

Trabajo Fin de Máster
Máster Diseño Avanzado en Ingeniería Mecánica

Evaluación de la tenacidad a la fractura en uniones
encoladas composite-composite mediante el ensayo
DCB

Autora: Beatriz Prieto Zafra

Tutor: José Cañas Delgado

Co-Tutor: Luis Arístides Távora Mendoza

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

Sevilla, 2018



Trabajo Fin de Máster
Máster Diseño Avanzado en Ingeniería Mecánica

Evaluación de la tenacidad a la fractura en uniones encoladas composite-composite mediante el ensayo DCB

Autora:

Beatriz Prieto Zafra

Tutor:

José Cañas Delgado

Profesor titular

Co-Tutor:

Luis Arístides Távara Mendoza

Dep. de Elasticidad y Resistencia de Materiales

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018

Trabajo Fin de Máster: Evaluación de la tenacidad a la fractura en uniones encoladas composite-composite mediante el ensayo DCB

Autora: Beatriz Prieto Zafra

Tutor José Cañas Delgado

Co-Tutor: Luis Arístides Távara Mendoza

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal

A mi padre

Agradecimientos

A mi familia por todo su apoyo incondicional durante todos estos años de andadura académica, ayudándome en todo lo que han podido, y en especial a mis padres por enseñarme a no rendirme frente a las adversidades.

En segundo lugar, a mis tutores Pepe y Luis por permitirme adentrarme en el mundo de los materiales compuestos y darme la oportunidad de desarrollar este proyecto. A todo el equipo técnico de laboratorio, Antonio Cañas, Miguel y José Ramón por enseñarme a desenvolverme en el laboratorio y prestarme su tiempo. A María del Mar por enseñarme con paciencia en el inicio de esta andadura.

Finalmente, a todos mis compañeros de curso que me han acompañado durante este año.

Resumen

En la industria aeronáutica el uso de materiales compuestos se ha visto incrementado en los últimos años debido al uso de uniones encoladas composite-composite. Para evaluar la calidad de estas uniones encoladas y asegurar su funcionalidad se realizan ensayos a nivel de probeta. Actualmente se realiza un ensayo de tenacidad a la fractura interlaminar del cual se obtiene G_{IC} . Esta propiedad depende solo del material, la preparación superficial y el proceso de curado y mayoritariamente se obtiene a través del ensayo double cantiléver beam (DCB) o mediante el ensayo drum peel.

En el presente trabajo se lleva a cabo una campaña experimental ensayando probetas con distintos espesores a través del ensayo DCB, aplicando las distintas formulaciones que ofrecen las normativas actuales. Se pretende comprobar que el valor obtenido es el mismo independientemente del espesor de la probeta, así como un análisis de influencia del utillaje en los resultados obtenidos.

Palabras clave: G_{IC} , materiales compuestos, energía de fractura interlaminar, modo I.

In the aeronautical industry, the use of composite materials has increased in recent years due to the use of composite-composite bonded joints. To evaluate the quality of these bonded joints and ensure their functionality, tests are carried out at the specimen level. Currently, an interlaminar fracture toughness test is performed, from which G_{IC} is obtained. This property depends only on the material, the surface preparation and the curing process and it is mostly obtained through the double cantilever beam test (DCB) or the drum peel test.

In the present work, an experimental campaign is carried out, testing specimens with different thicknesses through the DCB test, applying the different formulations offered by the current standards. The aim is to verify that the value obtained is the same regardless of the thickness of the specimen, as well as an analysis of the influence of the tooling on the obtained results.

Key words: G_{IC} , composite material, interlaminar fracture toughness, mode I.

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xiv
Índice de Tablas	xvi
Índice de Figuras	xvii
Notación	xix
1 Uniones encoladas	1
1.1 <i>Introducción</i>	1
1.2 <i>Objetivos</i>	2
1.3 <i>Estructura de la investigación</i>	3
2 Calidad de la unión encolada	5
2.1 <i>Introducción</i>	5
2.2 <i>Tipos de fallo en uniones encoladas</i>	5
2.3 <i>Ensayos para la caracterización de la unión encolada</i>	7
2.3.1 <i>Ensayo DCB</i>	7
3 Normativas	11
3.1 <i>Normativa AITM 1-0053</i>	11
3.2 <i>Normativa ASTM</i>	12
3.3 <i>Formulaciones alternativas</i>	13
4 Formulación en grandes desplazamientos	17
5 Procedimiento Experimental	23
5.1 <i>Materiales empleados</i>	23
5.2 <i>Geometría de las probetas</i>	24
5.3 <i>Fabricación de las probetas</i>	24
5.3.1 <i>Apilado</i>	24
5.3.2 <i>Bolsa de vacío</i>	24
5.3.3 <i>Curado</i>	25
5.3.4 <i>Co-curado</i>	26
5.3.5 <i>Encolado secundario</i>	26
5.4 <i>Procedimiento experimental</i>	26
6 Resultados experimentales	29
6.1 <i>Resultados co-curado</i>	29
6.2 <i>Resultados encolado secundario</i>	34
7 Conclusiones	41

Referencias

43

Anexo A

45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Resultados ensayo virtual	14
Tabla 2 Resultados ensayo virtual con factor de corrección	15
Tabla 3 Evaluación integrales elípticas	20
Tabla 4 Valores medios pequeños desplazamientos co-curado sin efecto de bloques ni corrección por grandes desplazamientos	29
Tabla 5 Valores medios grandes desplazamientos	30
Tabla 6 Valores medios pequeños desplazamientos con efecto de bloques y corrección por grandes desplazamientos	30
Tabla 7 Valores medios grandes desplazamientos con efecto de bloques	30
Tabla 8 Valores medios para grandes y pequeños desplazamientos, encolado secundario	36
Tabla 9 Resultados G_{IC} [8+8] pequeños desplazamientos	45
Tabla 10 Resultados G_{IC} [8+8] grandes desplazamientos	45
Tabla 11 Resultados G_{IC} [8+8] pequeños desplazamientos con efecto de bloques y corrección por grandes desplazamientos	46
Tabla 12 Resultados G_{IC} [8+8] grandes desplazamientos con efecto de bloques	46
Tabla 13 Resultados G_{IC} [4+4] pequeños desplazamientos	46
Tabla 14 Resultados G_{IC} [4+4] grandes desplazamientos	46
Tabla 15 Resultados G_{IC} [4+4] pequeños desplazamientos con efecto de bloques y corrección por grandes desplazamientos	47
Tabla 16 Resultados G_{IC} [4+4] grandes desplazamientos con efecto de bloques	47
Tabla 17 Resultados G_{IC} [2+2] pequeños desplazamientos	47
Tabla 18 Resultados G_{IC} [2+2] grandes desplazamientos	48
Tabla 19 Resultados G_{IC} [2+2] pequeños desplazamientos con efecto de bloques y corrección por grandes desplazamientos	48
Tabla 20 Resultados G_{IC} [2+2] grandes desplazamientos con efecto de bloques	48
Tabla 21 Resultados G_{IC} [2+2] pequeños y grandes desplazamientos	49
Tabla 22 Resultados G_{IC} [4+4] pequeños y grandes desplazamientos	49
Tabla 23 Resultados G_{IC} [8+8] pequeños y grandes desplazamientos	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Materiales Airbus A350-900 XWB (www.airbus.com).	1
Figura 2 Materiales usados en el Boeing 787 (www.boeing.com).	1
Figura 3 Modos de fallo.	5
Figura 4 Posibles causas de deslaminación, Sridharan [1].	6
Figura 5 Ejemplos de deslaminación.	6
Figura 6 Modos de fractura, Broek [2].	7
Figura 7 Dimensiones de la probeta, AITM [3].	8
Figura 8 Ensayo experimental DCB.	9
Figura 9 Curva Fuerza-desplazamiento en el ensayo DCB, AITM [3].	11
Figura 10 Parámetros de la probeta, Gunderson, J. D [5].	12
Figura 11 Gráfica corrección a y dimensiones del sistema de aplicación de carga, ASTM [3].	13
Figura 12 Curva Fuerza-desplazamiento, Williams, J. G. [7].	17
Figura 13 Efecto de los bloques, Williams, J. G. [7].	18
Figura 14 Parámetros de un elemento viga, Williams, J. G. [7].	18
Figura 15 Factor de corrección para grandes desplazamientos, Williams, J. G. [7].	20
Figura 16 Geometría de la probeta, AITM [3].	23
Figura 17 Esquema componentes bolsa de vacío, Yan, L [9].	25
Figura 18 Autoclave	25
Figura 19 Probeta marcada.	26
Figura 20 Utillaje articulado.	27
Figura 21 Disposición del utillaje y cámara digital.	27
Figura 22 Carga-desplazamiento [8+8].	31
Figura 23 Carga-desplazamiento [4+4].	31
Figura 24 Carga-desplazamiento [2+2].	32
Figura 25 Deformadas obtenidas durante el ensayo: (a) probetas [8+8], (b) probetas [4+4] y (c) probetas [2+2] co-curadas.	33
Figura 26 Modos de fallo.	33
Figura 27 Representación esquemática del gráfico fuerza-desplazamiento, Renart Canalias[10].	34
Figura 28 Representación efecto stick-slip.	35
Figura 29 Carga-desplazamiento [8+8].	36
Figura 30 Carga-desplazamiento [4+4].	37
Figura 31 Carga-desplazamiento [2+2].	37

Figura 32 Deformadas obtenidas durante el ensayo: (a) probetas [8+8], (b) probetas [4+4] y (c) probetas [2+2] encolado secundario.	38
Figura 33 Modos de fallo.	38
Figura 34 Comparativa deformadas [2+2].	39

DCB	Double Cantilever Beam
CDP	Climbing Drum Peel
G_{IC}	Tenacidad a la fractura en modo I
Sin	Función seno
Δa	Variación de la longitud de grieta
B	Ancho del espécimen
H	Espesor del espécimen
t	Espesor del laminado

1 UNIONES ENCOLADAS

1.1 Introducción

El uso de materiales compuestos en las industrias aeronáuticas y aeroespacial se ha extendido debido a las ventajas que ofrecen frente a los materiales convencionales. Especialmente por su resistencia, rigidez y la capacidad de adaptar la estructura a cada aplicación, así como una reducción del peso, lo que revierte en una disminución del combustible y por tanto menos emisiones. El impacto de los materiales compuestos puede observarse en el modelo de Airbus A350-900 XWB, el porcentaje empleado de material compuesto en la construcción es de un 52% en peso (figura 1). Al igual que en el Boeing 787 donde el porcentaje en peso de material compuesto usado es de 50% (figura 2). Esto confirma la importancia de los materiales compuestos en las industrias aeronáuticas.

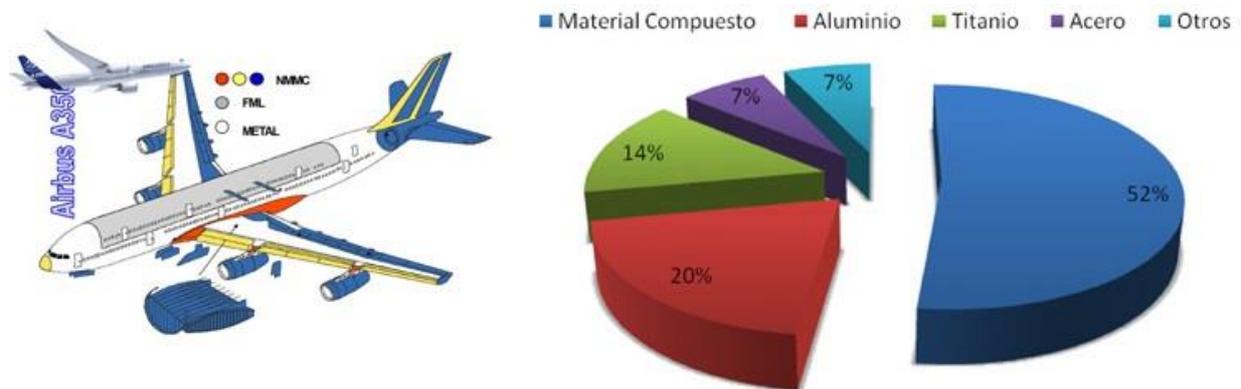


Figura 1 Materiales Airbus A350-900 XWB (www.airbus.com).

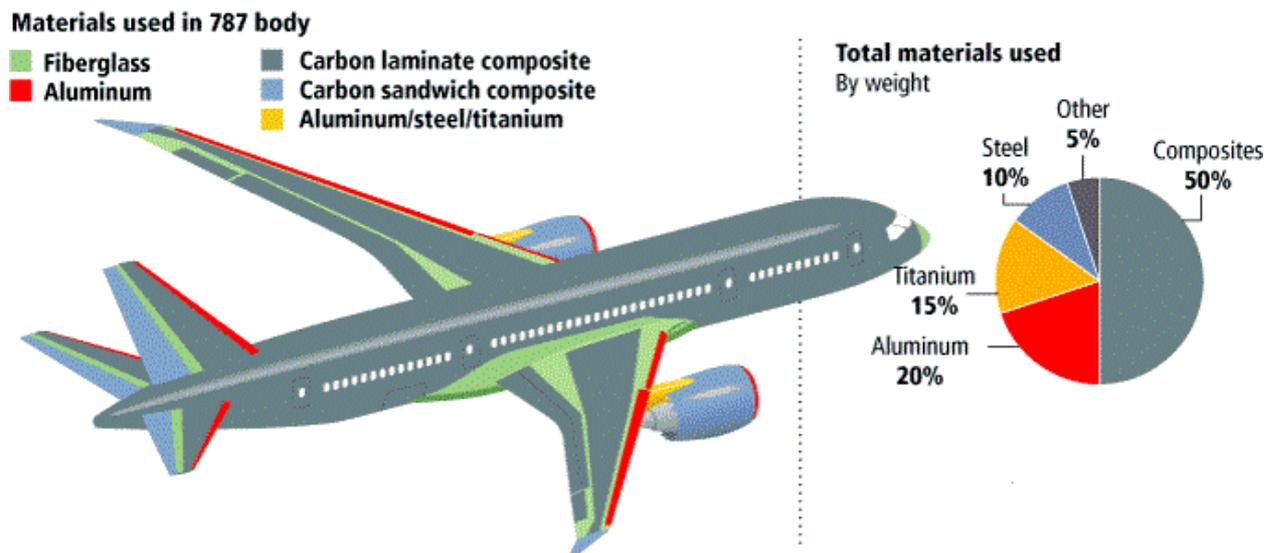


Figura 2 Materiales usados en el Boeing 787 (www.boeing.com).

Los materiales compuestos se emplean en mayor medida en el sector aeronáutico en la formación de paneles rigizados. Estos paneles se realizan mediante uniones encoladas composite-composite, entre elementos membrana y rigidizadores estructurales. Estos rigidizadores llamados larguerillos, se

añaden para aumentar la rigidez del elemento y pueden tener distintos perfiles en forma I, T, L, U o W.

Los procedimientos de fabricación de las uniones encoladas más comunes son el co-curado, el cual consiste en curar en primer lugar una de las partes y posteriormente curar el otro componente con el adhesivo. La otra alternativa es el encolado secundario, donde ambos componentes se curan por separado y posteriormente se realiza un ciclo de curado de la unión.

En muchas aplicaciones estructurales, los laminados no alcanzan su rendimiento máximo debido a la deslaminación. La deslaminación o aparición y crecimiento de grieta es uno de los modos de fallo que más limita la vida útil de los materiales compuestos. En materiales compuestos esta puede ser debida a diversos factores durante el proceso de fabricación o durante el servicio de la propia pieza. La presencia de deslaminación puede provocar una disminución significativa de la rigidez y resistencia del laminado, pudiendo producir el fallo de la estructura.

Por lo tanto, es necesario conocer y evaluar la calidad de las uniones encoladas en condiciones de servicio para un correcto diseño y la obtención de parámetros que caractericen su comportamiento mecánico ante la fractura. Para ello, las autoridades de certificación exigen que se practiquen ensayos mecánicos para asegurar y verificar la calidad de la unión encolada. Actualmente para evaluar la calidad de la unión se emplea el ensayo de tenacidad a la fractura en modo I, G_{IC} . Se evalúa esta propiedad ya que solo depende del material y de la preparación superficial. Esta medición se lleva a cabo a través del ensayo DCB (double cantilever beam) o mediante CDP (climbing drum peel).

La prueba DCB de acuerdo con la normativa vigente se realiza en probetas de configuraciones simétricas y cuando los espesores de los adherentes se encuentran comprendidos entre 1.5 mm y 2.5 mm. Para espesores inferiores se debe tener en cuenta el efecto de grandes desplazamientos. La normativa actual recoge correcciones que tienen en cuenta este efecto, aunque su aplicación puede ser cuestionada al obtenerse inconcordancias en los resultados experimentales.

La prueba CDP es empleada en encolados tipo sándwich y para configuraciones en las cuales los adherentes tengan distinto espesor, requiriendo que uno de los adherentes tenga una rigidez a flexión baja para evitar la rotura de este durante el procedimiento.

La motivación de este trabajo es la evaluación del valor de G_{IC} a partir del ensayo DCB sin tener que emplear la longitud de grieta a , al ser este valor difícil de obtener con precisión.

1.2 Objetivos

Los objetivos del presente trabajo son los siguientes:

- Estudio de los procedimientos actuales para el cálculo de G_{IC} .
- Estudiar las alternativas existentes para el cálculo de G_{IC} para las cuales no es necesario la medición de la longitud de grieta a .
- Estudio de grandes desplazamientos. La tendencia actual es el uso de elementos de espesor más delgado lo que implica que ya no nos encontremos en el rango de pequeños desplazamientos. Con las formulaciones actuales los resultados obtenidos para G_{IC} en grandes desplazamientos distan de ser semejantes al valor estimado de G_{IC} .
- Estudio experimental mediante la comparación de resultados a través de las distintas formulaciones tanto para pequeños como grandes desplazamientos.

1.3 Estructura de la investigación

El trabajo se ha realizado para cumplir con los objetivos anteriormente descritos, para ello la investigación se divide en tres partes fundamentales: estudio de la normativa, experimentación y análisis y comparación de resultados.

En la primera se realiza el estudio de las normativas actuales y la obtención de las distintas formulaciones de G_{IC} para las cuales no es necesario medir el valor de a . Además, se obtienen formulaciones para grandes y pequeños desplazamientos.

En la fase de experimentación se practican ensayos a nivel de probeta para tres espesores distintos. Se realizan los ensayos a probetas fabricadas mediante dos procesos distintos de fabricación del tejido, mediante el co-curado y encolado secundario.

Y, por último, se analizan y comparan los resultados obtenidos para las dos fabricaciones realizadas.

2 CALIDAD DE LA UNIÓN ENCOLADA

2.1 Introducción

La resistencia y rigidez de los materiales compuestos hacen que se conviertan en una de las mejores alternativas a los materiales convencionales en estructuras donde el peso es una variable crítica. Por lo tanto, es necesario conocer los mecanismos de fallo y daño en materiales compuestos.

Como se ha indicado en el capítulo anterior, los objetivos del presente trabajo son la mejora de los métodos actuales de obtención del valor de G_{IC} obtenido a partir del ensayo de doble viga en voladizo utilizado en la industria aeronáutica para la evaluación de la unión adhesiva.

2.2 Tipos de fallo en uniones encoladas

En este trabajo se van a realizar ensayos para dos tipos de uniones, uniones co-curadas y encolado secundario. Ambas uniones están formadas por dos adherentes unidos por una lámina de adhesivo. Durante la realización de un ensayo o la puesta en servicio de un componente estructural pueden presentarse tres tipos de fallo: fallo cohesivo, fallo adhesivo o fallo por deslaminación. Los distintos modos de fallo pueden tener lugar de forma individual o como combinación de varios fallos.

- Fallo adhesivo: cuando la separación se produce en la interfase sustrato-adhesivo.
- Fallo cohesivo: se produce por la rotura del adhesivo, quedando restos de este sobre las superficies de los dos laminados encolados.
- Fallo por deslaminación: la grieta se propaga a través de la resina del preimpregnado, arrancando fibras del material base del laminado.
- Fallo mixto: se observan al mismo tiempo varios tipos de fallo anteriormente expuestos.

Uno de los principales modos de fallo es la deslaminación (figura 5), en la cual una grieta se propaga entre los adherentes.

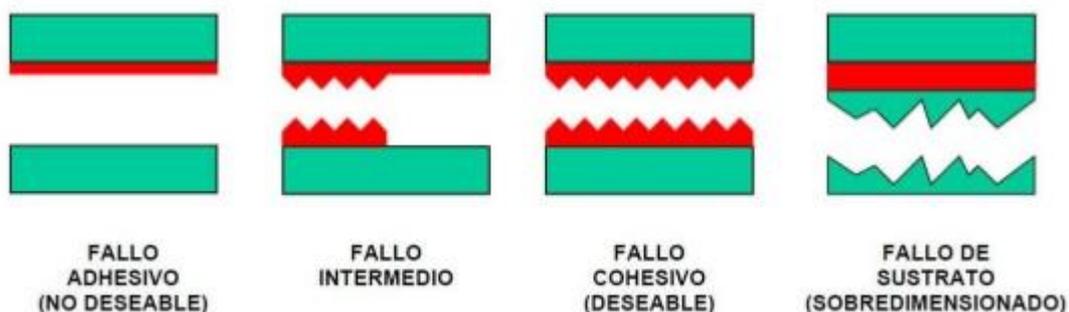


Figura 3 Modos de fallo.

La deslaminación es inducida por tensiones interlaminares y de cizalladura que se desarrollan debido a una variedad de factores como pueden ser efectos de borde libre, discontinuidades estructurales o fallos durante su fabricación. Algunas de las causas que pueden producir fracturas interlaminares se muestran en la figura (4) [1].

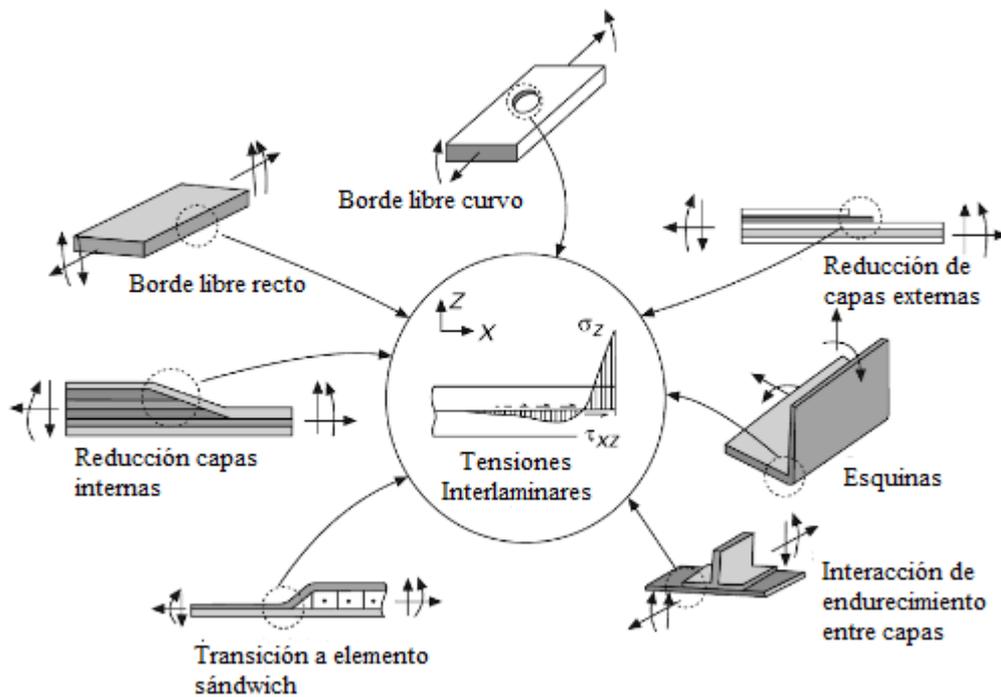


Figura 4 Posibles causas de deslaminación, Sridharan [1].



Figura 5 Ejemplos de deslaminación.

Además, una descripción completa de la resistencia a la fractura interlaminar requiere la caracterización de los distintos modos de propagación de grieta, que van en función de las cargas que intervienen. La figura 6 muestra los tres posibles modos.

- Modo I: los desplazamientos de las caras adyacentes a la grieta toman una dirección normal al plano de crecimiento de la grieta.
- Modo II: se genera un cortante en el plano del adhesivo que sigue la dirección de propagación.

- Modo III: se genera un cortante en el plano del adhesivo que sigue una dirección perpendicular a la de propagación.

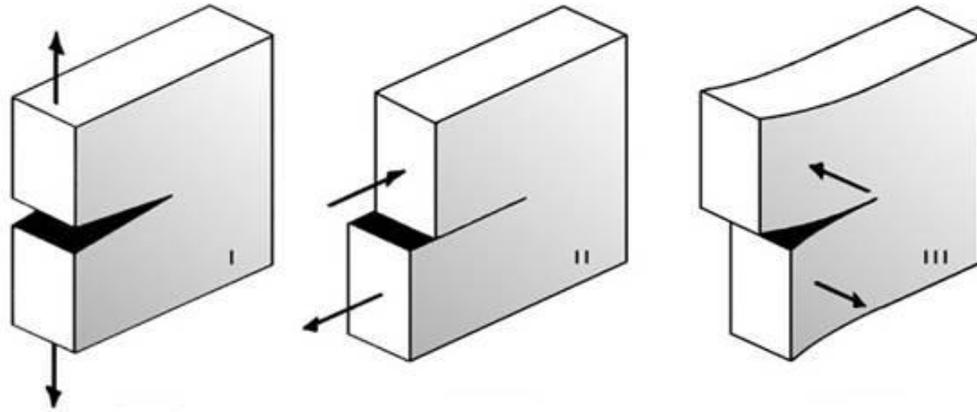


Figura 6 Modos de fractura, Broek [2].

Al igual que con los tipos de fallo, los modos de fallo pueden presentarse individualmente o combinados entre sí. En este trabajo se va a introducir una grieta a través del ensayo G_{IC} en modo I.

2.3 Ensayos para la caracterización de la unión encolada

Para evaluar la calidad de la unión se llevan a cabo ensayos experimentales de pelado. Estos ensayos consisten en separar los dos adherentes de la unión en dirección perpendicular al plano del adhesivo y determinar el valor de la resistencia a la fractura. Para configuraciones simétricas el valor de G_c coincide con G_{IC} (en modo I).

La propagación de una grieta entre dos láminas unidas mediante adhesivo se define mediante el valor de la tenacidad a la fractura interlaminar. Esta medida de la tenacidad se define como la energía liberada por cada unidad de área abierta de grieta.

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

Donde U es la energía liberada en propagar la grieta en función de la carga y del desplazamiento asociado; a es la longitud de grieta; y b es el ancho de la probeta.

2.3.1 Ensayo DCB

El ensayo experimental más empleado es el ensayo doble viga en voladizo (DCB). Se hará uso de las normativas AITM1-0053 [3] y ASTM [4]. Para el ensayo se emplean probetas formadas por dos laminados de composite unidas por una capa de adhesivo. Para inducir la grieta inicial, se coloca en uno de los extremos de la probeta una lámina de teflón de pequeño espesor. La grieta se propaga por el plano medio del adhesivo a medida que se separan los brazos durante el ensayo. Las dimensiones de la probeta son las que se muestran en la figura 7.

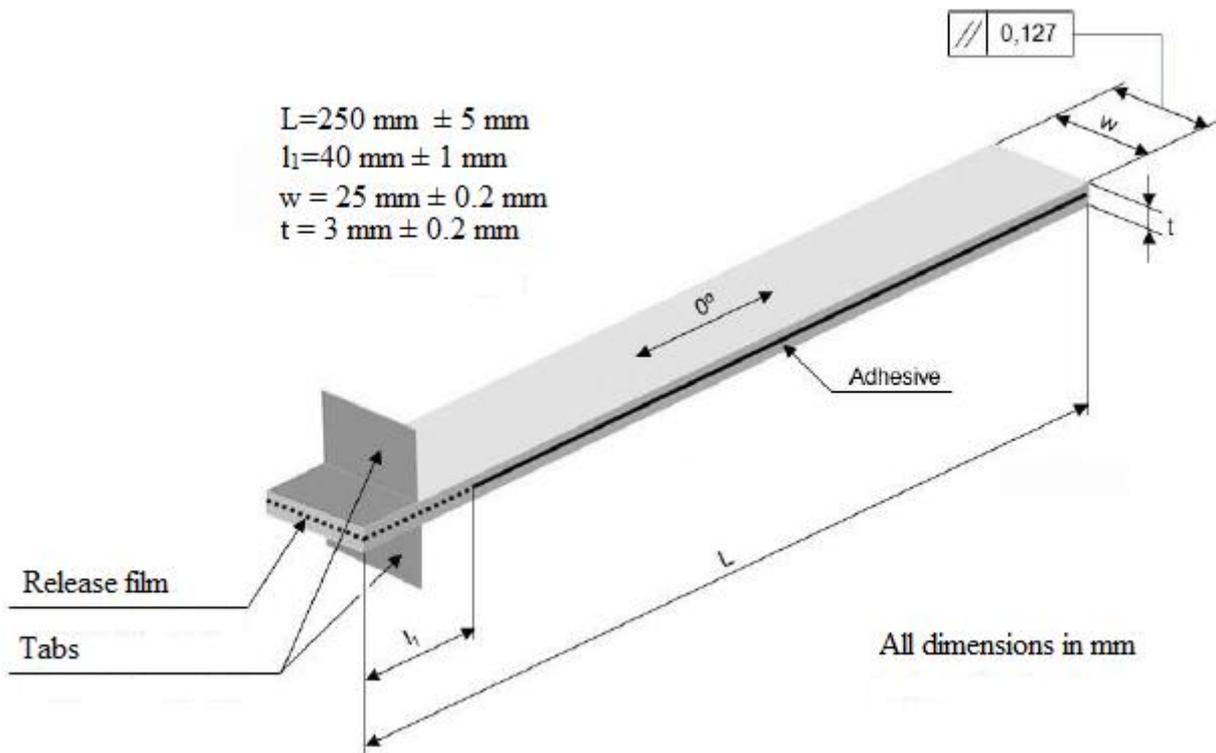


Figura 7 Dimensiones de la probeta, AITM [3].

En este estudio se realizan los ensayos en probetas simétricas con igual número de capas [8+8], [4+4] y [2+2], con una zona de teflón la cual servirá de pre-grieta. Antes de comenzar el ensayo es necesario medir el espesor y el ancho de cada muestra tomando varios puntos significativos para así obtener la media. Posteriormente se realiza el ensayo sometiendo a la probeta a una fuerza de pelado lo suficientemente grande para que la grieta avance.

Durante el ensayo se recogen los valores de fuerza (P), desplazamiento (δ) y la longitud de grieta (a) en cada instante de tiempo. A partir de los datos recogidos se puede obtener el valor de tenacidad a la fractura G_{IC} . Este es el área encerrada bajo la curva carga frente a desplazamiento. Esta energía es la necesaria para generar una superficie de grieta, cuanto mayor es el valor, mayor será la calidad de la unión.

La principal desventaja de este procedimiento reside en obtener un valor correcto de longitud de grieta, ya que el crecimiento de la grieta puede ser continuo o producirse a saltos. Además, la obtención de la medida suele realizarse visualmente, por lo que pueden producirse errores, aunque se han propuesto algunos procedimientos automáticos, ninguno de ellos ha sido implementado como un procedimiento estándar. Por ello, el objetivo es obtener el valor de G_{IC} a partir de otras formulaciones sin necesidad de emplear el valor de a .

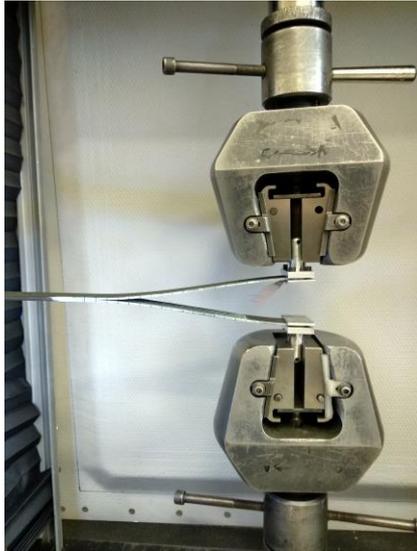


Figura 8 Ensayo experimental DCB.

3 NORMATIVAS

Actualmente se emplean las normativas AITM y ASTM para evaluar la energía de fractura.

3.1 Normativa AITM 1-0053

En esta normativa se define un método para determinar la energía de tenacidad a la fractura en modo I. El propósito es obtener la resistencia a la propagación de grietas en compuestos de fibra de carbono en uniones encoladas. Para calcular la energía a la fractura se emplea la siguiente fórmula:

$$G_{IC}(P, a, \delta) = \frac{A}{a \times w} \times 10^6 \text{ (J/m}^2\text{)} \quad (1)$$

Donde:

- G_{IC} tenacidad a la fractura
- A energía para lograr la propagación de la grieta
- a es la longitud de grieta propagada: $a = a_{i+n} - a_i$
- w ancho de la probeta

Esta formulación es válida para espesor de probetas de 3 mm. Para calcular A se integra el área bajo la curva carga-desplazamiento de cruceta como se observa en la figura 9.

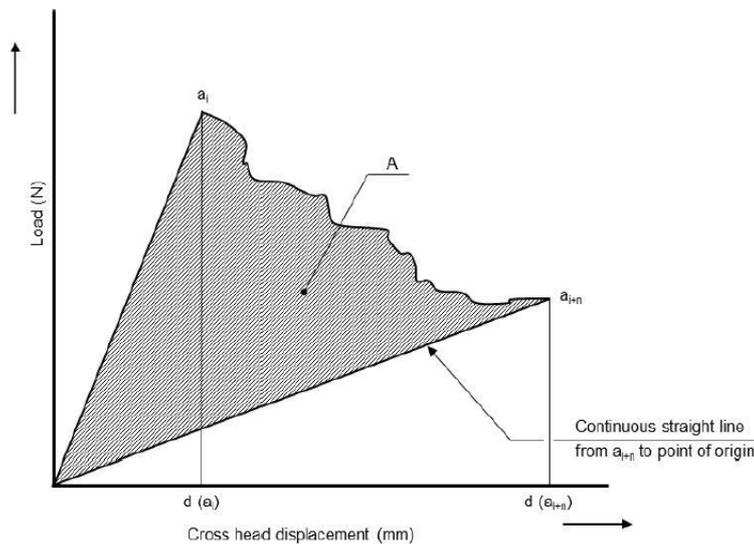


Figura 9 Curva Fuerza-desplazamiento en el ensayo DCB, AITM [3].

Los inconvenientes que presenta esta normativa son los siguientes:

- Es necesario medir la longitud de grieta para obtener G_{IC} y los resultados obtenidos pueden no ser correctos cuando la curva que muestra la figura 9 no es suave y va a saltos.
- Cuando no se cumple la hipótesis de pequeños desplazamientos, la descarga no es lineal, por lo que obtener el valor del área no es fácil.

3.2 Normativa ASTM

Esta normativa al igual que la anterior se basan en la geometría de la figura 10 y hace uso de la teoría de vigas. El espesor de las probetas está normalizado entre 3 y 5 mm. Esta normativa es de aplicación para la evaluación de la energía liberada cuando la grieta avanza entre dos láminas de un laminado, aunque el método es de aplicación para laminados encolados. La siguiente ecuación no tiene en cuenta la deformación debida al axil ni el cortante.

$$G = \frac{M^2}{bEI} \quad (2)$$

Donde M es el momento flector que existe en el borde de grieta de cada laminado cuando se produce el crecimiento, EI la rigidez a flexión y b es el ancho de la probeta.

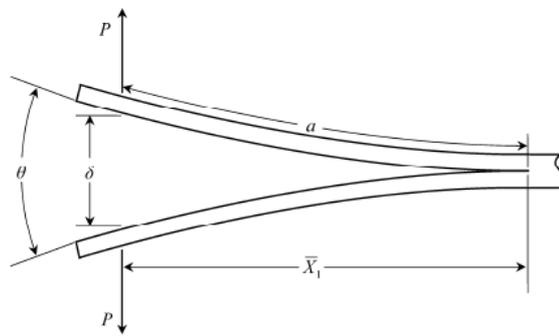


Figura 10 Parámetros de la probeta, Gunderson, J. D [5].

Para pequeños desplazamientos $x \approx a$ $M = Pa$, válida para $\delta/a < 0,4$, siendo δ la apertura entre los adherentes. Las teorías de vigas más usadas son dos: Euler-Bernoulli y Timoshenko. De acuerdo con la teoría de vigas el desplazamiento en el punto de carga es:

$$\delta = \frac{2Pa^3}{3EI} + \frac{Fh^2a}{4GI} \quad (3)$$

Donde E es el módulo de Young para el adherente, $I=bh^3/12$ y G es el módulo de cizalladura. El último término aparece solo en la teoría de vigas de Timoshenko. Esta normativa hace uso de la teoría de vigas de Euler-Bernoulli, quedando la expresión final como una combinación de las ecuaciones (2) y (3) anteriormente descritas:

$$G(P, a, \delta) = \frac{3P\delta}{2ba} \quad (4)$$

Nuevamente vuelve a ser necesario conocer el valor de a. La normativa ofrece tres correcciones a la ecuación (4), obteniéndose:

$$G(P, a, \delta) = \frac{3P\delta}{2b(a + |\Delta|)} \frac{F}{N} \quad (5)$$

De manera independiente las correcciones son:

- Considerar el giro de la sección en el borde la grieta. Una forma de corregirlo es suponer que la probeta tuviera una delaminación ligeramente más larga, $a+\Delta$. Donde Δ se determina experimentalmente.

$$G(P, a, \delta, \Delta) = \frac{3P\delta}{2b(a + |\Delta|)} \quad (6)$$

- Efecto de los bloques de aplicación de carga. Para aquellas muestras con bloques de carga, la distancia desde el extremo a la línea de carga debe de ser de 50 mm para evitar la influencia de los bloques. Por lo que se debe añadir el siguiente término dividiendo en la ecuación (6).

$$N = 1 - \left(\frac{L'}{a}\right)^3 - \frac{9}{8} \left[1 - \left(\frac{L'}{a}\right)^2\right] \left(\frac{\delta t}{a^2}\right) - \frac{9}{35} \left(\frac{\delta}{a}\right)^2 \quad (7)$$

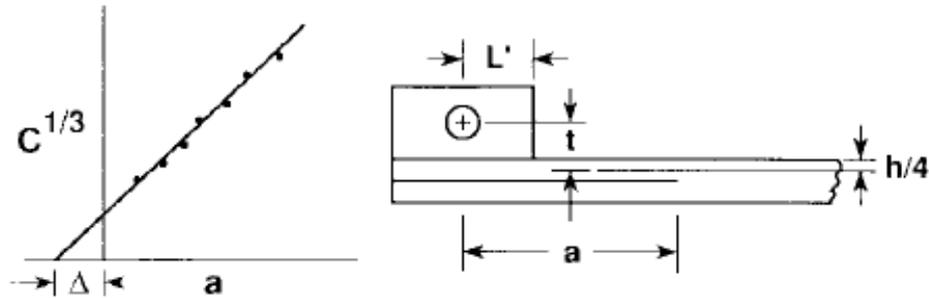


Figura 11 Gráfica corrección a y dimensiones del sistema de aplicación de carga, ASTM [3].

- Grandes desplazamientos, es corregida mediante el uso del parámetro F en el cálculo de G_{IC} . Este término se introduce en la ecuación (6) multiplicando.

$$F = 1 - \frac{3}{10} \left(\frac{\delta}{a}\right)^2 - \frac{3}{2} \left(\frac{\delta t}{a^2}\right) \quad (8)$$

3.3 Formulaciones alternativas

Todas las expresiones recogidas en los apartados anteriores requieren de la medición del parámetro a . Existen otras ecuaciones alternativas para obtener el valor de G_{IC} , estas ecuaciones son expresiones que se obtienen a partir de la combinación de las ecuaciones anteriores.

$$G_{IC}(P, a) = \frac{P^2 a^2}{bEI} \quad (9)$$

$$G_{IC}(P, \delta) = \frac{P^3}{bEI} \sqrt[3]{\left(\frac{3EI\delta}{2P}\right)^2} \quad (10)$$

$$G_{IC}(a, \delta) = \frac{9EI\delta^2}{4ba^4} \quad (11)$$

Las ecuaciones (4, 5, 9, 10 y 11) son las distintas expresiones a partir de las cuales se puede obtener el valor de la resistencia a la fractura. Hay que tener en cuenta como se mencionó previamente, la necesidad de localizar y medir correctamente el valor de la longitud de grieta para obtener valores precisos de G_{IC} , en caso de emplear las ecuaciones (4, 5 y 10). El uso de las ecuaciones (9, 10 y 11) frente a la ecuación (4) presenta la desventaja de conocer las dimensiones del espécimen ($I=bh^3/12$), así como el módulo de elasticidad longitudinal.

A partir de una simulación numérica realizada en el departamento de Elasticidad y Resistencia, se han resuelto mediante MEF cuatro casos para los cuales la única diferencia ha sido el espesor de los adherentes (4, 2, 1 y 0.5 mm), en todos ellos los adherentes son laminas unidireccionales para los cuales se ha fijado un valor de $G_{IC}=600 \text{ J/m}^2$. Todas las simulaciones fueron realizadas para un Δa de 60 mm. Los resultados obtenidos se recogen en la tabla 1.

Se puede observar que cuando hay desplazamientos pequeños, es decir, adherentes con una rigidez elevada ($h>1$) los valores obtenidos de G_{IC} son similares, pero cuando nos encontramos con pequeños espesores los resultados se alejan del valor esperado.

Tabla 1 Resultados ensayo virtual

	$G(P, a, \delta)$ Ec. 4	$G(P, a, \delta, \Delta)$ Ec. 6	$G_{IC}(P, a)$ Ec. 9	$G_{IC}(P, \delta)$ Ec. 10	$G_{IC}(a, \delta)$ Ec. 11
Cinta 16 capas (h=4 mm)	604.54	598.90	598.22	602.42	610.97
Cinta 8 capas (h= 2mm)	601.99	599.39	604.27	602.75	599.72
Cinta 4 capas (h=1mm)	605.47	587.68	633.89	614.77	578.52
Cinta 2 capas (h=0.5mm)	631.38	518.85	862.76	699.39	469.43

Los valores obtenidos de aplicar el factor de corrección F se recogen en la tabla 2. Se puede observar que para grandes espesores el efecto de la corrección es mínimo, no se muestran grandes cambios en los resultados. Por el contrario, en pequeños desplazamientos los resultados que se obtienen son notoriamente diferentes. Por lo tanto, el factor de corrección es de aplicación en la ecuación (9), para la cual se obtienen resultados satisfactorios en su aplicación.

Tabla 2 Resultados ensayo virtual con factor de corrección

	$G(P, a, \delta)$	$G(P, a, \delta, \Delta)$	$G_{IC}(P, a)$	$G_{IC}(P, \delta)$	$G_{IC}(a, \delta)$
	Ec. 4	Ec. 6	Ec. 9	Ec. 10	Ec. 11
Cinta 16 capas (h=4 mm)	604.05	598.42	597.74	601.93	610.49
Cinta 8 capas (h= 2mm)	598.45	595.86	600.71	599.20	596.19
Cinta 4 capas (h=1mm)	574.16	557.21	600.87	582.91	548.85
Cinta 2 capas (h=0.5mm)	450.11	367.64	604.18	495.66	340.48

Los resultados obtenidos en las tablas 1 y 2 no consideran el efecto de los bloques patrón [6].

4 FORMULACIÓN EN GRANDES DESPLAZAMIENTOS

Los grandes desplazamientos se producen cuando los laminados son muy delgados ($t < 3mm$). Esto provoca que el diagrama mostrado en la figura 4 ya no sea lineal, sino como el mostrado en la figura 12. Por lo tanto, con las expresiones descritas anteriormente no se obtienen buenos resultados para G_{IC} . En la bibliografía podemos encontrar expresiones que nos permitan obtener el valor de G_{IC} para grandes desplazamientos [7,8].

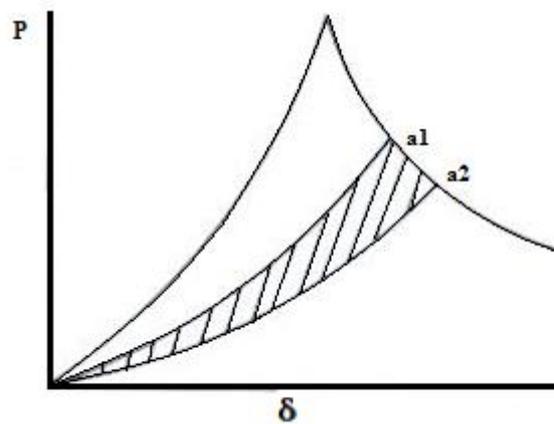


Figura 12 Curva Fuerza-desplazamiento, Williams, J. G. [7].

Para este problema se analiza la geometría mostrada en la figura 13. La formulación empleada para el desarrollo es válida para cualquier elemento con un comportamiento anisotrópico en una viga delgada omitiendo las tensiones transversales.

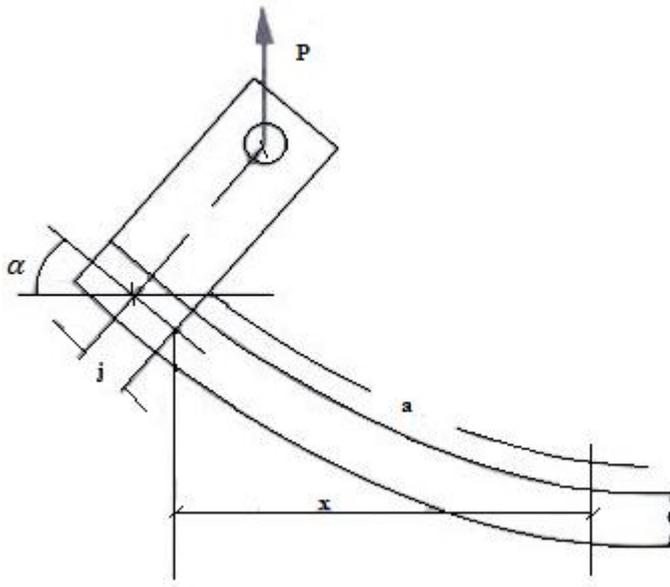


Figura 13 Efecto de los bloques, Williams, J. G. [7].

Volvemos a considerar el momento de la sección como muestra la ecuación (12), pero ahora con $x \neq a$.

$$M = -P x \quad x \neq a \quad M = -P(x + j \cos \alpha - k \sin \alpha) \quad (12)$$

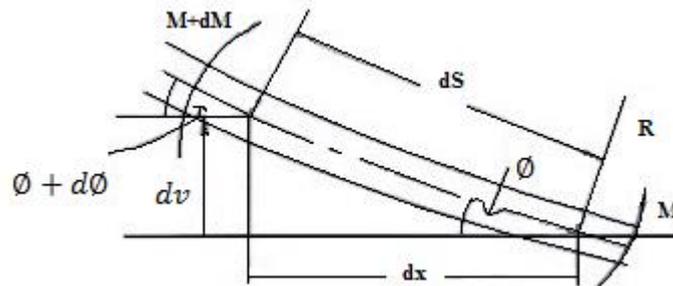


Figura 14 Parámetros de un elemento viga, Williams, J. G. [7].

Para pequeños elementos como muestra la figura 14 se obtiene:

$$R = \frac{dS}{d\phi}, \frac{dS}{dx} = \frac{1}{\cos \phi} \text{ y } \frac{dv}{dx} = \tan \phi$$

$$R = \frac{dS}{d\phi} = \frac{dx}{d\phi} \frac{1}{\cos \phi} \quad (13)$$

La ecuación (13) es una formulación exacta para desplazamientos finitos. Se puede definir el radio de curvatura R , teniendo en cuenta que la deformación es debida completamente a la flexión como:

$$R = -\left(\frac{EI}{P}\right)\frac{1}{x} \quad (14)$$

Combinando las ecuaciones (13) y (14) e integrando se obtiene:

$$\frac{x^2}{2} = -\left(\frac{EI}{P}\right)\sin\phi + A \quad (15)$$

Cuando $x = 0$, $\phi = \alpha$, por lo tanto:

$$x = \sqrt{\frac{2EI}{P}}\sqrt{\sin\alpha - \sin\phi} \quad (16)$$

Combinando las ecuaciones (13) y (14) se obtiene:

$$\alpha = \sqrt{\frac{EI}{2P}}\int_0^\alpha \frac{d\phi}{\sqrt{\sin\alpha - \sin\phi}} \quad (17)$$

De manera similar se combinan las ecuaciones (13), (14) y (16):

$$\delta = \sqrt{\frac{EI}{2P}}\int_0^\alpha \frac{\sin\alpha d\phi}{\sqrt{\sin\alpha - \sin\phi}} \quad (18)$$

A partir de las ecuaciones (17) y (18) y definiendo un parámetro K se definen las siguientes integrales para obtener el resultado de G.

$$I_1 = \int_0^\alpha \frac{d\phi}{\sqrt{\sin\alpha - \sin\phi}} \quad I_2 = \int_0^\alpha \frac{\sin\alpha d\phi}{\sqrt{\sin\alpha - \sin\phi}} \quad (19)$$

$$K = \sqrt{\frac{EI}{2P}} \quad (20)$$

Podemos definir la distancia horizontal \bar{x} como:

$$\bar{x} = 2K\sqrt{\sin\alpha} \quad (21)$$

A partir de las ecuaciones anteriores podemos definir a y la apertura vertical δ :

$$\begin{aligned} a &= K I_1 \quad (a) \\ \delta &= 2K I_2 \quad (b) \end{aligned} \quad (22)$$

Volviendo hacer uso de la ecuación (2) y la ecuación (21) obtenemos el valor de G para grandes desplazamientos según muestra la siguiente ecuación:

$$G_{GD} = \frac{2P}{B} \sin\alpha \quad (23)$$

Se puede obtener el valor de α de tres formas distintas dependiendo de los parámetros de entrada.

- A partir de δ y P mediante el uso de la ecuación (22) a. Donde $\alpha=f(\delta, P)$.
- A partir de a y P. Donde $\alpha=g(a, P)$.
- $\delta/a = 2I_2/I_1$. Donde $\alpha=h(\delta, a)$

La siguiente tabla muestra la evaluación de las integrales de la ecuación (19) mediante el programa Wolfram Mathematica.

Tabla 3 Evaluación integrales elípticas

I_2	Alfa (rad)	δ/a	I_1
0.00133335	0.01	0.0133332	0.200004
0.00377137	0.02	0.0266657	0.282863
0.00692877	0.03	0.0399967	0.346467
0.1066824	0.04	0.0533256	0.400117
0.0149106	0.05	0.0666516	0.447419
0.01960248	0.06	0.0799739	0.490222
0.02470493	0.07	0.093292	0.529626

La bibliografía ofrece al igual que para pequeños desplazamientos una corrección debido al efecto de aplicación de carga en los bloques.

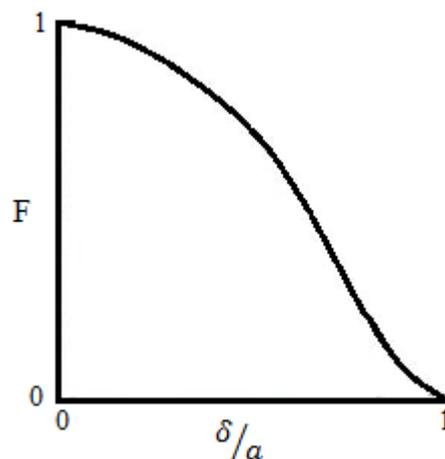


Figura 15 Factor de corrección para grandes desplazamientos, Williams, J. G. [7].

El factor de corrección se obtiene como sigue:

$$F = \frac{G_{GD}}{G_{PD}} \quad (24)$$

Donde G_{GD} , hace referencia a la ecuación (17) en grandes desplazamientos y G_{PD} a la ecuación 9 en pequeños desplazamientos. Haciendo uso de la ecuación (22) se obtiene F.

$$F = \frac{4\sin\alpha}{I_1^2}$$

5 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Para la caracterización de las probetas ensayadas frente al fenómeno de deslaminación se ha estudiado su resistencia a la fractura interlaminar en modo I para obtener el valor de G_{IC} . Se ha hecho uso de una máquina de tracción y las probetas ensayadas son del tipo DCB. En estas probetas se ha comparado el valor G_{IC} de dos configuraciones de unión adhesiva.

El ensayo DCB se practica en probetas rectangulares de espesor uniforme, fabricadas a partir de cinta unidireccional.

5.1 Materiales empleados

El comportamiento frente al proceso de deslaminación y por lo tanto el comportamiento a la fractura de un material depende de los materiales constituyentes del mismo.

Se han realizado dos tipos de muestras, realizadas mediante los procedimientos de co-curado y encolado secundario. Todas las probetas se han realizado con cinta a 0° simétrico [8+8], [4+4] y [2+2] con adhesivo FM300 K. El pre-preg empleado para todas las probetas es UD/M21/35%/268/T700GC-12K/300, fabricado por HexPly. Por último, el Peel Ply utilizado es Z-24.259, fabricado por Hexcel Composites.

La deslaminación artificial (inserto inicial) de las probetas se consigue empleando un film desmoldante en medio de las capas del laminado.

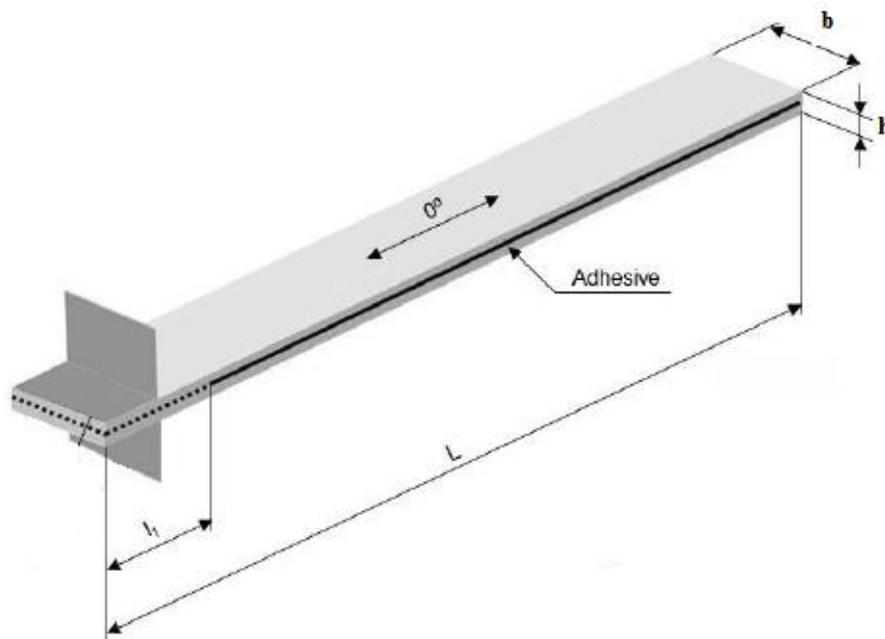


Figura 16 Geometría de la probeta, AITM [3].

5.2 Geometría de las probetas

Como se ha comentado con anterioridad las probetas ensayadas son del tipo DCB. La geometría es rectangular, de espesor “h” y anchura “b”, con un inserto inicial no adhesivo en su plano medio. El laminado es simétrico de 8, 4 y 2 láminas con 0° de orientación. Las dimensiones para las probetas fabricadas tanto por co-curado como por encolado secundario son:

- Longitud (l): 325 mm para co-curado y 315 mm para encolado secundario
- Espesor (h): 1.15-2.60 mm
- Ancho (b): 25 mm
- Longitud del inserto: 40 mm

5.3 Fabricación de las probetas

El primer paso es diseñar el número de paneles necesarios para la realización de los ensayos. Se realizan tres paneles de espesores distintos teniendo en cuenta las medidas que dictan las normas. Hay que sobredimensionar los paneles para tener en cuenta las pérdidas de los bordes, y el espesor del disco de corte. Durante la investigación se decidió realizar tres paneles más, pero modificando el proceso de curado.

5.3.1 Apilado

El proceso comienza con el apilado de láminas de carbono prepeg, dependiendo del espesor deseado se apilarán 8, 4 o 2 láminas. Este apilamiento se realiza de manera manual dándoles las orientaciones especificadas. Es importante no presionar directamente una vez colocada una lámina sobre la otra, ya que al cometer un error de orientación no se podrán despegar ambas laminas. Una vez seguros de su correcta colocación se aplica presión y se procede a la precompactación.

Durante la precompactación se realiza el vacío para eliminar todo el aire entre láminas, quedando un laminado uniforme y compacto. Finalmente se coloca el Peel Ply por ambas caras del panel con objeto de mantener la simetría durante el curado.

5.3.2 Bolsa de vacío

Tras obtener el panel precompactado, se procede a fabricar la bolsa de vacío. La figura 14 muestra un esquema de los componentes que conforman la bolsa de vacío. En primer lugar, se limpia con acetona la mesa de aluminio para eliminar cualquier tipo de impureza. Se rodea el borde de la mesa con cromato y se coloca PTFE fino cubriendo la zona de la plancha interior al cromato. Se coloca el panel y se vuelve a colocar PTFE fino encima del panel y encima de este se pone airwave. Se cierra la bolsa de vacío con PTFE grueso pegándolo con cromato para cerrar la bolsa. Se colocan las tomas de vacío, prestando atención a su colocación con el fin de evitar dañar la bolsa. Con objeto de optimizar el proceso se recomienda repasar los bordes presionando con una espátula para eliminar cualquier pequeña fuga.

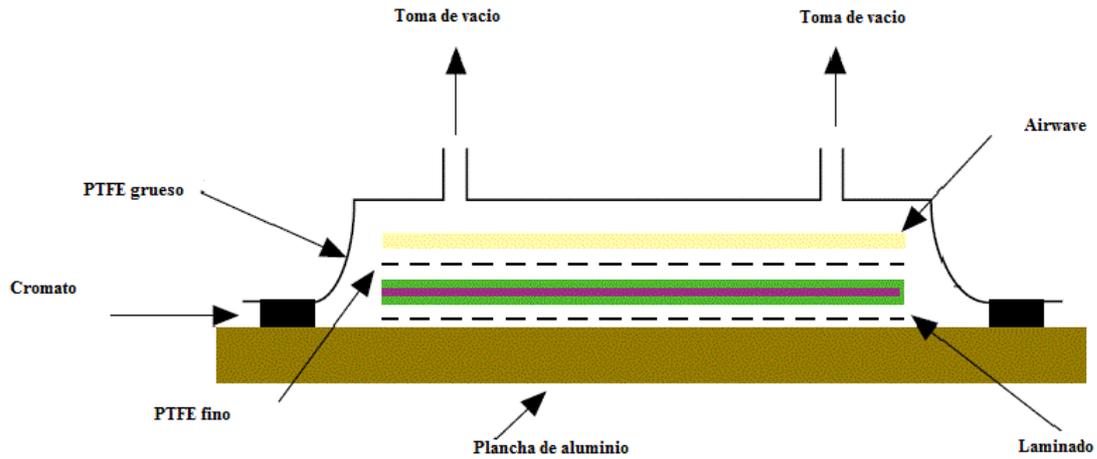


Figura 17 Esquema componentes bolsa de vacío, Yan, L [9].

5.3.3 Curado

Una vez que las condiciones de la bolsa son óptimas se procede a la siguiente etapa, el curado. Este proceso se realiza en el autoclave. Dependiendo del material que se esté empleando se debe de seguir un proceso de curado distinto y unas condiciones específicas para cada tipo de curado.



Figura 18 Autoclave

Una vez que los paneles han salido del autoclave se procede al siguiente paso, este será diferente para los distintos paneles. En unos paneles se aplicará co-curado y en otros, encolado secundario. La diferencia entre ambos procesos radica en la secuencia de operaciones de curado de los materiales.

5.3.4 Co-curado

El co-curado consiste en curar primero uno de los componentes y posteriormente curar el otro componente fresco con la lámina del adhesivo. Por lo que se debe retirar la lámina de Peel Ply en la cara donde se va a colocar el adhesivo. Encima del adhesivo se vuelven a colocar el número de capas correspondientes a cada panel, 8, 4 y 2. El proceso de apilado es el mismo que el explicado con anterioridad. Finalmente se vuelve a colocar otra lámina de Peel Ply y se vuelve a realizar una bolsa de vacío.

Una vez que los paneles están preparados se procede al curado final. Se debe de comprobar que las bolsas de vacío no presentan fugas. El ciclo de curado tiene lugar teniendo en cuenta las especificaciones del adhesivo.

Una vez curados los laminados se procede al corte de los paneles según las dimensiones dadas en el apartado 5.2 mediante la sierra de corte. Es importante la correcta identificación de cada probeta.

5.3.5 Encolado secundario

En este proceso se realizan dos curados, se curan por separado los componentes que forman el laminado y posteriormente se realiza un ciclo de curado de la unión adhesiva. Este proceso se emplea habitualmente para curar piezas de gran tamaño.

5.4 Procedimiento experimental

Una vez que las probetas han sido cortadas e identificadas, se procede a la experimentación. En primer lugar, se pinta cada probeta de blanco y se realizan marcas a partir de una distancia de 60 mm del borde de la probeta cada 10 mm, esto nos facilitará detectar el avance de grieta con la ayuda de una cámara digital.



Figura 19 Probeta marcada.

Para los ensayos se va a hacer uso de un utillaje articulado, que permite el giro de la sección.

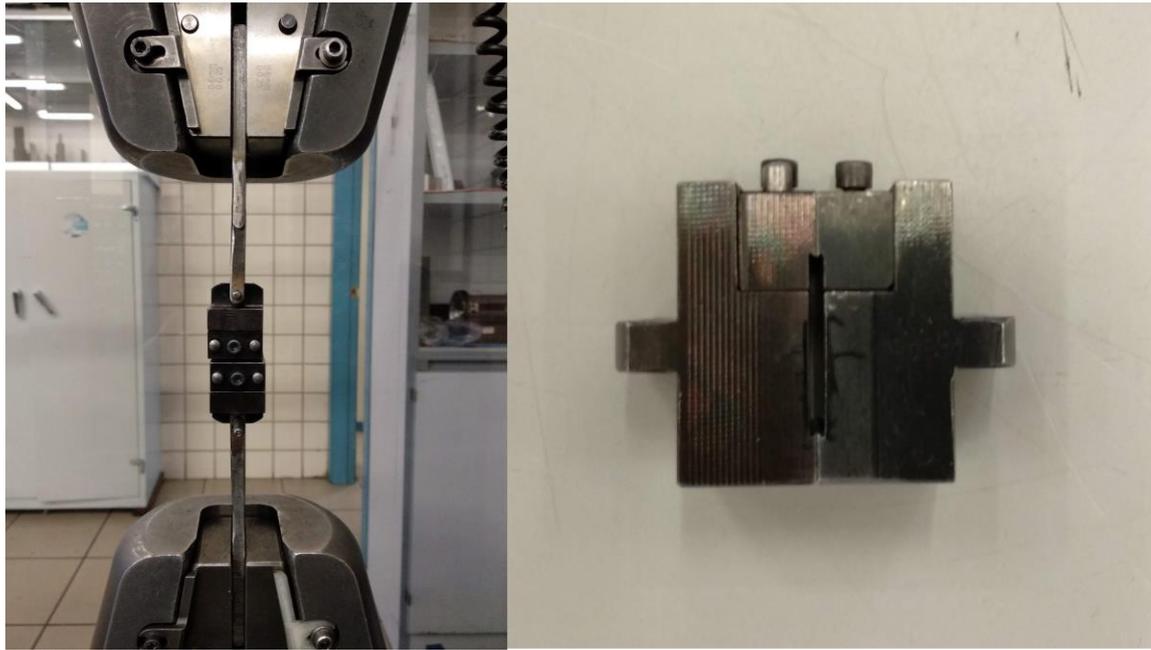


Figura 20 Utillaje articulado.

Se debe de prestar atención al par de apriete. El par de apriete permite la correcta fijación de la probeta al útil. Un exceso podría provocar deslaminaciones o concentraciones de tensiones en el extremo por la compresión lateral y, por lo tanto, fenómenos de flexión.

Los ensayos se realizan a velocidad constante, una vez que la grieta alcanza una línea vertical marcada, se anota el valor de desplazamiento de cruceta para esa medida. Se introducen en el programa los valores de espesor y ancho de cada probeta, así como el valor del módulo de elasticidad. Finalmente se introducen en el programa Excel los datos registrados de carga-desplazamiento recogidos durante la realización del ensayo.



Figura 21 Disposición del utillaje y cámara digital.

6 RESULTADOS EXPERIMENTALES

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para los dos tipos de fabricación realizada, co-curado y encolado secundario. Para obtener el valor de G_{IC} se ha desarrollado una aplicación en Excel, la cual implementa todos los procedimientos de cálculo del valor de G_{IC} previamente comentados en las secciones 3 y 4. En esta aplicación es necesario introducir los datos de espesor, ancho de la probeta, así como los distintos valores de a medidos en cada probeta. Durante la realización del ensayo como se comentó previamente se anotaron los valores del desplazamiento de cruceta al llegar el pico de grieta a cada marca.

6.1 Resultados co-curado

El ensayo se ha practicado a tres juegos de probetas de distinto espesor y dimensiones iguales. Durante la realización de los ensayos a las probetas [2+2] se encontró un problema, debido al pequeño espesor, los labios se escapan del útil, por lo que fue necesario pegarle al inicio de la probeta un elemento del mismo material que el ensayado y con las dimensiones del útil y de espesor 1.15 mm.

Las siguientes tablas recogen los valores medios obtenidos a partir del tratamiento de datos según las formulaciones anteriormente descritas. Los valores obtenidos para cada probeta se recogen en el Anexo A. Las ecuaciones (9), (10) y (11), consideran el giro de la sección donde $a_c = a + \Delta$. Los resultados obtenidos para pequeños desplazamientos son los que se recogen en la tabla 4.

Tabla 4 Valores medios pequeños desplazamientos co-curado sin efecto de bloques ni corrección por grandes desplazamientos

	$G_{IC}(P, \delta, a)$ Ec. 4	$G_{IC}(P, \delta, a_c)$ Ec. 6	$G_{IC}(P, a_c)$ Ec. 9	$G_{IC}(P, \delta)$ Ec. 10	$G_{IC}(a_c, \delta)$ Ec. 11	AITM
Cinta_2+2	1098	953	4921	1639	192	740
Cinta_4+4	1045	997	1440	1123	717	938
Cinta_8+8	1343	1243	1336	1271	1179	1242

El valor medio obtenido para las probetas [8+8] es similar entre las 6 formulaciones propuestas, mientras que por el contrario la diferencia crece a medida que disminuye el espesor, como es en el caso de las probetas [2+2], para las cuales se obtienen valores medios muy distintos para cada formulación.

Los valores medios para grandes desplazamientos quedan recogidos en la tabla 5. Estos valores se obtienen a partir de la ecuación (23), empleando distintos valores de entrada según se explicó en la sección 4. Los desplazamientos, así como la deformada obtenida es mucho mayor para probetas de

pequeño espesor, al tener una rigidez inferior, por lo tanto, los resultados obtenidos para las probetas [2+2] mejoran siendo similares para las tres formulaciones propuestas. Así mismo los resultados para [4+4] también mejoran. Los valores medios son similares entre los distintos espesores.

Tabla 5 Valores medios grandes desplazamientos

	$G=f(\delta/a)$	$G=f(\delta/k)$	$G=f(a/k)$
Cinta_2+2	1031	1181	1289
Cinta_4+4	1027	1063	1121
Cinta_8+8	1338	1260	1122

Si se aplica el factor de corrección F de grandes desplazamientos a los resultados obtenidos tanto para pequeños como grandes desplazamientos se obtienen los siguientes valores recogidos en las siguientes tablas 6 y 7.

Tabla 6 Valores medios pequeños desplazamientos con efecto de bloques y corrección por grandes desplazamientos

	$G_{IC}(P, \delta, a) * F/N$	$G_{IC}(P, \delta, a_c) * F/N$	$G_{IC}(P, a) * F$	$G_{IC}(P, \delta) * F/N^{2/3}$	$G_{IC}(a, \delta) * F/N^2$
Cinta_2+2	687	593	1221	754	291
Cinta_4+4	945	902	969	920	873
Cinta_8+8	1299	1203	1161	1186	1269

Como se comentó anteriormente en la sección 3.2, la aplicación del factor de corrección solo es válida para $G_{IC}(P, a)$. Para espesores pequeños la variación entre las distintas formulaciones aumenta.

Tabla 7 Valores medios grandes desplazamientos con efecto de bloques

	Cinta_2+2	Cinta_4+4	Cinta_8+8
$G=f(\delta/k)$	1109	1006	1231

A continuación, se recogen las gráficas carga-desplazamiento para cada juego de probetas. Como puede observarse el valor de carga máximo alcanzado aumenta con el espesor de la probeta.

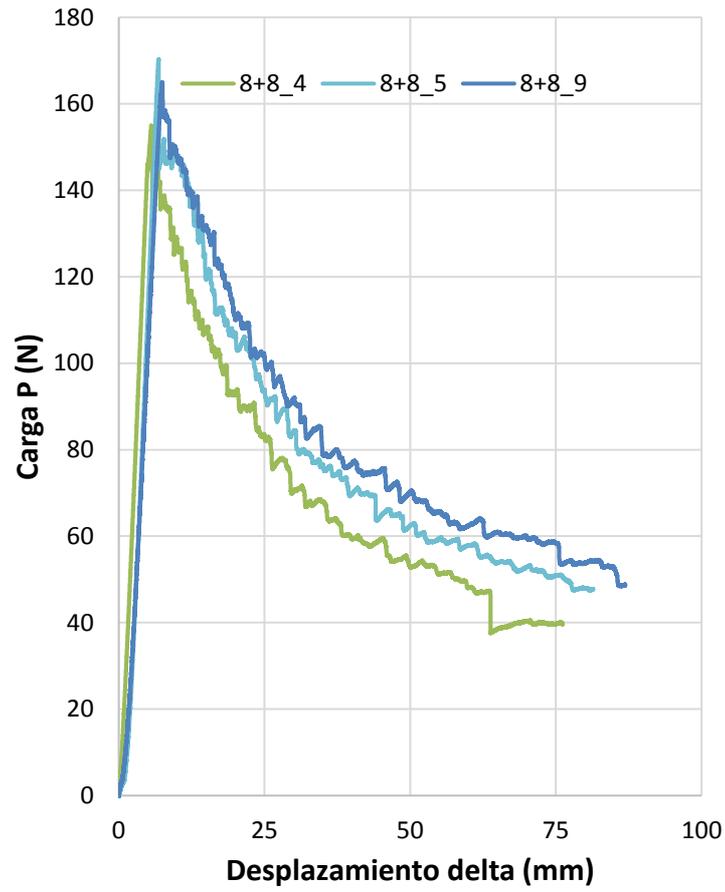


Figura 22 Carga-desplazamiento [8+8].

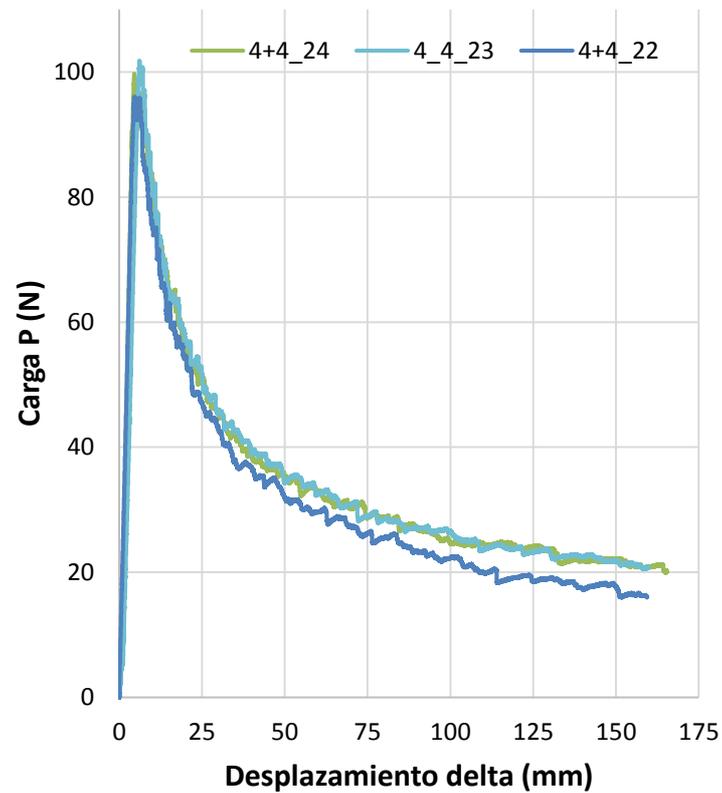


Figura 23 Carga-desplazamiento [4+4].

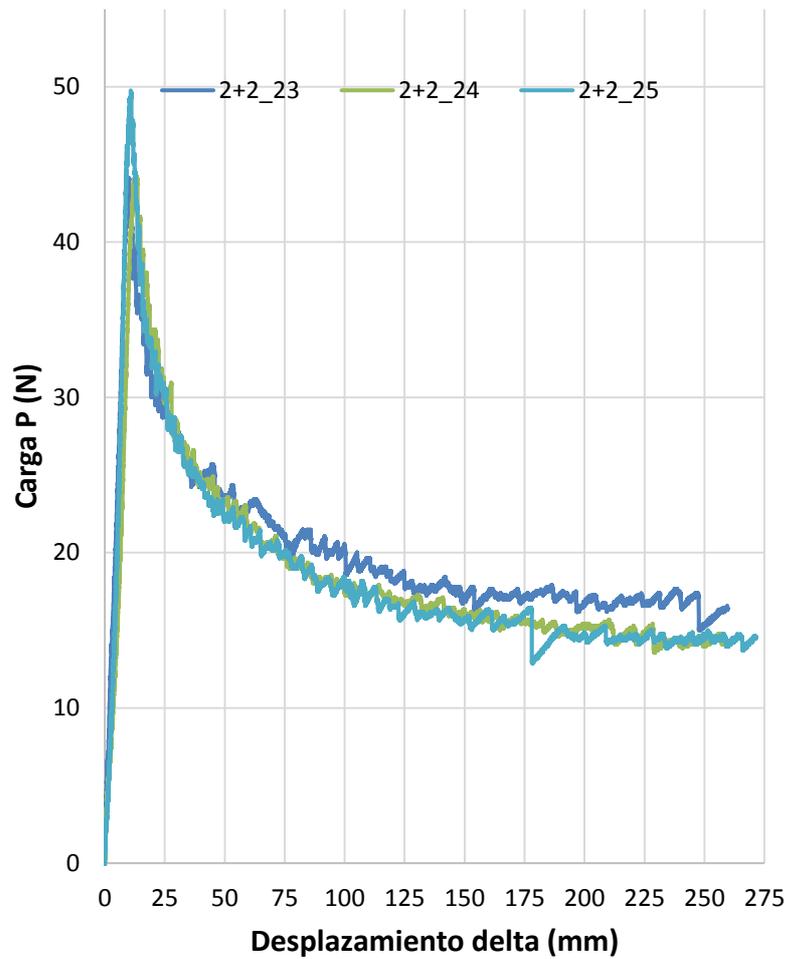


Figura 24 Carga-desplazamiento [2+2].

La figura 25 muestra las deformadas obtenidas durante la realización del ensayo para una probeta de cada juego. Se puede apreciar que la deformada que se obtiene es distinta para cada probeta. Solo para el caso de las probetas [8+8] se consigue una horizontalidad en el extremo de la probeta durante todo el ensayo. Esto está relacionado con el modo de fallo de las probetas figura 26.

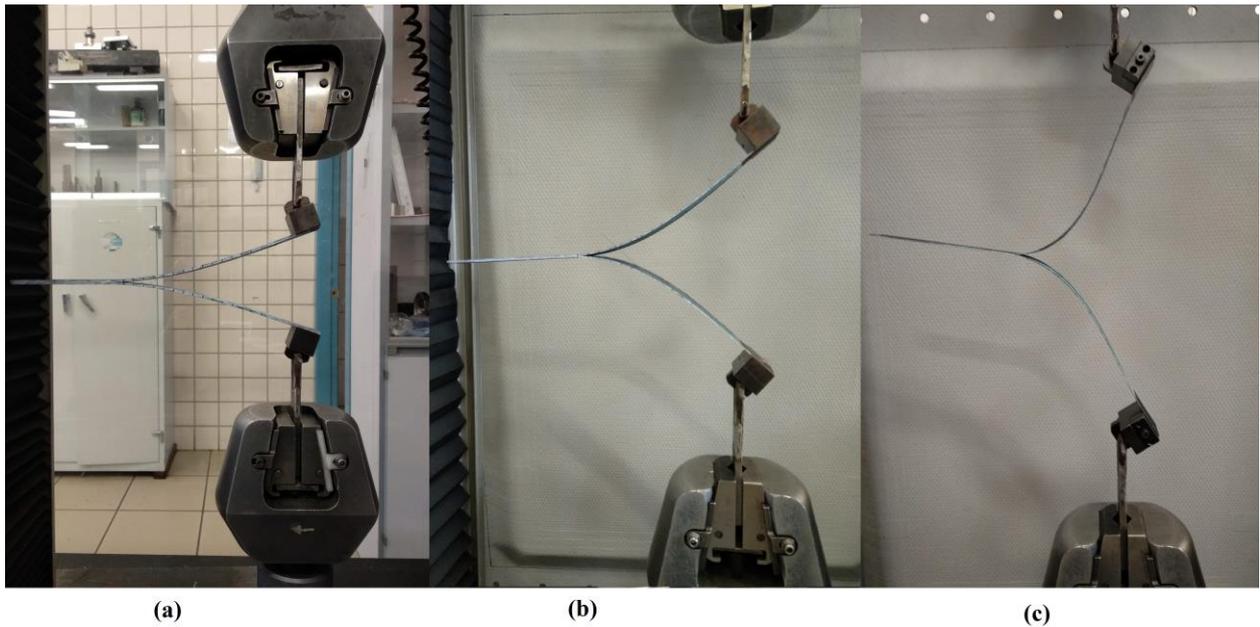


Figura 25 Deformadas obtenidas durante el ensayo: (a) probetas [8+8], (b) probetas [4+4] y (c) probetas [2+2] co-curadas.

En todas las configuraciones estudiadas se produce deslaminación. En la figura 26, los componentes que se han curado en primer lugar corresponden a los números 1, 3 y 5. En estos puede observarse como hay un arrastre del adhesivo, así como del material de la otra lámina., es decir, el ensayo no se produce en condiciones de simetría.

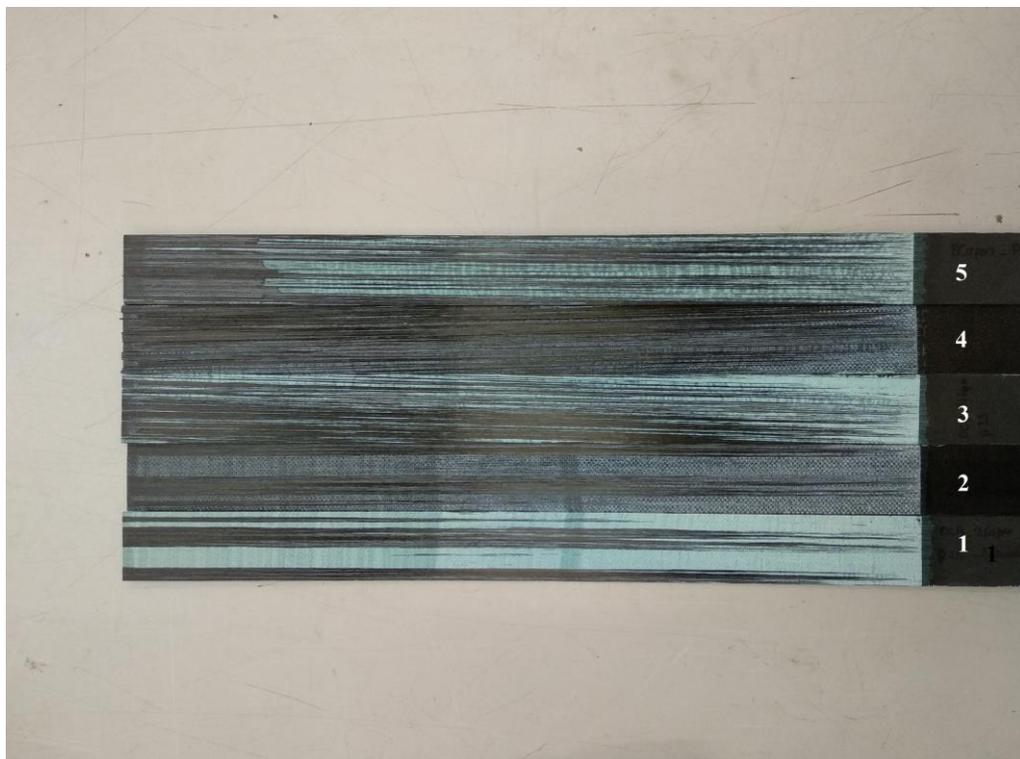


Figura 26 Modos de fallo.

Para el caso de la probeta [2+2] figura 25 (c), el labio superior de la probeta tiene un espesor mayor, al haberse producido delaminación arranca material del labio inferior aumentando por tanto su espesor. Este labio es el curado durante la fabricación de las probetas mediante co-curado.

6.2 Resultados encolado secundario

El procedimiento experimental es igual al desarrollado para las probetas realizadas por co-curado. Durante la realización de los ensayos en las probetas fabricadas mediante encolado secundario se observó que la propagación de la grieta se producía a saltos, este fenómeno es conocido como stick-slip, en el cual, la propagación de la grieta se produce a saltos. La figura 27 muestra como los desplazamientos se producen en forma de diente de sierra.

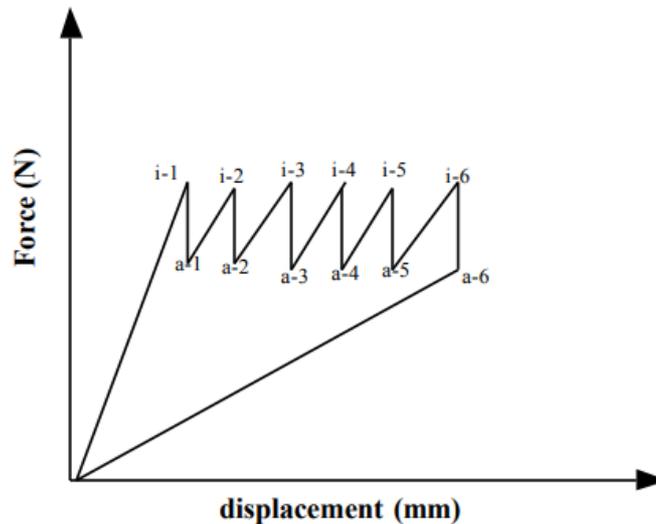


Figura 27 Representación esquemática del gráfico fuerza-desplazamiento, Renart Canalias[10].

A continuación, se muestra en la figura 28 la curva carga-desplazamiento y la curva propagación de la grieta-desplazamiento obtenida a partir del ensayo G_{IC} de una probeta [8+8] capas y la imagen de la superficie fracturada. Se ha hecho coincidir el rango de propagación de la grieta a , con la superficie de la imagen fracturada.

En cada salto en la curva a (δ) se produce un decremento en la fuerza aplicada en los extremos de la probeta en la curva P (δ). Al incrementar la longitud de grieta, la distancia entre el frente de grieta y el punto de aplicación de la carga aumenta, y, por lo tanto, la flexibilidad en los brazos de la probeta, por lo que es necesario aplicar menos fuerza para el mismo nivel de desplazamiento δ .

Se diferencian sobre la curva P (δ) tres zonas claras. La primera de ellas sería la parte de la gráfica en pendiente creciente, en esta zona la grieta no crece. La segunda sería de crecimiento lento de la grieta, se encontraría en el segundo pico de carga aplicada. Por último, una zona donde la grieta crece abruptamente, que se corresponde con todas las verticales en la gráfica P (δ).

Se observa en la superficie fracturada de la probeta franjas transversales de color blanco separadas una cierta distancia. Sobre la curva a (δ), estas franjas coinciden con la zona de crecimiento lento (fase stick) de la probeta. La distancia entre las franjas blancas es igual a la longitud del salto que tiene lugar durante la fase de crecimiento rápido de la longitud de grieta (fase slip).

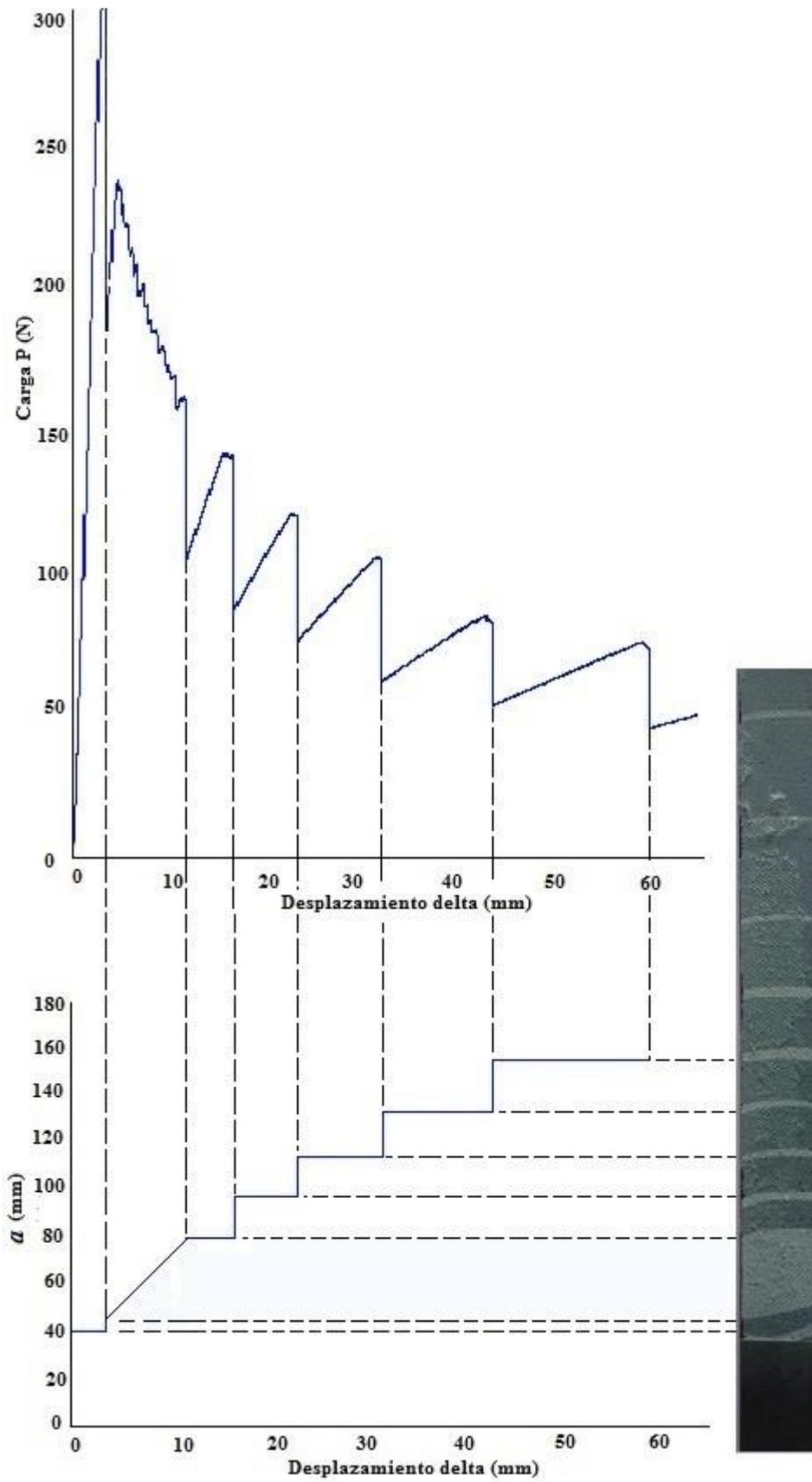


Figura 28 Representación efecto stick-slip.

Debido a la aparición de este fenómeno y la dificultad en la medición del parámetro a se ha

determinado el valor de la tenacidad a la fractura a través de la ecuación (10) donde G depende solo de la carga aplicada y el desplazamiento. Estos parámetros se obtienen directamente de la gráfica obtenida durante el ensayo. Para lo cual se ha hecho uso de los valores de P y δ en los puntos máximos de la curva fuerza-desplazamiento.

En la siguiente tabla se recogen los valores medios para las probetas ensayadas tanto para grandes como pequeños desplazamientos.

Tabla 8 Valores medios para grandes y pequeños desplazamientos, encolado secundario

	$G_{IC}(P, \delta)$ Ec. 10	$G=f(\delta/k)$
Cinta_2+2	2935	2105
Cinta_4+4	2425	2180
Cinta_8+8	1750	1729

Tanto para las probetas [2+2] como para las probetas [4+4] los valores medios obtenidos son similares. A continuación, se muestran las curvas carga-desplazamientos de los ensayos realizados.

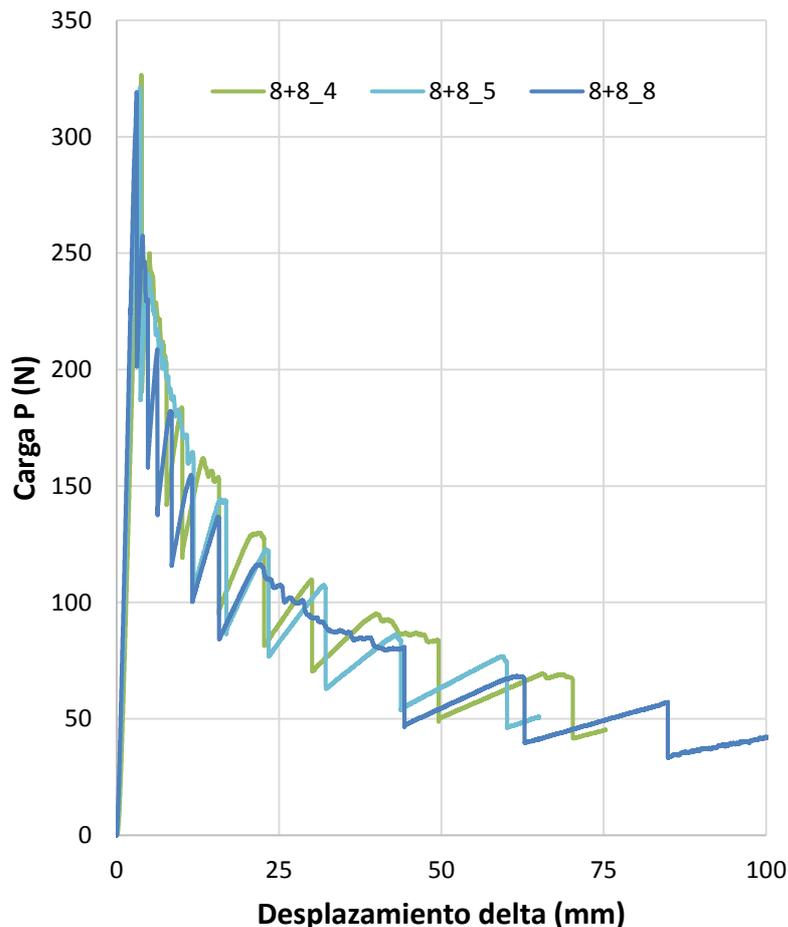


Figura 29 Carga-desplazamiento [8+8].

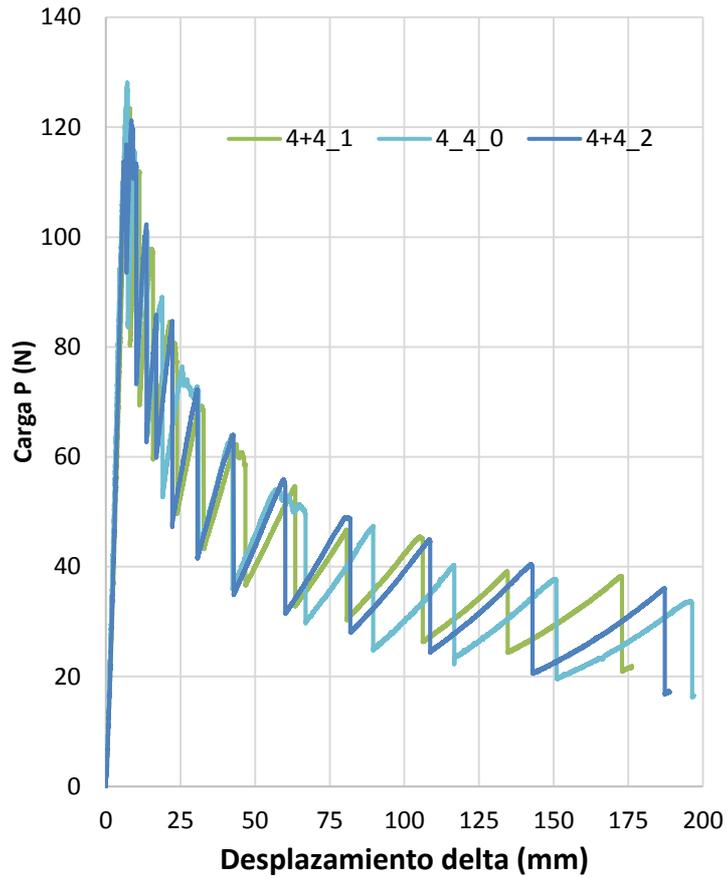


Figura 30 Carga-desplazamiento [4+4].

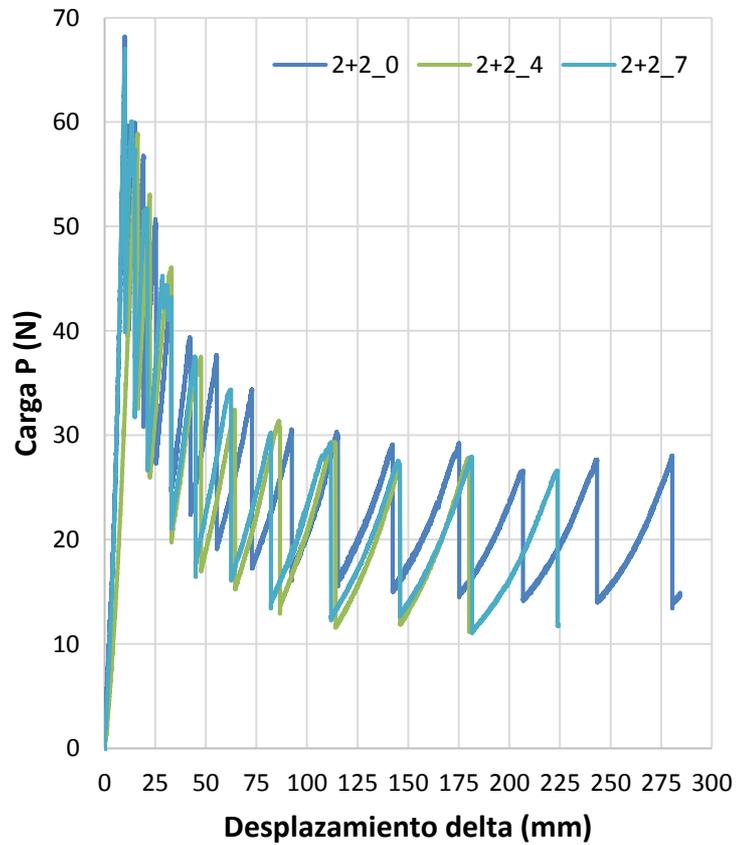


Figura 31 Carga-desplazamiento [2+2].

La figura 32 muestra las deformadas obtenidas durante la realización del ensayo G_{IC} para probetas fabricadas mediante encolado secundario.

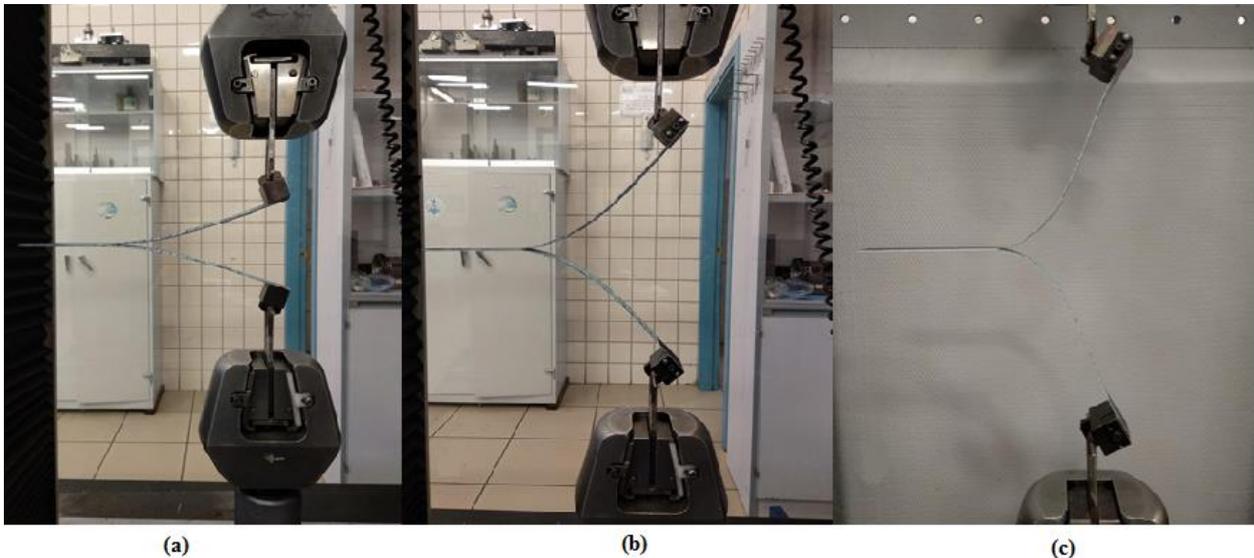


Figura 32 Deformadas obtenidas durante el ensayo: (a) probetas [8+8], (b) probetas [4+4] y (c) probetas [2+2] encolado secundario.

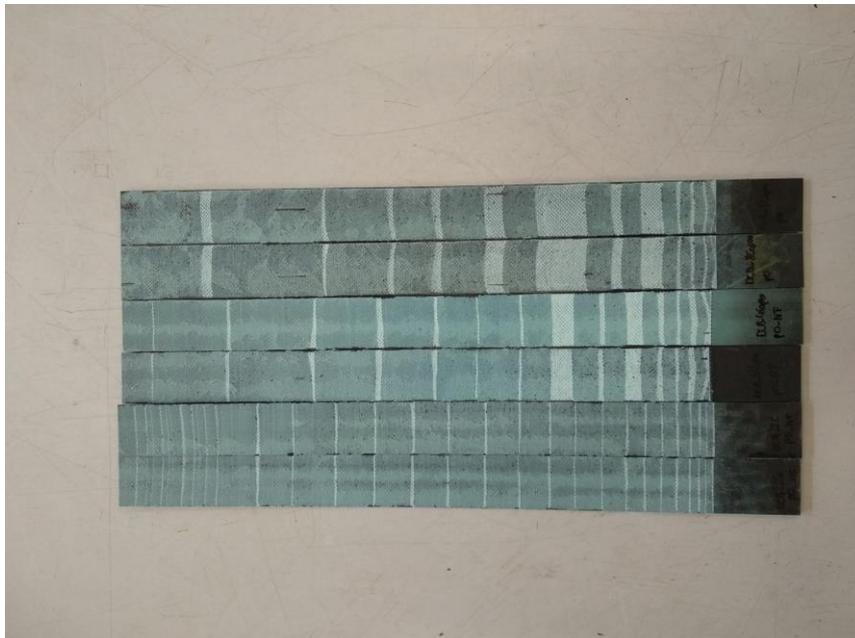


Figura 33 Modos de fallo.

Como se comentó previamente otra diferencia entre ambos procesos se presenta en las gráficas carga-desplazamiento obtenidas. En las probetas con encolado secundario se produce el efecto stick-slip, mientras que las probetas co-curadas presentan gráficas suaves. El proceso de toma de datos cuando se produce el fenómeno stick-slip es más complicado, ya que el avance de grieta se produce a saltos en lugar de forma continuada. Se puede diferenciar en cada salto dos etapas: la primera en la

cual el frente de grieta avanza lentamente y una segunda etapa de crecimiento rápido de grieta, a una velocidad de frente de grieta elevada.

Se puede apreciar que las gráficas de las probetas fabricadas mediante encolado secundario presentan el pico de carga máxima superior al que se produce en las probetas fabricadas mediante co-curado.

Otra diferencia al realizar los ensayos, son las deformadas obtenidas durante la realización de estos. Para las probetas co-curadas (salvo las probetas [8+8]) no se obtiene la horizontal del extremo de la probeta. A diferencia de lo que ocurre en aquellas fabricadas mediante encolado secundario, para las cuales se alcanza la horizontalidad desde el comienzo del ensayo (figura 34).

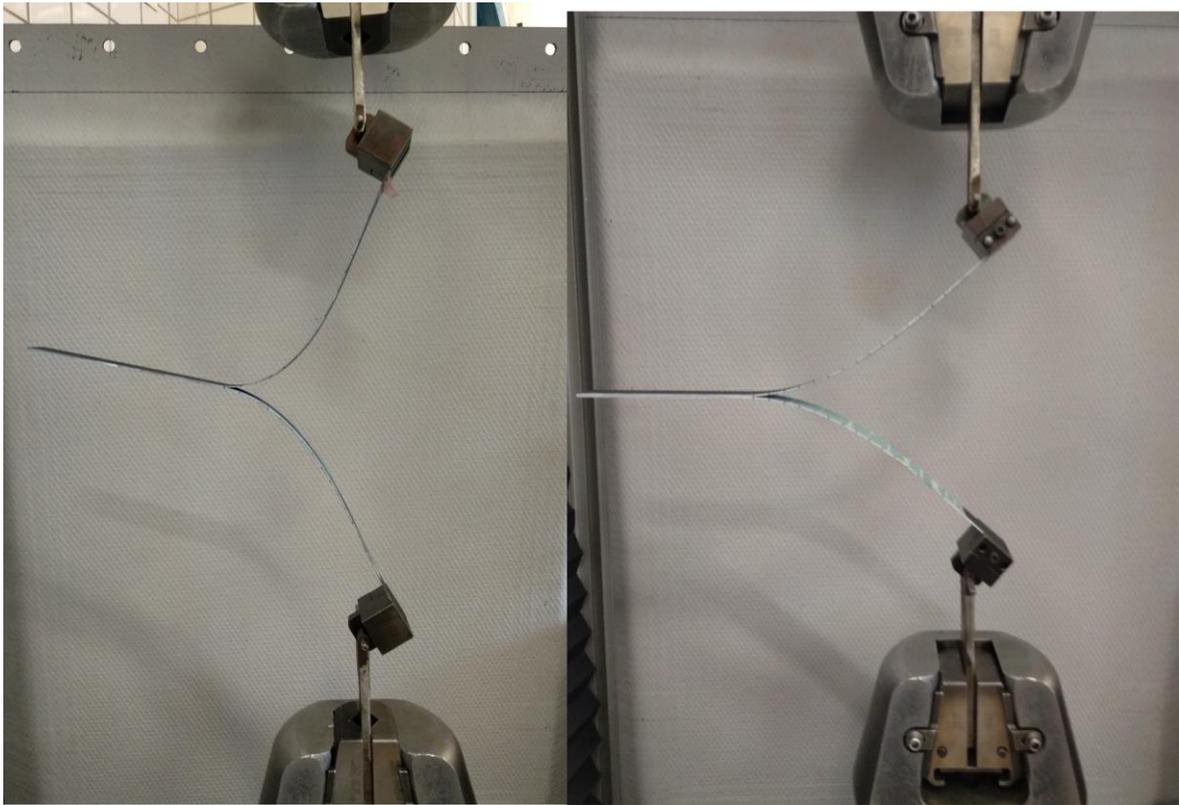


Figura 34 Comparativa deformadas [2+2].

7 CONCLUSIONES

Se han fabricado probetas para la realización del ensayo G_{IC} mediante dos procedimientos de fabricación distintos, una serie de probetas fabricadas mediante co-curado y otra serie de probetas fabricadas mediante encolado secundario, con el propósito de estudiar el valor de G_{IC} a partir de diferentes formulaciones y encontrar aquellas que obtengan resultados óptimos sin necesidad de obtener el parámetro de longitud de grieta. Las conclusiones que se han obtenido a raíz de la experimentación son:

1. Los modos de fallo dependen del proceso de fabricación. Para probetas co-curadas se produce deslaminación mientras que para probetas fabricadas mediante encolado secundario se produce fallo cohesivo.
2. Para probetas fabricadas mediante encolado secundario aparece el efecto stick-slip, lo que dificulta en gran medida la obtención del parámetro a .
3. Para pequeños desplazamientos en probetas fabricadas mediante co-curado la aplicación del factor de corrección por grandes desplazamientos y el efecto de los bloques solo obtiene buenos resultados para $G_{IC}(P, a)$.
4. Los valores de G_{IC} no son similares entre las distintas formulaciones propuestas en probetas fabricadas mediante co-curado
 - i. Error en la medición del parámetro a . Como se comentó al inicio del trabajo uno de los principales problemas en la obtención del valor de G_{IC} es la incertidumbre en la medida del valor de a . Este puede ser uno de los factores que hayan influido en los resultados finales. Para las probetas fabricadas mediante encolado secundario la dificultad en la medición de este parámetro era mayor al producirse el fenómeno stick-slip.
 - ii. Los desplazamientos no son los suficientemente pequeños para que se cumpla la hipótesis de pequeños desplazamientos, lo que conlleva a una disparidad en los resultados.
 - iii. El modo de fallo es mediante deslaminación (figura 26) en las probetas fabricadas mediante co-curado, esto puede ser debido a que el adhesivo penetra en el componente no curado, produciendo que el ensayo realizado no se produzca en condiciones de simetría.
5. Se obtienen valores de G_{IC} diferentes dependiendo del modo de fabricación.

REFERENCIAS

- [1] Sridharan, S. (Ed.). (2008). *Delamination behaviour of composites*. Elsevier.
- [2] Broek, D. (2012). *The practical use of fracture mechanics*. Springer Science & Business Media.
- [3] AITM 1-0053." Carbon fiber reinforced plastics. Determination of fracture toughness energy of bonded joints. Mode I. GIC test". Noviembre 2015, Blagnac, 31707, Francia.
- [4] American Society for Testing and Materials (Filadelfia). (1994). Standard test method for mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites. ASTM.
- [5] Gunderson, J. D., Brueck, J. F., & Paris, A. J. DCB test for the interlaminar fracture toughness of composites.
- [6] Castro Orta, M. D. M. (2017). Evaluación experimental de la calidad de una unión encolada composite-composite mediante ensayos de pelado.
- [7] Williams, J. G. (1987). Large displacement and end block effects in the 'DCB' interlaminar test in modes I and II. *Journal of Composite Materials*, 21(4), 330-347.
- [8] Williams, J. G. (1989). The fracture mechanics of delamination tests. *The Journal of strain analysis for engineering design*, 24(4), 207-214.
- [9] Yan, L., Chou, N., Huang, L., & Kasal, B. (2016). Effect of alkali treatment on microstructure and mechanical properties of coir fibres, coir fibre reinforced-polymer composites and reinforced-cementitious composites. *Construction and Building Materials*, 112, 168-182.
- [10] Renart Canalias, J. (2010). Desarrollo de un nuevo ensayo experimental para la evaluación de la calidad de uniones adhesivas entre componentes estructurales de composite para la industria aeronáutica.
- [11] Bazhenov, S. L. (1991). Strong bending in the DCB interlaminar test of thin, E-glass woven-fabric-reinforced laminates. *Composites*, 22(4), 275-280.
- [12] Biel, A., & Stigh, U. (2007). An analysis of the evaluation of the fracture energy using the DCB-specimen. *Archives of Mechanics*, 59(4-5), 311-327.
- [13] Bisshopp, K. E., & Drucker, D. C. (1945). Large deflection of cantilever beams. *Quarterly of Applied Mathematics*, 3(3), 272-275.
- [14] Blackman, B. R., & Kinloch, A. J. (2000). Protocol for the determination of the Mode I adhesive fracture energy, G_{Ic} , of structural adhesives using the double cantilever beam (DCB) and tapered double cantilever beam (TDCB) specimens. *Version 00-08. European Structural Integrity Society Polymers, Adhesives and Composites TC4 Committee*.
- [15] O'Brien, T. K. (1998). Interlaminar fracture toughness: the long and winding road to standardization. *Composites Part B: Engineering*, 29(1), 57-62.
- [16] Pavelko, V., Lapsa, K., & Pavlovskis, P. (2016). Determination of the mode I interlaminar fracture toughness by using a nonlinear double-cantilever beam specimen. *Mechanics of Composite Materials*, 52(3), 347-358.
- [17] Sela, N., & Ishai, O. (1989). Interlaminar fracture toughness and toughening of laminated composite materials: a review. *Composites*, 20(5), 423-435.

ANEXO A

En este anexo se presentan de manera extendida los datos obtenidos para las distintas formulaciones para cada probeta.

Resultados experimentales mediante co-curado para los distintos espesores ensayados.

Tabla 9 Resultados G_{IC} [8+8] pequeños desplazamientos

	$G_{IC}(P, \delta, a)$ Ec. 4	$G_{IC}(P, \delta, a_c)$ Ec. 6	$G_{IC}(P, a)$ Ec. 9	$G_{IC}(P, \delta)$ Ec. 10	$G_{IC}(a, \delta)$ Ec. 11	AITM Ec. 1
Probeta_8_4	1164	1135	989	1084	1305	1111.2
Probeta_8_5	1357	1222	1445	1292	1035	1241.4
Probeta_8_9	1508	1373	1575	1438	1198	1373.6
Media	1343	1243	1336	1271	1179	1242
CV (%)	12.83	9.68	23.03	13.99	11.53	10.56

Tabla 10 Resultados G_{IC} [8+8] grandes desplazamientos

	$G_{IC}(\delta, a)$	$G_{IC}(\delta, k)$	$G_{IC}(a, k)$
Probeta_8_4	1160	1075	923
Probeta_8_5	1352	1280	1154
Probeta_8_9	1502	1423	1284
Media	1338	1260	1122
CV (%)	12.81	13.88	16.29

Tabla 11 Resultados G_{IC} [8+8] pequeños desplazamientos con efecto de bloques y corrección por grandes desplazamientos

	$G_{IC}(P, \delta, a)^*$ F/N	$G_{IC}(P, \delta, a_c)^*$ F/N	$G_{IC}(P, a)^*$ F	$G_{IC}(P, \delta)^*F/N^{2/3}$	$G_{IC}(a, \delta)^*F/N^2$
Probeta_8_4	1128	1100	867	1016	1399
Probeta_8_5	1313	1182	1257	1207	1113
Probeta_8_9	1455	1326	1257	1207	1113
Media	1299	1203	1161	1186	1269
CV (%)	12.62	9.51	19.39	9.29	13.01

Tabla 12 Resultados G_{IC} [8+8] grandes desplazamientos con efecto de bloques

	Probeta_8_4	Probeta_8_5	Probeta_8_9	Media	CV (%)
$G_{IC} * f (\delta/k)$	1053	1252	1389	1231	13.72

Tabla 13 Resultados G_{IC} [4+4] pequeños desplazamientos

	$G_{IC}(P, \delta, a)$ Ec.4	$G_{IC}(P, \delta, a_c)$ Ec. 6	$G_{IC}(P, a)$ Ec. 9	$G_{IC}(P, \delta)$ Ec. 10	$G_{IC}(a, \delta)$ Ec. 11	AITM Ec. 1
Probeta_4_23	1092	989	1715	1188	571	944.5
Probeta_4_24	1074	1036	1541	1182	698	954.8
Probeta_4_25	968	968	1065	999	882	913.2
Media	1045	997	1440	1123	717	938
CV (%)	6.41	3.49	23.36	9.56	21.80	2.30

Tabla 14 Resultados G_{IC} [4+4] grandes desplazamientos

	$G_{IC}(\delta, a)$	$G_{IC}(\delta, k)$	$G_{IC}(a, k)$
Probeta_4_23	1074	1122	1200
Probeta_4_24	1057	1118	1221

Probeta_4_25	951	949	944
Media	1027	1063	1121
CV (%)	6.48	9.28	13.75

Tabla 15 Resultados G_{IC} [4+4] pequeños desplazamientos con efecto de bloques y corrección por grandes desplazamientos

	$G_{IC}(P, \delta, a) * F / N$	$G_{IC}(P, \delta, a_c) * F / N$	$G_{IC}(P, a) * F$	$G_{IC}(P, \delta) * F / N^{2/3}$	$G_{IC}(a, \delta) * F / N^2$
Probeta_4_23	988	894	1152	973	695
Probeta_4_24	975	941	1047	975	845
Probeta_4_25	873	872	707	813	1078
Media	945	902	969	920	873
CV (%)	6.66	3.90	24	10.10	22.10

Tabla 16 Resultados G_{IC} [4+4] grandes desplazamientos con efecto de bloques

	Probeta_4_23	Probeta_4_24	Probeta_4_25	Media	CV (%)
$G_{IC} * f(\delta/k)$	1061	1057	900	1006	9.12

Tabla 17 Resultados G_{IC} [2+2] pequeños desplazamientos

	$G_{IC}(P, \delta, a)$ Ec. 4	$G_{IC}(P, \delta, a_c)$ Ec. 6	$G_{IC}(P, a)$ Ec. 9	$G_{IC}(P, \delta)$ Ec. 10	$G_{IC}(a, \delta)$ Ec. 11	AITM Ec. 1
Probeta_2_23	1168	1010	5757	1797	184	743.5
Probeta_2_24	1088	933	4742	1599	189	745.1
Probeta_2_25	1037	915	4264	1523	202	732.1
Media	1098	953	4921	1639	192	740
CV (%)	6.01	5.29	15.49	8.63	4.83	0.95

Tabla 18 Resultados G_{IC} [2+2] grandes desplazamientos

	$G_{IC}(\delta, a)$	$G_{IC}(\delta, k)$	$G_{IC}(a, k)$
Probeta_2_23	1096	1272	1392
Probeta_2_24	1020	1156	1254
Probeta_2_25	976	1116	1222
Media	1031	1181	1289
CV (%)	5.88	6.86	7

Tabla 19 Resultados G_{IC} [2+2] pequeños desplazamientos con efecto de bloques y corrección por grandes desplazamientos

	$G_{IC}(P, \delta, a)$ *F/N	$G_{IC}(P, \delta, a_c)$ *F/N	$G_{IC}(P, a)$ *F	$G_{IC}(P, \delta)$ *F/N ^{2/3}	$G_{IC}(a, \delta)$ *F/N ²
Probeta_2_23	737	634	1445	834	278
Probeta_2_24	662	564	1113	708	287
Probeta_2_25	662	581	1104	720	307
Media	687	593	1221	754	291
CV (%)	6.30	6.15	15.91	9.22	5.10

Tabla 20 Resultados G_{IC} [2+2] grandes desplazamientos con efecto de bloques

	Probeta_2_23	Probeta_2_24	Probeta_2_25	Media	CV (%)
$G_{IC} * f(\delta/k)$	1200	1082	1044	1109	7.33

Resultados experimentales mediante ecnolado secundario para los distintos espesores ensayados.

Tabla 21 Resultados G_{IC} [2+2] pequeños y grandes desplazamientos

	$G_{IC}(P, \delta)$ Ec. 10	$G=f(\delta/k)$
Probeta_2_0	2169	3081
Probeta_2_4	2094	2987
Probeta_2_7	2053	2737

Tabla 22 Resultados G_{IC} [4+4] pequeños y grandes desplazamientos

	$G_{IC}(P, \delta)$ Ec. 10	$G=f(\delta/k)$
Probeta_4_0	2374	2126
Probeta_4_1	2155	2355
Probeta_4_2	2258	2545

Tabla 23 Resultados G_{IC} [8+8] pequeños y grandes desplazamientos

	$G_{IC}(P, \delta)$ Ec. 10	$G=f(\delta/k)$
Probeta_8_4	1836	1856
Probeta_8_5	1783	1804
Probeta_8_8	1568	1588