

Trabajo Fin de Máster

Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica

Estudio de la tenacidad a fractura en uniones de material compuesto no simétricas con un sistema novedoso de pelado

Autor: Antonio Amezcua Sánchez

Tutores: Jesús Justo Estebaranz y María Luisa Velasco López

**Dpto. Mecánica de Medios Continuos y Teoría de
Estructuras**
Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024



Trabajo Fin de Máster
Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica

Estudio de la tenacidad a fractura en uniones de material compuesto no simétricas con un sistema novedoso de pelado

Autor:

Antonio Amezcua Sánchez

Tutores:

Jesús Justo Estebaranz y María Luisa Velasco López

Profesor Titular y Profesora Ayudante Doctor

Dpto. Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras
Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024

Trabajo Fin de Máster: Estudio de la tenacidad a fractura en uniones de material compuesto no simétricas con un sistema novedoso de pelado

Autor: Antonio Amezcua Sánchez

Tutores: Jesús Justo Estebaranz y María Luisa Velasco López

El tribunal nombrado para juzgar el trabajo arriba indicado, compuesto por los siguientes profesores:

Presidente:

Vocal/es:

Secretario:

acuerdan otorgarle la calificación de:

El Secretario del Tribunal

Fecha:

Agradecimientos

Quiero agradecer, en primer lugar, a mis tutores Jesús y María Luisa por su confianza depositada en mí para llevar a cabo este Trabajo de Fin de Máster y por el trato tan cercano y humilde guiándome y enseñándome a lo largo del proyecto.

A Antonio y a Jose Ramón, quienes han estado a pie de cañón desde el primer día y siempre me han ofrecido su ayuda con una sonrisa en la cara.

A mi familia y amigos, por apoyarme en todas las decisiones de mi vida y ser un pilar fundamental y el motivo por el que seguir esforzándome y mejorar siempre profesionalmente y como persona.

A mis compañeros y profesores del Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales, por estar disponibles en todo momento y por acogerme con los brazos abiertos.

A mis compañeros del Máster y del Grado, quienes en mayor o menor medida, me han acompañado a lo largo de este camino.

A mi compañero y amigo Othman, con quien he afrontado las dificultades y celebrado los éxitos desde el primer día.

*Antonio Amezcua Sánchez
Sevilla, 2024*

Resumen

En la actualidad, la presencia de los materiales compuestos en la industria aeronáutica es cada vez más habitual tanto en componentes no estructurales como en aquellos destinados a soportar elevados gradientes de tensión y esfuerzos. Son numerosas las ventajas que convierten a los materiales compuestos en una alternativa real frente a materiales tradicionalmente empleados como los metales. La creciente demanda ha llevado consigo la innovación y el perfeccionamiento de los procesos de fabricación y de los métodos de ensayo. En concreto, la evaluación de la calidad de las uniones encoladas composite-composite supone a día de hoy un reto para la industria en general y para la aviación particularmente. Las consecuencias de una errónea evaluación de estas uniones puede llevar consigo fallos catastróficos y pérdidas económicas y productivas de muy alto nivel.

La calidad de la unión encolada se evalúa a partir de la tasa de liberación de energía liberada al propagar una grieta (G_C). Este parámetro se ha obtenido tradicionalmente mediante la realización de ensayos de tenacidad a fractura interlaminar sobre una probeta que pretende simular las condiciones operacionales del componente real. Popularmente, el cálculo de G_C se obtiene a partir del *Double Cantilever Beam* (DCB). Sin embargo, este no permite ensayar con éxito configuraciones no simétricas (adherentes de distinto espesor) e implica medir la grieta. Nace como alternativa el *Climbing Drum Peel* (CDP) cubriendo ciertas carencias del DCB como la posibilidad de ensayar adherentes de baja rigidez. Sin embargo, ambos comparten el inconveniente de no poder ser llevados a cabo *in situ* sobre la pieza real. Pese a que las condiciones de ensayo puedan ser equiparadas con las condiciones de operación surge la necesidad de un nuevo tipo de ensayo capaz de pelar el componente real para así evitar la mayor incertidumbre posible en los datos. Así es como se crea el *Horizontal Drum Peel* (HDP), una versión portátil del tambor del CDP que permite el pelado directamente sobre la pieza. Si bien, continúa siendo limitado su uso a adherentes con espesores reducidos.

El presente proyecto se centra en el *Horizontal Open Displacement*, una versión mejorada del HDP desarrollada también por el GERM. En concreto, se busca validar mediante una campaña experimental este novedoso y simple método de pelado. Diversos análisis teniendo en el foco el estudio de la tenacidad a fractura interlaminar buscan hacer del ensayo HOD una nueva y valiosa herramienta para la evaluación de la calidad de las uniones encoladas y su posible introducción en la cadena de producción.

Abstract

Currently, the presence of composite materials in the aeronautical industry is increasingly common both in non-structural components and in those intended to withstand high stress and gradients. There are numerous advantages that make composite materials a real alternative to traditionally used materials such as metals. Growing demand has led to innovation and improvement in manufacturing processes and testing methods. Specifically, evaluating the quality of composite-composite bonded joints today represents a challenge for the industry in general and for aviation in particular. The consequences of an erroneous evaluation of these unions can lead to catastrophic failures and very high-level economic and productive losses.

The quality of the bonded joint is evaluated from the release rate of energy released when propagating a crack (G_C). This parameter has traditionally been obtained by performing interlaminar fracture toughness tests on a specimen that aims to simulate the operational conditions of the real component. Popularly, the G_C calculation is obtained from the *Double Cantilever Beam* (DCB). However, this does not allow non-symmetrical configurations (adhesives of different thickness) to be successfully tested and involves measuring the crack. The *Climbing Drum Peel* (CDP) was born as an alternative, covering certain shortcomings of the DCB such as the possibility of testing low-stiffness adherents. However, both share the drawback of not being able to be carried out *in situ* on the real piece. Although the test conditions can be compared with the operating conditions, the need arises for a new type of test capable of peeling off the real component in order to avoid the greatest possible uncertainty in the data. This is how the *Horizontal Drum Peel* (HDP) is created, a portable version of the CDP drum that allows peeling directly on the part. However, its use continues to be limited to adherents with reduced thicknesses.

This project focuses on *Horizontal Open Displacement*, an improved version of the HDP also developed by the GERM. Specifically, we seek to validate this novel and simple peeling method through an experimental campaign. Various analyzes focusing on the study of interlaminar fracture toughness seek to make the HOD test a new and valuable tool for evaluating the quality of bonded joints and their possible introduction into the production chain.

Índice

<i>Resumen</i>	III
<i>Abstract</i>	V
<i>Notación</i>	IX
1 Introducción	1
1.1 Evolución histórica	1
1.2 Materiales compuestos, uniones encoladas y modos de fallo y fractura asociados	4
1.3 Motivación del estudio	7
1.4 Objetivos	8
1.5 Estructura del trabajo	9
2 Análisis del Estado del Arte	11
2.1 Ensayos convencionales para determinar la tenacidad a fractura interlaminar	11
2.1.1 Double Cantilever Beam (DCB)	11
2.1.2 Climbing Drum Peel (CDP)	12
2.2 Sistemas novedosos de pelado	13
2.2.1 Horizontal Drum Peel (HDP)	13
2.2.2 Horizontal Open Displacement (HOD)	14
3 Cálculo analítico de la tenacidad a fractura interlaminar	17
3.1 Cálculo de G_C en el ensayo HOD	17
3.1.1 Demostración matemática	18
3.2 Otros ensayos	21
4 Procedimiento experimental	25
4.1 Descripción del banco de ensayos	25
4.1.1 Módulo de adquisición de datos	31
4.1.2 Células de carga	32
4.2 Calibración	33
4.2.1 Manual	34
4.2.2 Automática	35
4.3 Metodología del ensayo HOD	35
4.4 Desafíos y retos en la experimentación	37
5 Caracterización mecánica del material	41
5.1 Morfología de las probetas a ensayar	41

5.2	Valores de tenacidad a fractura interlaminar obtenidos en investigaciones previas	42
6	Análisis y resultados de la campaña de ensayos HOD	45
6.1	Postprocesado de los resultados	45
6.2	8F+AA+2F	47
6.2.1	Comparación de la tenacidad a fractura interlaminar obtenida con el ensayo DCB	47
6.2.2	Modos de fallo identificados	49
6.2.3	Velocidad de ensayo	50
6.2.4	Estudio de la versatilidad y manejabilidad del ensayo HOD	51
6.3	8F+AA+3F	51
6.3.1	Comparación de la tenacidad a fractura interlaminar obtenida con el ensayo DCB	51
6.3.2	Modos de fallo identificados	53
6.3.3	Velocidad de ensayo	53
6.4	8F+AA+4F	54
6.4.1	Comparación de la tenacidad a fractura interlaminar obtenida con el ensayo DCB	54
6.4.2	Modos de fallo identificados	55
6.4.3	Velocidad de ensayo	56
6.5	8F+AA+5F	56
6.5.1	Comparación de la tenacidad a fractura interlaminar obtenida con el ensayo DCB	56
6.5.2	Modos de fallo identificados	57
6.5.3	Velocidad de ensayo	58
6.6	8F+AA+6F	58
6.6.1	Comparación de la tenacidad a fractura interlaminar obtenida con el ensayo DCB	58
6.6.2	Modos de fallo identificados	60
6.6.3	Velocidad de ensayo	60
6.7	8F+AA+7F	61
6.7.1	Comparación de la tenacidad a fractura interlaminar obtenida con el ensayo DCB	61
6.7.2	Modos de fallo identificados	62
6.7.3	Velocidad de ensayo	63
6.8	8F+AA+8F	63
6.8.1	Comparación de la tenacidad a fractura interlaminar obtenida con el ensayo DCB	63
6.8.2	Modos de fallo identificados	65
6.8.3	Velocidad de ensayo	65
7	Conclusiones, mejoras y líneas de estudio futuras	67
7.1	Conclusiones	68
7.2	Posibles mejoras y líneas de estudio futuras	70
	<i>Índice de Figuras</i>	75
	<i>Índice de Tablas</i>	79
	<i>Bibliografía</i>	81

Notación

G_C	Tenacidad a fractura interlaminar
G_{IC}	Tenacidad a fractura interlaminar en modo I
NDT	Non-Destructive Tests
DCB	Double Cantilever Beam
CDP	Climbing Drum Peel
HDP	Horizontal Drum Peel
HOD	Horizontal Open Displacement
GERM	Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales
U	Energía interna de deformación
a	Longitud de la grieta
A	Área de la curva comprendida entre la curva P- δ
b	Ancho de la probeta
M	Momento flector en el borde de la grieta
EI	Rigidez a flexión
F	Componente fresco
AA	Doble adhesivo

1 Introducción

A lo largo del presente capítulo se describe la evolución de los diferentes materiales utilizados en estructuras aeronáuticas hasta el momento. Se explicará cómo surge la necesidad de hacer uso de los materiales compuestos y de las uniones encoladas y en qué consisten. Adicionalmente, se citarán los objetivos que se desean alcanzar con la realización del proyecto y la manera en que éste ha sido estructurado.

1.1 Evolución histórica

Al comienzo de los tiempos de la aviación la madera era el material por excelencia para la construcción de las primeras aeroestructuras. Si bien, el estallido de la primera guerra mundial tuvo como consecuencia la necesidad de diseñar aeronaves más resistentes y compactas; haciendo uso de diversos metales [1].

En las últimas décadas se ha experimentado un auge en el uso de materiales compuestos. La principal razón es el crecimiento exponencial que ha tenido la industria aeroespacial, donde el peso y la resistencia son factores clave a tener en cuenta. De ahí, el enorme desarrollo llevado a cabo en el diseño y en las técnicas de fabricación empleadas en materiales compuestos puesto que la correcta combinación de los mismos tiene como resultado propiedades de rigidez, rendimiento a alta temperatura, resistencia a corrosión, conductividad o dureza superiores a los metales [2]. Más específicamente, son las propiedades mecánicas específicas de los materiales compuestos las responsables de tal crecimiento. En concreto, la elevada rigidez y resistencia en relación a la densidad de los mismos supera notablemente las aptitudes de materiales metálicos convencionales como el acero o el aluminio. Pese a que inicialmente los materiales compuestos no eran utilizados en componentes sometidos a elevadas cargas estructurales, el paradigma actual ha cambiado gracias a los avances técnicos desarrollados. En la Figura 1.1 se muestra la morfología de las aeronaves de la familia del 747 de la empresa *Boeing*, manifestándose la vasta presencia de los materiales compuestos.

Uno de los campos de mejora más evidente relacionado con la integración de los materiales compuestos en las aeronaves reside en el análisis y evaluación de las uniones encoladas composite-composite. Lograr una disminución de peso y de coste aumentando a su vez la seguridad de las aeroestructuras es el principal objetivo de los ingenieros en la actualidad. Pese a la extensa evolución que han tenido los procedimientos de unión como el remachado o la soldadura, las uniones encoladas siguen necesitando de una confianza adicional para su normal aplicación. Sin embargo, son ya conocidas sus ventajas frente al resto de procedimientos de unión; la posibilidad de unir materiales distintos de pequeño espesor, diseños más ligeros, distribuciones de tensión más uniformes, costes

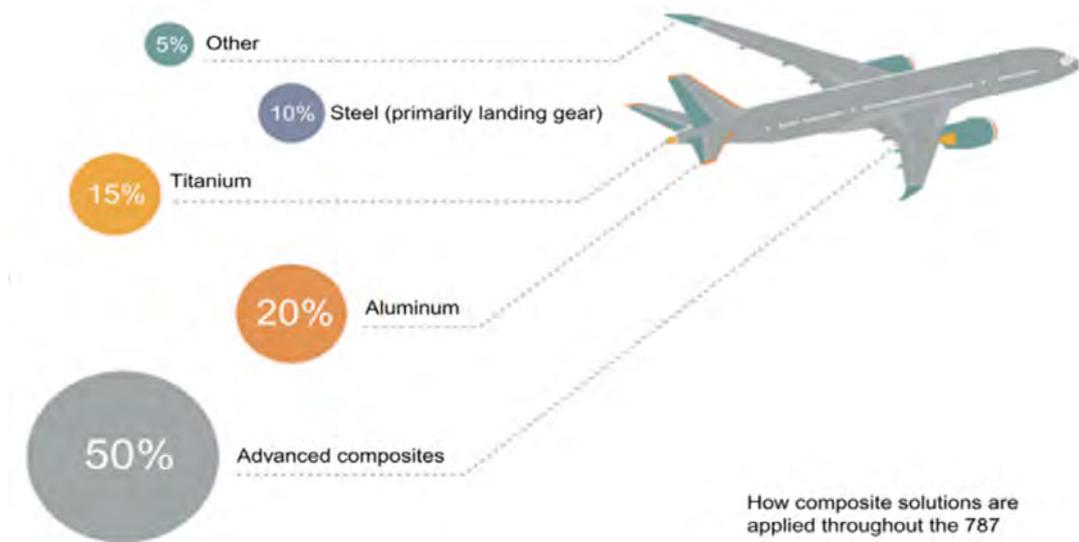


Figura 1.1 Materiales que conforman el *Boeing 747* [3].

de fabricación reducidos, prevención de la corrosión, sellado de huecos o superficies aerodinámicas más pulidas [2]. En cambio, una vez fabricada la pieza, resulta muy difícil inspeccionar la calidad de la unión. Es por ello que aún se continúan realizando estudios acerca de la calidad de las uniones encoladas composite-composite. En la actualidad, atendiendo a los diferentes procesos curado pueden distinguirse los siguientes tipos de uniones encoladas según se muestra en la Figura 1.2:

- Co-curado con y sin adhesivo: tanto el panel como el rigidizador están frescos y el ciclo de curado asociado es el prepreg.
- Co-encolado: uno de los adherentes ha sido previamente curado y el otro fresco. El ciclo de curado asociado es el prepreg.
- Encolado secundario: tanto el panel como el rigidizador están previamente curados y el ciclo de curado asociado es el adhesivo.

Mediante la realización de ensayos no destructivos (NDT) en las uniones encoladas es posible únicamente conocer si las superficies de los adherentes se encuentran en contacto. Sin embargo, la correcta evaluación de la calidad de la unión encolada requiere comprobar si la adhesión es correcta. Esto se traduce en que las autoridades de certificación exigen para este tipo de unión la realización de ensayos mecánicos en probetas de control de proceso [5]. De esta forma, será posible determinar si existe alguna incompatibilidad entre adherente y adhesivo o si se ha producido alguna contaminación durante el proceso de curado; así como si la técnica seleccionada ha sido la correcta.

A día de hoy, la calidad de la unión encolada en la industria aeronáutica se cuantifica a través de la tenacidad a fractura interlaminar dónde se evalúa la energía liberada al propagar una grieta a través de la unión (G_C) [5]. Para determinar el valor de (G_C) se realiza un ensayo de pelado en un espécimen que tiene una grieta previa. Haciendo uso o bien de la carga de pelado aplicada y/o el desplazamiento y/o la longitud de la grieta es posible obtener la energía que se libera por unidad de área al propagar la grieta [6]. Resulta de interés el estudio de la tenacidad a fractura interlaminar porque *a priori*, solo depende del material (adhesivo), del proceso de curado y de la preparación superficial previa al ensayo.

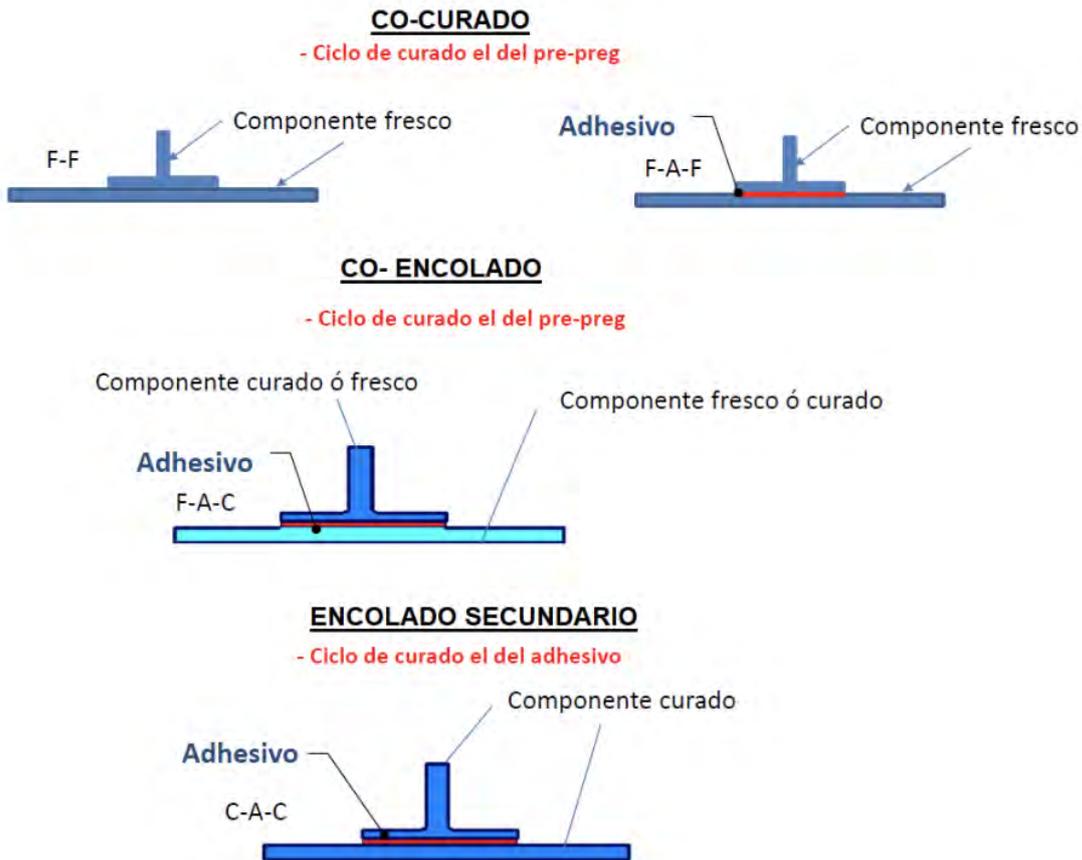


Figura 1.2 Tipos de uniones encoladas en materiales compuestos [4].

La caracterización de los materiales compuestos sobre probetas es solo una pequeña parte de todas las tareas a realizar para asegurar la integridad estructural de los elementos a fabricar con estos materiales [2]. Atendiendo a los ensayos a realizar, se establece la jerarquía que se muestra en la Figura 1.3; así, en la base de esta pirámide se encuentran los ensayos sobre probetas (elementos utilizados en el presente proyecto), mientras que en la parte superior aparecen los ensayos sobre componentes y elementos completos (*full-scale*). El motivo del uso de probetas para caracterizar el material se debe a que permite obtener propiedades y tendencias necesarias para el cálculo de valores admisibles y no admisibles de tensiones y deformaciones. Por otro lado, los ensayos *full-scale* tienen como objetivo comprobar si el componente completo cumple con las especificaciones de operación impuestas [6]. Como es de esperar, el número de ensayos realizados para cada caso son muy diferentes. Mientras que para caracterizar el material se requieren decenas de miles de ensayos, para el caso de ensayos *full-scale* basta con unas pocas unidades.

La realización de ensayos de materiales compuestos sobre probetas en lugar de *full-scale* presenta varias ventajas económicas y prácticas. En primer lugar, las probetas son más económicas de fabricar y manejar en comparación con estructuras a escala completa, lo que reduce significativamente los costos asociados con la experimentación. Además, permiten una mayor flexibilidad en términos de diseño experimental y variables controladas, lo que facilita la exploración de múltiples escenarios y condiciones de carga. También cabe destacar que las probetas son más fáciles de almacenar y transportar, lo que simplifica la logística. En última instancia, el uso de probetas en los ensayos de materiales compuestos puede acelerar el proceso de desarrollo y optimización de productos, lo que conduce a una reducción de los costos y tiempos de producción a largo plazo.

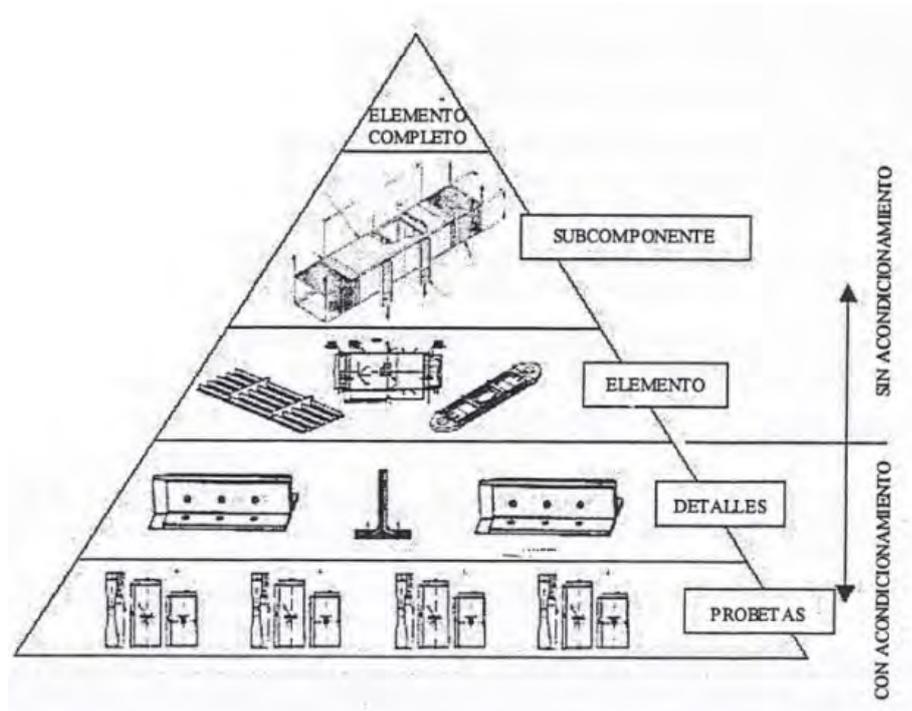


Figura 1.3 Pirámide de ensayos [6].

1.2 Materiales compuestos, uniones encoladas y modos de fallo y fractura asociados

Un material compuesto se puede definir como la combinación a escala macroscópica de dos o más materiales con interfase de separación entre ellos para formar un nuevo material. El propósito es doble, por un lado obtener propiedades que no pueden alcanzarse por ninguno de los materiales actuando aisladamente y por otro lado, combinar las propiedades individuales de cada constituyente en un solo material. Los materiales compuestos reforzados con fibra, constituyen el caso de mayor interés por sus aplicaciones en base a sus excelentes propiedades mecánicas [2].

En el presente proyecto el material compuesto seleccionado está formado por dos componentes fundamentalmente: un refuerzo de fibras de carbono y una matriz polimérica de epoxy, responsable de mantener las fibras unidas y de la transferencia de las cargas. Además, se van a ensayar diferentes configuraciones de uniones encoladas para poder analizar la influencia del apilado en la tenacidad a fractura interlaminar. Dichas uniones estarán realizadas para configuraciones no simétricas en su mayoría.

Cómo ya se ha mencionado con anterioridad, las principales ventajas de los materiales compuestos frente a otros tipos de materiales reside en la alta resistencia y rigidez específica en relación a su peso. De ahí, su elevado interés en estructuras aeronáuticas. Por ello, se precisa conocer los mecanismos de fallo y de daño asociados a los materiales compuestos. En la Figura 1.4 se muestran los cuatro tipos de fallo que pueden presentarse en la realización de los diferentes ensayos:

- Fallo adhesivo. Se da cuando el fallo se produce entre la imprimación y el adhesivo. El adhesivo queda íntegro en uno de los adherentes, no pudiendo desarrollar toda su capacidad portante y generando un fallo prematuro de la unión [6]. Está asociado a defectos en la preparación superficial de los adherentes.

- Fallo intermedio. También conocido como fallo mixto, es una combinación de los diferentes mecanismos de fallo descritos.
- Fallo cohesivo. Se produce como consecuencia de la rotura del adhesivo; quedándose este a ambos lados de los adherentes. Es indicativo de una buena adherencia entre el adhesivo y el sustrato.
- Fallo de sustrato. También conocido como fallo por delaminación es consecuencia de la propagación de la grieta a través de la resina del preimpregnado. Conforme la grieta avanza, se van arrancando fibras del material base laminado. Está originado por las tensiones de pelado.

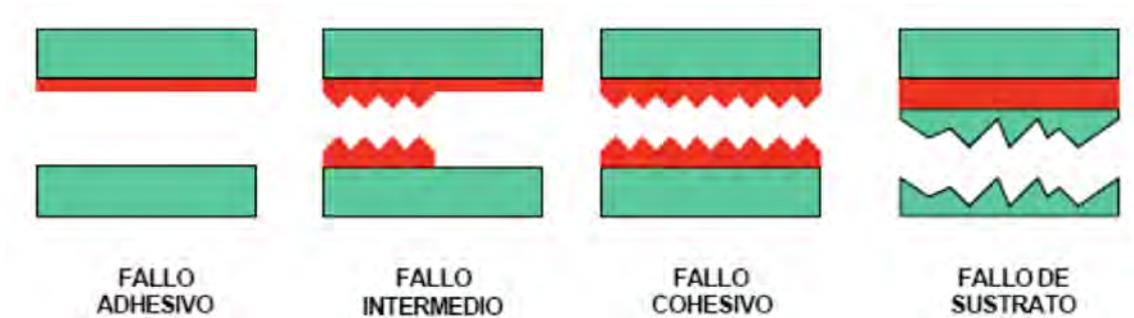


Figura 1.4 Modos de fallo [7].

Los modos de rotura adhesiva son inherentemente impredecibles debido a la complejidad de la interacción entre el adhesivo y las superficies que une. La magnitud de la fuerza de adhesión puede variar significativamente según factores como la limpieza de las superficies, la rugosidad, la temperatura, la humedad y otros factores ambientales. Estos elementos pueden influir de manera impredecible en la capacidad del adhesivo para mantener una unión. Por ello, el fallo adhesivo es el más indeseable por ser incontrolable. A pesar de esta imprevisibilidad en los modos de rotura adhesiva, se pueden realizar estudios y pruebas para comprender mejor las características mecánicas del adhesivo. Mediante pruebas de tracción, cizallamiento, flexión u otros métodos, es posible determinar las propiedades cohesivas del adhesivo para soportar diferentes tipos de esfuerzos. Por ello, el fallo más deseable es el cohesivo. En cuanto al fallo de sustrato o delaminación, esta se origina por tensiones entre láminas y cizallamiento que surgen debido a diversos factores, como los efectos en los bordes libres, discontinuidades estructurales o fallos durante la fabricación. A continuación se muestran en la Figura 1.5 algunos de los modos de fallo identificados previamente descritos durante la realización de los ensayos del presente caso de estudio.

Con esta comprensión de las propiedades mecánicas del adhesivo, es posible predecir las cargas a las que se producirá la rotura bajo diferentes tipos de esfuerzos. Siendo necesario caracterizar los diferentes modos de propagación de grieta para conseguir una descripción completa de la resistencia a la fractura interlaminar. En la Figura 1.4 se muestran los posibles modos de fractura.

- Modo I (modo de abertura). Corresponde al modo normal de separación de las caras de la grieta bajo la acción de tensiones normales.
- Modo II (modo de deslizamiento). Se refiere al desplazamiento de los labios bajo la acción de tensiones de corte perpendiculares al frente de grieta.
- Modo III (modo de desgarre). También se produce por deslizamiento y cizalladura de los labios de la fisura, en una dirección paralela al frente de grieta [8].



Figura 1.5 Modos de fallo identificados durante la realización de los ensayos del presente caso de estudio.

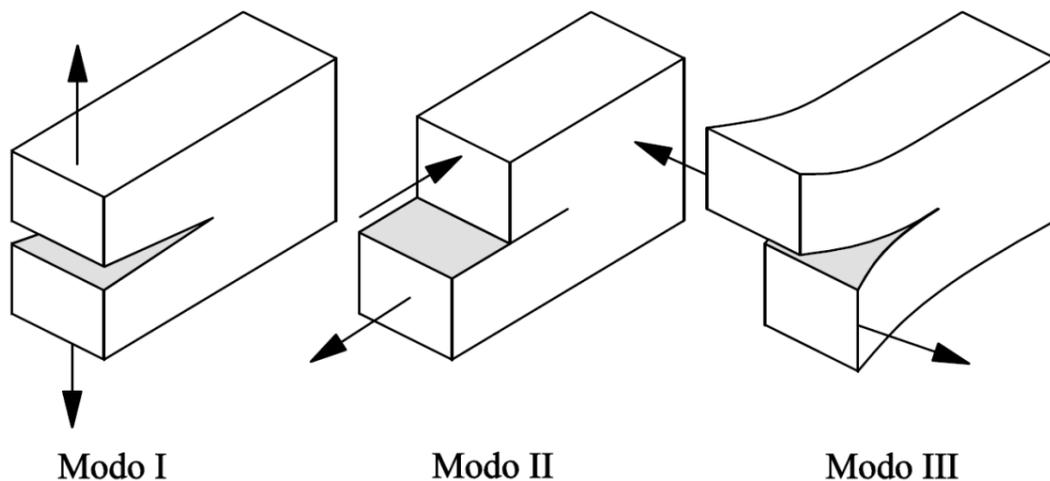


Figura 1.6 Modos de fractura. [8].

Los modos de fractura pueden ocurrir de forma individualizada o de forma combinada. Para el caso de laminados simétricos, se pretende que la propagación de la grieta sea en modo I en todos los ensayos a realizar. La razón de esto es la facilidad a la hora de calcular experimentalmente la tenacidad a fractura en dicho modo de manera relativamente sencilla. Para laminados no simétricos es necesario hacer uso de una serie de hipótesis que serán explicadas más adelante.

La amplia adopción de materiales compuestos en las estructuras primarias de aeronaves, junto con el creciente uso de uniones encoladas composite-composite en lugar de las uniones mecánicas, destaca la importancia de comprender a fondo cómo estas uniones se comportan ante fuerzas que podrían causar la separación de las partes unidas. Es esencial, tanto para los diseñadores como para garantizar la calidad en la producción, evaluar la eficacia de las uniones encoladas y obtener parámetros que describan su resistencia mecánica frente a la fractura. Aunque se ha investigado ampliamente el comportamiento de las estructuras metálicas, todavía existen incertidumbres en lo que respecta a las uniones entre laminados de material compuesto y adhesivos. Por consiguiente, este estudio tiene como objetivo avanzar en la caracterización de las uniones encoladas composite-composite mediante la realización de ensayos experimentales.

1.3 Motivación del estudio

Un componente estructural aeronáutico muy común son los paneles rigidizados que incluyen una piel reforzada mediante la adición de un conjunto de larguerillos (rigidizadores) que suelen estar pegados [5]. Para determinar la calidad de la unión debe llevarse a cabo el control de proceso descrito en la Figura 1.7, compuesto por:

- Preparación de una muestra simétrica tanto del larguerillo (Semipanel A) como de la piel.
- Preparación de una muestra no simétrica tanto del larguerillo (Semipanel A) como de la piel.
- Integración de larguerillos y pieles (encolado larguerillos-piel) y recorte de una muestra [6].

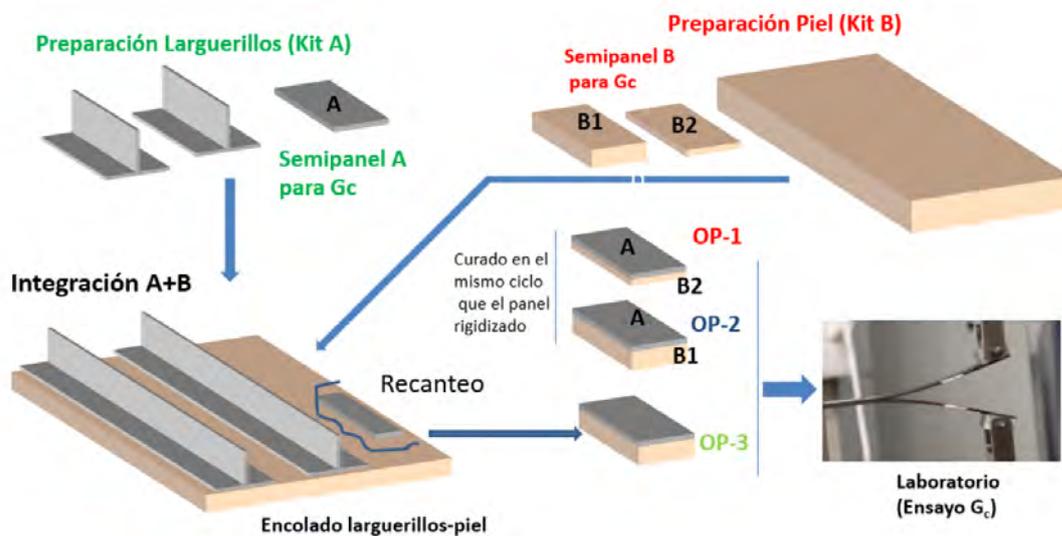


Figura 1.7 Control de proceso actual [4].

Los ensayos de tenacidad a la fractura interlaminar (G_c) utilizados con mayor frecuencia en la actualidad para cuantificar la calidad de la unión adherida son el *Double Cantilever Beam* (DCB) y el *Climbing Drum Peel* (CDP). Ambos presentan una serie de desventajas. En primer lugar, es necesario recortar las probetas una vez fabricadas para poder ser enviadas al laboratorio y ser ensayadas. Esto deriva en tiempos de producción elevados y pérdidas económicas. En segundo lugar, ninguno de estos dos tipos de ensayos permiten la ejecución *in situ* de los mismos. Es decir, el ensayo no es llevado a cabo sobre la pieza real, sino sobre unas probetas que supuestamente están en las mismas condiciones que las piezas reales. En la realidad, estas probetas no representan de forma fidedigna el comportamiento del componente real, por lo que los resultados arrojados con estos ensayos no permiten la caracterización adecuada de la calidad de la unión.

Precisamente, como consecuencia de las desventajas previamente descritas de los ensayos DCB y CDP surge la motivación del presente trabajo: disponer de un tipo de ensayo que no requiera el recorte de las muestras y pueda realizarse *in situ*. Este escenario se representa en la Figura 1.8. En futuras secciones, se explicará en profundidad el abanico de posibilidades existentes para la realización de este tipo de ensayo.

En la última década el Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales (GERM) ha desarrollado y conseguido validar dos nuevos tipos de ensayos de tenacidad a la fractura interlaminar. Primero

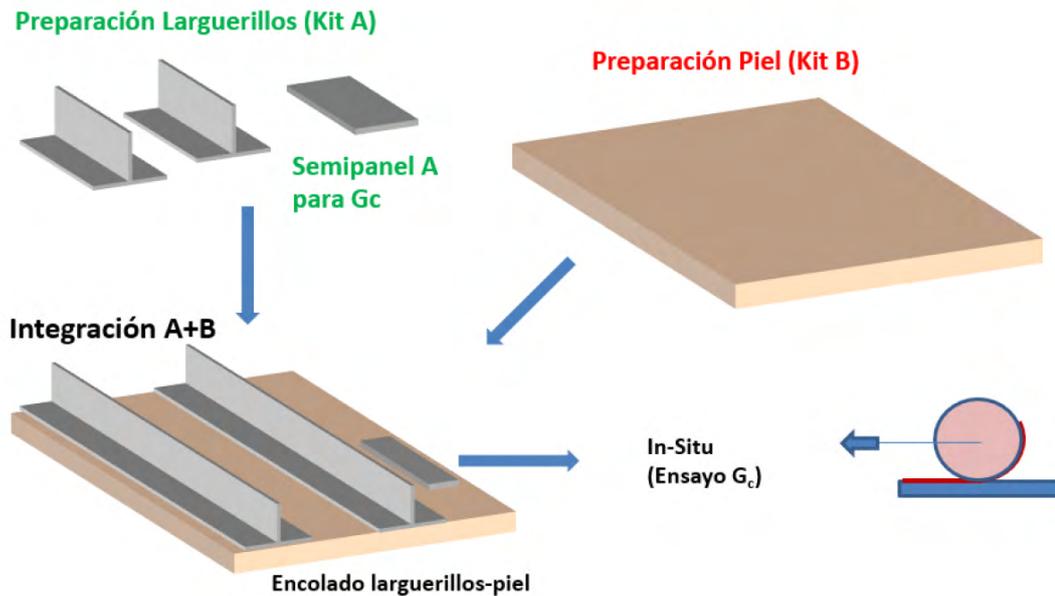


Figura 1.8 Control de proceso deseado [4].

fue el *Horizontal Drum Peel* (HDP) [5][4] y posteriormente el *Horizontal Open Displacement* (HOD) [4] [9].

El foco de este proyecto se centra en el ensayo HOD; ya que permite su realización *in situ* por parte de operarios poco cualificados con un tiempo de postprocesado de resultados bajo. La introducción de este tipo de ensayo en la cadena de producción de la pieza en cuestión arroja resultados esperanzadores. Sin embargo, presenta un importante inconveniente a tener en cuenta: requiere que las probetas estén completamente fijadas a la mesa de trabajo. Es cierto que años atrás se planteó la posibilidad de utilizar un adhesivo como el X-60, pero esto implicaría pegar y despegar cada una de las probetas a ensayar, complicando su integración en la cadena de producción. Por todo ello, este proyecto pretende buscar alternativas más factibles para fijar las probetas a la mesa de trabajo.

1.4 Objetivos

El objetivo principal del proyecto es la puesta a punto del ensayo HOD y su posterior validación. Si bien, teniendo en consideración lo descrito anteriormente, los objetivos secundarios de este estudio son:

- Caracterización mecánica de los materiales empleados
- Cálculo analítico de la tenacidad a fractura interlaminar mediante el ensayo HOD.
- Determinación de la tenacidad a fractura interlaminar mediante el ensayo HOD.
- Postprocesado de los resultados obtenidos. Comparación con otro tipo de ensayos y validación del ensayo HOD.
- Nuevas propuestas de mejora para ensayos futuros.

Se comenzará describiendo las decisiones de diseño tomadas y los aspectos más relevantes del proceso de producción. Se hará hincapié en cómo afecta a la calidad de la unión encolada la configuración del laminado. Se seleccionarán series con diferentes apilados y espesores para

ver la influencia que tiene en los resultados obtenidos. Por otro lado, se describirá en profundidad la metodología seguida en el laboratorio. Recogiendo las técnicas de fabricación y prácticas de laboratorio necesarias para la exitosa obtención de resultados. En todo momento se hará uso de las normativas pertinentes para la obtención de los parámetros de interés. Finalmente, se analizará cómo ha mejorado el ensayo HOD con la introducción de una nueva técnica para fijar las probetas a la mesa de trabajo respecto a las alternativas pasadas. Esto, permitirá disponer de una visión general de la campaña de ensayos HOD y su posterior comparación con los ensayos ya existentes. Por último, se presentarán las conclusiones más relevantes del proyecto que darán paso a líneas de estudio futuras del trabajo en cuestión.

1.5 Estructura del trabajo

El estudio se ha dividido en seis capítulos y varios anexos:

Capítulo 1: Introducción

En este capítulo se resumen las principales características que justifican el uso de materiales compuestos en la industria aeronáutica y el auge experimentado en los últimos años. Además, se aporta una descripción de las uniones encoladas, su importancia y los ensayos actualmente disponibles para verificar su calidad, destacando sus ventajas e inconvenientes.

Se divide en las subsecciones: 1.1 Evolución histórica, 1.2 Materiales compuestos, uniones encoladas y modos de fallo y fractura, 1.3 Motivación del estudio, 1.4 Objetivos y 1.5 Estructura del trabajo.

Capítulo 2: Análisis del Estado del Arte

En este capítulo se ofrece una visión general de proyectos pasados que abordaron el estudio de la calidad de las uniones encoladas mediante la realización de ensayos de la tenacidad a fractura interlaminar. Esto permite contextualizar y ubicar el proyecto en cuestión, establecer las necesidades de estudio y las vías de investigación a seguir.

Se divide en las subsecciones: 2.1 Ensayos convencionales para determinar la tenacidad a fractura interlaminar y 2.2 Sistemas novedosos de pelado.

Capítulo 3: Cálculo analítico de la tenacidad a fractura interlaminar

En este capítulo se desarrollan las leyes y ecuaciones que rigen el cálculo de la tenacidad a fractura interlaminar en el ensayo HOD.

Incluye, en primer lugar, el cálculo de la tenacidad a fractura interlaminar para el ensayo HOD. Paralelamente, se demuestra matemáticamente y se justifican las hipótesis asumidas para la obtención de la expresión final. Finalmente se realiza un breve recorrido por el cálculo analítico de la tenacidad a fractura interlaminar para el resto de ensayos.

Capítulo 4: Procedimiento experimental

En este capítulo se explica detalladamente lo realizado en la campaña de ensayos. Por ello, se recoge información desde la configuración de los equipos y su morfología hasta la metodología

empleada en la realización de los ensayos. Se concluye citando las adversidades más notables encontradas en la realización del proyecto.

Capítulo 5: Caracterización mecánica del material

Este capítulo tiene como objetivo explicar el proceso de caracterización mecánica del material que será utilizado en la fabricación de las probetas que serán a *posteriori* ensayadas.

Se divide en las subsecciones: 5.1 Morfología de las probetas a ensayar y 5.2 Valores de tenacidad a fractura interlaminar obtenidos en investigaciones previas.

Capítulo 6: Análisis y Resultados de la campaña de ensayos HOD

En este capítulo se muestran y se analizan los resultados obtenidos en la campaña de ensayos HOD haciendo uso del nuevo método de fijación. A continuación, se compararán con investigaciones predecesoras para poder así validar el estudio. Además, se discutirán ensayos adicionales realizados sobre muestras con el fin de conocer mejor el ensayo HOD.

Cada configuración se corresponde con una sección diferente. Se divide cada sección en las subsecciones: Comparación de la tenacidad a fractura interlaminar obtenida con el ensayo DCB, Modos de fallo identificados y Velocidades de ensayo.

Capítulo 7: Conclusiones, mejoras y líneas de estudio futuras

En este capítulo se recogen las conclusiones más importantes del estudio. Por un lado, se hará una crítica cualitativa del estudio teniendo en cuenta los objetivos inicialmente planteados. Por otro lado, se discutirán las posibles fuentes de mejora y los horizontes a alcanzar en futuras investigaciones. Se explicarán las limitaciones encontradas durante la realización del proyecto y cómo podrían ser abordadas. Esto permitirá profundizar aún más en el estudio en cuestión abriendo nuevas vías de desarrollo de ensayos de pelado.

Se divide en las subsecciones: 7.1 Conclusiones y 7.2 Posibles mejoras y líneas de estudio futuras.

2 Análisis del Estado del Arte

En el presente capítulo se ofrece una visión general de los ensayos de tenacidad a fractura interlaminar tradicionalmente utilizados para la evaluación de la calidad de las uniones encoladas. A su vez, se presentan los nuevos sistemas de pelado que continúan en desarrollo; así como sus principales ventajas.

2.1 Ensayos convencionales para determinar la tenacidad a fractura interlaminar

2.1.1 Double Cantilever Beam (DCB)

Tal y cómo se explicó en secciones anteriores, se pretende que la propagación de la grieta sea en modo I en todos los ensayos a realizar. Para este modo, el cálculo de la tenacidad a fractura interlaminar (G_{IC}) se simplifica al depender, *a priori*, únicamente del material (adhesivo), de la preparación superficial y del proceso de curado. Dicha propiedad es obtenida mediante la realización de un ensayo de pelado en un espécimen que tiene una grieta previa. Haciendo uso o bien de la carga de pelado aplicada y/o el desplazamiento y/o la longitud de la grieta es posible obtener la energía que se libera por unidad de área al propagar la grieta [6].

En la actualidad, el ensayo sobre probetas más extendido es el *Double Cantilever Beam* (DCB) [10] [11] [12]. Puede ser utilizado tanto para la determinación de la tenacidad a fractura interlaminar ante la presencia de una grieta propagándose entre dos láminas de material compuesto o para determinar la tenacidad de un adhesivo cuando la grieta se propaga entre dos laminados unidos con dicho adhesivo. En ambos casos, la tenacidad a fractura interlaminar se calcula en términos de la tasa de liberación de energía (G). Además, considerando la propagación de la grieta por el plano de simetría se cumple que $G_{IC} = G_C$. En la Figura 2.1 se representa el ensayo DCB mostrando las variables de interés.

Pese a la facilidad de ejecución de este tipo de ensayo, posee numerosas desventajas a tener en cuenta. En primer lugar, se requiere medir la longitud de la grieta. Esto supone un problema ya que existe una gran incertidumbre en esta medición, e incluso su determinación puede resultar muy complicada o imposible [13]. En segundo lugar, según las normas, sólo puede realizarse en configuraciones simétricas y cuando los espesores de los adherentes estén comprendidos entre 1.5 [mm] y 2.5 [mm]. Para el caso de espesores menores, se debe tener en cuenta la teoría de los grandes desplazamientos. La norma ASTM [11] propone varias correcciones para tener en cuenta no sólo el efecto de los grandes desplazamientos, sino también el efecto introducido por los bloques de carga.

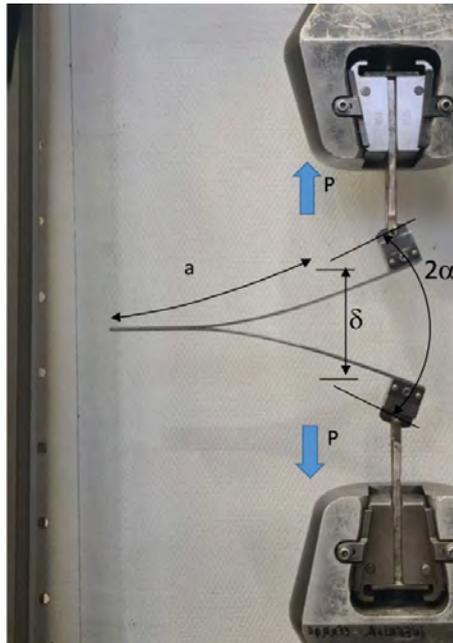


Figura 2.1 Ensayo *Double Cantilever Beam* (DCB) [13].

Además, como ya se comentó con anterioridad, el ensayo DCB no puede ser ejecutado *in situ* sobre el componente real. Este ensayo ha sido ampliamente estudiado en [9] [14] [13] [15].

2.1.2 Climbing Drum Peel (CDP)

Una alternativa al ensayo DCB es el denominado *Climbing Drum Peel* (CDP). Este ensayo fue concebido 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 [16]. El ensayo consiste en enrollar un laminado flexible (que se despega al mismo tiempo que se enrolla) mediante un tambor de dos radios diferentes ($r_2 > r_1$). El laminado se fija al tambor por su parte central que tiene radio r_1 . Las partes exteriores (bordes) del tambor (con mayor radio, r_2) incluyen dos correas de carga que aplicarán el torque requerido para la progresión del tambor a lo largo de la probeta. Los extremos de las correas de carga se fijan en la parte inferior de una máquina de ensayo universal, mientras que el extremo no agrietado de la probeta se fija a las mandíbulas superiores de la máquina. Una vez colocada la probeta, la cruceta superior de la máquina se mueve hacia arriba provocando que el laminado flexible entre en contacto (enrolle) con la parte interna del tambor. Luego, el tambor “trepa” a lo largo de la muestra propagando la zona inicial prefisurada mientras los laminados flexibles se enrollan [5]. En la Figura 2.2 se muestra el ensayo CDP y un esquema del mismo con las variables más relevantes, respectivamente.

El ensayo CDP presenta una serie de ventajas frente al DCB. En primer lugar, no requiere medir la grieta. Además, es válido para configuraciones no simétricas y con espesores pequeños. En cuanto a las limitaciones que posee el ensayo CDP se destacan la imposibilidad de realizar el ensayo *in situ* y que no admite probetas de espesores grandes. Adicionalmente, la tenacidad a fractura interlaminar que se evalúa en dicho ensayo no es la asociada al modo I; sino que existe cierta superposición entre diferentes modos de rotura como consecuencia de posibles deslizamientos relativos en la interfaz entre el laminado a pelar y el resto de la probeta [6].

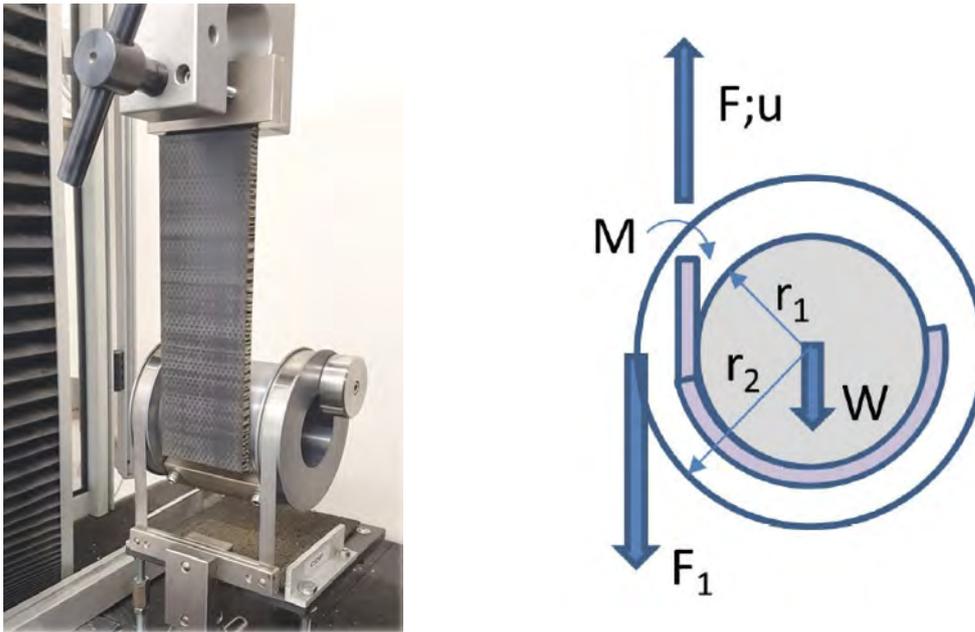


Figura 2.2 Ensayo *Climbing Drum Peel* (CDP) [16][17].

2.2 Sistemas novedosos de pelado

Tanto el ensayo DCB como el CDP son universalmente aceptados para la determinación de la tenacidad a fractura interlaminnar en uniones encoladas. Pese a ello, cuentan con una serie de limitaciones que impulsaron al GERM al desarrollo de dos nuevos tipos de sistemas de pelado. Las principales limitaciones que tienen son la necesidad de medir la posición del vértice de la grieta (DCB) y la imposibilidad de realizarse *in situ* sobre el componente real. Estas, influyen directamente en el proceso productivo, en los tiempos de entrega y en los costes asociados.

2.2.1 Horizontal Drum Peel (HDP)

El *Horizontal Drum Peel* (HDP, Patente N° 201730163) fue desarrollado por el GERM y el primer ensayo en satisfacer con éxito las carencias de los ensayos DCB y CDP. Se trata de un sistema capaz de aplicar directamente sobre el tambor un par de rotación a través de una célula de carga (en este caso de torsión) y calcular la tenacidad a fractura interlaminnar en función de los momentos de pelado, los momentos de liado y las dimensiones de la probeta y el tambor. Cabe destacar que la tenacidad a fractura evaluada no se corresponde al modo I de fractura. Es decir, existe cierta mixicidad, aunque en general es baja. El principal inconveniente es que este ensayo no puede ser utilizado para adherentes con espesores grandes [6]. En la Figura 2.3 se muestra el ensayo HDP y un esquema del mismo con las variables más relevantes, respectivamente.

Las primeras investigaciones y simulaciones numéricas sobre el HDP tuvieron como objetivo determinar la influencia de parámetros tales como la rigidez y configuración de las láminas o las propiedades del adhesivo. También se analizó el comportamiento de las probetas durante el ensayo, la correcta fijación del tambor, la capacidad de la célula de torsión y la potencia del motor [18]. Investigaciones posteriores proporcionarían el alcance de este tipo de ensayo [9] [15].

El primer modelo del HDP fue recibido con éxito en el sector, lo que subraya su relevancia y utilidad. Sin embargo, se identificó la necesidad de evolucionar el diseño original en base a dos aspectos principales: la reducción de peso y la mejora de la adaptabilidad del dispositivo. La

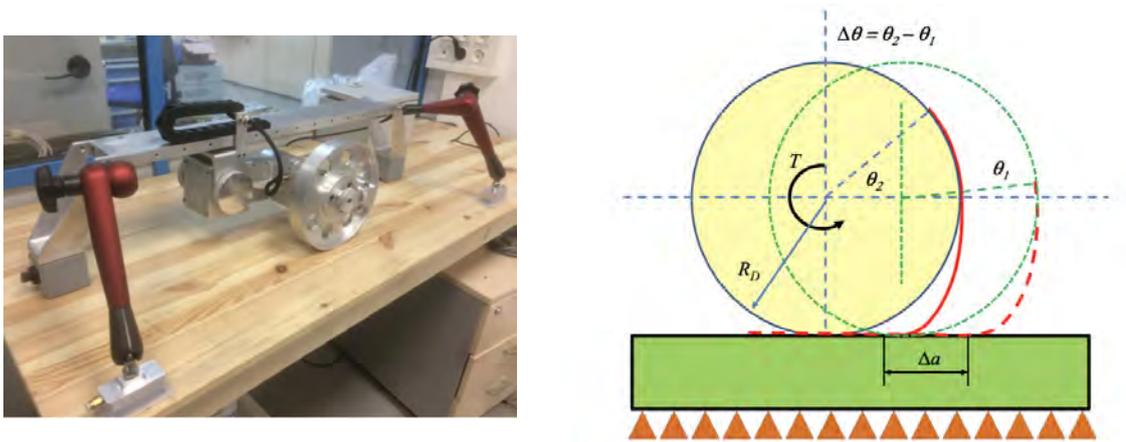


Figura 2.3 Ensayo *Horizontal Drum Peel* (HDP) [5].

reducción de peso es crucial para hacer que el HDP sea más fácil de transportar y manipular, lo que aumenta su accesibilidad y conveniencia. Además, se busca mejorar la adaptabilidad del dispositivo para permitir su uso en una variedad de posiciones y entornos de prueba.

2.2.2 Horizontal Open Displacement (HOD)

El *Horizontal Open Displacement* (HOD) fue desarrollado por el GERM poco tiempo después que el ensayo HDP. El objetivo era el desarrollo de un segundo dispositivo de pelado que cubriese las necesidades del HDP y mantuviese las ventajas frente a los ensayos convencionales (DCB y CDP). Al igual que el ensayo HDP, este nuevo novedoso sistema de pelado debe poder realizarse *in situ* sobre la pieza real y con la mayor facilidad y en el menor tiempo posible para no alterar la cadena de producción del componente en cuestión. Es decir, su ejecución debe ser sencilla para el operario y el postprocesado de los resultados debe ser mínimo. En definitiva, operarios poco cualificados deberían ser capaces de llevar a cabo el ensayo con éxito. El manejo del dispositivo y el *software* utilizado para su interpretación serán explicados en secciones posteriores.

El ensayo HOD cuenta con un rodillo que se mueve entre los dos adherentes, registrando conforme avanza la fuerza necesaria para mover el rodillo mediante una célula de carga. Por tanto, se realiza *in situ* sobre la pieza real y permite obtener directamente la fuerza de pelado. En la Figura 2.4 se muestra el ensayo HOD y un esquema del mismo con las variables más relevantes, respectivamente.



Figura 2.4 Ensayo *Horizontal Open Displacement* (HOD) [4].

Los primeros estudios se basaron en simulaciones numéricas sobre el HOD, para así, poder demostrar la validez analítica del modelo [5]. *A posteriori* se realizó una campaña experimental para comprobar los resultados obtenidos, comparándolos con el ensayo de referencia CDP y el HDP [9].

Adicionalmente, en [4] se abordarían aspectos relacionados tanto con los ensayos convencionales como con los nuevos sistemas de pelado. En el ensayo DCB se estudió el efecto de los sistemas de aplicación de carga (configuración simétrica y no simétrica), el estudio de configuraciones no simétricas, así como consideraciones sobre el modelo cohesivo y las simulaciones numéricas [6]. Para el caso del ensayo CDP se analizó la influencia del diámetro del tambor tanto para cinta unidireccional como para tejido. Finalmente, para el ensayo HDP también se comprobó el efecto del diámetro del tambor y la mixicidad en el cálculo de la tenacidad a fractura.

Con el fin de disponer de una idea genérica de las características de cada uno de los ensayos, se muestra en la Figura 2.5 los puntos a destacar y las carencias de cada uno de ellos.

	DCB	CDP	HDP	HOD
No hay que medir la grieta	✗	✓	✓	✓
Vale para configuraciones no simétricas (h_1, h_2)	✗	✓	✓	✓
Vale para pequeños desplazamientos ($h > 1$ mm)	✓	✗	✗	✓
Vale para grandes desplazamientos ($h < 1$ mm)	✗	✓	✓	✓
Se puede realizar in-situ sobre la pieza real	✗	✗	✓	✓

Figura 2.5 Comparación entre los diferentes tipos de ensayos [4].

Sin embargo, a día de hoy, no existen estudios en profundidad de los parámetros que condicionan el *Horizontal Open Displacement* (HOD) y los resultados obtenidos. Precisamente es aquí dónde reside el interés del presente proyecto: análisis y evaluación de variables del ensayo tales como el método de fijación y la posibilidad de ensayar diferentes espesores y configuraciones.

3 Cálculo analítico de la tenacidad a fractura interlaminar

La tenacidad a fractura interlaminar en términos generales (G_C) o en modo I (G_{IC}) es una propiedad que solo depende de la combinación adhesivo-sustrato, de la preparación superficial y del proceso de curado. De forma experimental, se obtiene 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 [19]. Como se ha mencionado con anterioridad, los ensayos habitualmente empleados para su determinación son los convencionales: DCB y CDP. Sin embargo, la necesidad de poder realizar los ensayos *in situ* ha conducido al desarrollo de nuevos ensayos: HDP y HOD.

3.1 Cálculo de G_C en el ensayo HOD

Se trata del tipo de ensayo que se ha utilizado en el presente proyecto. Como se ha explicado con anterioridad, tiene como objetivo facilitar el procedimiento para calcular la tenacidad a fractura interlaminar lo máximo posible (más aún que el ensayo HDP). Además, permite la realización *in situ* del ensayo sobre la pieza real, pelando la piel con la ayuda de un rodillo que se mueve entre los dos adherentes de la muestra registrando la fuerza necesaria para mover el conjunto (fuerza de pelado). A continuación, se expone el modelo numérico desarrollado en [19] que permitió validar analíticamente el ensayo HOD.

Se comienza definiendo la energía de pelado (ΔU) a partir de la fuerza que el rodillo requiere para avanzar según la Ecuación 3.1.

$$\Delta U = F \cdot \Delta u \quad (3.1)$$

Como el ángulo α visible en la Figura 3.1 permanece invariable con el movimiento del rodillo permite llegar a la conclusión de que:

$$\Delta u = \Delta a$$

A su vez, atendiendo a la definición general de la tenacidad a fractura interlaminar visible en la Ecuación 3.2:

$$G_C = \frac{\Delta U}{b \cdot \Delta a} \quad (3.2)$$

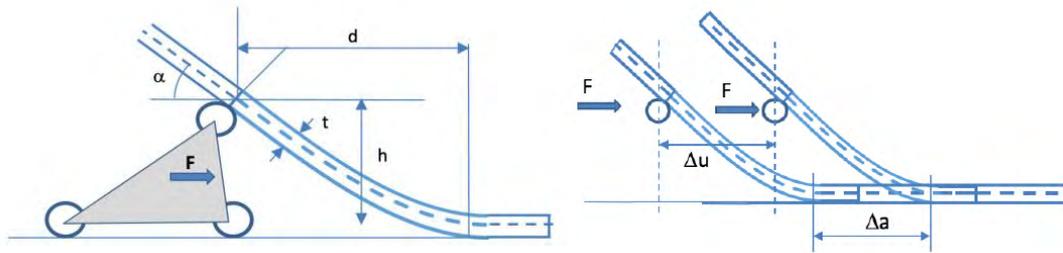


Figura 3.1 Variables del ensayo HOD [20].

Es posible establecer que la tenacidad a fractura interlaminar G_C en el ensayo HOD solo depende de la fuerza necesaria para hacer avanzar el rodillo y del ancho de la probeta, como se muestra en la Ecuación 3.3. Es decir, G_C es independiente del útil de arrastre y de los parámetros relacionados con él; como el diámetro del rodillo, la separación del rodillo respecto al adherente rígido, etc.

$$G_C = \frac{F}{b} \quad (3.3)$$

3.1.1 Demostración matemática

A continuación se procede a la resolución analítica y se detallan las hipótesis asumidas que permiten llegar a la Ecuación 3.3. Se hace uso de la teoría de grandes desplazamientos en la que:

- El borde de la grieta se considera empotrado, es decir, que las secciones de las dos semiprobetas en el borde de la grieta no giran [6].
- Las deformaciones asociadas a los esfuerzos axiales y cortantes se desprecian frente a la flexión.
- Solo se considera relevante el momento flector a efectos de curvatura
- Se considera nula la deformación por flexión en la zona amarrada al banco de ensayos.

En la Figura 3.2 se muestra el esquema completo y las variables que serán utilizadas para el estudio analítico del ensayo HOD.

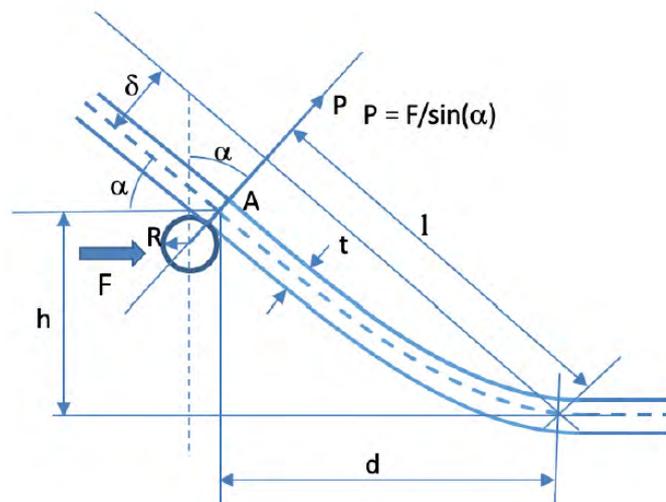


Figura 3.2 Estudio analítico del HOD [20].

Se parte de la definición de curvatura elástica de una viga visible en la Ecuación 3.4.

$$\frac{1}{R} = \frac{M}{E \cdot I} \quad (3.4)$$

Dónde R hace referencia al radio del rodillo, M al momento generado, E al módulo de Young del material del carrito e I a la inercia. Adicionalmente, teniendo en cuenta que:

$$R = \frac{ds}{d\phi}$$

$$\frac{ds}{dx} = \frac{1}{\cos \phi}$$

$$\frac{dv}{dx} = \tan \phi$$

$$M = P \cdot x$$

A su vez, se representa en la Figura 3.3 la definición del momento que permite visualizar los diferenciales existentes en el carrito de pelado del ensayo HOD.

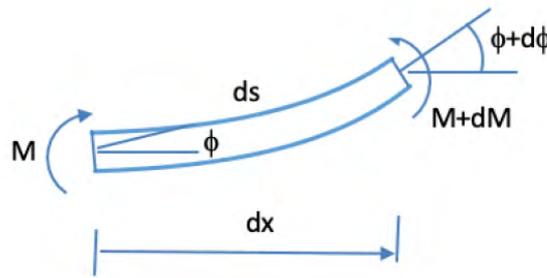


Figura 3.3 Definición del momento en la muestra [20].

El radio del rodillo R puede caracterizarse dando como resultado la Ecuación 3.5.

$$R = \frac{dx}{d\phi} \cdot \frac{1}{\cos \phi} = \frac{E \cdot I}{P} \cdot \frac{1}{x} \quad (3.5)$$

Despejando, igualando e integrando desde 0 hasta la posición final alcanzada como consecuencia del avance del rodillo, es posible obtener de la Ecuación 3.5 una expresión para el desplazamiento longitudinal x (véase Ecuación 3.6).

$$\int_0^x x dx = \int_0^\phi \cos \phi d\phi \rightarrow x = \sqrt{\frac{2 \cdot E \cdot I}{P} \cdot \sqrt{\sin \phi}} \quad (3.6)$$

Sustituyendo la Ecuación 3.6 en la Ecuación 3.5 se llega a una expresión final para R (véase Ecuación 3.7).

$$R = \sqrt{\frac{E \cdot I}{2 \cdot P}} \cdot \frac{1}{\sqrt{\sin \phi}} \quad (3.7)$$

A su vez es posible establecer una relación para la curvatura que experimenta la probeta a ensayar en su vértice (δ) haciendo uso del cortante con la Ecuación 3.8

$$\delta = \int_0^\alpha dv = \int_0^\alpha R \cdot \sin \phi d\phi = \sqrt{\frac{E \cdot I}{2 \cdot P}} \cdot \int_0^\alpha \sqrt{\sin \phi} d\phi \quad (3.8)$$

De igual forma, la longitud por la que avanza la grieta l puede calcularse con la Ecuación 3.9

$$l = x(\alpha) = \sqrt{\frac{2 \cdot E \cdot I}{P}} \cdot \sqrt{\sin \alpha} \quad (3.9)$$

Estas variables se muestran en la Figura 3.4.

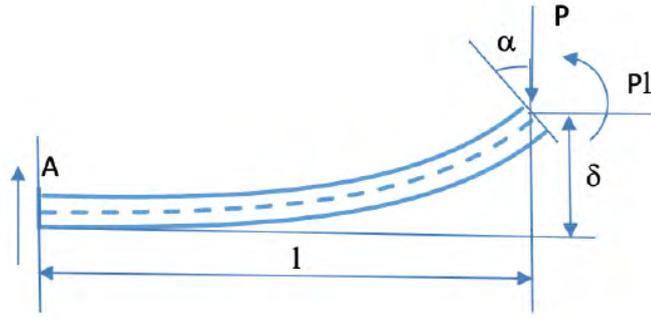


Figura 3.4 Desarrollo matemático HOD [20].

Con todo ello y atendiendo a la definición general de la Ecuación 3.2, la tenacidad a fractura interlaminar en el ensayo HOD vendrá dada por la Ecuación 3.10. Téngase en cuenta que se han sustituido las expresiones previamente descritas y que el momento flector calculado en el borde de la grieta M se corresponde al momento crítico, que es el responsable del despegue de la piel por rotura del adhesivo.

$$G = \frac{M^2}{2 \cdot B \cdot E \cdot I} = \frac{P^2 \cdot l^2}{2 \cdot B \cdot E \cdot I} = \frac{P \cdot \sin \alpha}{B} = \frac{F}{B} \quad (3.10)$$

Por otro lado, considerando que la fuerza de pelado aplicada F es dato, es posible conocer los esfuerzos en el vértice de la grieta, como se muestra en la Figura 3.6.



Figura 3.5 Esfuerzos en el vértice de la grieta [20].

Adicionalmente, el ángulo de curvatura α puede ser calculado resolviendo la Ecuación 3.13 teniendo en cuenta que la inercia de la probeta considerando su curvatura I_δ sigue la Ecuación 3.11 y que h puede expresarse según la Ecuación 3.12 donde H , R , t y F son datos.

$$I_\delta = \int_0^\alpha \sqrt{\sin \phi} d\phi \quad (3.11)$$

$$h = H + \left(R + \frac{t}{2}\right) \cdot \cos \sqrt{\frac{E \cdot I}{2 \cdot P} - \frac{t}{2}} \quad (3.12)$$

$$h - \sqrt{\frac{2 \cdot E \cdot I}{F}} \cdot \sin^2 \alpha - \sqrt{\frac{E \cdot I}{2 \cdot F}} \cdot I_{\delta} \cdot \sqrt{\sin \alpha} \cdot \cos \alpha = 0 \quad (3.13)$$

3.2 Otros ensayos

A diferencia del *Horizontal Open Displacement* (HOD) el cálculo analítico para los ensayos convencionales resulta tedioso e implica tener que aplicar correcciones fruto de la necesidad de conocer la longitud de la grieta o de la configuración del propio laminado.

Para el caso del ensayo DCB, se utiliza habitualmente la formulación propuesta por la norma AITM 1-0053 [10]. Esta, establece que si los desplazamientos son pequeños y el laminado es simétrico, la tenacidad a fractura interlaminar G_C puede ser calculada según la Ecuación 3.14

$$G_C = G_{IC} = \frac{A}{b \cdot \Delta a} \quad (3.14)$$

Donde b es el ancho de la probeta y A es el área comprendida entre la curva $P-\delta$ y las rectas que unen los puntos con grietas de longitud a y $a + \Delta a$ con el origen, respectivamente. Además, Δa hace referencia al aumento de la longitud de la grieta entre los puntos comentados que [10] establece que tiene un valor de 60 mm. A modo de ejemplo, se presenta en la Figura la curva $P-\delta$ de una investigación realizada en [4].

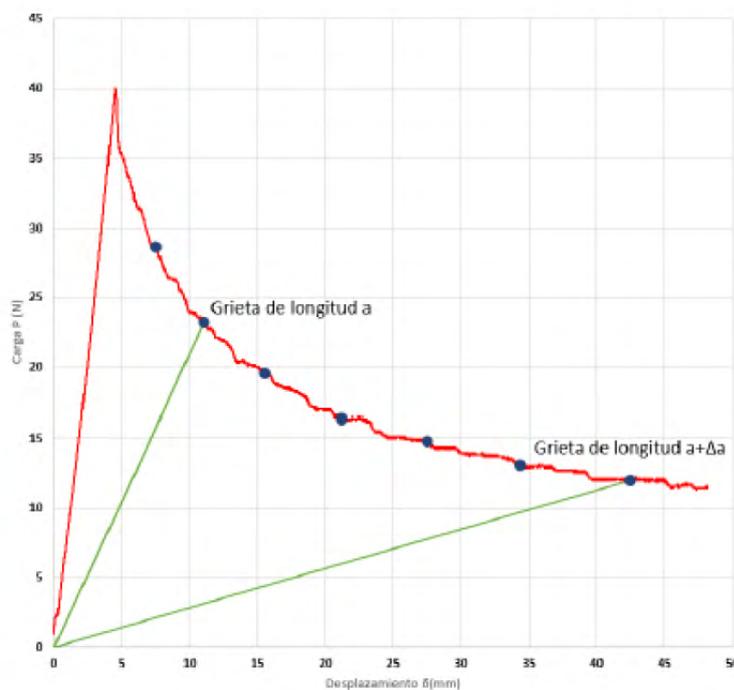


Figura 3.6 Curva $P-\delta$ en el ensayo DCB [4].

Pese a la relativa sencillez que aparenta, presenta la siguiente serie de inconvenientes [6]:

- Cuando la curva no es suave y se producen saltos (*stick-slip*) los resultados pueden no ser fiables.
- Implica medir la longitud de la grieta, con las dificultades que ello lleva consigo.
- Solo es válida la Ecuación 3.14 cuando se cumple la hipótesis de pequeños desplazamientos. Cuando esta no se cumple, el avance de la grieta deja de ser lineal y en consecuencia, el cálculo del área A no es trivial.
- Solo es válida para laminados simétricos.

Existen algunas formulaciones alternativas como explican las normas ASTM D5528 en [11] o la ISO 15024 en [12]. Estas hacen uso de la teoría de vigas en la que la tenacidad a fractura interlaminar se calcula según la Ecuación 3.15 donde $M = P \cdot a$.

$$G_{IC} = \frac{M^2}{b \cdot E \cdot I} \quad (3.15)$$

Pero de nuevo, solo son válidas cuando existen pequeños desplazamientos y los laminados son simétricos. Además, también requieren medir la longitud de la grieta. Si bien, ofrecen una serie de correcciones a diferencia de la norma ASTM 1-0053 que se resumen en:

- Corrección del valor de a mediante un ajuste experimental al considerar que el borde de la grieta no está empotrado [6]. Se basa en sumar una cantidad Δa .
- Corrección por efecto de grandes desplazamientos. Se basa en multiplicar G_{IC} por un factor F .
- Corrección por el sistema de cogida. Se basa en dividir G_{IC} por un factor N .

Como resultado se obtiene una serie de expresiones que conducen a un mismo valor de G_{IC} . Sin embargo, es notable la cantidad de consideraciones y correcciones que son necesarias aplicar en los procedimientos previamente descritos.

Los dos ensayos restantes, el *Climbing Drum Peel* (CDP) y el *Horizontal Drum Peel* (HDP) son totalmente comparables analíticamente y experimentalmente, como se comprobó en [20]. La principal causa de esto es la propia configuración del banco de ensayos. El tambor de pelado del HDP tenía como objetivo ser más flexible y facilitar la realización de los ensayos por parte del operario. Existieron diferentes prototipos hasta que se alcanzó el definitivo (Patente N° 201730163) en [21], que eliminaba la cremallera del prototipo anterior, sustituyéndola por un actuador solidario a un motor que hiciese girar el tambor. De esta forma, se conseguía que el avance fuese automático y se produjese a medida que la piel se enrolla al tambor. En cuanto al cálculo de G_{IC} , se plantea el esquema de la Figura 3.7

Es visible que en este dispositivo, el aumento de la grieta corresponde al tramo de probeta que se enrolla en el tambor. De esta forma, es posible llegar a la Ecuación 3.16 y a la Ecuación 3.17.

$$G_C = \frac{\Delta U}{\Delta A} = \frac{\Delta U}{B \cdot \Delta a} \quad (3.16)$$

$$\Delta a = R_L \cdot \Delta \theta \quad (3.17)$$

Donde R_L hace referencia al radio total de liado y sigue la Ecuación 3.18.

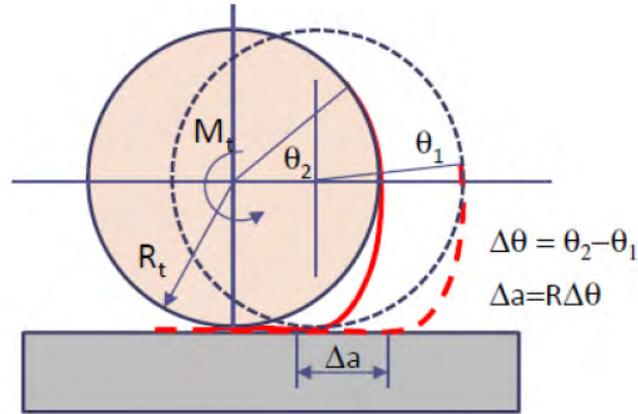


Figura 3.7 Esquema para el análisis mecánico del HDP [20].

$$R_L = \frac{D_t + t}{2} \quad (3.18)$$

Por otro lado, la energía interna (ΔU) necesaria para producir el pelado de la probeta se expresa mediante la Ecuación 3.19.

$$\Delta U = (M_d - M_w) \cdot \Delta\theta \quad (3.19)$$

En la Ecuación 3.19 el momento asociado al giro de la piel M tiene el subíndice d cuando hace referencia a pelado más liado, mientras que el subíndice w se corresponde únicamente al liado. Con todo ello, es posible obtener una expresión para la tenacidad a fractura interlaminar en el ensayo HDP como se muestra en la Ecuación 3.20.

$$G_C = \frac{M_d - M_w}{B \cdot R_L} \quad (3.20)$$

Adicionalmente, estudios realizados en [5] demostraron que la mixicidad de modos es baja y que el modo predominante es el modo I. De esta forma, es posible afirmar que tanto en el ensayo CDP como en HDP el valor de G_C está próximo al G_{IC} .

4 Procedimiento experimental

La motivación del presente capítulo es múltiple. Se comienza realizando una descripción general del banco de ensayos. Para ello, se hará uso de una serie de diseños realizados en [20]. Contendrán diferentes vistas de los componentes mecánicos que conforman el banco de ensayos y los equipos auxiliares utilizados. También se citarán las mejoras de prototipos como consecuencia de un mayor conocimiento del *Horizontal Open Displacement*. Una vez conocida la anatomía del ensayo HOD se procederá a explicar la puesta a punto del mismo. Se comienza definiendo brevemente las conexiones de pines que ha sido necesario establecer para la lectura de los datos medidos por las células de carga. De la mano, se explicarán las células de carga utilizadas y el motivo de su uso en cada escenario.

Paralelamente, se considera de especial relevancia el proceso seguido para la calibración del equipo en su conjunto; ya que, cualquier fallo de medida en los equipos trae consigo resultados erróneos. Se describe el proceso automático de calibración que ofrece el *software* utilizado y un procedimiento manual. Los pasos seguidos se muestran con detalle en esta sección.

Finalmente, se describe la metodología del ensayo HOD. Desde que se encienden los equipos hasta que comienza el ensayo. Se realiza un recorrido por los diferentes campos que necesitan ser ajustados antes de la realización del ensayo. A su vez, se incluye cómo debe realizarse el postprocesado de los datos o la forma en la que se ha considerado más oportuno visualizar los datos durante la realización del ensayo. Por último, se muestran los formatos de exportación que ofrece el *software* y se comenta el tratamiento a realizar una vez ensayadas las probetas. Supone, por tanto, un conjunto de pasos de vital importancia para la obtención de resultados que permitan validar el *Horizontal Open Displacement* para las diferentes configuraciones de laminado a ensayar.

4.1 Descripción del banco de ensayos

Una vez validado analíticamente el ensayo HOD, se procede a explicar la configuración del banco de ensayos y de sus partes más importantes. Para disponer de una visión global de la forma del banco de ensayos, se muestra en la Figura 4.1 un diseño realizado en *CATIA* en [20]. Como es visible, el banco de ensayos consta de un motor con una cuerda incorporada que permite el giro sobre sí mismo en ambas direcciones (la de pelado y la contraria). La cuerda es de metal para evitar deformaciones y se hace pasar por dos poleas encargadas de redirigir la dirección del carrito de pelado al que va atada y es el responsable del pelado de la probeta. El conjunto se encuentra sostenido por un soporte que puede ser fijado por unión magnética a la superficie dónde se practica el ensayo (metálica).

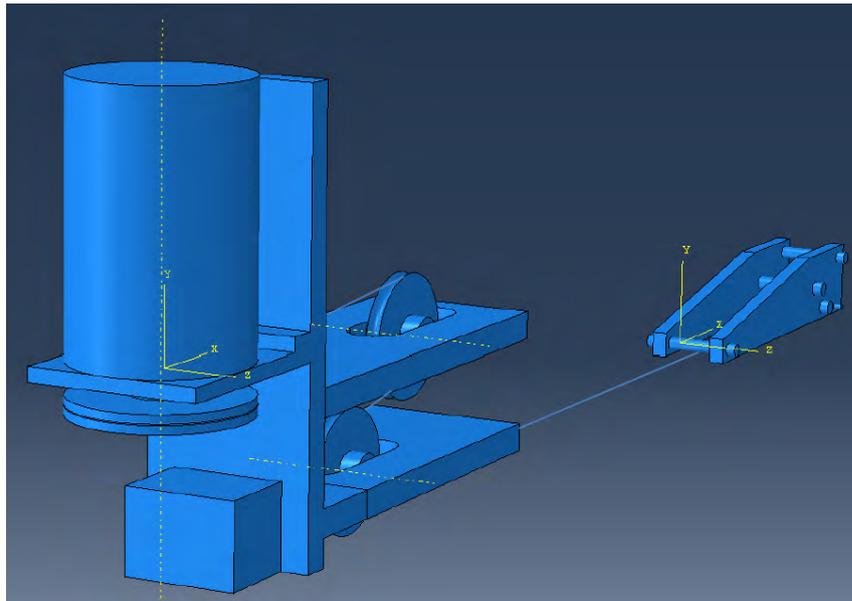


Figura 4.1 Diseño global del banco de ensayos del HOD [20].

Adicionalmente, se muestra en las Figuras 4.2 y 4.3 el perfil y la planta del conjunto previamente descrito.



Figura 4.2 Perfil del banco de ensayos del HOD [20].



Figura 4.3 Planta del banco de ensayos del HOD [20].

Aunque en el diseño de la Figura 4.1 no se representa, se muestra en la Figura 4.4 la superficie donde se sujeta la probeta a ensayar.

La superficie de la Figura 4.4 dispone de una cola de milano que permite mediante unos tornillos apretar y aflojar la muestra a la hora de realizar los ensayos. Así, se ha resuelto uno de los principales problemas del ensayo HOD: la fijación de la probeta a ensayar. En campañas de ensayo anteriores, se utilizaba un adhesivo para fijar la probeta a la mesa. Si bien, para ensayar una única probeta era necesario pegarla a la mesa dónde se fuese a ensayar y posteriormente despegarla haciendo uso de acetona. La realización *in situ* del ensayo se convertía en un desafío al ser el tiempo de ensayo elevado. De esta forma en cambio, basta con apretar con las sujeciones la muestra, como es visible en la Figura 4.5.

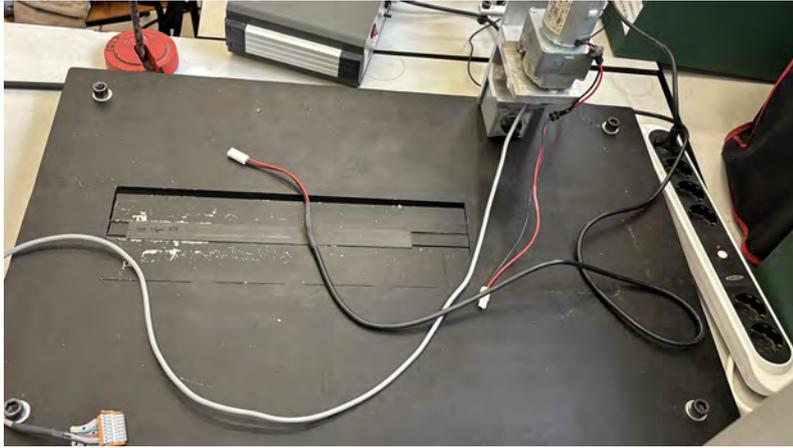


Figura 4.4 Superficie de apoyo del banco de ensayos HOD.

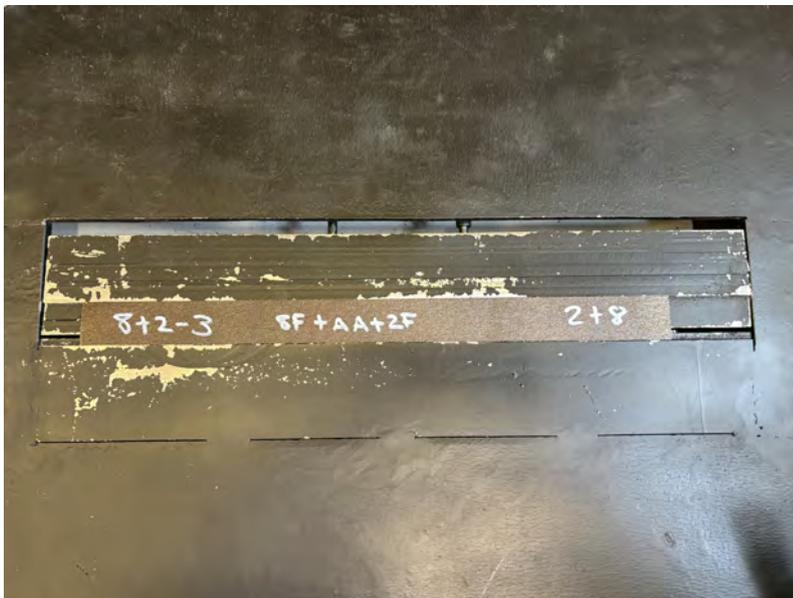


Figura 4.5 Cola de milano del banco de ensayos HOD.

El funcionamiento de la cola de milano mostrada en la Figura 4.5 ha sido desarrollado en el GERM. Consta de un total de 9 tornillos. Los más gruesos, 5 en total, funcionan como tornillos guía para mantener las sujeciones de la probeta en el mismo plano que la superficie del banco de ensayos. Además, posee 4 tornillos más pequeños (de 6 [mm] de diámetro) encargados de apretar y desaflojar la muestra a ensayar. Para el caso de los dos centrales, si se aprieta el tornillo permite quitar la pieza. Tienen que estar desaflojados para que la probeta esté fijada. Los exteriores, en cambio, deben apretarse para fijar la probeta y aflojarse para poder quitar la probeta.

A continuación se expone una breve explicación de las diferentes partes que componen el banco de ensayos. Se comienza representando en la Figura 4.6 el motor K80-GR53.30 de *Kelvin*. Fue seleccionado de tal forma que fuese capaz de satisfacer el rango de fuerzas de pelado necesario para la realización de los ensayos. Cuenta con un reductor con una elevada resistencia mecánica que permite su utilización en cualquier posición. A su vez, dispone de un par de utilización hasta los 8 Nm a carga uniforme. Además, actúa a velocidad constante. Es decir, si la probeta ofrece una mayor resistencia a pelado en algún tramo en concreto, el motor tirará con más fuerza para mantener la velocidad del ensayo constante.

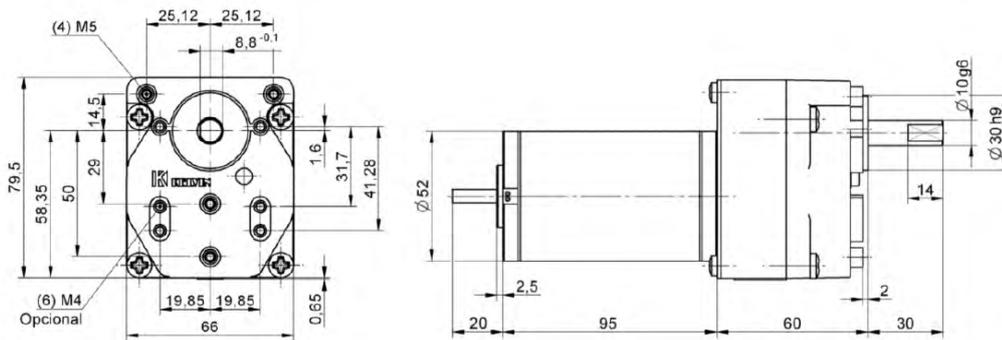


Figura 4.6 Plano del motor K80-GR53.30.

Solidario al motor, se dispone de una caja de control desde dónde se modifia el sentido y la velocidad del motor. Dicha caja de control se muestra en la Figura 4.7 y dispone de dos interruptores, uno encargado de encender/apagar y otro para seleccionar la dirección de pelado y un potenciómetro que ajusta la velocidad de giro del motor.



Figura 4.7 Caja de control del ensayo HOD.

Paralelamente, el motor está contenido en un soporte formado por las partes que se describen en la Figura 4.8. Inicialmente, dicho soporte se unía a la superficie de ensayo mediante ventosa. Sin embargo, se desarrolló en [20] una alternativa basada en una unión imantada. Resulta mucho más versátil al ser metálica la superficie de fijación en la que se apoya la probeta. El componente real que funciona como soporte y contiene al motor previamente descrito se muestra en la Figura 4.9. Las ruedas guías o poleas que se encargan de transmitir el movimiento y están contenidas en el soporte se representan en la Figura 4.10.

Finalmente, se muestra en la Figura 4.11 la primera versión del carrito de pelado del ensayo HOD. Constaba de dos rodillos que permitían el desplazamiento a lo largo de la mesa de apoyo; ya que anteriormente, no se disponía de la superficie mostrada en la Figura 4.4 y dos rodillos adicionales para la colocación de la muestra.

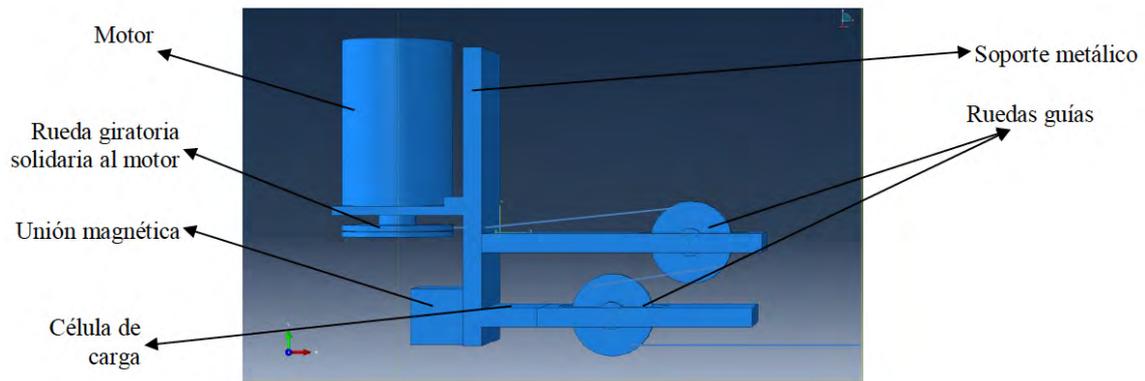


Figura 4.8 Partes que componen al soporte del ensayo HOD [20].

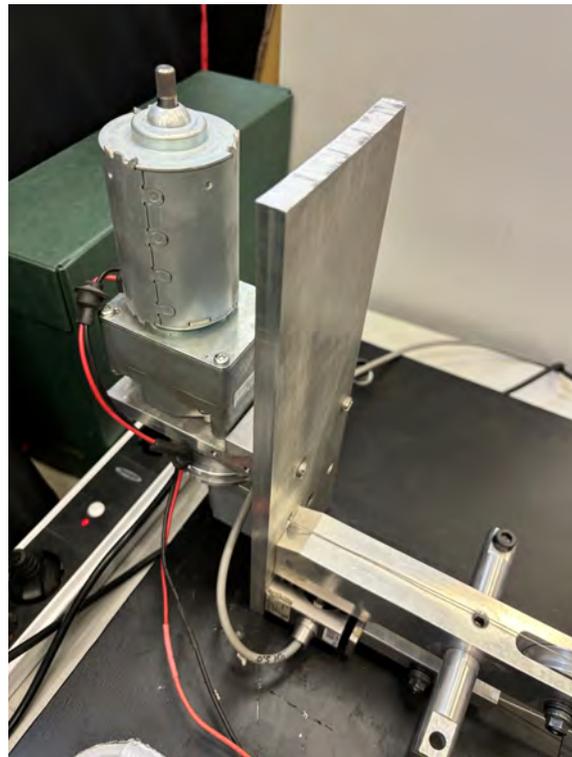


Figura 4.9 Soporte que contiene al motor K80-GR53.30 en el ensayo HOD.

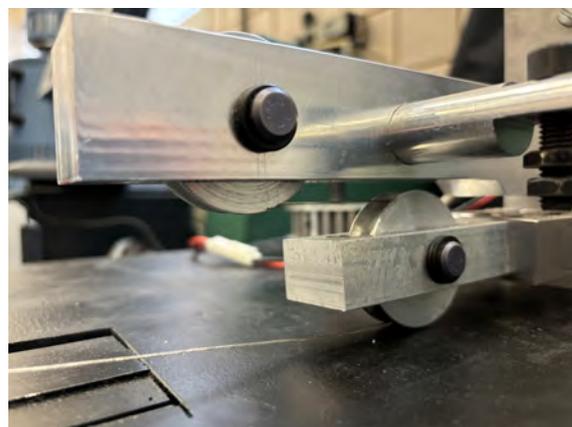


Figura 4.10 Ruedas guías contenidas en el soporte del ensayo HOD.



Figura 4.11 Primera versión del carrito de pelado del ensayo HOD.

Se proporciona en la Figura 4.12 el alzado, perfil y planta de este primer prototipo de pelado.

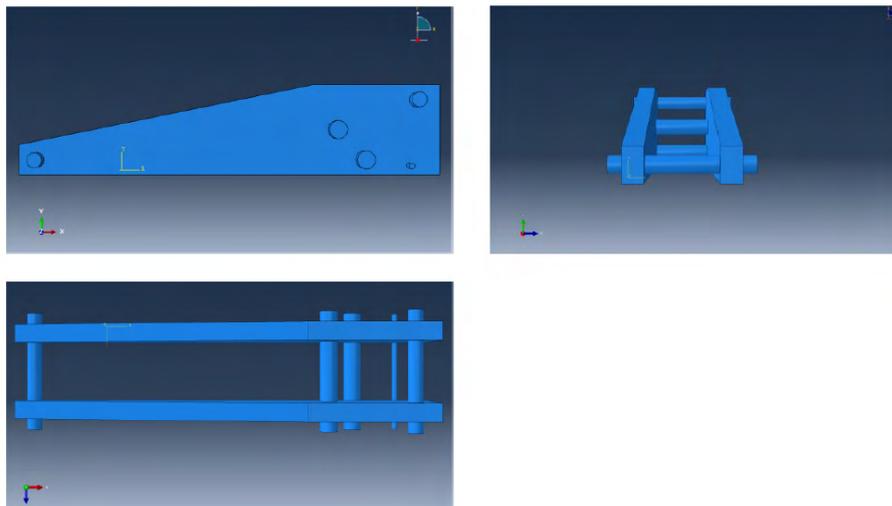


Figura 4.12 Alzado, perfil y planta de la primera versión del carrito de pelado del ensayo HOD.

Una de las conclusiones que se obtuvieron en [20] fue que era posible desarrollar una nueva versión del carrito de pelado con menos rodillos (menos rozamiento) y con una mayor sencillez a la hora de colocar las muestras. La versión mejorada del carrito de pelado del ensayo HOD se muestra en la Figura 4.13. Cabe destacar que ambos carritos de pelado cuentan con una abertura que permite atar la cuerda para que tire del mismo y colocar una célula de carga si fuese necesario.

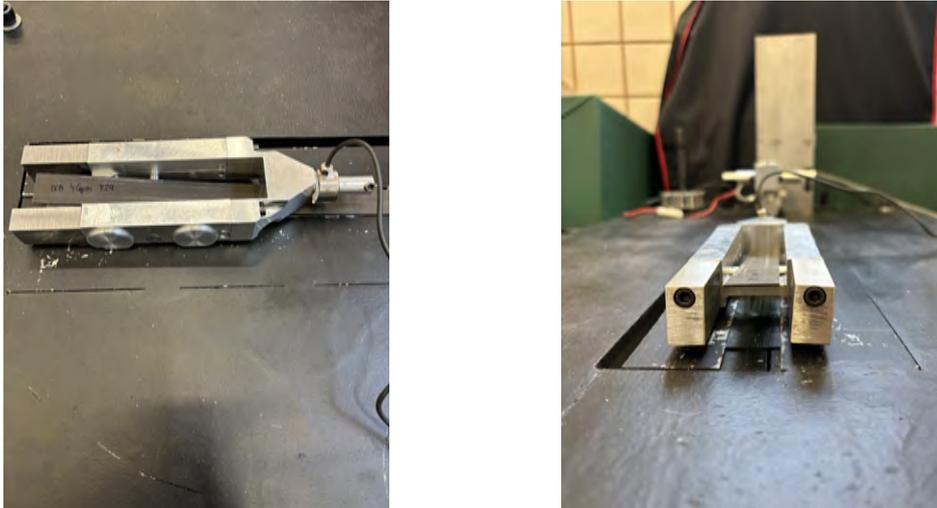


Figura 4.13 Versión mejorada del carrito de pelado del ensayo HOD.

4.1.1 Módulo de adquisición de datos

Para la realización del ensayo HOD es necesario hacer uso de un equipo auxiliar. Se trata del módulo de adquisición de datos *Quantum HBM MX1615B*. Como se muestra en la Figura 4.14 cuenta con 16 canales diferentes dónde deben introducirse los conectores, que están unidos a las células de carga responsables de la recolección de los datos. El módulo se conecta mediante un cable *ethernet* a un portátil que contiene el *software* que será utilizado para la realización de los ensayos: *catman Easy V4.2.2*.



Figura 4.14 Conexión de puertos en el módulo de adquisición de datos *Quantum HBM MX1615B*.

Tal y como se ha comentado, en el ensayo se utilizarán células de carga y no galgas extensiométricas, siendo necesario establecer las conexiones de cables oportuna. Por norma general, se sigue la configuración de puente completo. Para conocer qué color va a cada polo del pin se ha tenido que consultar la asignación de cables del fabricante de la célula (incluida en su ficha técnica) y posteriormente han sido conectados según se dispone en las instrucciones del *Quantum HBM*

MX1615B. El cableado resultante para los dos células que serán explicadas en detalle en la siguiente sección se muestra en la Figura 4.15.

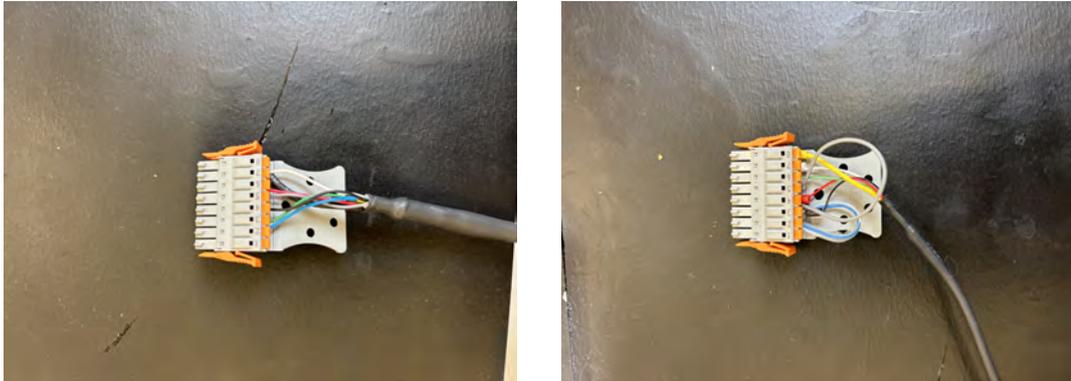


Figura 4.15 Cableado resultante para los dos células de carga utilizadas en el ensayo HOD.

4.1.2 Células de carga

Como se ha comentado, la realización del ensayo HOD hace uso de células de carga. Concretamente se contemplan dos tipos. La primera, es la célula de carga S9M de 500 N que se encuentra contenida en la parte inferior del motor presente en el soporte metálico (véase Figura 4.9). Esta célula es la que fue utilizada en [20] y arrojó resultados válidos. Sin embargo, en la presente campaña de ensayos, se ha prescindido de su uso. La razón está en que la lectura de fuerza de pelado aplicada sobre la muestra no es realmente la que está experimentando la muestra. El paso por las ruedas guías genera cierta fuerza de rozamiento que no se contempla en la medida. De igual forma, el peso del carrito (y el rozamiento que este ofrece con la superficie de ensayo) también viene inmerso en la medida. Es cierto que podría mitigarse el segundo conflicto viendo cuál es la fuerza necesaria para mover el carrito de pelado de forma aislada. Sin embargo, el rozamiento de las poleas no se puede cuantificar de manera trivial. La solución, pasa por la utilización de una célula de carga del tipo DYM-103 de 20 kg o 196.2 N colocada directamente en la nueva versión del carrito de pelado como se muestra en la Figura 4.16. De esta forma, se consigue que la fuerza registrada en N sea en su totalidad la que produce el avance de la grieta en el laminado y no sea necesario realizar ninguna consideración adicional.

Uno de los problemas que surgieron en la colocación de la célula de carga en el carrito de pelado fue que el extremo del cable quedaba situado en la parte inferior, generando rozamiento cuando avanzaba el carrito. En un primer momento, se optó por utilizar arandelas metálicas que permitiesen situar el extremo del cable en la parte superior. Finalmente, fue necesario además el uso de arandelas de papel como se muestra en la Figura 4.16.

El principal problema de utilizar la célula de carga DYM-103 de 20 kg es que no está estandarizada. El programa *catman Easy V4.2.2* precisa registrar el sensor una vez conectado el conector al canal adecuado y previa al ensayo, el tipo de célula de carga que va a ser utilizado. A diferencia de la célula de carga S9M de 500 N que está registrada en el *catman Easy V4.2.2*, la nueva célula de carga no lo está. El *modus operandi* pasaba por identificar una célula de carga similar de forma y sobretodo de capacidad. Lo más parecido que se encontró fue la C9B de 200 N como se muestra en la Figura 4.17.



Figura 4.16 Célula de carga DYMH-103 de 20 kg incorporada en el carrito de pelado del ensayo HOD.

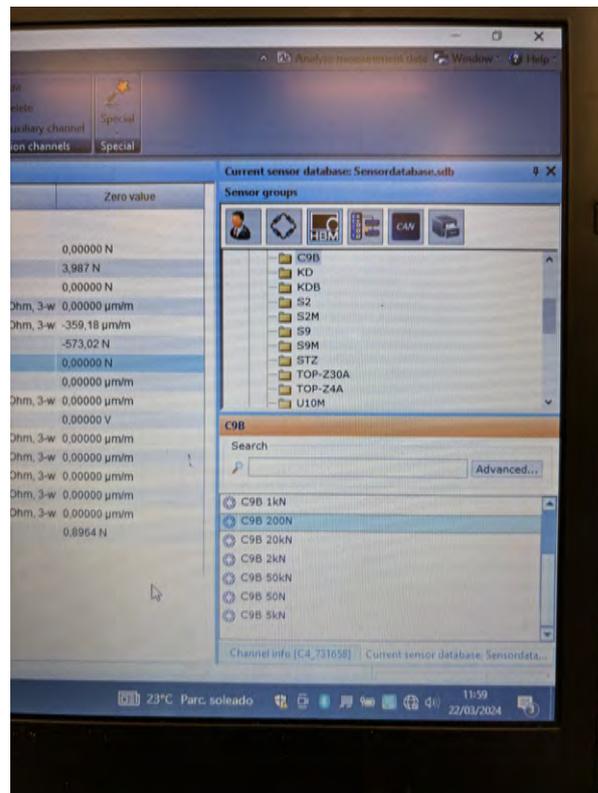


Figura 4.17 Sensor asociado a la célula de carga DYMH-103 de 20 kg.

4.2 Calibración

Dependiendo del tipo de célula de carga el proceso de calibración será más o menos tedioso. Básicamente la diferencia reside en que para los casos en los que la célula de carga no esté contenida en el catálogo del *catman Easy V4.2.2* la calibración tendrá que ser manual. Así, se tendrá que para

la célula DYMH-103 de 20 kg el proceso será manual mientras que para la célula de carga S9M de 500 N podrá hacerse de forma automática.

4.2.1 Manual

La calibración manual se realiza en la pestaña *sensor adaptation*. Como se muestra en la Figura 4.18 lo primero es seleccionar el canal dónde está la célula de carga a calibrar. En este caso, se selecciona el canal C4-731658. Después, se comienza el proceso de calibración. Consta de tomar dos medidas, una física y otra eléctrica. La física está asociada al peso/fuerza al que está sometida la célula en ese preciso instante y la señal eléctrica asociada la mide el *software*. Es decir, hay que hacer uso de dos pesos o fuerzas conocidas para asociarles una señal eléctrica. Para el primer punto se utiliza el cero, la célula de carga sin ningún peso/fuerza asociada. Para el segundo punto, se utilizan los pesos que se muestran en la Figura 4.19.

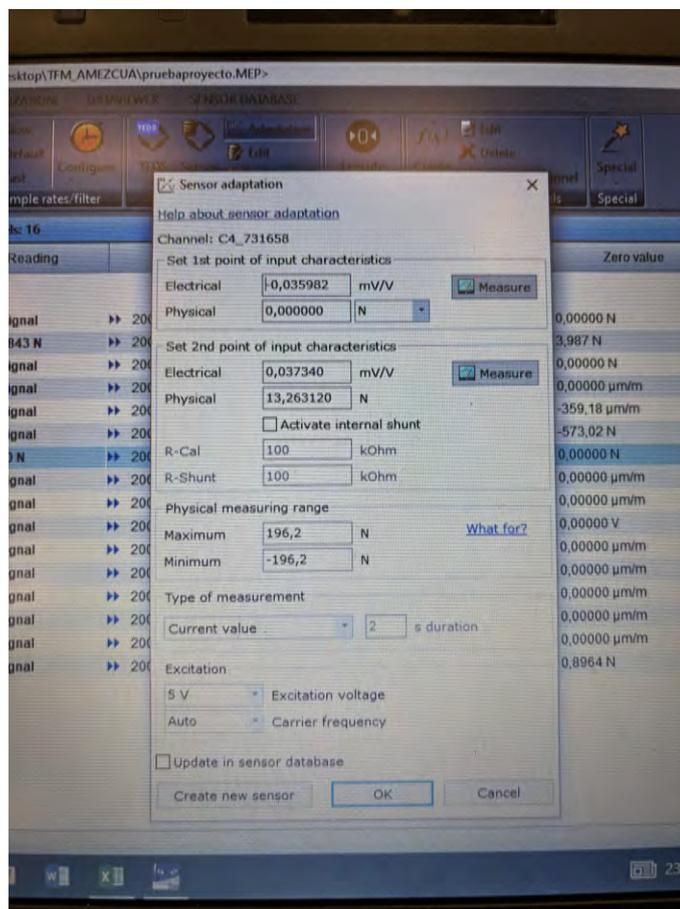


Figura 4.18 Proceso de calibración manual de la célula de carga DYMH-103 de 20 kg.

Cabe mencionar que teniendo en cuenta que la suma de los dos pesos es de 1.352 kg y que la aceleración de la gravedad es de 9.80665 m/s^2 la equivalencia del conjunto es de 13.263 N. Con el propósito de que el resultado de la calibración sea el óptimo posible, ha sido necesario aislar de cualquier perturbación o rozamiento la toma de las medidas físicas. Se ha hecho uso de unos de los laminados a ensayar para sujetarlo debajo del banco de ensayos y colgar de él el carrito de pelado con la célula incorporada y los pesos mostrados en la Figura 4.19. En la Figura 4.20 se muestra la disposición utilizada. Una vez guardadas las medidas para los dos puntos, era necesario comprobar si en la configuración de la Figura 4.20 la célula de carga medía correctamente los 13.263 N. Como

se muestra en la Figura 4.21 se obtiene un valor de 13.31 N, pudiendo validar el proceso manual de calibración.



Figura 4.19 Pesos utilizados para la calibración manual de la célula de carga DYMH-103 de 20 kg.

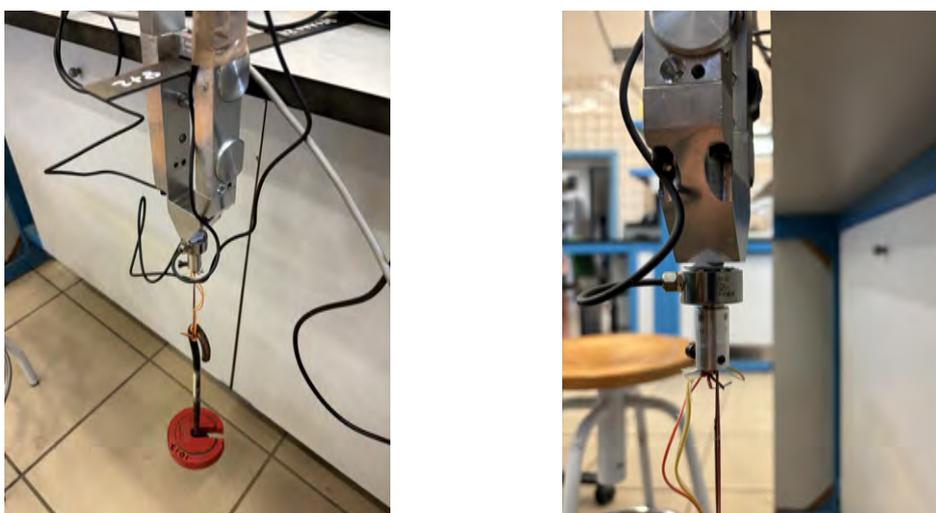


Figura 4.20 Adquisición de medidas para la calibración de la célula de carga DYMH-103 de 20 kg.

4.2.2 Automática

Para los casos en los que la célula de carga se encuentra registrada en el catálogo del *catman Easy V4.2.2* o se ha calibrado previamente de forma manual, la calibración puede realizarse de forma automática. Se trata de seleccionar el canal de medida que contenga a la célula que se quiera calibrar y darle al botón *Execute* que pone en cero la lectura de la célula de carga en ese instante. Se mostrará en la sección 4.3 en qué paso debe realizarse.

4.3 Metodología del ensayo HOD

La metodología a seguir en el ensayo HOD engloba desde el momento en el que se tiene la probeta fabricada hasta que se obtienen los resultados. Por ello, se comienzan definiendo las propiedades que debe tener la probeta a ensayar. La zona encolada debe ser lo suficientemente extensa para

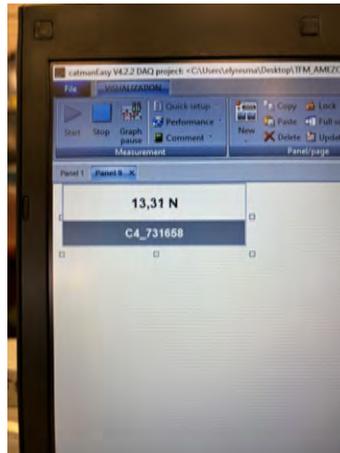


Figura 4.21 Resultado de la calibración manual de la célula de carga DYMH-103 de 20 kg.

poder obtener resultados fiables. Las dimensiones que deben tener todas las muestras se representan en la Figura 4.22.

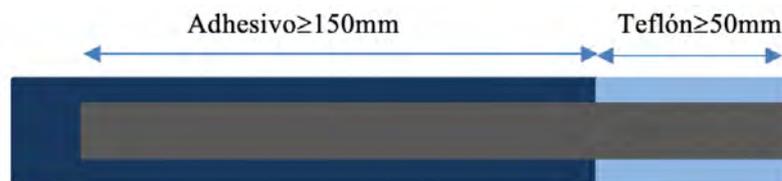


Figura 4.22 Dimensiones necesarias de las probetas para la correcta realización del ensayo HOD [20].

Conocido esto, el siguiente paso es abrir el *software Catman Easy* en el portátil correspondiente al ensayo. A continuación, se conecta al módulo de adquisición de datos a través del *ethernet* previamente establecidos los canales. Después, es necesario comprobar que el módulo de adquisición HBM es reconocido por el *software*. La conexión se puede realizar si aparece una luz verde. Tras ello, se pulsa a *Connect* como se muestra en la Figura 4.23.

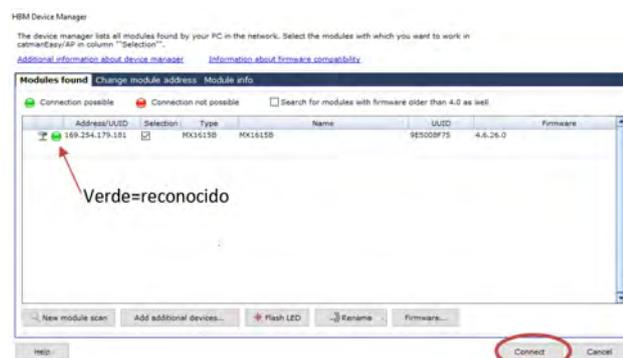


Figura 4.23 Vinculación del módulo de adquisición HBM con el *software Catman Easy* [20].

Una vez establecida la conexión entre *Catman Easy* y el módulo de adquisición HBM, aparecen los 16 canales disponibles como se muestra en la Figura 4.24. Cabe destacar que aquellos canales en los que se haya conectado previamente una célula de carga aparecerán en verde con un valor asociado. Como se ha detallado en 4.1.2, la célula de carga a tener en cuenta es la del tipo DYMH-103 de 20 kg o 196.2 N que en *Catman Easy* viene definida por el nombre C4-731658.

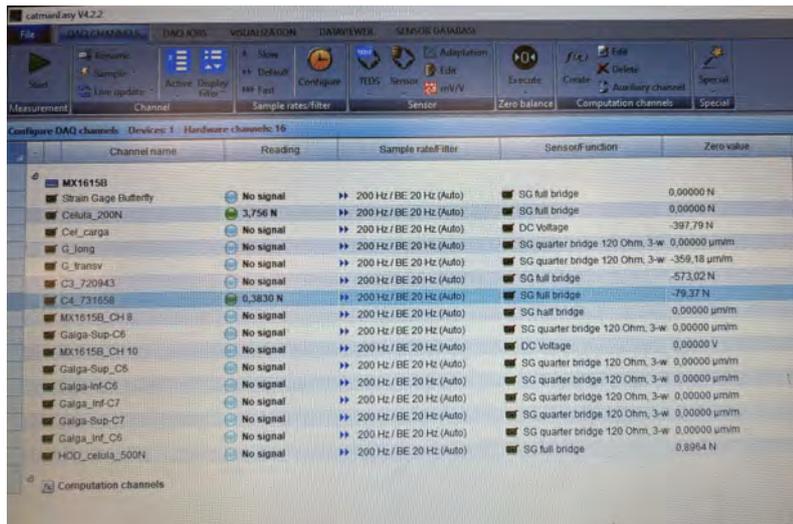


Figura 4.24 Canales disponibles del módulo de adquisición de datos visibles en *Catman Easy*.

El siguiente paso es asociar al canal en el que se encuentra la célula de carga de interés el sensor asociado como se explicó con anterioridad. Posteriormente, se procede a la calibración que puede ser de forma manual o automática como se muestra en la Figura 4.25. Esta asocia mediante el botón *Execute* la lectura que tiene la célula de carga en ese momento al valor cero, suponiendo que no está siendo sometida a ninguna fuerza externa.



Figura 4.25 Calibración automática de la célula de carga [20].

Antes de comenzar el ensayo, es necesario disponer de todos los equipos configurados tanto los pertenecientes al banco de ensayos como el *Catman Easy*. Por ello, se debe ajustar la pestaña *Visualization* como se muestra en la Figura 4.26. La opción por defecto es la automática. Sin embargo, existen diferentes tablas estadísticas, marcadores digitales e incluso gráficas la fuerza de pelado *in situ*.

Como en la mayoría de ensayos, resulta de interés ser capaz de manipular la frecuencia de muestreo, las escalas, etc. Es por ello, que *Catman Easy* ofrece en el apartado de *Settings* la posibilidad de hacerlo como se muestra en la Figura 4.27. En el presente proyecto se ha ensayado con una frecuencia de 200 Hz, resultando en un periodo de 5 ms.

Finalmente, basta con manipular de forma correcta la caja de control asociada al motor como se muestra en la Figura según se quiera pelar la muestra o despelar para poder comenzar un ensayo con una nueva muestra.

4.4 Desafíos y retos en la experimentación

Una parte fundamental cuando se realiza un campaña de ensayos en el laboratorio es recoger las dificultades y los problemas que han surgido durante la experimentación. El propósito es doble. Por un lado, permite entender de forma más clara el por qué de los resultados que serán presentados en la siguiente sección. Por otro lado, permite a las investigaciones futuras relacionadas con el ensayo HOD no cometer los errores que se citarán a continuación y tener precaución en ciertos aspectos

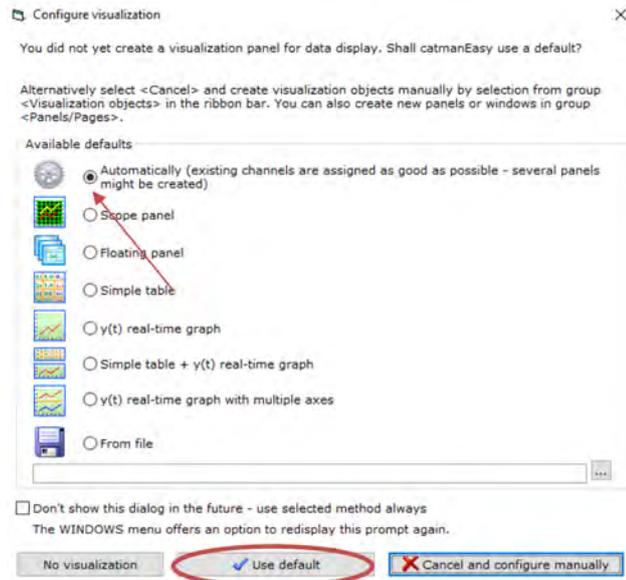


Figura 4.26 Sección de *Visualization* de *Catman Easy* [20].

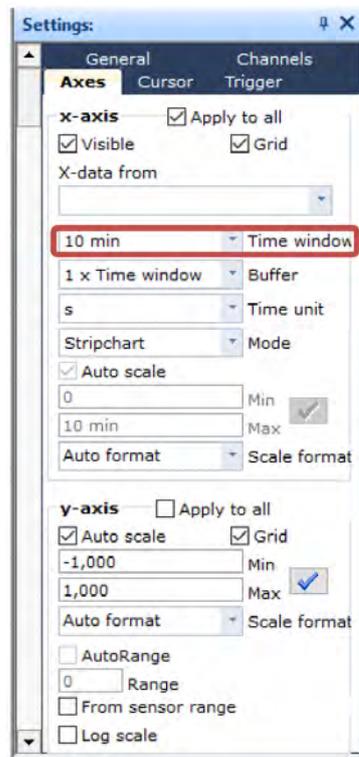


Figura 4.27 Sección de *Settings* de *Catman Easy* [20].



Figura 4.28 Funcionamiento de la caja de control asociada al motor de pelado [20].

que *a priori*, no suponían una amenaza. De esta forma, se les permitirá conducir de forma correcta y avanzar más rápido en sus pertinentes investigaciones.

La célula de carga del tipo DYM-103 de 20 kg o 196.2 N fue en su comienzo una fuente de incertidumbre. La razón de ello es que, como ya se comentó anteriormente, uno de los objetivos era situar esta célula de carga en el propio carrito de pelado para que la lectura fuese lo más fiel a la realidad posible. Sin embargo, a diferencia de la célula de carga S9M de 500 N que sí que está registrada en el catálogo del *catman Easy V4.2.2* la nueva célula no lo estaba. Se valoraron diferentes alternativas y finalmente se llegó a la conclusión que la mejor forma de proceder era asociarle un sensor con una capacidad similar; ya que las existentes en el catálogo utilizan números múltiplos de 10. Es decir, se le asoció a la célula de carga un sensor del tipo C9B de 200 N. Hecho esto, surgía la duda de procediendo así los resultados que se obtendrían serían fidedignos. La solución pasó por realizar una calibración totalmente manual para así evitar la calibración automática que proponía *catman Easy V4.2.2* para el sensor del tipo C9B de 200 N. De esta forma fue posible solventar ambas dificultades.

Otra de las dificultades encontradas fue el cable de acero del que tira el motor que va sujeto al carrito de pelado. Para poner en contexto, la muestra de material compuesto se fija al banco de ensayos en un espacio longitudinal limitado mediante la cola de milano. Esto supone que el ancho de las probetas puede variar, pues se ajusta mediante la cola de milano, pero la dirección longitudinal se ve limitada a unos 25 cm aproximadamente. Es decir, probetas más largas no pueden ser ensayadas con el diseño actual del banco de ensayos. Además, como es de esperar, se precisa de una cierta longitud de pelado pasada la zona de teflón de la muestra para dar como válido el ensayo. Es justo aquí donde aparece el primer desafío. El cable de acero que une la célula de carga agarrada al carrito de pelado con el motor, tiene también una longitud limitada. Durante la realización de uno de los ensayos, con la intención de pelar lo suficiente la muestra, el carrito de pelado sobrepasó el límite longitudinal y llegó al extremo donde el cable de acero pasa por las poleas. El resultado dado que el carrito no podía continuar avanzando y el motor continuaba tirando del cable fue la rotura del cable de acero. Inicialmente, se pensaba que sería necesario desmontar el soporte y las poleas y hacer pasar un nuevo hilo de acero por ellas. Finalmente, fue posible realizar un nudo simulando un perro de arrastre con la ayuda de pegamento instantáneo. Si bien, se determinó que un único perro de arrastre no influye prácticamente en los resultados pero que en caso de que volviese a ocurrir no es posible disponer de un cable de acero compuesto por sucesivos empalmes. Siendo necesario reemplazar dicho cable. Además, cabe resaltar la limitación longitudinal del actual banco de ensayos.

La cola de milano dispone de numerosas ventajas y ciertos aspectos a tener en cuenta. Es cierto que este nuevo método de sujeción permite la rápida realización de los ensayos por parte del operario y prescindir del uso de adhesivos como se hacía con anterioridad. En cambio, requiere un conocimiento profundo de cómo se comportan los tornillos que tiene en su interior y de la intensidad de torsión a aplicar por parte del operario. Como ya se explicó en la sección anterior, cuenta con 5 tornillos que actúan como guía y que prácticamente no es necesario manipular y con 4 tornillos centrales más pequeños que son los responsables de apretar y desaflojar la probeta. El problema está en que para manipular dichos tornillos, que se encuentran en la parte inferior del banco, se precisa de una llave de unos 15 cm de longitud hecha con una aleación de acero con una dureza baja. Durante la realización de uno de los ensayos, se aplicó demasiada torsión en el apriete de la probeta y debido a la fragilidad de la llave aleada se fracturó, quedando en el interior de la cavidad del tornillo el extremo de la llave. Este suceso demoró la continuación de la campaña de ensayos al ser muy difícil su extracción. Finalmente, se optó por girar el banco de ensayos que es muy pesado al ser metálico y extraer los 8 tornillos restantes. El tornillo atrancado no fue necesario cortarlo

pero sí aplicarle fuerza manual con un tornillo para que saliese. Se recomienda por tanto fabricar un útil de apriete distinto del que se dispone en la actualidad y tener una especial precaución en el apriete de las muestras.

Una de las dificultades encontradas durante la campaña de ensayos se encontraba en la colocación del laminado que iba a ser pelado en el carrito. Inicialmente, durante el proceso de fabricación se deja un pequeño margen de unos 5 cm sin adhesivo al que se le coloca teflón. De esta forma, la probeta tiene un extremo por el que puede abrirse y comenzar así el pelado de la muestra. El problema se encuentra en que, pese a que dicho tramo de teflón se encontraba en todas las probetas, en los casos más cercanos al caso simétrico era muy difícil separar los adherentes como consecuencia de la solidez de los mismos. Es decir, cuanto más espesor tiene el adherente, más difícil es abrir la probeta para colocarla en el útil de ensayo. En el presente caso de estudio, se tienen siete configuraciones no simétricas y una simétrica. Como se verá en secciones futuras, para las tres configuraciones más cercanas al caso simétrico fue necesario hacer uso de una paleta para comenzar a separar los adherentes y de un destornillador, que funcionase como palanca para colocar la muestra en el carrito de pelado. Una posible solución sería la construcción de unas pinzas que ayudasen al operario en la colocación de la probeta previo al ensayo.

Como se comentará en 6, el cálculo de la velocidad de pelado ha sido uno de los hitos a cumplir en el presente proyecto. Se mostrará cómo es posible obtener a partir del tiempo de pelado y de la longitud pelada dicha velocidad. Sin embargo, resulta necesario hacer mención al equipo del banco de ensayos responsable de su ajuste. Se trata de la caja de control asociada al motor de pelado. El principal problema se encuentra en que no dispone de un lector de señal para que el operario pueda visualizar *in situ* el voltaje que está suministrando al motor en [V] que posteriormente será transformado en energía cinética. En consecuencia, aunque sea posible calcular la velocidad de pelado usada en un determinado ensayo, no es posible manipular el equipo con precisión. Esto deriva en la dificultad de seleccionar una velocidad determinada una vez movido el botón de su posición anterior. Sería muy interesante diseñar un lector de señal eléctrica para poder cuantificar los cambios realizados con el botón de la caja de control.

5 Caracterización mecánica del material

Resulta interesante conocer las propiedades de rigidez de los materiales a ensayar antes de comenzar la campaña de ensayos. Para ello, se realiza un ensayo a tracción sobre las probetas a ensayar haciendo un especial hincapié en el espesor, que participa directamente en el cálculo analítico de la tenacidad a fractura interlaminar. Sin embargo, en el presente proyecto se va a hacer uso de una serie de materiales comúnmente utilizados que ya están perfectamente caracterizados. Por ello, no es necesario realizar ningún ensayo sino hacer uso de las investigaciones previamente realizadas tal y como se verá a continuación.

Por otro lado, se hará uso de la campaña de ensayos DCB realizada en [5]. En ella, se obtuvieron los valores de tenacidad a fractura interlaminar en modo I (G_{IC}) que serán posteriormente comparados con los resultados obtenidos con el ensayo de interés en el proyecto: *Horizontal Open Displacement* (HOD).

5.1 Morfología de las probetas a ensayar

La estructura de las probetas a ensayar sigue un mismo patrón. Todas tienen la nomenclatura de nF-AA-8F, el parámetro n es variable (desde 3 hasta 8, por lo que todos los laminados son antisimétricos menos el caso de $n = 8$). A su vez, dicha nomenclatura significa que el laminado ha sido fabricado en un único proceso de curado (autoclave). Es decir, se han apilado n láminas de material compuesto siendo la F un indicativo de que el material estaba fresco (sin curar). Después, se colocan dos capas de adhesivo y posteriormente 8 láminas de material compuesto. El laminado resultante se somete en su conjunto a un único proceso de curado en autoclave. En la Figura 5.1 se muestran las probetas resultantes del proceso perviamente descrito que serán sometidas al ensayo HOD.

El material compuesto utilizado es HEXPLY M21/34%/UD194/IMA-12K donde la notación empleada indica:

- Tipo de resina: HEXPLY
- Porcentaje de peso de resina: 34 %
- Tipo de laminado: UD (unidireccional)
- Peso de fibra: 194 g/cm²
- Tipo de fibra: IMA
- Número de filamentos por fibra: 12K

Por otro lado, el adhesivo utilizado es el FM300M0.03.

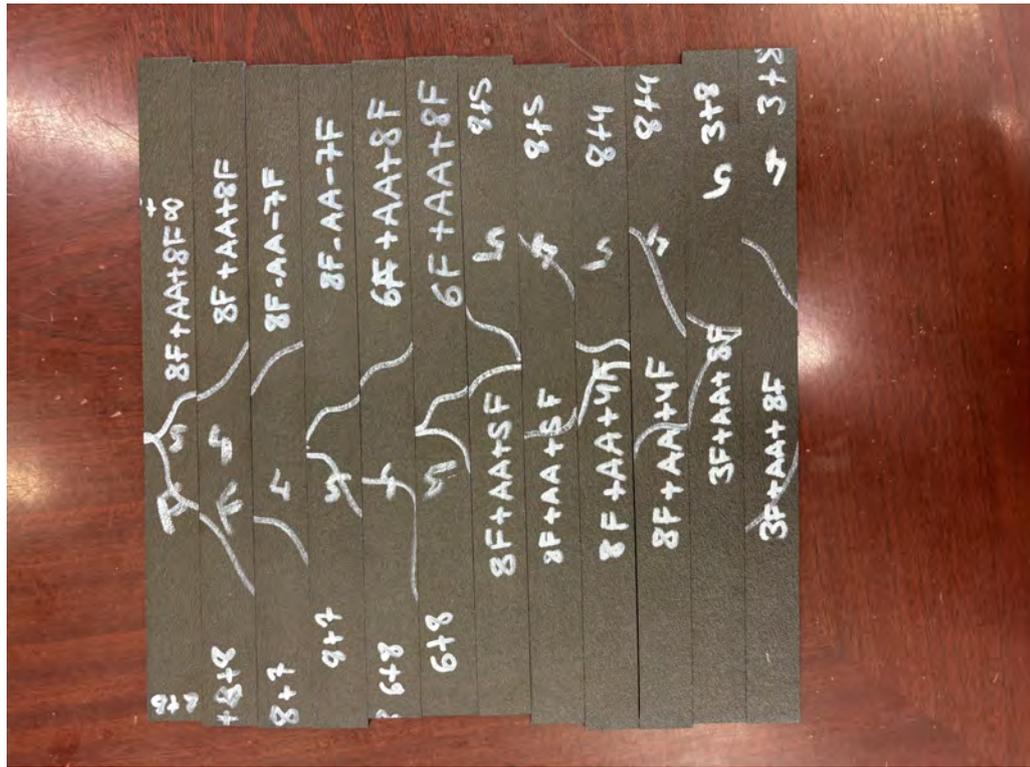


Figura 5.1 Probetas a ensayar.

En el estudio de caracterización realizado en [5] se obtuvieron las propiedades físicas y mecánicas del material compuesto seleccionado y del adhesivo, respectivamente. Los valores obtenidos se muestran en la Figura 5.2.

Material	t [mm]	E_{11} [GPa]	E_{22} [GPa]	ν_{12}	G_{12} [GPa]
CFRP	0.19	140	9	0.3	5
Adhesive	0.13	3.25		0.4	1.16

Figura 5.2 Propiedades físicas y mecánicas de los materiales utilizados [5].

5.2 Valores de tenacidad a fractura interlaminar obtenidos en investigaciones previas

Para poder comparar los resultados de tenacidad a fractura interlaminar obtenidos mediante la realización de la campaña de ensayos HOD es necesario disponer de unos valores de referencia. Al tratarse de un sistema novedoso de pelado no se dispone en la literatura de resultados representativos. Es cierto que en [20], se realizó la primera campaña de ensayos HOD. Si bien, el banco de ensayos utilizado entonces no es el empleado en el actual proyecto. Tampoco el dispositivo encargado de aplicar la fuerza de pelado es el mismo. Adicionalmente, las mediciones se realizaron haciendo uso

de una célula de carga que se comprobó que inducía errores. Por ello, tampoco es utilizada en la investigación actual.

En consecuencia, se va a hacer uso de la campaña de ensayos realizada en [5]. En ella, se sometió a una serie de probetas con la misma configuración que las probetas que serán utilizadas en este proyecto al ensayo *Double Cantilever Beam* (DCB). Este tipo de ensayo, pese a sus limitaciones, es el más utilizado en la actualidad por lo que los resultados de tenacidad a fractura interlaminar obtenidos fueron validados y resultan la mejor opción para comparar los resultados que serán obtenidos con posterioridad con el ensayo HOD. En la Tabla 5.1 se muestran los valores de tenacidad a fractura interlaminar para las configuraciones a ensayar previamente explicadas.

Tabla 5.1 Valores de tenacidad a fractura interlaminar para las configuraciones a ensayar.

Configuración	G_C J/m ²
8F+AA+8F	1450-1550
8F+AA+7F	1000-1100
8F+AA+6F	850-950
8F+AA+5F	800-850
8F+AA+4F	800-900
8F+AA+3F	700-800

Cabe mencionar que pese a que en el ensayo DCB implica medir la longitud de la grieta y que *a priori* no es válido para configuraciones no simétricas ni ante la presencia de grandes desplazamientos, la norma [11] propone una serie de correcciones que permiten obtener buenas aproximaciones. Además, el ensayo DCB cuenta con una ventaja fundamental a la hora de comparar los resultados obtenidos con el ensayo HOD frente al resto de ensayos disponibles: no existe mixicidad en los modos de fractura. Es decir, puede considerarse la propagación de la grieta en el plano de simetría de la muestra (modo I de fractura), al igual que en el ensayo HOD. Esto, permite afirmar que los valores de tenacidad a fractura interlaminar obtenidos en la Tabla 5.1 tenían asociados el modo I de fractura y no una combinación de varios de ellos.

6 Análisis y resultados de la campaña de ensayos HOD

El capítulo tiene como propósito mostrar, analizar y argumentar los resultados obtenidos en la campaña de ensayos HOD para las diferentes configuraciones. Adicionalmente, se realiza una comparación exhaustiva con los resultados de la campaña de ensayos DCB que se ha tomado como referencia a lo largo del presente proyecto. Atendiendo tanto a los valores de tenacidad a fractura interlaminar como a los modos de fallo identificados tras realizar los ensayos. A su vez, se han realizado investigaciones adicionales con el propósito de poder validar los resultados obtenidos y la metodología de ensayo utilizada. Por ejemplo, demostrar la versatilidad del ensayo HOD al permitir bidireccionalidad en el ensayo. Se pone de manifiesto la capacidad de pelar tanto el adherente más fino como el más grueso. Esto, en el ensayo CDP no es posible; ya que el tambor no es capaz de pelar el adherente más grueso. Por otro lado, la velocidad de ensayo también ha sido analizada en profundidad. Al tratarse de un nuevo tipo de ensayo, es necesario validar también los equipos responsables de la obtención de los datos. Entre ellos, el potenciómetro asociado al motor juega un papel crucial en el desarrollo del ensayo. Como se explicará a continuación, según el tipo de laminado se precisa de una velocidad de pelado determinada u otra. Inicialmente, se desconocía el efecto de este parámetro en la ejecución del ensayo.

Por otro lado, cabe destacar la necesidad de comparar en todo momento los resultados obtenidos del ensayo HOD con los del DCB. El ensayo DCB pese a las limitaciones de las que dispone (como se explicaron en secciones anteriores), cuenta con una gran cantidad de investigaciones y estudios que refutan sus convicciones. Por ello, a la hora de extraer conclusiones del ensayo HOD deberá tenerse en consideración los resultados del DCB.

6.1 Postprocesado de los resultados

Esta sección tiene como objetivo describir el tratamiento realizado sobre los datos recogidos tras la realización del ensayo. Los resultados son recopilados en *Catman Easy V4.2.2*. El *software* permite seleccionar la extensión en el guardado. Por comodidad, la extensión seleccionada ha sido *.XLS* para poder trabajar con *Excel*. En la Figura 6.1 se muestra la forma del archivo resultante de la configuración 8F+AA+2F tras la realización del ensayo. Como es visible, aparecen los diferentes sensores registrados en otras campañas de ensayos. Si bien, solo la célula de carga DYMH-103 llamada en el programa C4-731658 es la que contiene información relacionada con el ensayo como se muestra en la Figura 6.2.

Los valores numéricos de interés de la Figura 6.2 son el periodo en segundos (columna de la izquierda) y la fuerza de pelado ejercida por el motor por unidad de longitud N/m (columna de la

Figura 6.1 Archivo .XLS resultante de la configuración 8F+AA+2F tras la realización del ensayo HOD.

0	23.3361988	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000	5.27145958
0.005	23.3359165	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000	5.2681818
0.01	23.3436871	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000	5.26671219
0.015	23.3540001	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000	5.26733398
0.02	23.3565445	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000	5.2681818
0.025	23.3585224	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000	5.27049875
0.03	23.3679886	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000	5.27371979
0.035	23.3759003	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000	5.27326775
0.04	23.3726501	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000	5.26823807
0.045	23.3722267	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000	5.26552534
0.05	23.3812695	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000	5.26654291
0.055	23.3867779	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000	5.26614714
0.06	23.3775959	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000	5.26411247
0.065	23.3644562	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000	5.26580811
0.07	23.3551311	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000	5.27010298
0.075	23.350893	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000	5.27230692
0.08	23.3483486	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000	5.27089405
0.085	23.3434048	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000	5.2710638
0.09	23.3390236	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000	5.27400255
0.095	23.3398724	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000	5.27428532
0.1	23.3429794	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000	5.26902914
0.105	23.3510342	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000	-1000000	5.26609039

Figura 6.2 Datos asociados a la célula de carga C4-731658 para la configuración 8F+AA+2F tras la realización del ensayo HOD.

derecha). Cabe resaltar la equivalencia existente entre J/m^2 y N/m . Se ha considerado utilizar N/m porque la fuerza de pelado del motor se expresa en Newton y la anchura de la probeta en metros. La frecuencia de muestreo seleccionada fue de 200 Hz, de ahí que los saltos temporales se produzcan cada 5 ms. El siguiente paso sería aislar estas columnas del resto de sensores. Además, es necesario restar a la fuerza de pelado la fuerza de pretensado. Esta fuerza es el valor inicial que experimenta la probeta cuando se coloca en el útil de ensayo, antes de comenzar el pelado. Hecho esto, el cálculo de la tenacidad a fractura interlaminar se obtiene como el cociente entre la fuerza de pelado aplicada N/m entre la anchura de la probeta en metros.

Obtenidos los valores de G_{IC} para todos los instantes de tiempo es necesario identificar qué

tramo de la gráfica es realmente de interés. Básicamente, en todas las configuraciones los valores seleccionados seguían el mismo patrón. Se trata del tramo de valores constantes previo al pico de rotura de la probeta. Conocidos los dos instantes de tiempo entre los que se observa la tenacidad a fractura se introducen en el *script* de *Matlab* que se muestra en la Figura 6.3.

```
% Importar los datos desde un archivo Excel
[num, txt, raw] = xlsread('8F+AA+2F_2_sin_filtrar.xlsx');

% Asumiendo que los datos numéricos están en la primera columna y los datos asociados en la segunda
data = num(:,2);
associatedData = num(:,1);

% Establecer los límites
lowerLimit = 15.40000073;
upperLimit = 21.52000102;

% Filtrar los datos
filter = data >= lowerLimit & data <= upperLimit;
filteredData = data(filter);
filteredAssociatedData = associatedData(filter);

% Crear una nueva tabla con los datos filtrados y los datos asociados
filteredTable = table(filteredData, filteredAssociatedData);

% Escribir la tabla en un nuevo archivo Excel
writetable(filteredTable, '8F+AA+2F_2_filtrado.xlsx');
```

Figura 6.3 *Script* de *Matlab* utilizado para el postprocesado de los resultados tras la realización del ensayo HOD.

En el apartado de 'Establecer los límites' de la Figura 6.3 se establecen los límites superior e inferior y el *script* a partir de ellos devuelve los valores de G_{IC} comprendidos en ese intervalo. Este tratamiento de los datos resulta vital en cualquier tipo de ensayo; no solo en el ensayo HOD. De no hacerse, las gráficas que serán mostradas a continuación no serían una fiel representación del ensayo. A lo largo del ensayo según la fase se obtienen valores dispares que distorsionan el parámetro de interés real, la tenacidad a fractura interlaminar. Además, el hecho de seguir este proceso permite disponer de una visión general de los resultados obtenidos a lo largo de todo el ensayo y permite vincularlos directamente con las observaciones realizadas durante su ejecución, identificando situaciones y familiarizándose con el ensayo HOD.

6.2 8F+AA+2F

Se trata del primer tipo de configuración. Pese a que no fue analizada en [5], se disponía de varias muestras que han permitido realizar investigaciones adicionales a las que se explicarán para el resto de las configuraciones.

6.2.1 Comparación de la tenacidad a fractura interlaminar obtenida con el ensayo DCB

Tal y como se ha mencionado anteriormente, no existe un intervalo numérico con el que comparar los resultados de tenacidad a fractura interlaminar obtenidos en el ensayo. Si bien, se muestra en la Figura 6.4 como los valores de G_C tienen un orden de magnitud coherente según la tendencia seguida en la Figura 5.1.

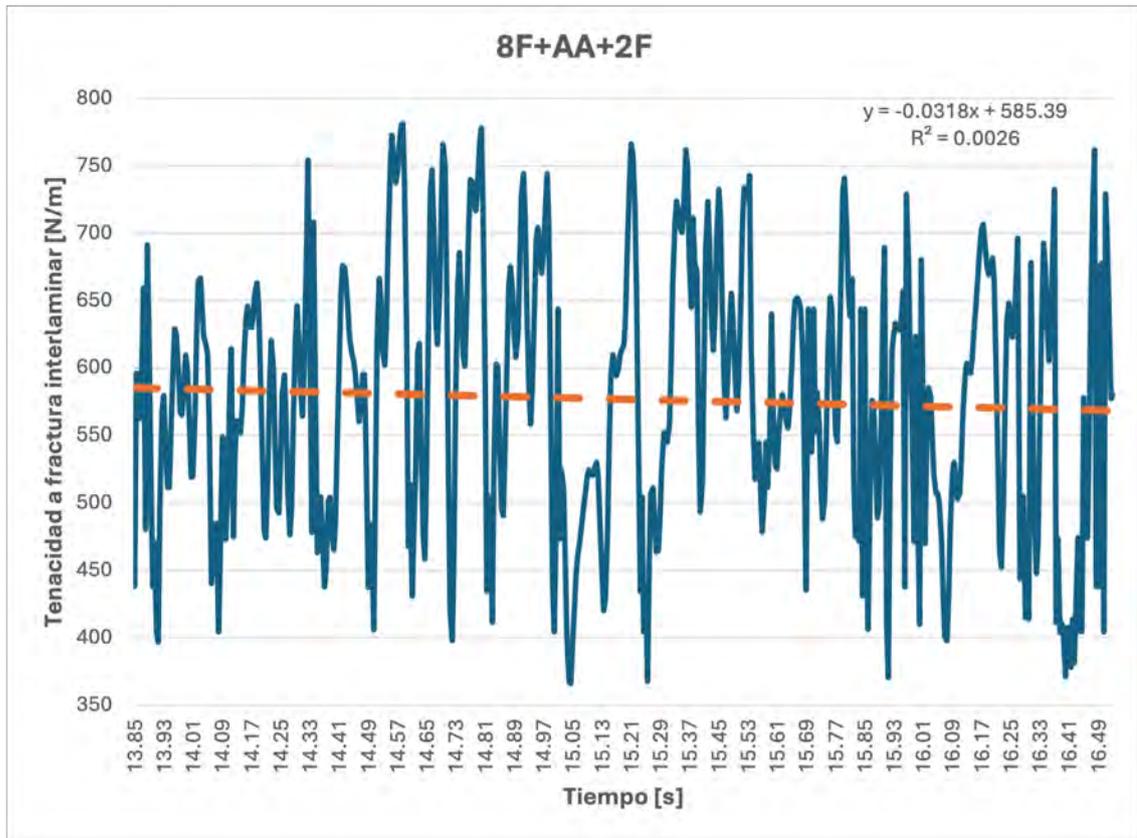


Figura 6.4 Evolución temporal de la tenacidad a fractura interlaminar de la primera muestra de la configuración 8F+AA+2F en el ensayo HOD.

Como es visible en la Figura 6.4, el promedio de tenacidad a fractura oscila en torno a los 575 N/m. El carrito de pelado apenas opuso resistencia al pelado del laminado. Por otro lado, las crestas y los valles manifiestan que la propagación de la grieta a lo largo del adherente y del adherente de menor espesor no se produce en la totalidad de forma constante y fluida sino que se experimentan ciertos 'tirones' que tienen como consecuencia que una cresta y su valle consecutivo tengan valores absolutos similares y generen un promedio de tenacidad a fractura prácticamente constante a lo largo del ensayo.

Los resultados arrojados por una muestra no son suficientes para dar por válido el ensayo HOD. Factores de todo tipo; así como la metodología de ensayo seguida, factores climáticos e incluso el estado de las probetas ensayadas o su proceso de fabricación introducen una gran incertidumbre en los resultados. En consecuencia, es necesario disponer al menos de una fuente de información adicional. En el presente estudio se ha ensayado cada tipo de configuración dos veces como mínimo. De esta forma, en la Figura 6.5 se representan los resultados obtenidos en la segunda serie de ensayos. Como es visible, el rango de valores de tenacidad a fractura se mantiene en torno a los 575 N/m. Pudiendo así corroborar la veracidad de los resultados.

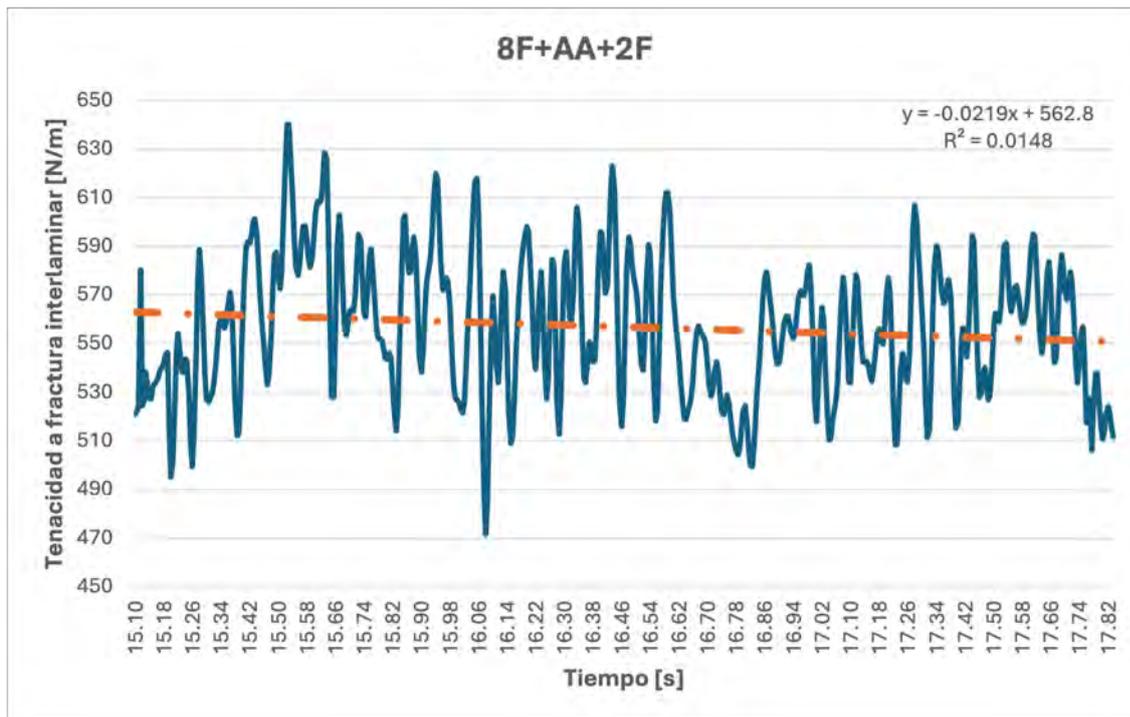


Figura 6.5 Evolución temporal de la tenacidad a fractura interlaminar de la segunda muestra de la configuración 8F+AA+2F en el ensayo HOD.

6.2.2 Modos de fallo identificados

Para poder validar experimentalmente el ensayo HOD no basta con obtener valores de tenacidad a fractura similares a los DCB. Es necesario que la forma en la que el carrito pela el laminado produzca en las probetas los modos de fallo que predice la teoría. Por ello, se representa en la Figura 6.6 el resultado de la propagación de la grieta a lo largo del laminado una vez finalizado el ensayo. Se visualiza como al comienzo existe adhesivo en las dos partes del laminado como consecuencia de la presencia del teflón. Posteriormente, es visible una pequeña línea blanca de 1 mm de espesor que se corresponde con un fallo cohesivo (ambos adherentes tienen adhesivo). A continuación, el fallo que se ve es adhesivo porque la grieta se propaga entre el adhesivo y el adherente de menor espesor. Finalmente, se tiene una migración casi completa de la grieta. Para conseguir un análisis exhaustivo de los modos de fallo sería necesario utilizar un microscopio para ver en detalle las direcciones en las que se propaga la grieta. Si bien, atendiendo a las lecturas a nivel microscópico realizadas [22] es posible afirmar que la evolución de los modos de fallo es la esperada.

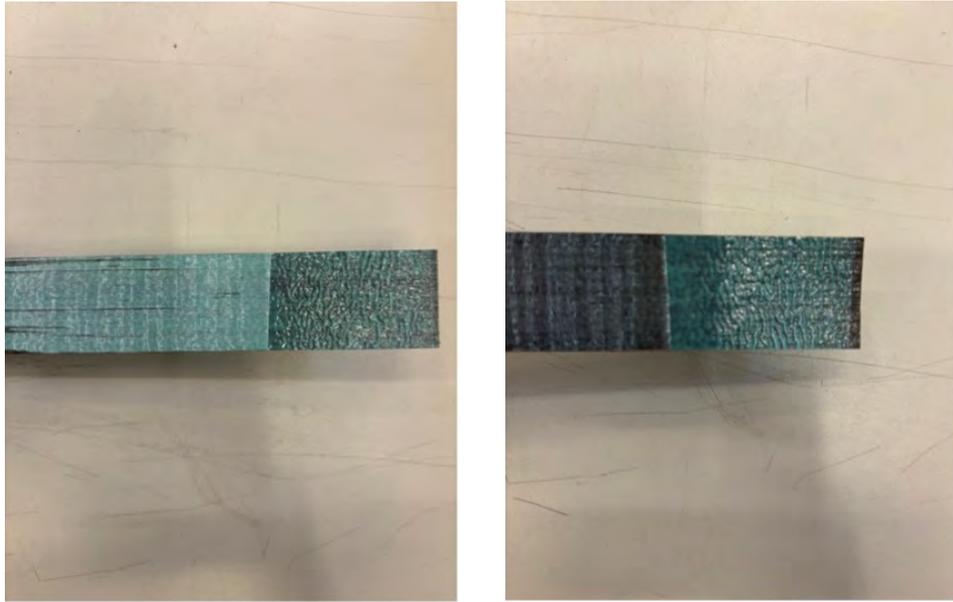


Figura 6.6 Ahderente de 2 (izquierda) y 8 (derecha) capas de la configuración 8F+AA+2F tras la realización del ensayo HOD.

6.2.3 Velocidad de ensayo

La velocidad de pelado se obtiene directamente como el cociente entre la parte de muestra pelada (desplazamiento en metros) y el tiempo de ensayo en segundos. Inicialmente, se pensaba que la caja de control suministraba un determinado voltaje al motor responsable del pelado y que este, independientemente de la resistencia que opusiese el laminado, tiraba con la misma fuerza de pelado. Como se explicará más adelante, esta hipótesis no resultó ser del todo cierta; ya que, a medida que los ahderentes tenían mayores espesores se requirió aumentar el valor de la velocidad para que fuese posible el pelado de la muestra. Por todo ello, uno de los hitos en el análisis de los resultados ha sido encontrar para qué configuración en concreto es preciso un valor de velocidad de pelado determinado. Pudiendo así, con lo ayuda de futuros ensayos HOD, estandarizar un valor de velocidad para cada configuración atendiendo a factores como el ciclo de curado o la composición de los materiales compuestos empleados.

Como se ve en la Figura 6.4, el tiempo de ensayo es de 2.64 s. La longitud de pelado obviando el teflón (5 cm aproximadamente) es de 9 cm = 0.09 m. Se obtiene por tanto un valor de velocidad de pelado de $0.03409091 \text{ m/s} = 3.409091 \text{ cm/s} = 34.09091 \text{ mm/s}$. La velocidad seleccionada era prácticamente la máxima que la caja de control podía suministrar. En consecuencia, no fue casi posible ver la evolución del ensayo al ser el tiempo de muestreo muy pequeño. Adicionalmente, al tratarse del primer ensayo, la falta de experiencia y el rápido avance del carrito supuso la rotura del cable de acero que tira del carrito al avanzar demasiado rápido y atrancar la polea solidaria al motor. Como se verá en las siguientes configuraciones, esto supuso un aprendizaje en la forma de proceder al ensayar las muestras.

Por otro lado, en la segunda probeta se obtuvo la misma longitud de pelado obviando el teflón (5 [cm] aproximadamente) en un tiempo de ensayo de 2.72 s (véase Figura 6.5). Con ello, se obtiene un valor de velocidad de pelado de $0.0330882 \text{ m/s} = 3.30882 \text{ cm/s} = 33.0882 \text{ mm/s}$. Se observa de nuevo que la velocidad seleccionada era demasiado alta y, junto a la poca tenacidad a fractura de este laminado, desembocó en un tiempo de ensayo muy bajo.

6.2.4 Estudio de la versatilidad y manejabilidad del ensayo HOD

El hecho de disponer de una probeta adicional de la configuración 8F+AA+2F permitió experimentar un concepto de interés. Se trata de comprobar que el ensayo HOD arroja los mismos resultados independientemente de cómo se coloque la muestra en la cola de milano. Es decir, ver si en primer lugar si la cola de milano es capaz de sujetar correctamente el adherente de menor espesor y seguidamente, si tras el pelado los resultados obtenidos coinciden con las dos series de ensayos mostradas con anterioridad. En la Figura 6.7 se representan los valores de tenacidad a fractura interlaminar obtenidos situando el adherente de ocho capas en la parte superior y el de dos capas sujeto por la cola de milano. Como es visible, se verifica que este ensayo es capaz de pelar ambos adherentes. Siendo esta una clara ventaja competitiva respecto a algunos ensayos convencionales como el *Climbing Drum Peel* (CDP) o más novedosos como el *Horizontal Drum Peel* (HDP) en los que el tambor es incapaz de pelar el adherente de mayor espesor. Además, supone una verificación de la demostración matemática del ensayo HOD en la que se manifiesta que la tenacidad a fractura interlaminar depende únicamente de la fuerza de pelado ejercida y del ancho de la probeta ensayada.

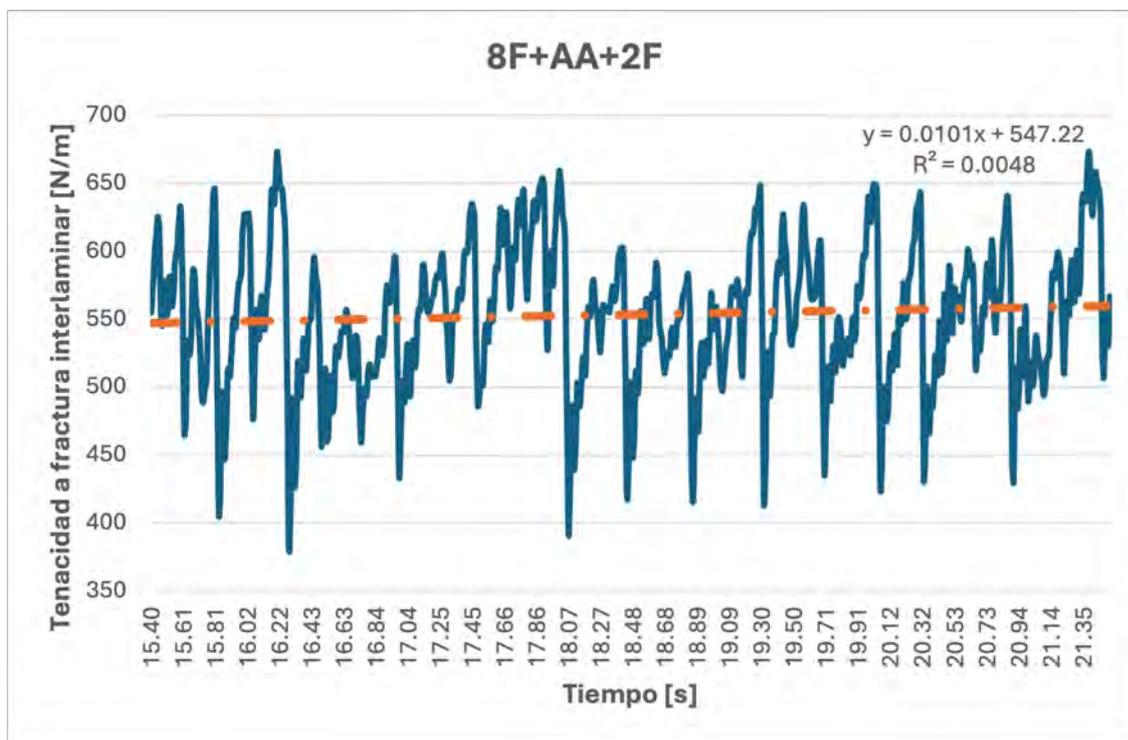


Figura 6.7 Evolución temporal de la tenacidad a fractura interlaminar de la tercera muestra de la configuración 8F+AA+2F en el ensayo HOD.

6.3 8F+AA+3F

En este caso sí que se disponían de resultados validados en [5] con los que comparar y analizar los obtenidos en la presente campaña de ensayos.

6.3.1 Comparación de la tenacidad a fractura interlaminar obtenida con el ensayo DCB

La configuración 8F+AA+3F se trata del primer caso no simétrico analizado en [5]. En él, se estableció que el rango de valores de tenacidad a fractura debía encontrarse entre [700, 800] N/m. En la Figura 6.8 se representan los valores de tenacidad de la primera serie de ensayos.

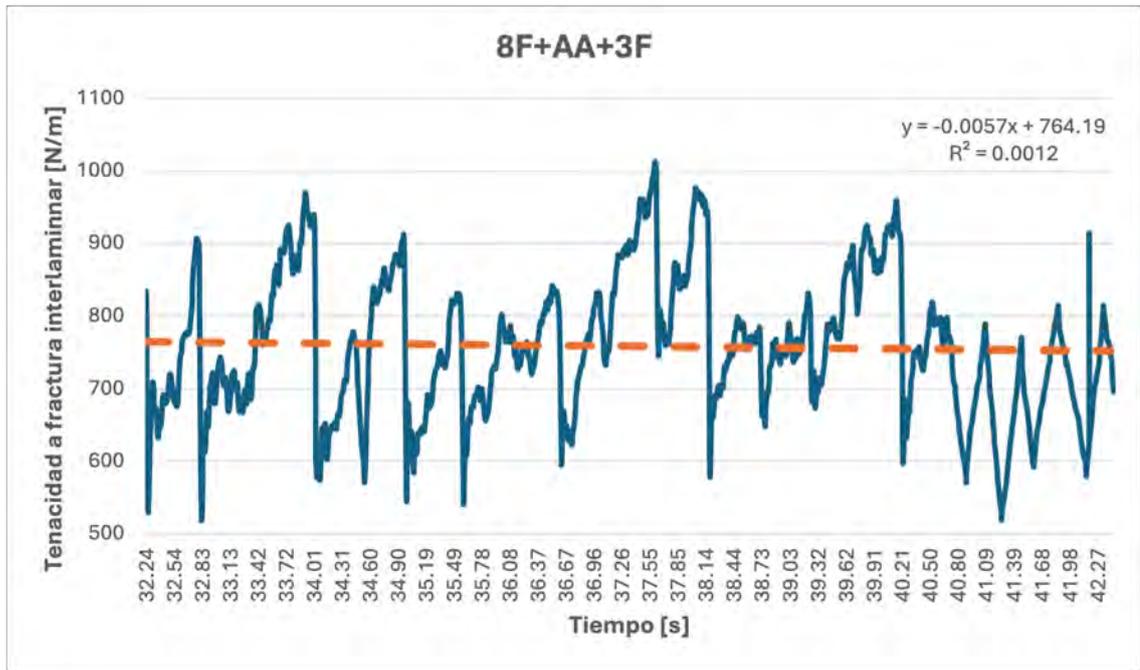


Figura 6.8 Evolución temporal de la tenacidad a fractura interlaminar de la primera muestra de la configuración 8F+AA+3F en el ensayo HOD.

De igual forma, con el fin de conseguir solidez en la campaña de ensayos, se ensayó una segunda muestra con la misma configuración. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 6.9. Como es visible, se cumple con el rango de valores obtenidos en [5].

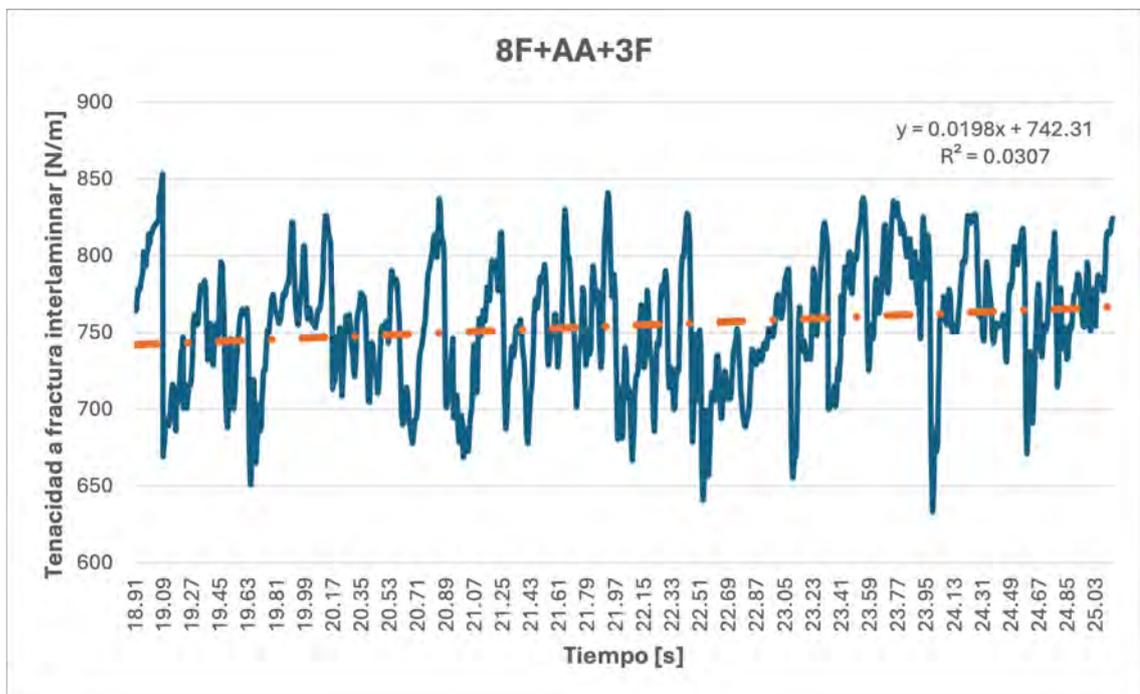


Figura 6.9 Evolución temporal de la tenacidad a fractura interlaminar de la segunda muestra de la configuración 8F+AA+3F en el ensayo HOD.

6.3.2 Modos de fallo identificados

Los modos de fallo identificados en las dos probetas de la configuración 8F+AA+3F son análogos a los de la configuración 8F+AA+2F. En la Figura 6.10 es visible el resultado de la propagación de la grieta a lo largo del laminado una vez finalizado el ensayo. Al igual que en la configuración 8F+AA+2F, al comienzo existe adhesivo en las dos partes del laminado como consecuencia de la presencia del teflón. Posteriormente, es visible una pequeña línea blanca de 1 mm de espesor que se corresponde con un fallo cohesivo. Posteriormente, el fallo que se ve es adhesivo seguido de una migración casi completa de la grieta.

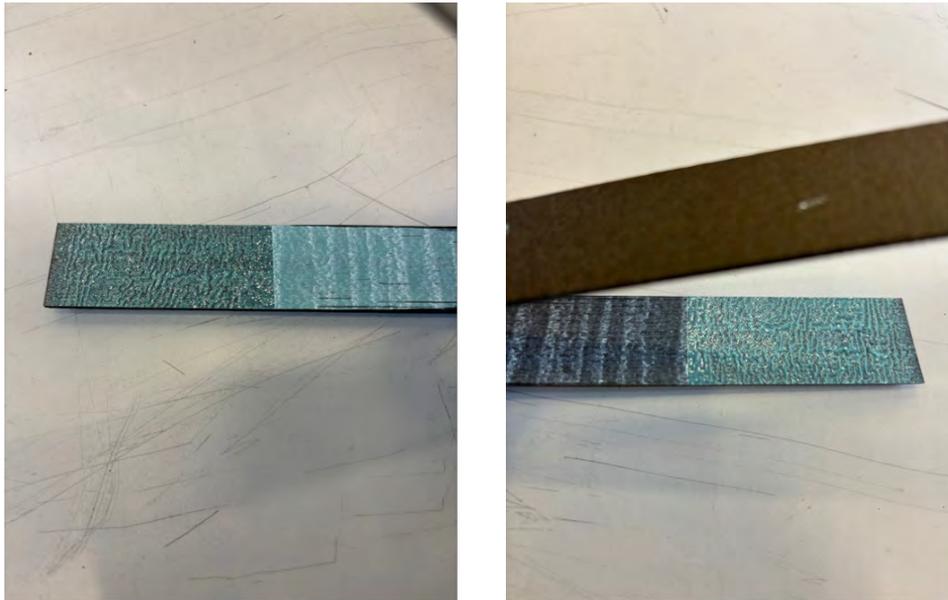


Figura 6.10 Adherente de 3 (izquierda) y 8 (derecha) capas de la configuración 8F+AA+3F tras la realización del ensayo HOD.

6.3.3 Velocidad de ensayo

Como se ve en la Figura 6.8, el tiempo de ensayo es de 10.2 s. La longitud de pelado obviando el teflón (5 cm aproximadamente) es de 10 cm = 0.1 m. Se obtiene por tanto un valor de velocidad de pelado de $0.00980392 \text{ m/s} = 0.980392 \text{ cm/s} = 9.80392 \text{ mm/s}$. En este caso, a diferencia de la configuración 8F+AA+2F, se disminuyó mucho la velocidad a suministrar por la caja de control. Permitiendo ahora sí, visualizar correctamente el desarrollo del ensayo y disponer de un pelado más uniforme en el que identificar el tramo a considerar en el cálculo de la tenacidad a fractura interlaminar fue más sencillo. Además, permitió conservar íntegramente la salud del banco de ensayos.

Es cierto que en la segunda serie de ensayos también se redujo considerablemente la velocidad de pelado respecto a la primera serie (véase Figura 6.5). Sin embargo, teniendo en cuenta que la longitud de pelado en la segunda probeta de la configuración 8F+AA+3F era de 0.09 m y que el tiempo de ensayo fue de 6.12 s se obtuvo una velocidad de pelado de $0.0155228 \text{ m/s} = 1.55228 \text{ cm/s} = 15.5228 \text{ mm/s}$. Al no disponer de un indicador de velocidad en el potenciómetro no fue posible seleccionar la misma velocidad de pelado que en la primera serie pero sí del orden de magnitud. De ahí, las diferencias apreciables.

6.4 8F+AA+4F

Para la configuración 8F+AA+4F se dispone en [5] también de un orden de magnitud con el que comparar los resultados de tenacidad a fractura interlaminar obtenidos.

6.4.1 Comparación de la tenacidad a fractura interlaminar obtenida con el ensayo DCB

En [5] se establece que el ensayo DCB arroja valores de tenacidad a fractura comprendidos entre [800, 900] N/m. En la Figura 6.11 se representan los valores de tenacidad de la primera serie de ensayos.

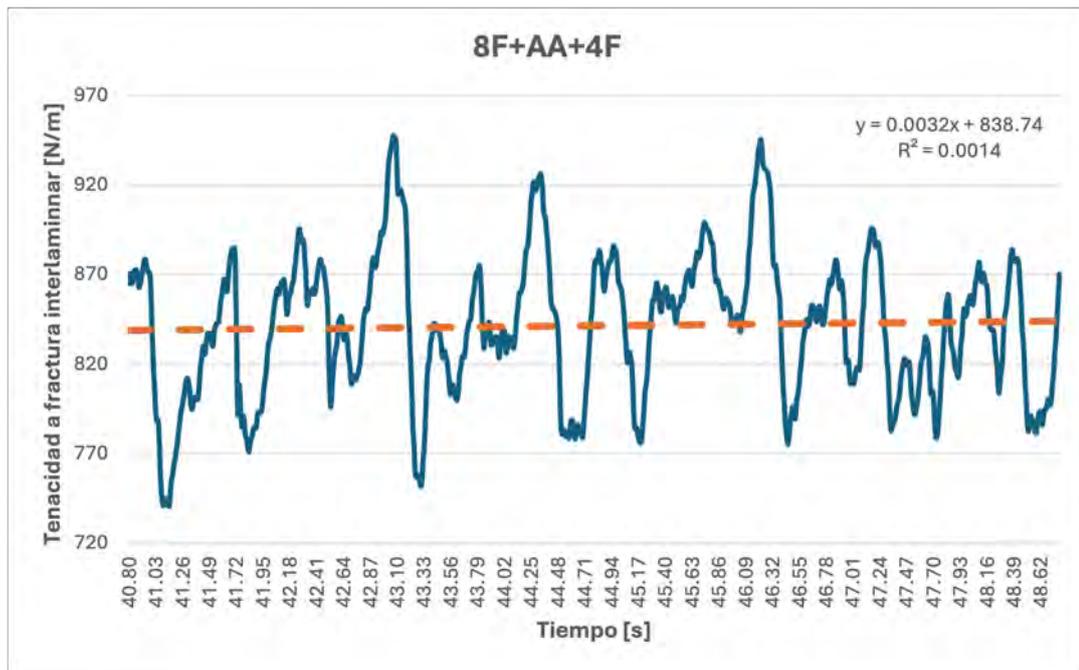


Figura 6.11 Evolución temporal de la tenacidad a fractura interlaminar de la primera muestra de la configuración 8F+AA+4F en el ensayo HOD.

Por otro lado, en la Figura 6.12 se muestran los resultados obtenidos en la segunda serie de ensayos. Se corrobora que tanto en la primera serie (véase Figura 6.12) como en la segunda serie (véase Figura) los valores se encuentran dentro del rango validado en [5].

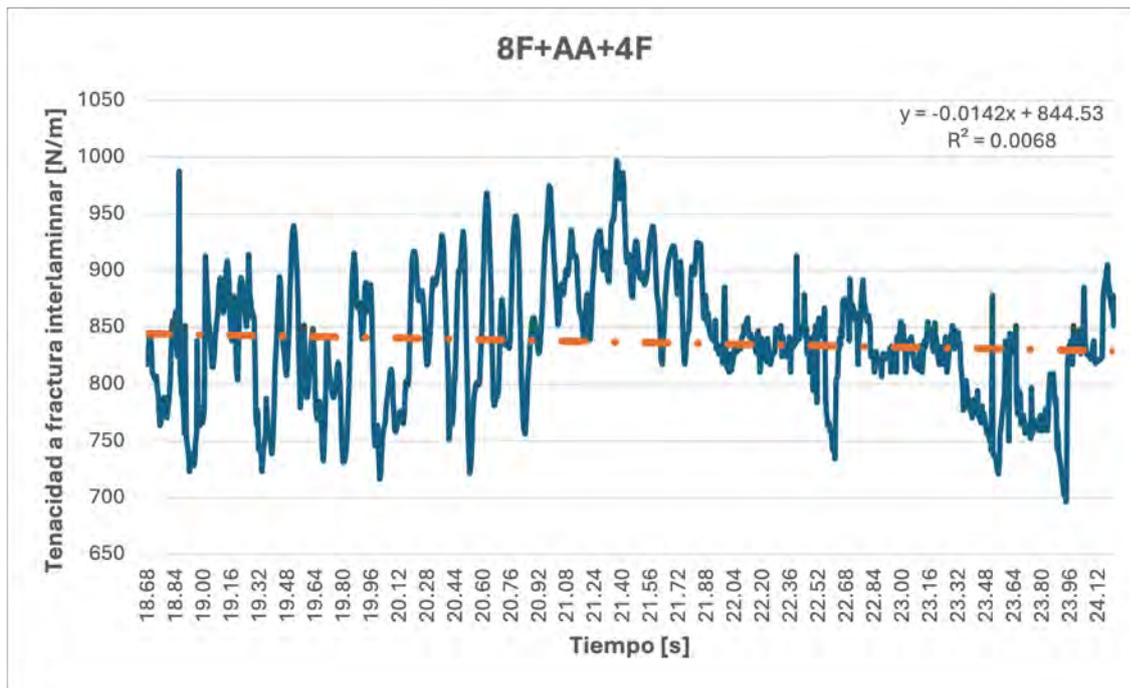


Figura 6.12 Evolución temporal de la tenacidad a fractura interlaminar de la segunda muestra de la configuración 8F+AA+4F en el ensayo HOD.

6.4.2 Modos de fallo identificados

En la Figura 6.13 es visible el resultado de la propagación de la grieta a lo largo del laminado una vez finalizado el ensayo. Cabe destacar una tendencia explicada en profundidad en [22]. En las configuraciones 8F+AA+2F, 8F+AA+3F y 8F+AA+4F el modo de fallo predominante es el adhesivo. La propagación de la grieta avanza en su mayoría entre la interfaz del adhesivo y el adherente de menor espesor. Quedando gran parte de adhesivo en el adherente más grueso. Si bien, es cierto que continúa apareciendo el fallo cohesivo en zonas puntuales. Además, cabe resaltar que para la configuración 8F+AA+4F la migración de la grieta se produce de forma casi inminente, antes que para las configuraciones previamente mencionadas.

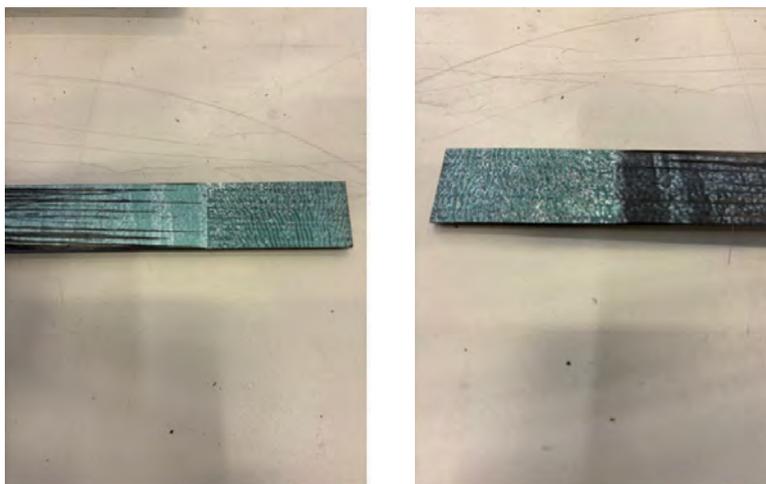


Figura 6.13 Adherente de 4 (izquierda) y 8 (derecha) capas de la configuración 8F+AA+4F tras la realización del ensayo HOD.

6.4.3 Velocidad de ensayo

Como se ve en la Figura 6.11, el tiempo de ensayo es de 7.82 s. La longitud de pelado obviando el teflón (5 cm aproximadamente) es de 10 cm = 0.1 m. Se obtiene por tanto un valor de velocidad de pelado de $0.012787 \text{ m/s} = 1.2787 \text{ cm/s} = 12.787 \text{ mm/s}$. En la configuración 8F+AA+3F se decidió posicionarse del lado de la seguridad y se escogió un valor de velocidad de ensayo muy bajo. En este caso, se optó por aumentar ligeramente la velocidad en la caja de control.

La longitud de pelado de la probeta de la segunda serie de ensayos obviando el teflón era de 0.09 m. El tiempo de ensayo es de 5.44 s. Con ello, se obtiene un valor de velocidad de pelado de $0.0165441 \text{ m/s} = 1.65441 \text{ cm/s} = 16.5441 \text{ mm/s}$. Pese a que en la primera serie fue necesario aumentar ligeramente la velocidad respecto a la configuración 8F+AA+2F, en este caso se mantuvo constante. Se obtienen velocidades de pelado muy similares entre series.

6.5 8F+AA+5F

Al igual que antes, es posible comparar los resultados de tenacidad a fractura obtenidos con los ensayos en [5].

6.5.1 Comparación de la tenacidad a fractura interlaminar obtenida con el ensayo DCB

En [5] se establece que el ensayo DCB arroja valores de tenacidad a fractura comprendidos entre [800, 850] N/m. Se aprecia que la configuración 8F+AA+4F ofrece valores de tenacidad superiores a la configuración 8F+AA+5F pese a estar más cerca del caso simétrico esta última. Es decir, la tenacidad a fractura no es en todos los casos directamente proporcional al aumento de espesor de los adherentes pese a que en la mayoría de los casos se cumpla. En la Figura 6.14 se representan los valores de tenacidad de la primera serie de ensayos.

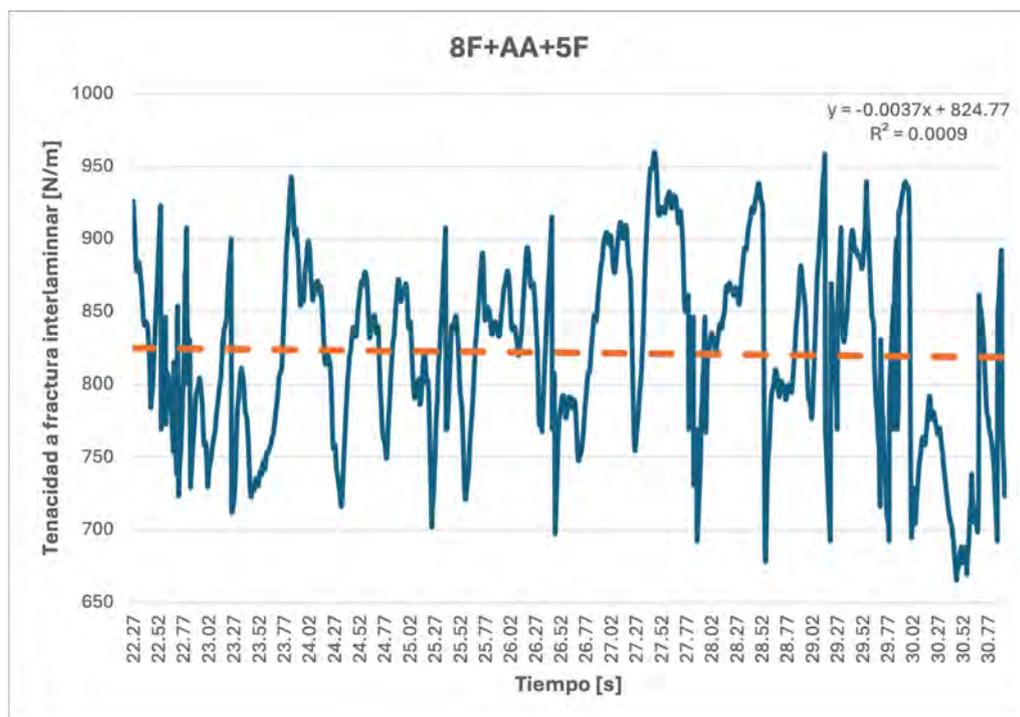


Figura 6.14 Evolución temporal de la tenacidad a fractura interlaminar de la primera muestra de la configuración 8F+AA+5F en el ensayo HOD.

Paralelamente, como se observa en la Figura 6.15, en la segunda serie de ensayos se obtuvieron resultados análogos a la primera serie (véase Figura 6.14). Se confirman por ende la veracidad de los resultados obtenidos.

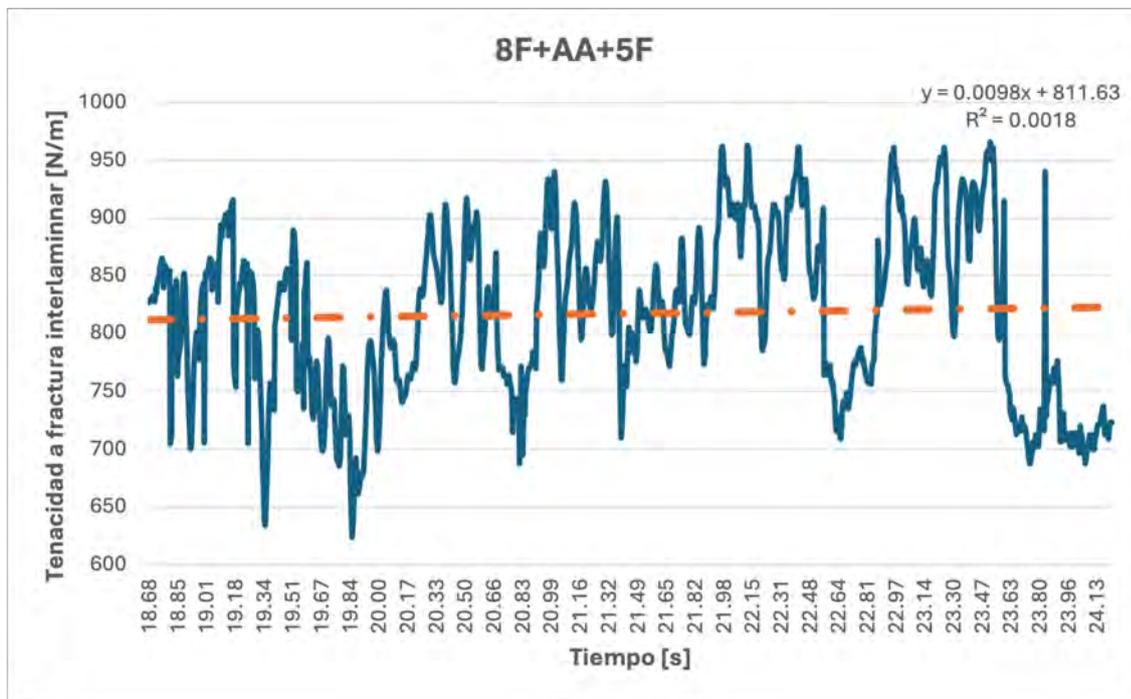


Figura 6.15 Evolución temporal de la tenacidad a fractura interlaminar de la segunda muestra de la configuración 8F+AA+5F en el ensayo HOD.

6.5.2 Modos de fallo identificados

En la Figura 6.16 es visible el resultado de la propagación de la grieta a lo largo del laminado una vez finalizado el ensayo. Cabe destacar una tendencia explicada en profundidad en [22]. El comportamiento de la muestra es el mismo que en las configuraciones anteriores. Al comienzo existe adhesivo en las dos partes del laminado como consecuencia de la presencia del teflón. Posteriormente, es visible una pequeña línea blanca de 1 mm de espesor que se corresponde con un fallo cohesivo. Posteriormente, el fallo que se ve es adhesivo seguido de una migración casi completa de la grieta. Resaltar una mayor presencia de fallo adhesivo.

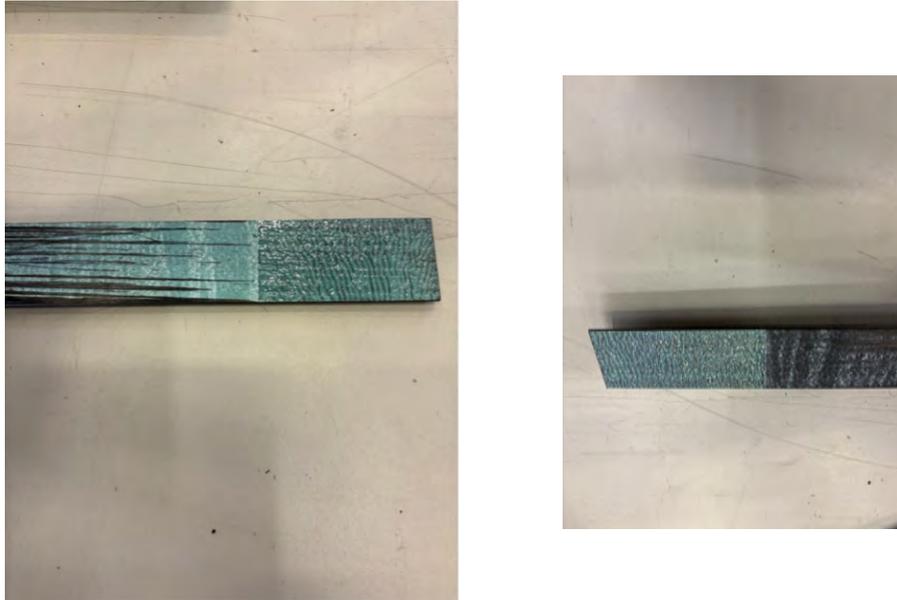


Figura 6.16 Ahderente de 5 (izquierda) y 8 (derecha) capas de la configuración 8F+AA+5F tras la realización del ensayo HOD.

6.5.3 Velocidad de ensayo

Como se muestra en la Figura 6.14, el tiempo de ensayo es de 8.5 s. La longitud de pelado obviando el teflón (5 cm aproximadamente) es de 11 cm = 0.11 m. Se obtiene por tanto un valor de velocidad de pelado de $0.012941 \text{ m/s} = 1.2941 \text{ cm/s} = 12.941 \text{ mm/s}$. En este caso la velocidad seleccionada era la misma que para la configuración 8F+AA+4F.

Paralelamente, como e muestra en la Figura 6.15, el tiempo de ensayo es de 5.45 s. La longitud de pelado obviando el teflón (5 cm aproximadamente) es de 9 cm = 0.09 m. Siendo la velocidad de pelado de $0.01651376 \text{ m/s} = 1.651376 \text{ cm/s} = 16.51376 \text{ mm/s}$. Como en la primera serie de ensayos, se continúa manteniendo la velocidad de pelado de la segunda serie de la configuraciones 8F+AA+3F y 8F+AA+4F.

6.6 8F+AA+6F

Se procede a comparar los resultados de tenacidad a fractura obtenidos con los ensayos en [5].

6.6.1 Comparación de la tenacidad a fractura interlaminar obtenida con el ensayo DCB

En la Figura 6.17 se representan los valores de tenacidad de la primera serie de ensayos. En [5] se establece que el ensayo DCB arroja valores de tenacidad a fractura comprendidos entre [850, 950] N/m.

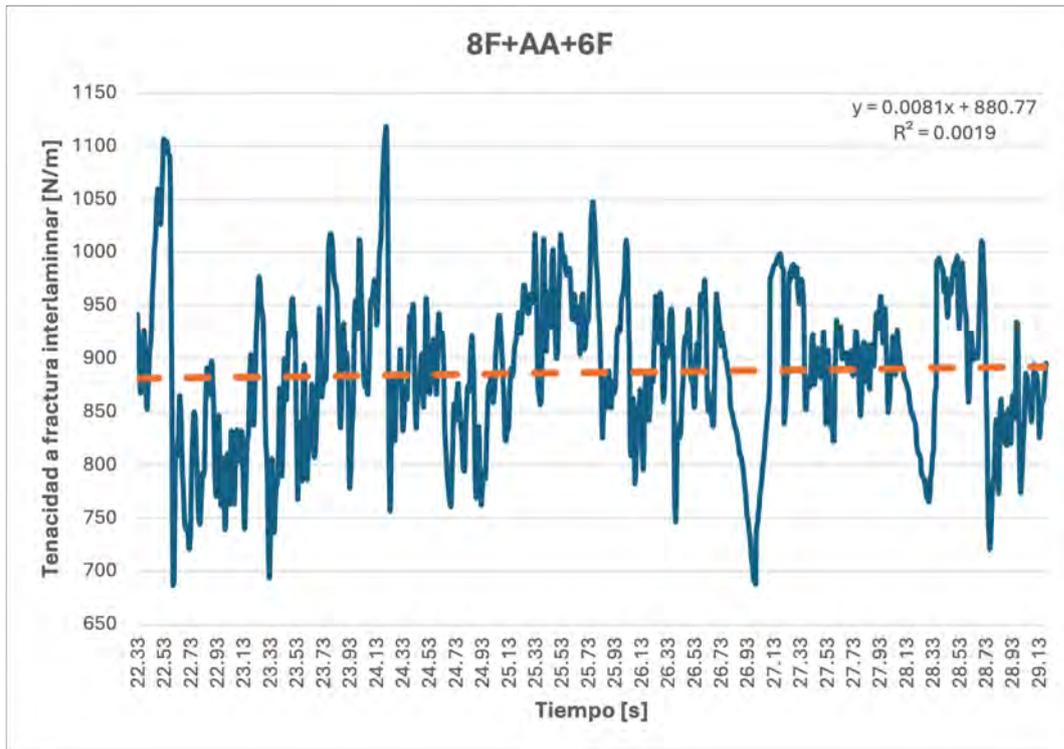


Figura 6.17 Evolución temporal de la tenacidad a fractura interlaminar de la primera muestra de la configuración 8F+AA+6F en el ensayo HOD.

A su vez, la Figura 6.18 pone en evidencia que en la segunda serie de ensayos se continúan obteniendo valores de tenacidad a fractura dentro del rango esperado y muy similares a los de la Figura 6.17.

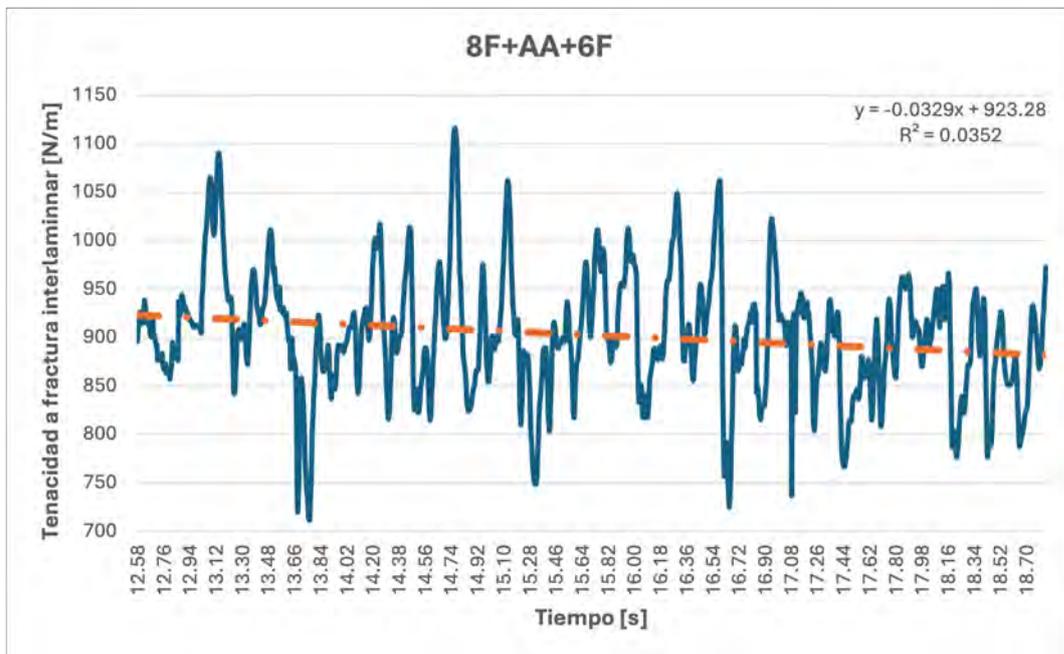


Figura 6.18 Evolución temporal de la tenacidad a fractura interlaminar de la segunda muestra de la configuración 8F+AA+6F en el ensayo HOD.

6.6.2 Modos de fallo identificados

En la Figura 6.19 es visible el resultado de la propagación de la grieta a lo largo del laminado una vez finalizado el ensayo. Cabe destacar una tendencia explicada en profundidad en [22]. En la configuración 8F+AA+5F se produce el cambio de tendencia en los modos de fallos precedido en [22]. A diferencia de las configuraciones anteriores, el modo de fallo predominante pasa a ser el cohesivo. Se observa cómo el adhesivo queda impregnado en ambos adherentes al finalizar el ensayo. Si bien, también se aprecia fallo adhesivo pero en menor medida.

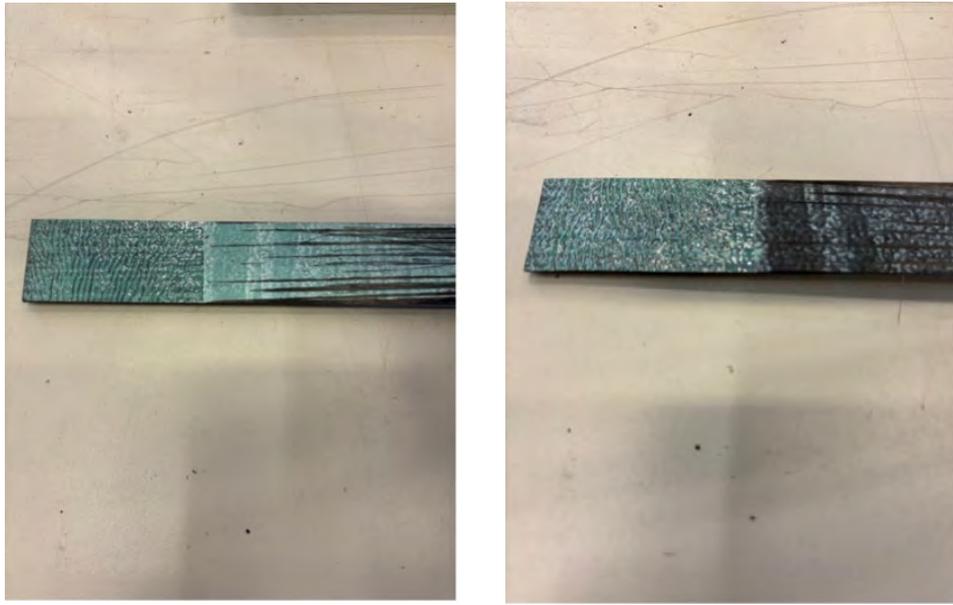


Figura 6.19 Adherente de 6 (izquierda) y 8 (derecha) capas de la configuración 8F+AA+6F tras la realización del ensayo HOD.

Por otro lado, es necesario analizar la relación existente entre los modos fallo y los valores de G_{IC} obtenidos como se hace en [22]. *A priori*, cabe esperar que siendo el valor de G_C mayor para los modos mixtos que para el modo I puro, al disminuir el espesor del adherente más fino, el G_C aumente. Sin embargo, los resultados de la actual campaña de ensayos reflejan que, a excepción de la configuración 8F+AA+4F, la tendencia es la contraria. Una posible causa es la diferente naturaleza del daño para cada configuración. Siendo la proporción de cohesividad y adhesividad de la propagación de la grieta diferente de 8F+AA+8F a 8F+AA+2 como se muestra en [22].

6.6.3 Velocidad de ensayo

Como se muestra en la Figura 6.17, el tiempo de ensayo es de 6.8 s. La longitud de pelado obviando el teflón (5 cm aproximadamente) es de 9 cm = 0.09 m. Se obtiene por tanto un valor de velocidad de pelado de $0.013235 \text{ m/s} = 1.3235 \text{ cm/s} = 13.23529 \text{ mm/s}$. Se mantuvo la velocidad seleccionada en las configuraciones 8F+AA+4F y 8F+AA+5F.

Por otro lado, como e muestra en la Figura 6.18, el tiempo de ensayo es de 6.12 s. La longitud de pelado obviando el teflón (5 cm aproximadamente) es de 9.5 cm = 0.095 m. Siendo la velocidad de pelado de $0.01552287 \text{ m/s} = 1.552287 \text{ cm/s} = 15.52287 \text{ mm/s}$. Como en la primera serie de ensayos, se continúa manteniendo la velocidad de pelado de la segunda serie de las configuraciones 8F+AA+3F, 8F+AA+4F y 8F+AA+5F.

6.7 8F+AA+7F

Se procede a comparar los resultados de tenacidad a fractura obtenidos con los ensayos en [5].

6.7.1 Comparación de la tenacidad a fractura interlaminar obtenida con el ensayo DCB

En la Figura 6.20 se representan los valores de tenacidad de la primera serie de ensayos. En [5] se establece que el ensayo DCB arroja valores de tenacidad a fractura comprendidos entre [1000, 1100] N/m. Se observa un notable aumento del valor de G_{IC} esperado al tratarse de la configuración más próxima al caso simétrico.

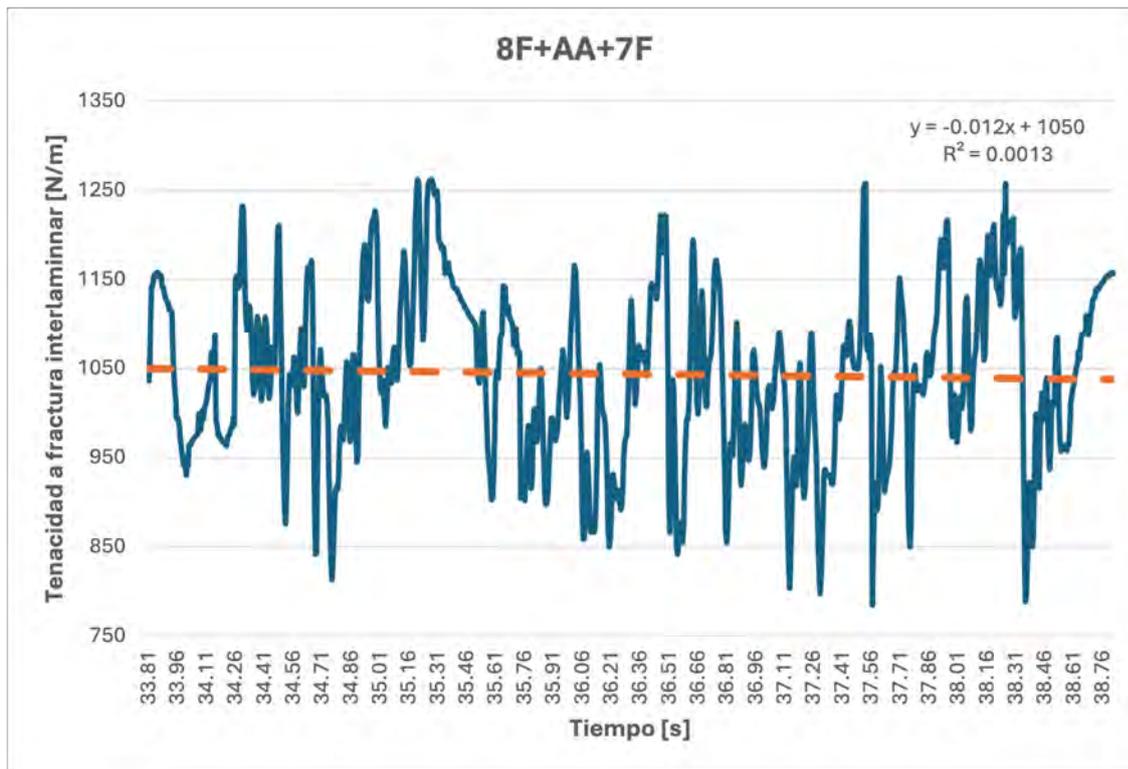


Figura 6.20 Evolución temporal de la tenacidad a fractura interlaminar de la primera muestra de la configuración 8F+AA7F en el ensayo HOD.

Los resultados obtenidos de tenacidad a fractura interlaminar en la segunda serie de ensayos se representan en la Figura 6.21. Se corrobora que en la primera serie de ensayos los valores de G_{IC} obtenidos para la configuración 8F+AA+7F eran los deseados.

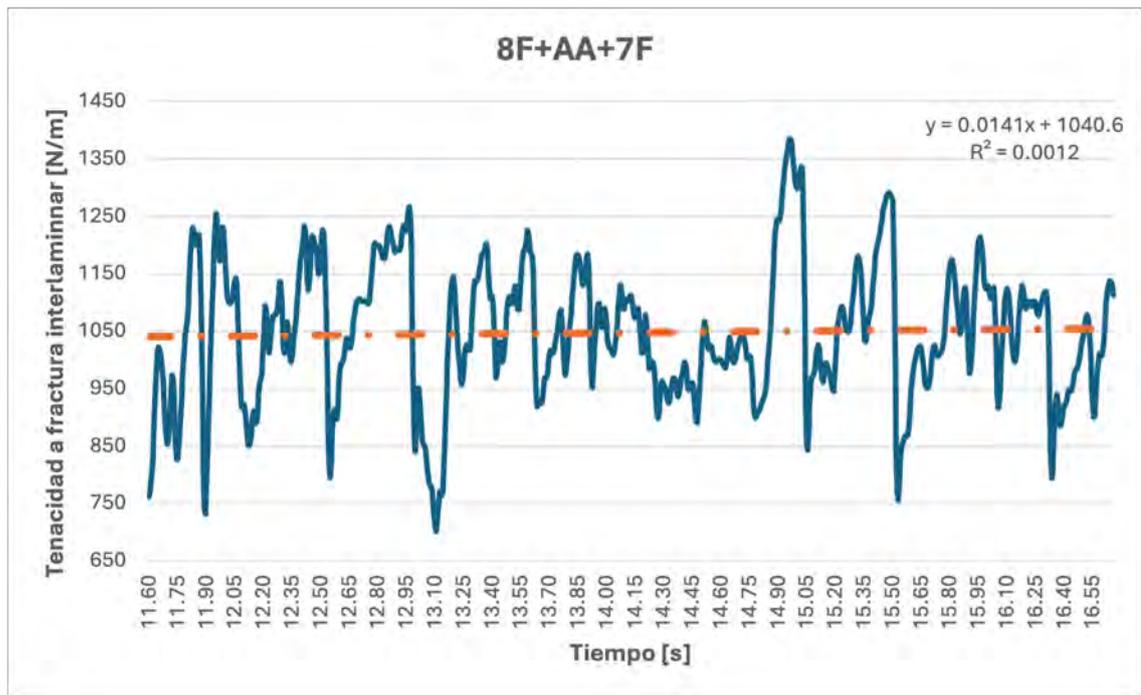


Figura 6.21 Evolución temporal de la tenacidad a fractura interlaminar de la segunda muestra de la configuración 8F+AA7F en el ensayo HOD.

6.7.2 Modos de fallo identificados

En la Figura 6.22 es visible el resultado de la propagación de la grieta a lo largo del laminado una vez finalizado el ensayo. Los modos de fallo identificados en la configuración 8F+AA+7F son los mismos que los hallados en la configuración 8F+AA+6F.

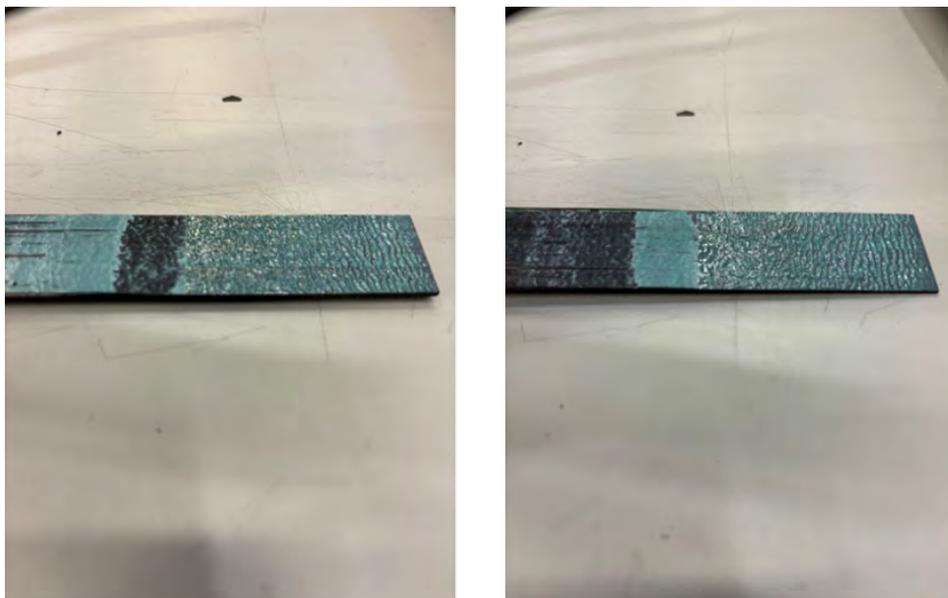


Figura 6.22 Adherente de 7 (izquierda) y 8 (derecha) capas de la configuración 8F+AA+7F tras la realización del ensayo HOD.

6.7.3 Velocidad de ensayo

Como se muestra en la Figura 6.20, el tiempo de ensayo es de 4.95 s. La longitud de pelado obviando el teflón (5 cm aproximadamente) es de 10 cm = 0.1 m. Se obtiene por tanto un valor de velocidad de pelado de $0.020202 \text{ m/s} = 2.0202 \text{ cm/s} = 20.202 \text{ mm/s}$. En este caso fue necesario aumentar la velocidad del potenciómetro porque no era capaz de pelar la muestra con la velocidad de las configuraciones 8F+AA+4F, 8F+AA+5F y 8F+AA+6F. Queda reflejado en el tiempo de ejecución del ensayo que es menor al de las configuraciones anteriores.

Análogo a la primera serie (véase Figura 6.20), en la Figura 6.21 se observa como el tiempo de ensayo se reduce a 4.95 s. Teniendo en cuenta que la longitud de pelado fue de 0.1 m obviando el teflón se obtiene una velocidad de pelado de $0.02222 \text{ m/s} = 2.2222 \text{ cm/s} = 22.2222 \text{ mm/s}$. Nótese que como en la primera serie, ha sido necesario de nuevo aumentar la velocidad de pelado para que el carrito pudiese pelar el laminado. Además, el valor que se obtiene es prácticamente igual que el de la primera serie. Pudiendo confirmar que para esta configuración y este tipo de probeta (proceso de fabricación, ciclo de curado...) el valor fronterizo reside en torno a este valor.

6.8 8F+AA+8F

Por último, se van a comparar los resultados de tenacidad a fractura obtenidos para la configuración 8F+AA+8F con los ensayos realizados en [5].

6.8.1 Comparación de la tenacidad a fractura interlaminar obtenida con el ensayo DCB

Se trata del caso simétrico. En [5] se establece que el ensayo DCB arroja valores de tenacidad a fractura comprendidos entre [1450, 1550] N/m. En la Figura 6.23 se representan los valores de tenacidad de la primera serie de ensayos. En este caso, al poseer los dos adherentes el mismo espesor, la propagación de la grieta se produce más uniformemente que en las configuraciones anteriores. En consecuencia, la grieta no migra al adherente más 'débil' sino que ambos oponen la misma resistencia al pelado del carrito. Obteniéndose valores de tenacidad a fractura muy superiores respecto a cualquier otra configuración.

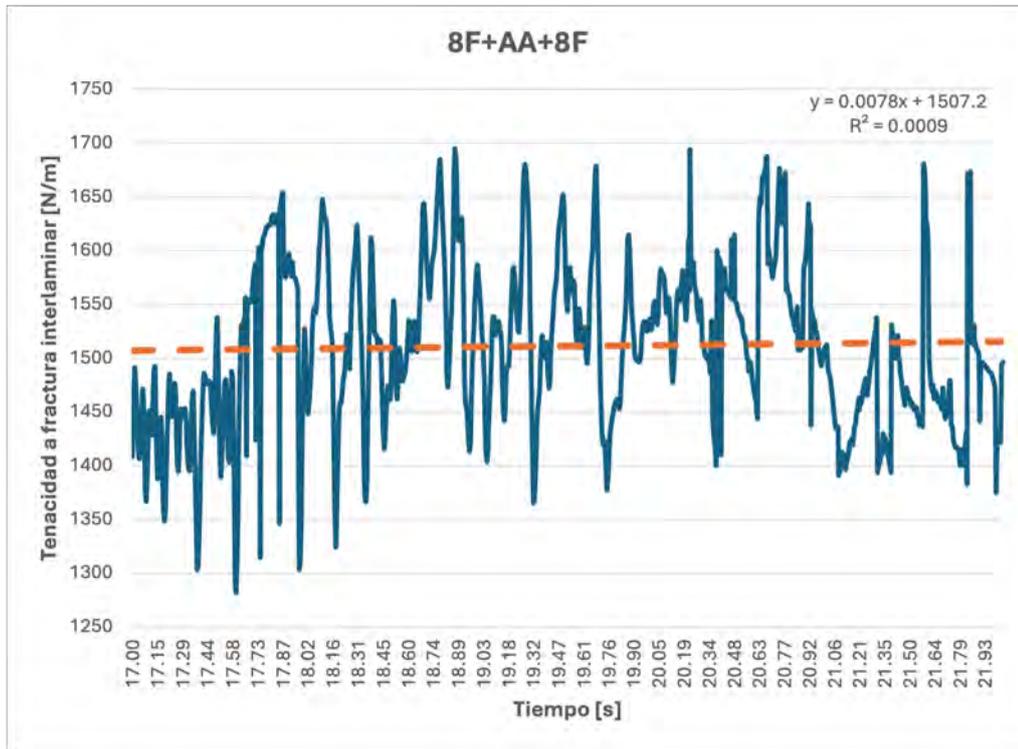


Figura 6.23 Evolución temporal de la tenacidad a fractura interlaminar de la primera muestra de la configuración 8F+AA+8F en el ensayo HOD.

Para terminar de completar el análisis, en la segunda serie de ensayos se comprobó que los valores de G_{IC} coincidiesen con los de la primera serie (véase Figura 6.23). Con todo ello, en la Figura 6.24 se representan los valores de G_{IC} obtenidos para la configuración 8F+AA+8F.

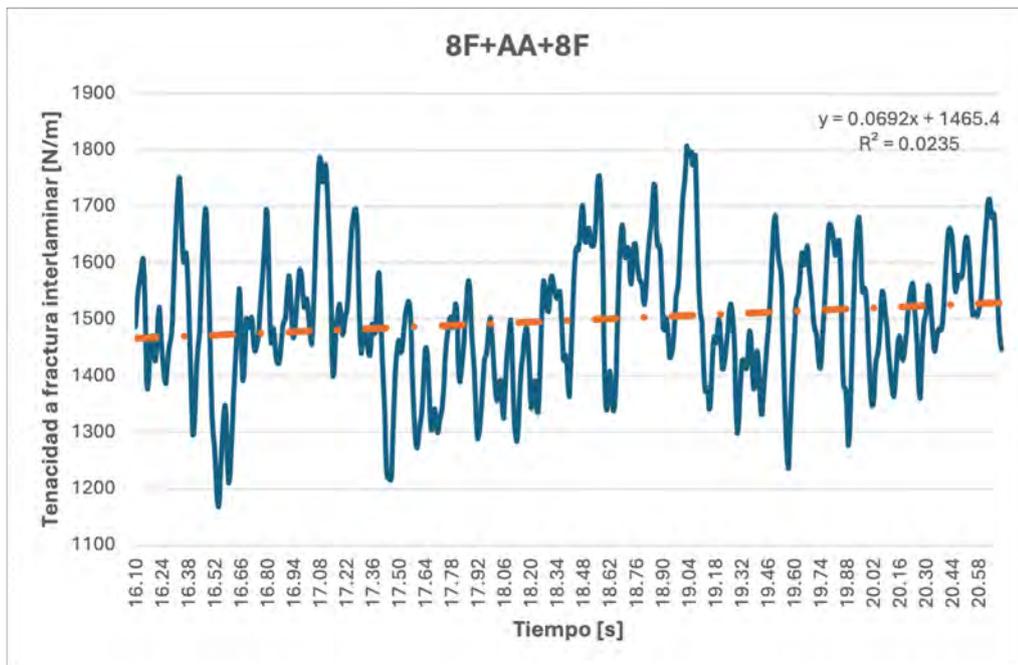


Figura 6.24 Evolución temporal de la tenacidad a fractura interlaminar de la segunda muestra de la configuración 8F+AA+8F en el ensayo HOD.

6.8.2 Modos de fallo identificados

En la Figura 6.25 es visible el resultado de la propagación de la grieta a lo largo del laminado una vez finalizado el ensayo. De igual forma, se concluye que las configuraciones 8F+AA+6F, 8F+AA+7F y 8F+AA+8F comparten un mismo comportamiento en la propagación de la grieta a lo largo del laminado.

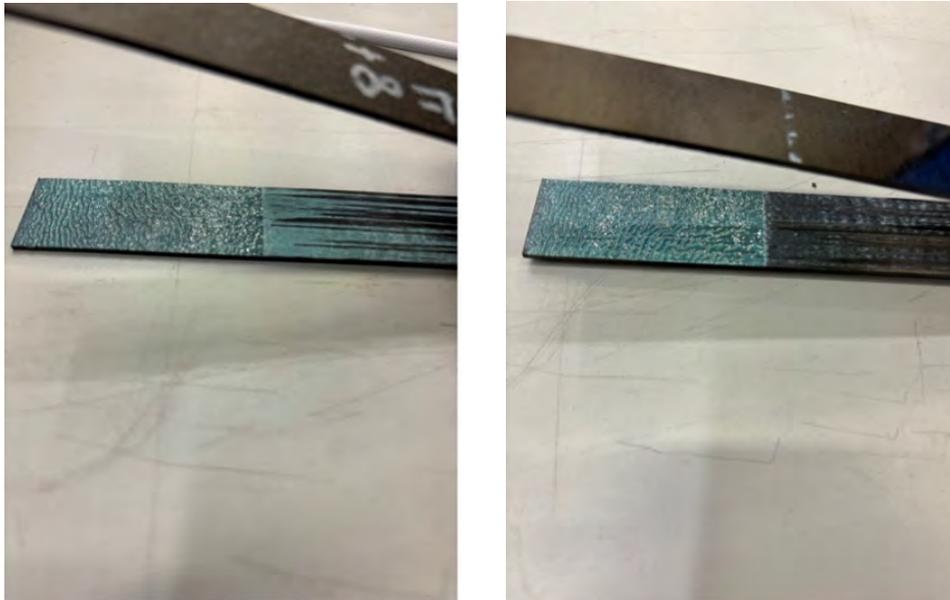


Figura 6.25 Ahderente de 8 (izquierda) y 8 (derecha) capas de la configuración 8F+AA+4F tras la realización del ensayo HOD.

6.8.3 Velocidad de ensayo

Como se muestra en la Figura 6.23, el tiempo de ensayo es de 4.93 s. La longitud de pelado obviando el teflón (5 cm aproximadamente) es de 10 cm = 0.1 m. Se obtiene por tanto un valor de velocidad de pelado de $0.020283 \text{ m/s} = 2.0283 \text{ cm/s} = 20.283 \text{ mm/s}$. En este caso fue necesario aumentar la velocidad del potenciómetro porque no era capaz de pelar la muestra con la velocidad de las configuraciones 8F+AA+4F, 8F+AA+5F y 8F+AA+6F. Queda reflejado en el tiempo de ejecución del ensayo que es menor al de las configuraciones anteriores. Se mantuvo la velocidad seleccionada en la configuración 8F+AA+7F.

Siguiendo la misma tendencia que la primera serie de ensayos (véase Figura 6.23), se extrae de la Figura 6.24 un tiempo de ensayo de 4.48 s. La longitud de pelado obviando el teflón es de 9 cm = 0.09 m. Se obtiene por tanto un valor de velocidad de pelado de $0.0223214 \text{ m/s} = 2.23214 \text{ cm/s} = 22.3214 \text{ mm/s}$. Se observa como se mantiene la misma velocidad de pelado de la configuración 8F+AA+7F.

7 Conclusiones, mejoras y líneas de estudio futuras

El presente capítulo se dedica a exponer las conclusiones obtenidas a lo largo del desarrollo de este Trabajo de Fin de Máster (TFM). A lo largo de las secciones anteriores, se han explorado diversas dimensiones del tema de estudio, analizando tanto el marco teórico como los resultados empíricos obtenidos a través de la campaña de ensayos. En esta fase final, es fundamental sintetizar los hallazgos más relevantes y reflexionar sobre el cumplimiento de los objetivos planteados al inicio del trabajo.

En particular, se presentarán las conclusiones más relevantes derivadas de la campaña de ensayos realizada. Estos ensayos han sido fundamentales para validar las hipótesis planteadas y proporcionar datos empíricos que sustentan las principales afirmaciones del estudio. A través de una tabla comparativa y análisis detallados, se ilustrarán los resultados obtenidos, facilitando una comprensión clara y concisa de los hallazgos.

Las conclusiones aquí presentadas no solo resumen los puntos clave abordados en el TFM, sino que también ofrecen una visión crítica sobre las implicaciones de los resultados obtenidos, su aplicabilidad práctica, y las posibles limitaciones encontradas durante el proceso de investigación. Además, se proporcionan recomendaciones para futuras investigaciones y para la aplicación de los hallazgos en contextos específicos.

A lo largo del capítulo, se detallarán las principales conclusiones derivadas de este estudio, abordando tanto las aportaciones teóricas como las prácticas. Asimismo, se discutirá cómo estos resultados contribuyen al conocimiento existente del ensayo HOD y qué nuevas preguntas emergen a partir de los hallazgos obtenidos. Se incluirá una comparación entre las diferentes series de ensayos que permitirá visualizar de manera clara las diferencias y similitudes entre los distintos escenarios ensayados, proporcionando un soporte visual que complementa el análisis crítico realizado.

Finalmente, se manifestarán las líneas de investigación que deben seguirse en el futuro para validar completamente el ensayo HOD y facilitar su introducción en la cadena de producción. Es crucial establecer las bases para estudios futuros que profundicen en áreas no completamente exploradas en este trabajo. Esto incluye la realización de pruebas adicionales en condiciones variadas, la optimización de los procesos y la evaluación de la escalabilidad de los resultados obtenidos. Al definir estas bases, se asegura una ruta clara y estructurada que permitirá avanzar en la validación del ensayo HOD, garantizando su eficacia y viabilidad a escala industrial. Esto no solo fortalecerá

la confianza en los hallazgos actuales, sino que también permitirá la integración eficiente y efectiva del ensayo HOD en entornos de producción reales.

7.1 Conclusiones

La forma de proceder y de extraer las principales conclusiones del trabajo va a ser comprobando si los hitos inicialmente planteados se han cumplido y de qué forma. Adicionalmente, se pondrá en valor a partir de la motivación inicial planteada cómo ha contribuido la presente investigación. Añadiendo un análisis exhaustivo y los comentarios que se consideren oportunos teniendo en cuenta toda la campaña de ensayos.

La creación del ensayo *Horizontal Open Displacement* por parte del GERM tenía como principal objetivo disponer de un ensayo de pelado de materiales compuestos capaz de ensayar *in situ* las piezas y que además, no tuviese limitaciones que sus antepasados compartían. Entre ellas, se buscaba que desapareciese la necesidad de medir la grieta (dada su alta dificultad) para el cálculo de la tenacidad a fractura interlaminar, que fuese posible ensayar tanto laminados simétricos como antisimétricos o que pudiesen ser pelados ambos adherentes independientemente del espesor de los mismos. Estos avances fueron introducidos en [20] con éxito pero debido a la limitación temporal del trabajo académico, quedaron muchos puntos abiertos y líneas de investigación que eran necesarias explorar para poder validar el ensayo HOD. Es precisamente aquí dónde el presente trabajo entra en partida. La comparación de los valores de tenacidad a fractura interlaminar obtenidos en el ensayo HOD con el ensayo DCB mundialmente validado, el análisis de las velocidades de pelado o la versatilidad del ensayo HOD son algunos de los puntos tratados en el proyecto.

El sustento del proyecto es la comparación de los valores de tenacidad a fractura interlaminar obtenidos en la campaña de ensayos HOD con la campaña DCB realizada en [5]. A modo de resumen, se presenta en la Tabla 7.1 el rango de valores de G_{IC} obtenidos y los modos de fallo predominantes en las diferentes configuraciones para las dos series de ensayos. Téngase en cuenta que la tercera serie solo contempla el estudio de la configuración 8F+AA+2F reflejado en 6.2.4 por lo que no ha sido representada en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1 Resumen de los valores de tenacidad a fractura interlaminar y de los modos de fallo predominantes para las diferentes configuraciones ensayadas en la campaña de ensayos HOD.

Configuración	Serie 1		Serie 2	
	Rango G_{IC} J/m ²	MF predominante	Rango G_{IC} J/m ²	MF predominante
8F+AA+2F	575-585	Adhesivo	550-560	Adhesivo
8F+AA+3F	755-760	Adhesivo	745-770	Adhesivo
8F+AA+4F	840-845	Adhesivo	830-850	Adhesivo
8F+AA+5F	820-825	Adhesivo	810-825	Adhesivo
8F+AA+6F	875-900	Cohesivo	880-920	Cohesivo
8F+AA+7F	1045-1050	Cohesivo	1045-1055	Cohesivo
8F+AA+8F	1510-1520	Cohesivo	1485-1510	Cohesivo

Si se compara la Tabla 7.1 con la Tabla 5.1 se observa cómo el valor de G_C se encuentra dentro del rango esperado según la campaña realizada en [5] para todas las configuraciones. Adicionalmente, utilizando las investigaciones realizadas en [22] acerca de los modos de fallo, es posible afirmar que se obtienen las mismas tendencias. Siendo el modo de fallo adhesivo el predominante desde la configuración 8F+AA+2F hasta la configuración 8F+AA+5F y el cohesivo para las configuraciones

restantes: 8F+AA+7F y 8F+AA+8F. Se concluye por tanto que los resultados de tenacidad a fractura obtenidos coinciden con los de la campaña DCB realizado en [5] y que los modos de fallo analizados son análogos a los encontrados en [22]. Si bien, al disponer únicamente de probetas fabricadas con un mismo proceso de curado no ha sido posible evaluar el efecto que este tiene en la propagación de la grieta a lo largo del laminado. De la misma manera, el ángulo que produce el avance de la grieta respecto al eje de simetría de la muestra requería de un análisis microscópico que no se contempla en el proyecto. Pese a ello, a nivel macroscópico sí puede afirmarse que en las configuraciones más cercanas al caso simétrico (8F+AA+7F y 8F+AA+8F) el ángulo de propagación de grieta inicial era más pequeño que para los casos menos simétricos.

Como se ha mencionado anteriormente, la velocidad de pelado ha sido otro de los puntos estudiados en la campaña de ensayos. En la Tabla 7.2 se recopilan los valores de los parámetros necesarios para el cálculo de la velocidad de pelado de las diferentes configuraciones ensayadas en la campaña de ensayos HOD.

Tabla 7.2 Resumen de los valores de los parámetros necesarios para el cálculo de la velocidad de pelado de las diferentes configuraciones ensayadas en la campaña de ensayos HOD.

Configuración	Serie 1		Serie 2	
	Tiempo [s]	Longitud pelada [m]	Tiempo [s]	Longitud pelada [m]
8F+AA+2F	2.64	0.09	2.72	0.09
8F+AA+3F	10.2	0.1	6.12	0.09
8F+AA+4F	7.82	0.1	5.44	0.09
8F+AA+5F	8.5	0.11	5.45	0.09
8F+AA+6F	6.8	0.09	6.12	0.095
8F+AA+7F	4.95	0.1	4.95	0.1
8F+AA+8F	4.93	0.1	4.48	0.09

Como es visible en la Tabla 7.2 los tiempos de ensayo y las longitudes peladas son consecuencia directa de la velocidad de pelado seleccionadas. Como se explica en 4, resulta muy difícil seleccionar una velocidad determinada al no disponer de un indicador de la misma. Pese a ello, en la Tabla 7.3 se representan los valores de velocidades de pelado de las diferentes configuraciones ensayadas en la campaña de ensayos HOD.

Tabla 7.3 Resumen de los valores de velocidad de pelado de las diferentes configuraciones ensayadas en la campaña de ensayos HOD.

Configuración	Serie 1	Serie 2
	Velocidad de pelado [cm/s]	Velocidad de pelado [cm/s]
8F+AA+2F	3.409091	3.30882
8F+AA+3F	0.980392	1.55228
8F+AA+4F	1.2787	1.65441
8F+AA+5F	1.2941	1.651376
8F+AA+6F	1.3235	1.552287
8F+AA+7F	2.0202	2.222
8F+AA+8F	2.0283	2.23214

Como ya se explicó en el Capítulo 6 y como se observa en la Tabla 7.3 se produce un incremento sustancial de la configuración 8F+AA+6F a la configuración 8F+AA+7F. El motivo se encuentra en la propia anatomía de la caja de control y el motor de pelado asociado. Básicamente, teniendo en

cuenta la morfología de las probetas (proceso de curado, materiales...) no era capaz de pelar la muestra con la velocidad de las configuraciones 8F+AA+4F, 8F+AA+5F y 8F+AA+6F. Inicialmente se pensaba que el motor de pelado tiraba del carrito de pelado con la misma fuerza independientemente de la velocidad seleccionada en la caja de control. No fue hasta el momento en el que se ensayó la configuración 8F+AA+7F cuando comenzaron las sospechas acerca de esta hipótesis. La realización de una segunda serie de ensayos de las mismas probetas permitió corroborar el comportamiento de la máquina y establecer que para las condiciones de trabajo mencionadas existía una frontera a superar. Concretamente, se concluye que para una configuración de 8F+AA+7F se precisa una velocidad de pelado igual o superior a 2 cm/s aproximadamente. Como se observa en la Tabla 7.3 para ambas series los valores obtenidos son prácticamente iguales.

Por último, en la campaña de ensayos realizada se estudió la capacidad del banco de ensayos del *Horizontal Open Displacement* de pelar tanto el adherente de menor espesor como el de mayor. Para ello, se hizo uso de una tercera probeta de la configuración 8F+AA+2F. Se sujetó el adherente de menor espesor con la cola de milano y se situó el adherente de 8 capas en el carrito de pelado. Tras la realización del ensayo se obtuvieron los valores de tenacidad a fractura visibles en la Figura 6.7. Se concluye que se obtuvieron los mismos resultados y que resulta indiferente la colocación de la muestra. Siendo esta una ventaja competitiva respecto a ensayos de tambor convencionales como el CDP o más novedosos como el HDP. Además pone de manifiesto lo predicho por la literatura (véase Capítulo 3) en lo referente al cálculo de la tenacidad a fractura interlaminar; depende únicamente del ancho de la probeta y de la fuerza de pelado aplicada.

7.2 Posibles mejoras y líneas de estudio futuras

En esta sección se abordarán las posibles mejoras identificadas durante la realización del proyecto; así como las líneas de estudio futuras que pueden derivarse de los hallazgos obtenidos. A lo largo de la investigación, se han identificado áreas que, con ajustes y optimizaciones, podrían potenciar significativamente los resultados obtenidos, mejorar la eficiencia del ensayo de pelado y ampliar el alcance del ensayo HOD en el ámbito industrial.

Es fundamental reconocer que cualquier proyecto de investigación es, en muchos sentidos, un punto de partida más que un punto final. Los resultados y conclusiones obtenidos proporcionan una base sólida, pero también revelan nuevas preguntas y oportunidades para profundizar en el conocimiento del tema estudiado. Las mejoras propuestas buscan no solo resolver limitaciones encontradas, sino también abrir nuevas vías de exploración que podrían contribuir a avances significativos en la disciplina. Asimismo, se discutirán las líneas de investigación futuras necesarias para validar y perfeccionar el ensayo HOD. Estas líneas de estudio incluirán la realización de pruebas adicionales en diferentes condiciones, la exploración de nuevas variables y la evaluación de la viabilidad del proceso a mayor escala. La identificación de estas áreas es crucial para asegurar una evolución continua y una implementación exitosa de los hallazgos en entornos de producción real.

A continuación, se detallarán las mejoras propuestas y se describirán las principales áreas de investigación que, de ser exploradas, pueden ofrecer un impacto significativo en la validez y aplicabilidad del trabajo realizado. Este análisis no solo pretende mejorar el trabajo actual, sino también proporcionar una guía para futuras investigaciones que puedan ampliar y profundizar en los conocimientos adquiridos.

Si se pone el foco sobre el análisis realizado en el presente trabajo, existe un punto de interés a explorar. Se trata del filtrado de la señal que proporciona en la actualidad el módulo de adquisición

de datos *Quantum HBM MX1615B* y que es mostrada a través del *Catman Easy V4.2.2*. Como se observa a lo largo del capítulo 6, la tenacidad a fractura interlaminar no proporciona valores constantes en el tiempo durante el pelado. De ahí, que tanto en los resultados de la campaña realizada en [5] como la de este proyecto sean mostrados en forma de rango. Si bien, esto no supone un hito de mejora en su totalidad mientras que las probetas sean fabricadas y ensayadas manualmente. Donde surge una línea de mejora extensa es en la naturaleza de la propia señal. Pese a que el intervalo mencionado se obtiene a través del promedio de todos los puntos de la gráfica, la tenacidad a fractura interlaminar experimenta crestas y valles continuamente fruto del avance imperfecto del carrito de pelado y de la propia propagación de la grieta a lo largo del laminado. Las investigaciones futuras deberían centrar su atención en parámetros como el ruido blanco, la covarianza y los ajustes estadísticos. Al comienzo del proyecto se planteó la posibilidad de incluir dicho análisis. Se tomó como primera hipótesis hacer uso del filtro de *kalman* como herramienta de filtrado a través de *Matlab*. Sin embargo, la limitación temporal y la necesidad de acotar la investigación dejan marcadas las líneas futuras de investigación para su implementación.

Desde la perspectiva anatómica del banco de ensayos, surgen varios puntos de posible mejora. El primero de ellos tiene que ver con la longitud del banco de ensayos. Pese a que es cierto que el objetivo del ensayo HOD es ensayar muestras de componentes reales y no la pieza en su totalidad existe cierta limitación de recorrido. El carrito de pelado avanzaba gracias al cable de acero impulsado por el motor de pelado en la dirección longitudinal. El problema se encuentra en que situando la probeta en el extremo de la cola de milano, el carrito de pelado debe pararse antes de llegar a la polea por la que pasa el cable de acero. De lo contrario, ocurriría lo que se experimentó en la primera serie de la configuración 8F+AA+2F como se explica en capítulos anteriores. Es decir, si se quisiese pelar completamente la muestra, sería necesario que la distancia desde dónde se cola la muestra hasta la polea fuese superior. Hacer el soporte metálico del banco de ensayos sería una posible vía de mejora. Aunque pelar la probeta totalmente no sea necesario en todos los casos supone una mejora desde el lado de la seguridad y mejora considerablemente la ejecución del ensayo.

En el Capítulo 4 se dieron algunas pinceladas sobre el problema existente con la velocidad de pelado. El cálculo de la velocidad de pelado es posible una vez realizado el ensayo, analizando la duración del mismo y la longitud de la muestra pelada. Sin embargo, resultaría muy interesante que el propio operario tuviese opción de ajustarla a un valor determinado antes de comenzar el ensayo. De esta forma, sería posible ensayar varias muestras con una misma velocidad de pelado y poder deducir conclusiones relevantes. Además, para las configuraciones con mayores espesores que requieren valores superiores de velocidad eliminaría la duda de si la velocidad seleccionada es suficiente para pelar el laminado. Adicionalmente, esto permitiría generalizar un valor de velocidad cuando se tuviesen diferentes procesos de fabricación, materiales u procesos de curado. En resumen, disponer de un indicador de velocidad o de voltaje suministrado por la caja de control al motor facilitaría el trabajo del operario y aumentaría la productividad del *Horizontal Open Displacement* en su conjunto.

Otra línea de mejora se encuentra también relacionada con la velocidad de pelado. En el actual trabajo se ha llegado a la conclusión de que para la configuración 8F+AA+7F se precisa al menos de una velocidad de pelado igual o superior a 2 m/s. Sin embargo, dicho valor es dependiente de factores tales como la forma en la que se han apilado las láminas, la naturaleza de los materiales compuestos utilizados, las propiedades del adhesivo, el ciclo de curado aplicado o de la forma en la que el operario ha ejecutado el ensayo. Por todo ello, según las condiciones de trabajo se tendrá una combinación de laminado y velocidad de pelado mínima diferente. Se plantea la posibilidad de realizar tantas campañas de ensayos HOD como sea posible para poder abarcar toda la casuística y

hacer del *Horizontal Open Displacement* un ensayo respaldado por numerosas investigaciones.

La validación y optimización del ensayo *Horizontal Open Displacement* (HOD) representan un hito significativo en el estudio de materiales compuestos. Este método, posee numerosas ventajas sobre ensayos convencionales como el *Double Cantilever Beam* (DCB) o el *Climbing Drum Peel* (CDP) pero también respecto a otros más novedosos desarrollados también por el GERM como el *Horizontal Drum Peel*. Entre otros factores, ofrece la posibilidad de pelar laminados antisimétricos, simplifica el proceso al eliminar la necesidad de medir la grieta directamente, es igualmente válido tanto para pelar adherentes de espesores pequeños y su principal ventaja competitiva, la ejecución del ensayo puede realizarse *in situ* sobre la pieza real. No obstante, aún queda mucho por explorar y validar. Continuar investigando es esencial para asegurar que todas las variables relevantes sean plenamente comprendidas y controladas.

Las futuras campañas de ensayos deben enfocarse en probar configuraciones y casuísticas nuevas, ampliando así el rango de aplicaciones del HOD. Es vital evaluar el comportamiento del ensayo en diferentes tipos de laminados y condiciones de pelado, así como analizar su precisión y repetibilidad en entornos industriales reales. Solo a través de una investigación exhaustiva y sistemática se podrá garantizar que el HOD cumpla con los estándares de calidad y eficiencia requeridos para su implementación en la industria. Además, es fundamental explorar cómo este ensayo puede integrarse en los procesos de producción existentes, optimizando su aplicación para que sea tanto eficiente como efectiva para los operarios. Las campañas de ensayo futuras no solo deben centrarse en la validación técnica, sino también en la viabilidad práctica del HOD en un contexto industrial. La introducción del banco de ensayos HOD podría conllevar cambios de diseño y la incorporación de elementos más sofisticados, especialmente en lo relacionado con las células de carga, con el objetivo de aumentar la capacidad productiva y mejorar la precisión de los resultados obtenidos. Es importante resaltar que los elementos utilizados para la construcción del banco de ensayos fueron seleccionados por el GERM de forma experimental. Es decir, se buscaba inicialmente disponer de un dispositivo que fuese capaz de ejecutar ensayos de pelado. Desde entonces, no ha experimentado grandes cambios en sus componentes salvo los explicados en 4. Si finalmente se introdujese en los laboratorios de materiales compuestos dedicados al ensayo de los mismos se abre la puerta a nuevas configuraciones de diseño. Por ejemplo, el soporte que sostiene el banco de ensayos es muy pesado y hace que su traslado no sea sencillo. Además, la cola de milano es solidaria a él. Nuevas ideas de diseño podrían mejorar la operativa del ensayo HOD.

En conclusión, la importancia de continuar investigando el ensayo HOD radica en su potencial para revolucionar la evaluación de la tenacidad a fractura interlaminar y el análisis de la propagación de grietas en materiales compuestos. Una validación completa y una mayor comprensión de sus aplicaciones prácticas permitirán que el HOD se convierta en una herramienta estándar, beneficiando tanto a la comunidad científica como a la industria. Este trabajo pionero en la Universidad de Sevilla sienta las bases para futuros avances y abre la puerta a nuevas posibilidades en el estudio y aplicación de materiales compuestos.

Actualmente, el estudio de la tenacidad a fractura y el pelado de láminas de material compuesto es un área de gran interés y relevancia en sectores ingenieriles como el aeronáutico y el naval. Estos sectores demandan métodos precisos y eficientes para evaluar la resistencia y durabilidad de los materiales compuestos, que son cruciales para garantizar la seguridad y el rendimiento de las estructuras. La literatura científica ha documentado diversas técnicas y enfoques para evaluar estos materiales, pero aún existen limitaciones y áreas de mejora. Los ensayos tradicionales, aunque bien establecidos, pueden ser complejos, costosos y a menudo requieren condiciones de laboratorio controladas. Datos recientes sugieren que la industria continúa buscando métodos más prácticos

y eficientes que puedan ser aplicados directamente en el campo, sin comprometer la precisión y la fiabilidad de los resultados. El ensayo HOD tiene el potencial de satisfacer estas necesidades al proporcionar una metodología más eficiente y adaptable que los ensayos convencionales.

En conclusión, la importancia de continuar investigando el ensayo HOD radica en su potencial para revolucionar la evaluación de la tenacidad a fractura interlaminar y el análisis de la propagación de grietas en materiales compuestos. Una validación completa y una mayor comprensión de sus aplicaciones prácticas permitirán que el HOD se convierta en una herramienta estándar, beneficiando tanto a la comunidad científica como a la industria. Este trabajo pionero en la Universidad de Sevilla sienta las bases para futuros avances y abre la puerta a nuevas posibilidades en el estudio y aplicación de materiales compuestos.

Índice de Figuras

1.1	Materiales que conforman el <i>Boeing 747</i> [3]	2
1.2	Tipos de uniones encoladas en materiales compuestos [4]	3
1.3	Pirámide de ensayos [6]	4
1.4	Modos de fallo [7]	5
1.5	Modos de fallo identificados durante la realización de los ensayos del presente caso de estudio	6
1.6	Modos de fractura. [8]	6
1.7	Control de proceso actual [4]	7
1.8	Control de proceso deseado [4]	8
2.1	Ensayo <i>Double Cantilever Beam</i> (DCB) [13]	12
2.2	Ensayo <i>Climbing Drum Peel</i> (CDP) [16][17]	13
2.3	Ensayo <i>Horizontal Drum Peel</i> (HDP) [5]	14
2.4	Ensayo <i>Horizontal Open Displacement</i> (HOD) [4]	14
2.5	Comparación entre los diferentes tipos de ensayos [4]	15
3.1	Variables del ensayo HOD [20]	18
3.2	Estudio analítico del HOD [20]	18
3.3	Definición del momento en la muestra [20]	19
3.4	Desarrollo matemático HOD [20]	20
3.5	Esfuerzos en el vértice de la grieta [20]	20
3.6	Curva P- δ en el ensayo DCB [4]	21
3.7	Esquema para el análisis mecánico del HDP [20]	23
4.1	Diseño global del banco de ensayos del HOD [20]	26
4.2	Perfil del banco de ensayos del HOD [20]	26
4.3	Planta del banco de ensayos del HOD [20]	26
4.4	Superficie de apoyo del banco de ensayos HOD	27
4.5	Cola de milano del banco de ensayos HOD	27
4.6	Plano del motor K80-GR53.30	28
4.7	Caja de control del ensayo HOD	28
4.8	Partes que componen al soporte del ensayo HOD [20]	29
4.9	Soporte que contiene al motor K80-GR53.30 en el ensayo HOD	29
4.10	Ruedas guías contenidas en el soporte del ensayo HOD	29
4.11	Primera versión del carrito de pelado del ensayo HOD	30
4.12	Alzado, perfil y planta de la primera versión del carrito de pelado del ensayo HOD	30
4.13	Versión mejorada del carrito de pelado del ensayo HOD	31
4.14	Conexión de puertos en el módulo de adquisición de datos <i>Quantum HBM MX1615B</i>	31

4.15	Cableado resultante para los dos células de carga utilizadas en el ensayo HOD	32
4.16	Célula de carga DYMH-103 de 20 kg incorporada en el carrito de pelado del ensayo HOD	33
4.17	Sensor asociado a la célula de carga DYMH-103 de 20 kg	33
4.18	Proceso de calibración manual de la célula de carga DYMH-103 de 20 kg	34
4.19	Pesos utilizados para la calibración manual de la célula de carga DYMH-103 de 20 kg	35
4.20	Adquisición de medidas para la calibración de la célula de carga DYMH-103 de 20 kg	35
4.21	Resultado de la calibración manual de la célula de carga DYMH-103 de 20 kg	36
4.22	Dimensiones necesarias de las probetas para la correcta realización del ensayo HOD [20]	36
4.23	Vinculación del módulo de adquisición HBM con el <i>software Catman Easy</i> [20]	36
4.24	Canales disponibles del módulo de adquisición de datos visibles en <i>Catman Easy</i>	37
4.25	Calibración automática de la célula de carga [20]	37
4.26	Sección de <i>Visualization</i> de <i>Catman Easy</i> [20]	38
4.27	Sección de <i>Settings</i> de <i>Catman Easy</i> [20]	38
4.28	Funcionamiento de la caja de control asociada al motor de pelado [20]	38
5.1	Probetas a ensayar	42
5.2	Propiedades físicas y mecánicas de los materiales utilizados [5]	42
6.1	Archivo .XLS resultante de la configuración 8F+AA+2F tras la realización del ensayo HOD	46
6.2	Datos asociados a la célula de carga C4-731658 para la configuración 8F+AA+2F tras la realización del ensayo HOD	46
6.3	<i>Script</i> de <i>Matlab</i> utilizado para el postprocesado de los resultados tras la realización del ensayo HOD	47
6.4	Evolución temporal de la tenacidad a fractura interlaminar de la primera muestra de la configuración 8F+AA+2F en el ensayo HOD	48
6.5	Evolución temporal de la tenacidad a fractura interlaminar de la segunda muestra de la configuración 8F+AA+2F en el ensayo HOD	49
6.6	Ahderente de 2 (izquierda) y 8 (derecha) capas de la configuración 8F+AA+2F tras la realización del ensayo HOD	50
6.7	Evolución temporal de la tenacidad a fractura interlaminar de la tercera muestra de la configuración 8F+AA+2F en el ensayo HOD	51
6.8	Evolución temporal de la tenacidad a fractura interlaminar de la primera muestra de la configuración 8F+AA+3F en el ensayo HOD	52
6.9	Evolución temporal de la tenacidad a fractura interlaminar de la segunda muestra de la configuración 8F+AA+3F en el ensayo HOD	52
6.10	Ahderente de 3 (izquierda) y 8 (derecha) capas de la configuración 8F+AA+3F tras la realización del ensayo HOD	53
6.11	Evolución temporal de la tenacidad a fractura interlaminar de la primera muestra de la configuración 8F+AA+4F en el ensayo HOD	54
6.12	Evolución temporal de la tenacidad a fractura interlaminar de la segunda muestra de la configuración 8F+AA+4F en el ensayo HOD	55
6.13	Ahderente de 4 (izquierda) y 8 (derecha) capas de la configuración 8F+AA+4F tras la realización del ensayo HOD	55
6.14	Evolución temporal de la tenacidad a fractura interlaminar de la primera muestra de la configuración 8F+AA+5F en el ensayo HOD	56
6.15	Evolución temporal de la tenacidad a fractura interlaminar de la segunda muestra de la configuración 8F+AA+5F en el ensayo HOD	57
6.16	Ahderente de 5 (izquierda) y 8 (derecha) capas de la configuración 8F+AA+5F tras la realización del ensayo HOD	58

6.17	Evolución temporal de la tenacidad a fractura interlaminar de la primera muestra de la configuración 8F+AA+6F en el ensayo HOD	59
6.18	Evolución temporal de la tenacidad a fractura interlaminar de la segunda muestra de la configuración 8F+AA+6F en el ensayo HOD	59
6.19	Ahderente de 6 (izquierda) y 8 (derecha) capas de la configuración 8F+AA+6F tras la realización del ensayo HOD	60
6.20	Evolución temporal de la tenacidad a fractura interlaminar de la primera muestra de la configuración 8F+AA7F en el ensayo HOD	61
6.21	Evolución temporal de la tenacidad a fractura interlaminar de la segunda muestra de la configuración 8F+AA7F en el ensayo HOD	62
6.22	Ahderente de 7 (izquierda) y 8 (derecha) capas de la configuración 8F+AA+7F tras la realización del ensayo HOD	62
6.23	Evolución temporal de la tenacidad a fractura interlaminar de la primera muestra de la configuración 8F+AA+8F en el ensayo HOD	64
6.24	Evolución temporal de la tenacidad a fractura interlaminar de la segunda muestra de la configuración 8F+AA+8F en el ensayo HOD	64
6.25	Ahderente de 8 (izquierda) y 8 (derecha) capas de la configuración 8F+AA+4F tras la realización del ensayo HOD	65

Índice de Tablas

5.1	Valores de tenacidad a fractura interlaminar para las configuraciones a ensayar	43
7.1	Resumen de los valores de tenacidad a fractura interlaminar y de los modos de fallo predominantes para las diferentes configuraciones ensayadas en la campaña de ensayos HOD	68
7.2	Resumen de los valores de los parámetros necesarios para el cálculo de la velocidad de pelado de las diferentes configuraciones ensayadas en la campaña de ensayos HOD	69
7.3	Resumen de los valores de velocidad de pelado de las diferentes configuraciones ensayadas en la campaña de ensayos HOD	69

Bibliografía

- [1] R. López. *Introducción a las estructuras de aviones*. 2023.
- [2] F. París, J. Cañas, J.C. Marín y A. Barroso. *Introducción al análisis y diseño con materiales compuestos*. 2008.
- [3] J. Hale. *Boeing 787 from the Ground Up*. 2009.
- [4] J. Cañas, L. Távara, A. Blázquez, A. Estefani y M.M. Castro. *Sobre los ensayos de tenacidad a fractura para la calidad de una unión encolada composite-composite*. *Soldadura y tecnologías de unión*, vol. 29, no 154, p. 25-33. 2018.
- [5] J. Cañas, L. Távara, A. Blázquez, A. Estefani y G. Santacruz. *A new in situ peeling test for the characterisation of composite bonded joints*. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2018, vol. 113, p.298-310. 2018.
- [6] P. Dugo. *Evaluación de la tenacidad a fractura interlaminar en uniones encoladas composite-composite mediante el ensayo DCB. Efecto del proceso de curado de configuraciones simétricas y no simétricas*. 2021.
- [7] F. Sánchez. *Uniones adhesivas y sus aplicaciones navales*. 2010.
- [8] J.A. Núñez. *Sobre la mecánica de la fractura elástica lineal. Desarrollo y aplicación del elemento esquina en el método de los elementos de contorno para problemas de fractura tridimensionales. Capítulo 2*. 2010.
- [9] M.M. Castro. *Un nuevo procedimiento para evaluar la calidad de encolados composite-composite*. 2019.
- [10] AITM 1-0005. *"Fibre reinforced plastics - Determination of interlaminar fracture toughness energy -Mode I - G1c"*. 2019.
- [11] ASTM-D5528-13. *"Standar Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional FiberReinforced Polymer Matrix Composite"*. 2019.
- [12] ISO 15024. *"Fibre-reinforced plastic composites-determination of mode I interlaminar fracture toughness, G1c, for unidirectionally reinforced materials"*. 2019.
- [13] B. Prieto. *Evaluación de la tenacidad a la fractura en uniones encoladas composite-composite mediante el ensayo DCB*. 2018.
- [14] E. Bolívar. *Influencia del proceso de encolado en la tenacidad a fractura de uniones no simétricas composite-composite*. 2020.

- [15] M.M. Castro. *Evaluación experimental de la calidad de una unión encolada composite-composite mediante ensayos de pelado*. 2017.
- [16] ASTM-D1781. "*Standar Test Method for climbing drum peel for adhesives*". 2012.
- [17] S. Licht. *EN 2243-3 Climbing Drum Peel Test at honeycombs*. 2012.
- [18] M.M. Castro. *Ensayos numéricos de uniones adhesivas composite-composite para la determinación de la tenacidad a la fractura*. *Materiales Compuestos*, 2018, vol. 2, no 4, p. 94-99. 2018.
- [19] J. Cañas. *Aplicación de la mecánica de la fractura en uniones encoladas composite-composite*. 2020.
- [20] M.M. Castro. *Un nuevo procedimiento para evaluar la calidad de encolados composite-composite*. 2019.
- [21] J. Cañas, L. Távora, A. Blázquez, A. Estefani y G. Santacruz. *Equipo de ensayo para la determinación in situ de la resistencia al pelado de uniones adhesivas*. *Patente P201730163*. 2017.
- [22] J. Cañas, J. Justo, M.L. Velasco y A. Blázquez. *Influence of the bonding method on interlaminar fracture toughness for composite material non-symmetric configurations*. 2024. Enviado a publicación.