

Los saltos mostrados máximos en el CDP respectivamente son de 115 N, 100 N y 100 N.

En el HDP:

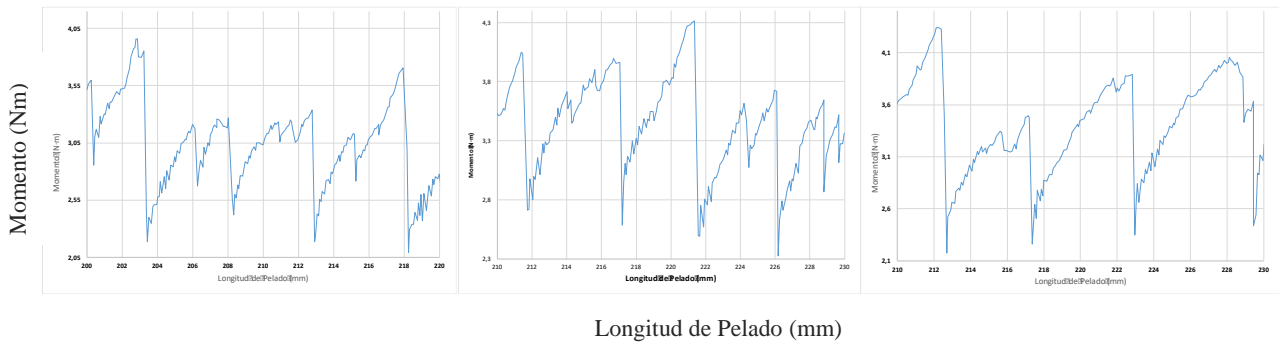


Figura 73: Ampliación de la magnitud de saltos del ensayo HDP 1, 2 y 3.

Los saltos en este caso son de 1.95 Nm, 1.9 Nm y 2.1 Nm, que teniendo en cuenta el diámetro del tambor 189.7 mm y el espesor nominal de la piel de 0.8 mm, se obtienen 19 N, 18.54 N y 20.49 N.

Para el HOD:

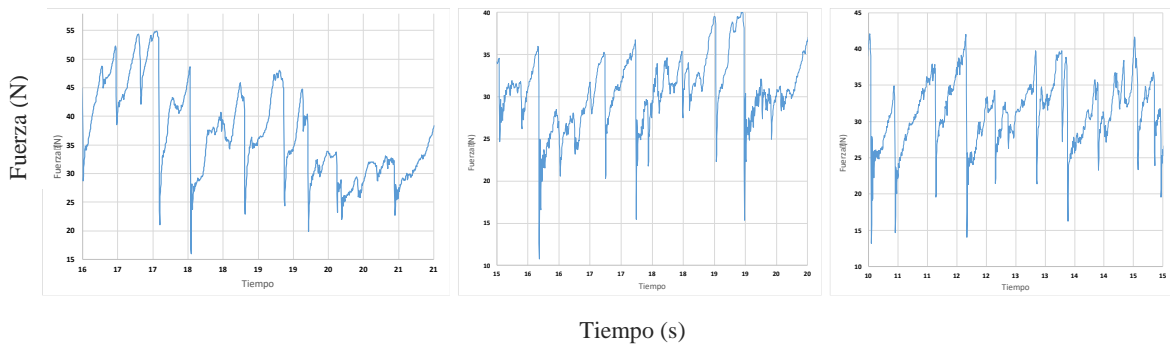


Figura 74: Ampliación de la magnitud de saltos del ensayo HOD 1, 2 y 3.

En este caso los saltos son 35 N, 26 N y 29 N. En el caso del tejido, los saltos son significativamente mayores que con la cita, sin embargo, esta observación era de esperar debido a las características tan diferentes que presenta el tejido respecto de la cinta. El tejido es un material notablemente más irregular que, unido a la particular rejilla del adhesivo film que aumenta la heterogeneidad, suponen una interfaz de la unión no uniforme provocando estos saltos. De igual modo que se ha expuesto con la cinta, los saltos más importantes se producen en el CDP, lo cual supone una tranquilidad para el resto de ensayos ya que el CDP es el ensayo de diferencia para esta comparación por ser el procedimiento validado en el sector.



## 8 CONCLUSIONES

---

Los resultados de esta investigación demuestran que el nuevo dispositivo HDP 2.0 proporciona resultados tan válidos como el ensayo de referencia CDP. Las mejoras presentadas optimizan la ejecución del ensayo, principalmente por la bajada de peso del dispositivo. La mayor adaptabilidad del equipo facilita la planificación del ensayo para su futura implantación en la cadena de producción. A su vez, respecto al estudio de las posibles dificultades que puede presentar el dispositivo:

- La desalineación de la probeta no afecta significativamente el valor de tenacidad a fractura que se obtiene del ensayo, sin embargo, sí afecta a la uniformidad del avance del ensayo. Por ello, se debe evitar la desalineación de la muestra respecto al tambor.
- Se asegura un correcto funcionamiento del ensayo en cualquiera de las dos direcciones posibles de giro del tambor.
- La determinación del modo de fallo de las muestras es un punto crítico a determinar, por lo que se ha modificado el software del ensayo para guardar un archivo con una imagen de las superficies de fallo.

Respecto al HOD se puede concluir que los resultados obtenidos con este equipo son comparables con los resultados obtenidos empleando el CDP y el HDP 2.0. A continuación se expone una síntesis de los resultados obtenidos con los 3 ensayos llevados a cabo para los dos tipos de material compuesto. En primer lugar, los ensayos realizados a muestras de cinta unidireccional:

*Tabla 16: Resumen de resultados para muestras de cinta.*

<b>Ensayo</b>	<b>G<sub>c</sub> Promedio (J/m<sup>2</sup>)</b>	<b>CV (%)</b>
CDP	828,50	1,99
HDP	717,21	3,05
HOD	953,36	2,00

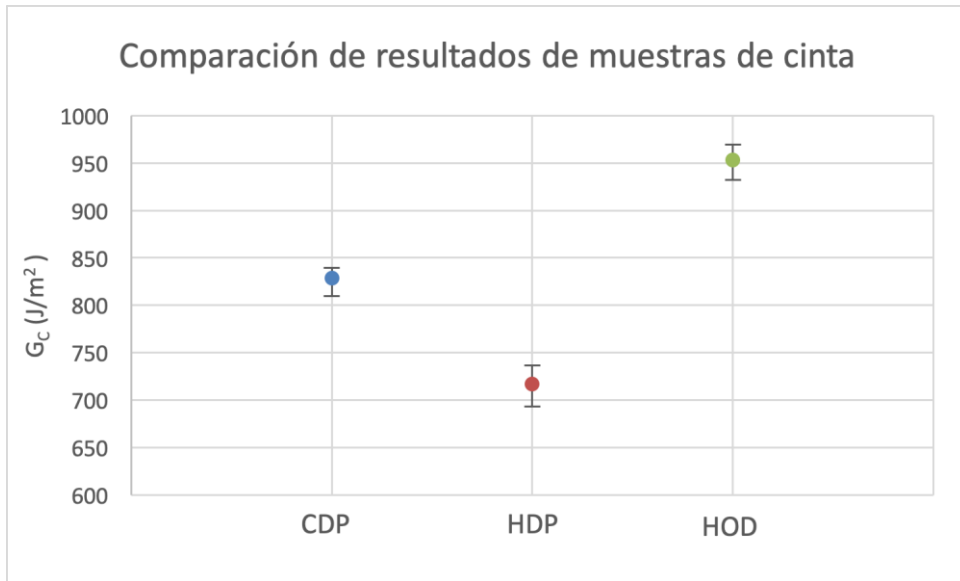


Gráfico 38: Comparación de los resultados obtenidos con cinta.

Los resultados presentan un coeficiente de varianza bajo, no tienen gran dispersión. Sin embargo, comparando entre ensayos podría ser preocupante la diferencia que presentan. El valor más elevado con el ensayo HOD, en segundo lugar, se encuentra el CDP y, por último, el HDP. Analizando los modos de fallo de cada ensayo que se muestran a continuación, se observa cómo las muestras ensayadas con el HOD presentan mayor delaminación que el resto, lo que explica su mayor valor de  $G_c$ .

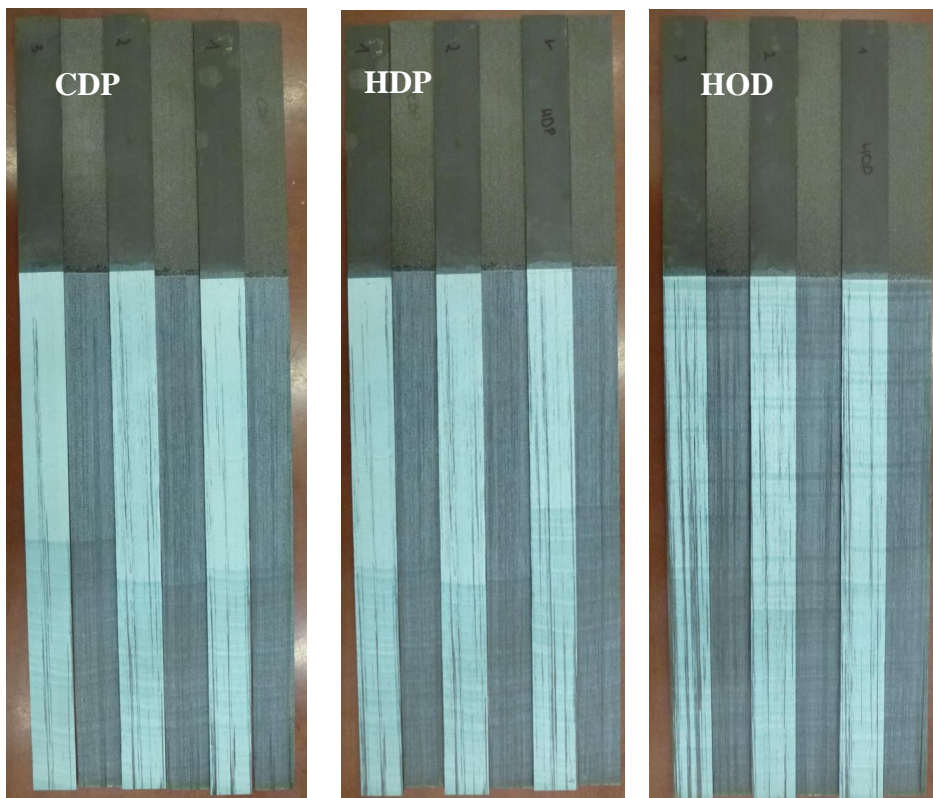


Figura 75: Modos de fallo muestras de cinta.

Se muestran a continuación los resultados obtenidos del tejido:

Tabla 17: Resumen de resultados para muestras de tejido.

Ensayo	G <sub>c</sub> Promedio (J/m <sup>2</sup> )	CV (%)
CDP	1627,78	0,95
HDP	1239,90	6,75
HOD	1326,71	3,40

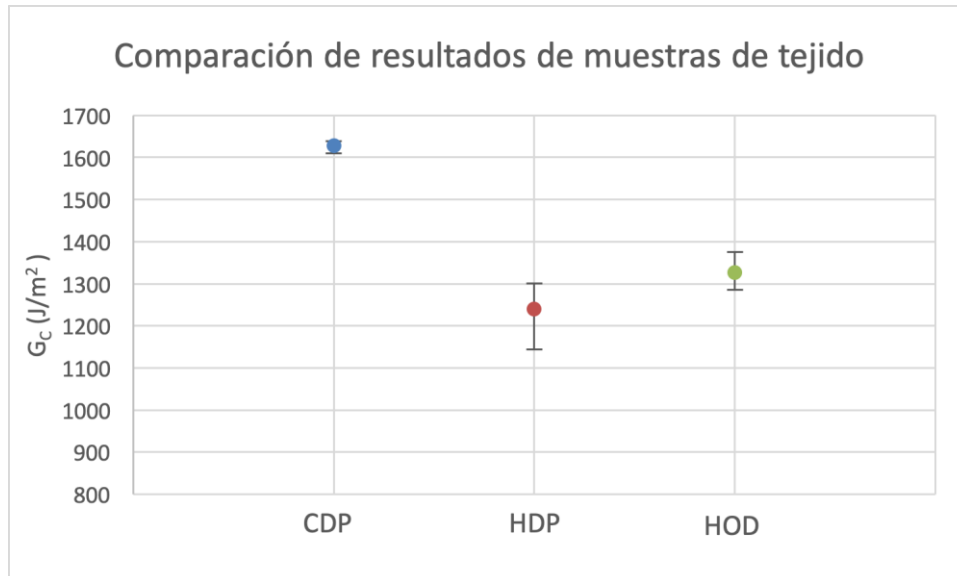


Gráfico 39: Comparación de los resultados obtenidos con tejido.

En los resultados obtenidos de las muestras de cinta, se observan resultados más cercanos entre sí que con el tejido. Contrastando los resultados del HDP y HOD en el Gráfico 39, teniendo en cuenta la dispersión que presentan los resultados obtenidos, ambos ensayos son comparables. Sin embargo, el CDP expone resultados algo más elevados. El modo de fallo es igual durante todo la muestra, es decir, para todos los ensayos. En los ensayos con tejido se ha procedido de manera diferente, se han empleado las mismas muestras para los 3 ensayos. Se decidió fabricar muestras suficientemente largas para tener el recorrido necesario para cada ensayo y así asegurar al completo las mismas propiedades, así como ahorrar material en fabricación.

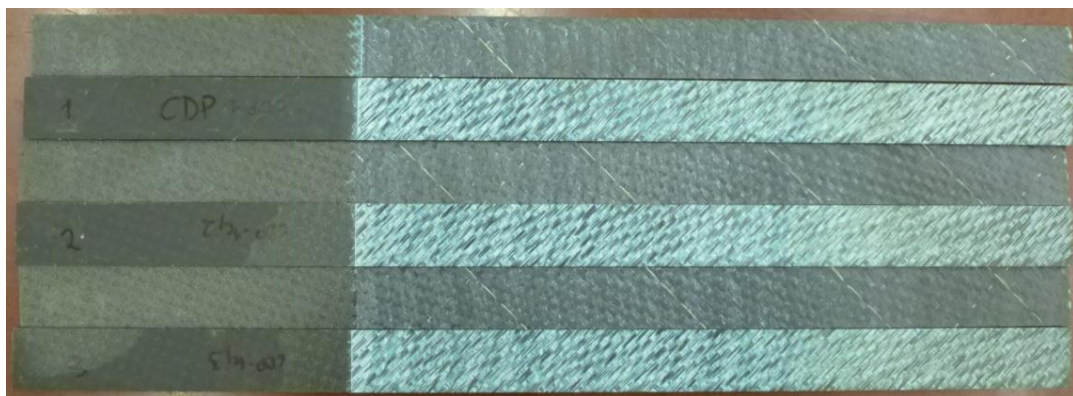


Figura 76: Modo de fallo de muestras de tejido.

Las diferencias entre los resultados de tenacidad a fractura obtenidos en las muestras de tejido requieren hacer una campaña de ensayo más extensa que clarifique las diferencias encontradas.

El diseño del HOD asegura un ensayo con un post-procesado más sencillo, ya que se obtiene directamente la fuerza de pelado neta requerida para pelar la muestra. El tamaño del dispositivo es considerablemente menor que el HDP, lo que facilita su manipulación reduciendo algunos minutos el procedimiento total del ensayo, desde el set-up hasta el post-procesado de datos. El empleo de dos materiales compuestos con diferentes propiedades permite asegurar un correcto funcionamiento del dispositivo independientemente del material que se emplee.

Ambos ensayos están diseñados para realizarse fuera del laboratorio y por personal poco cualificado, lo que presenta una ventaja fundamental a nivel industrial. El tiempo en cualquier punto de la cadena de producción de una pieza es un factor en constante evaluación para optimizar, por ello, estas alternativas para evaluar uniones encoladas tienen como principal objetivo disminuir el tiempo de ensayo.

Comparando ambos dispositivos, el HOD presenta mayores ventajas que el HDP por tener menor peso, y su manipulación y post-procesado son más sencillos. Sin embargo, se debe desarrollar un software similar al del HDP que agilice el procedimiento de ensayo HOD. Al ser un diseño reciente, se está trabajando en ello actualmente.

## **8.1 Trabajos futuros**

Para continuar la optimización del HDP 2.0, se quiere instalar una cámara en el dispositivo en el lugar apropiado para poder realizar una foto del modo de fallo de cada muestra ensayada y quede almacenada en el archivo de procesamiento de datos. A su vez, se considera un avance notable en el dispositivo el prescindir de cables. Para ello, primero, el dispositivo debe alimentarse a través de una batería, lo cual haría aumentar el peso del mismo. Hay que evaluar las diferentes opciones que se presentan en el mercado para optimizar este aspecto. Segundo, la conexión entre el dispositivo y el ordenador debe ser inalámbrica. Habría que analizar qué opción es la más viable para esta solicitud, vía Bluetooth o Wi-Fi. Para evitar la desalineación de las muestras respecto al tambor, se debe instalar un láser en el tambor que muestre una línea donde debe situarse la muestra.

El HOD se encuentra en pleno desarrollo y aún hay aspectos que solventar y mejorar. Hay que desarrollar una extensa campaña experimental para clarificar las discrepancias halladas en los resultados con las muestras de tejido. Puesto que el ensayo HDP lleva más tiempo en desarrollo, muchas de las ideas que se tienen en cuenta para su mejora, deben implantarse de igual modo en este nuevo ensayo. En primer lugar, el software que se utiliza actualmente debe mejorarse y diseñarse de un modo más sencillo, similar al empleado en el HDP con las mejoras que se han planteado. En segundo lugar, la implantación del láser para indicar la posición de las muestras paralelas a la dirección de la fuerza es un aspecto a implantar.

# REFERENCIAS

---

- [1] ADAMS, R. D., COWAP, J. W., FARQUHARSON, G. M., MARGARY, G. M., VAUGHN, D., 2009. *The relative merits of the Boeing wedge test and the double cantilever beam test for assessing the durability of adhesively bonded joints, with particular reference to the use of fracture mechanics*. International Journal of Adhesion and Adhesives 29, 609–620.
- [2] 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)
- [3] AITM 1-0005. "Fibre reinforced plastics - Determination of interlaminar fracture toughness energy - Mode I -  $G_{Ic}$ ". AIRBUS.
- [4] AITM 1-0019. "Determination of Tensile Lap Shear Strength of Composite Joints". AIRBUS. Blagnac, Francia.
- [5] AITM 1-0053. "Carbon fiber reinforced plastics. Determination of fracture toughness energy of bonded joints. Mode I.  $G_{Ic}$  test". AIRBUS. Noviembre 2015, Blagnac, 31707, Francia.
- [6] AITM 6-3008. "Classification of failure modes of composite bonded joints opened under mode 1 loading". AIRBUS. Nov 2014. Blagnac, Francia.
- [7] ASTM-D1781. "Standar test method for climbing drum peel for adhesives." AIRBUS.
- [8] ASTM-D5228-13. "Standar Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composite". AIRBUS.
- [9] BAMS 532-050C. "EPOXY RESIN IMPREGNATED CARBON UNI- DIRECTIONAL TAPE AND FABRIC 355°F AUTOCLAVE CURE". 2010 Bombardier Inc.
- [10] 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.
- [11] BIEL, A., U. SITGH. An analysis of the evaluation of the fracture energy using the DCB-specimen. Arch. Mech., 59, 4–5, pp. 311–327, (2007)
- [12] 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
- [13] CAMANHO, P.P., A. FINK, A. OBST, S. PIMENTA. Hybrid Titanium-CFRP laminates for high-performance bolted joints. *Composites Part A* 40:12 (2009) 1826-1837.
- [14] CAÑAS, J., TÁVARA, L., BLÁZQUEZ, A., ESTEFANI, A. AND SANTACRUZ, G. A new in situ peeling test for the characterisation of composite bonded joints. (2018) *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 113, pp.298-310
- [15] CAÑAS, J., L. TÁVARA, A. BLÁZQUEZ, A. ESTEFANI, G. SANTACRUZ. A new in-situ peeling test for the determination of the interlaminar fracture toughness. (2018) *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 113. 10.1016/j.compositesa.2018.07.014.

- [16] CAÑAS, J., L. TÁVARA, A. BLÁZQUEZ, A. ESTEFANI, M.M. CASTRO. Sobre los ensayos de tenacidad a fractura para evaluar la calidad de una unión encolada composite-composite. (2018)
- [17] 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
- [18] 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.
- [19] EN2243-3 (norma ICS 49.025.50); "Aerospace series – Non-metallic materials – Structural adhesives – Test method – Part 3: Peeling test metal honeycomb core". Bruselas.
- [20] 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.
- [21] FRANKLIN, V.A., T. CHRISTOPHER. Fracture Energy Estimation of DCB Specimens Made of Glass/Epoxy: An Experimental Study. *Advances in Materials Science and Engineering*. (2013)
- [22] GLESSNER, A. L., Takemori, M. T., Vallance, M. A., Gifford, S. K., 1989. *Mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional carbon fiber composites using a novel wedge-driven delamination design*. ASTM Special Technical Publications 1012.
- [23] IPS05-01-001-06. "Unidirectional Tape/ 180° Curing Class / Standard Modulus Fibre (268 and 134 g/m²)." AIRBUS. Blagnac, France.
- [24] IPS10-01-006-02. "Structural adhesive systems-Film-Epoxy for composite bonding (135°C performance), 180°C cure. FM 300M and FM 300K." AIRBUS. Blagnac, Francia.
- [25] IPS05-27-002-01. "High Performance Carbon Fibre Reinforced Epoxy Prepeg. Unidirectional Tape/ 180° Curing Class / Intermediate Modulus ." AIRBUS. Blagnac, France.
- [26] ISO, ISO 15024. "Fibre-reinforced plastic composites-determination of mode I interlaminar fracture toughness,  $G_{IC}$  for unidirectionally reinforced materials."
- [27] 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
- [28] 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>
- [29] PARÍS, Federico, 2000. *Teoría de la elasticidad*. Sevilla: Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales.
- [30] PARÍS, Federico y Vladislav MANTIC, 2014. *Mecánica de Sólidos: Mecánica de la Fractura*. Sevilla: Escuela Técnica Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla.
- [31] PARÍS, Federico, et al., 2015. *Introducción al análisis y diseño con materiales compuestos*. Sevilla: Escuela Técnica Superior de Ingenieros, Universidad de Sevilla.
- [32] PARIS, A. J., J. D. GUNDERSON. DCB Test for the interlaminar Fracture Toughness of Composites
- [33] PARÍS, F., J. CAÑAS, A. BLÁZQUEZ, A. ESTEFANI, L. TÁVARA, G. SANTACRUZ. T. Stoven. (2017) Equipo de ensayo para la determinación in situ de la resistencia al pelado de uniones adhesivas. Patente P201730163.
- [34] 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.

- [35] REINOSO, J., A. BLÁZQUEZ, L. TÁVARA, F. PARÍS, C. ARELLANO. Damage tolerance of composite runout panels under tensile loading. *Composites Part B*, 96 (2016) 79-93.
- [36] RENART CANALIAS, J. (2010). *Desarrollo de un nuevo ensayo experimental para la evaluación de la calidad de uniones adhesivas entre componentes estructurales de composite para la industria aeronáutica*. Doctorado. Universitat de Girona.
- [37] SENER, J. Y., FERRACIN, T., CAUSSIN, L., DELANNAY, F., 2002. *On the precision of the wedge-opened double cantilever beam method for measuring the debonding toughness of adhesively bonded plates*. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 22 (2), 129–137.
- [38] STOCCHI, C., P. ROBINSON, S.T. PINHO. A detailed finite element investigation composite bolted joints with countersunk fasteners. *Composites Part A* 52 (2013) 143-150.
- [39] THOULESS, M. D., ADAMS, J. L., KAFKALIDIS, M. S., WARD, S. M., DICKIE, R. A., WESTERBEEK, G. L., 1998. *Determining the toughness of plastically deforming joints*. *Journal of Materials Science* 33, 189–197.
- [40] 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. *Journal of Composite Materials*, Vol. 21 (1987) 330-347
- [41] WILLIAMS, J.G, 1988. "On the calculation of energy release rates for cracked laminates". *International Journal of Fracture* 36:101-119
- [42] WILLIAMS, J.G, 1989. "The Fracture Mechanics of Delamination Test." *Journal of Strain Analysis*. Vol. 24, Nº 4