

DESARROLLO DE UN NUEVO ENSAYO EXPERIMENTAL PARA LA EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DE UNIONES ADHESIVAS ENTRE COMPONENTES ESTRUCTURALES DE COMPOSITE PARA LA INDÚSTRIA AERONÁUTICA

Jordi RENART CANALIAS

Dipòsit legal: Gi. 1211-2015

<http://hdl.handle.net/10803/296679>

ADVERTIMENT. L'accés als continguts d'aquesta tesi doctoral i la seva utilització ha de respectar els drets de la persona autora. Pot ser utilitzada per a consulta o estudi personal, així com en activitats o materials d'investigació i docència en els termes establerts a l'art. 32 del Text Refós de la Llei de Propietat Intel·lectual (RDL 1/1996). Per altres utilitzacions es requereix l'autorització prèvia i expressa de la persona autora. En qualsevol cas, en la utilització dels seus continguts caldrà indicar de forma clara el nom i cognoms de la persona autora i el títol de la tesi doctoral. No s'autoritza la seva reproducció o altres formes d'explotació efectuades amb finalitats de lucre ni la seva comunicació pública des d'un lloc aliè al servei TDX. Tampoc s'autoritza la presentació del seu contingut en una finestra o marc aliè a TDX (framing). Aquesta reserva de drets afecta tant als continguts de la tesi com als seus resums i índexs.

ADVERTENCIA. El acceso a los contenidos de esta tesis doctoral y su utilización debe respetar los derechos de la persona autora. Puede ser utilizada para consulta o estudio personal, así como en actividades o materiales de investigación y docencia en los términos establecidos en el art. 32 del Texto Refundido de la Ley de Propiedad Intelectual (RDL 1/1996). Para otros usos se requiere la autorización previa y expresa de la persona autora. En cualquier caso, en la utilización de sus contenidos se deberá indicar de forma clara el nombre y apellidos de la persona autora y el título de la tesis doctoral. No se autoriza su reproducción u otras formas de explotación efectuadas con fines lucrativos ni su comunicación pública desde un sitio ajeno al servicio TDR. Tampoco se autoriza la presentación de su contenido en una ventana o marco ajeno a TDR (framing). Esta reserva de derechos afecta tanto al contenido de la tesis como a sus resúmenes e índices.

WARNING. Access to the contents of this doctoral thesis and its use must respect the rights of the author. It can be used for reference or private study, as well as research and learning activities or materials in the terms established by the 32nd article of the Spanish Consolidated Copyright Act (RDL 1/1996). Express and previous authorization of the author is required for any other uses. In any case, when using its content, full name of the author and title of the thesis must be clearly indicated. Reproduction or other forms of for profit use or public communication from outside TDX service is not allowed. Presentation of its content in a window or frame external to TDX (framing) is not authorized either. These rights affect both the content of the thesis and its abstracts and indexes.



Universitat de Girona

TESIS DOCTORAL

DESARROLLO DE UN NUEVO ENSAYO
EXPERIMENTAL PARA LA EVALUACIÓN DE LA
CALIDAD DE UNIONES ADHESIVAS ENTRE
COMPONENTES ESTRUCTURALES DE COMPOSITE
PARA LA INDUSTRIA AERONÁUTICA

VOLUMEN I:
MEMORIA Y ANEXOS

Jordi Renart Canalias

2010



Universitat de Girona

TESIS DOCTORAL

DESARROLLO DE UN NUEVO ENSAYO
EXPERIMENTAL PARA LA EVALUACIÓN DE LA
CALIDAD DE UNIONES ADHESIVAS ENTRE
COMPONENTES ESTRUCTURALES DE COMPOSITE
PARA LA INDUSTRIA AERONÁUTICA

VOLUMEN I:
MEMORIA Y ANEXOS

Jordi Renart Canalias

2010

PROGRAMA DE DOCTORADO EN TECNOLOGÍA

DIRIGIDA POR:
JOSEP COSTA BALANZAT

El presente trabajo ha sido financiado por el Ministerio de Educación y Ciencia mediante el proyecto Petri PTR1995-0901-OP.

El autor de este trabajo ha sido becado por l'Associació d'Enginyers Industrials de Catalunya con el soporte de l'Agrupació Sòcio-Cultural dels Enginyers Industrials de Catalunya.

Durante la realización de esta tesis, el autor ha sido miembro del grupo de investigación Análisis y Materiales Avanzados para el Diseño Estructural (AMADE) de la Universitat de Girona, y ha formado parte del cuerpo docente del Área de Mecánica de los Medios Continuos y Teoría de Estructuras (MMCTE) del departamento de Ingeniería Mecánica y de la Construcción Industrial (EMCI) de la Universitat de Girona.

Agraïments/Agradecimientos

Al director de la tesis, el Dr. Josep Costa Balanzat, per la seva excel·lent direcció, les interessants suggerències i el seu recolzament, que han estat imprescindibles per l'elaboració de la tesi.

Quisiera agradecer a Silvia Lazcano, Gloria Santacruz y Jose Sánchez de Airbus España por el soporte técnico que me han ofrecido durante este tiempo y porque gracias a ellos he tenido la oportunidad de poder llevar a cabo este trabajo.

Al personal del Departamento de Materiales y Estructuras del Área de materiales Compuestos del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), en especial a su director el Dr. Jose María Pintado y al personal del Área de Producción, María de la Torre e Irene Fernández, por acogerme, enseñarme, ayudarme y realizar la fabricación de todas las probetas que he “roto” durante la tesis.

Als membres del Departament d'Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial, a en Lluís Ripoll perquè va ser la persona que em va animar a començar, a Joan Andreu Mayugo per ser durant tant de temps el meu director de tesi “virtual”, a Norbert Blanco pels profitosos consells en relació a la part experimental que sempre han estat de gran ajuda i a Lluís Torres, a Xavier Cahís i Narcís Gascons perquè han fet possible la meva estada aquí. Ángel aunque te hayas jubilado también me acuerdo de ti.

Als més que companys amics Albert Turon, Pep Vicens, Pere Maími i Beningne Corbella amb els qui he compartit moltes més coses que la tesi. Als companys que m'han ajudat en la part experimental, producció i simulació, Elio Pajares, Emili González, Jaume Vives, Sergi Ortiz i Francesc Martín. I la resta de companys del grup de recerca amb qui he passat, passo i passaré molts bons moments tant laborals com “extralaborals”, Xavier Cahís, Dani Trias, Marc Gascons, Marta Baena, Cristina Barris, Cristina Miàs, Enric, Raúl, Montse, Javi, Dani, Irene, Takeishi, Lierni i Jordi.

Agrair als meus pares Lluís i Dolors i a la resta de la meva família el suport que m'ha donat, i la seva inacabable paciència.

I finalment el meu més sincer agraïment a la persona que m'ha ofert tot el seu recolzament i comprensió que tant m'han ajudat durant aquest temps. Gràcies Carme.

El Dr. Josep Costa Balanzat, professor del Departament de Física de la Universitat de Girona,

CERTIFICO:

Que aquest treball, titulat “Desarrollo de un nuevo ensayo experimental para la evaluación de la calidad de uniones adhesivas entre componentes estructurales de composite para la industria aeronáutica”, que presenta Jordi Renart Canalias per a l’obtenció del títol de doctor ha estat realitzat sota la meva direcció.

Girona, 8 de Juny de 2010

Resumen

El uso de los materiales composites en la industria aeronáutica ha experimentado un fuerte crecimiento en los últimos años debido a la utilización de componentes de composite que realizan funciones estructurales. A menudo, para disminuir los costes de producción, las partes esbeltas del fuselaje se unen con elementos rigidizadores mediante uniones adhesivas. Para asegurar que las uniones adhesivas cumplirán la función estructural para la cual se han diseñado se realizan ensayos a nivel de probeta.

En el presente trabajo se realiza un análisis de los métodos de ensayo experimental que se llevan a cabo para determinar la calidad de las uniones adhesivas (la cuál depende principalmente de la calidad de la preparación superficial, las propiedades del adhesivo y la compatibilidad entre el adhesivo y los adherentes). La tesis se enfoca a dos objetivos: la propuesta de mejoras del ensayo de doble viga en voladizo y el desarrollo de un método alternativo de propagación de grieta por avance forzado de una cuña (*Wedge Driven Test*, WDT). En cuanto al ensayo de doble viga en voladizo, se han diseñado unos utillajes de sujeción mecánica de la probeta a la máquina de ensayo y se ha propuesto una metodología experimental adaptada a la propagación discontinua del frente de grieta. En relación al nuevo método de ensayo, se ha desarrollado un procedimiento dirigido, al igual que el DCB actual, a determinar la tenacidad a la fractura en modo I de la unión adhesiva, mediante la introducción forzada de una cuña. Las ventajas que ofrece el ensayo WDT respecto el DCB es que es más rápido, económico, no se necesita ningún tipo de preparación previa de la probeta y no hace falta realizar mediciones de la longitud de grieta.

Para poner a prueba la sensibilidad del ensayo WDT a la calidad de la unión se ha realizado una serie de campañas experimentales, en las cuales se han analizado 4 configuraciones de unión adhesiva distintas (como resultado de la combinación de dos adherentes y dos adhesivos). Así mismo se han ensayado preparaciones intencionadamente defectuosas. De los resultados de las campañas experimentales se ha observado que el ensayo de propagación de grieta por avance forzado de cuña presenta unos resultados equivalentes a los del ensayo DCB y es sensible a la calidad de la preparación superficial.

Abstract

The use of composite materials in the aircraft industry has been increasing in recent years due to their application in structural parts. To reduce the production costs of these components the join between skins and stiffeners is made by means of an adhesive. In order to guarantee that the bonded joint fulfils the structural requirements, experimental tests on specimens are done from the first development tasks and throughout the production stages.

In the present work, an analysis of the experimental test methods to determine the quality of bonded joints has been performed - the quality of bonded joints depends on the quality of the surface preparation, the adhesive properties and the compatibility between the adhesive and the adherents. The work focuses on two objectives: the improvement of the double cantilever beam test, and the development of an alternative method of bonded joint characterization based on driving a wedge into the adhesive layer (Wedge Driven Test, WDT). In the double cantilever beam test, a mechanical fixture tool has been designed and a data reduction method for stick-slip crack propagation has been developed. On the other hand, the alternative test method such as the DCB, focuses on determining the fracture toughness in mode I of the adhesive joint, by means of introducing a wedge inside the specimen at a constant speed rate.

To prove the sensitivity of the WDT to the quality of the adhesive joint, a series of testing campaigns has been performed over 4 adhesive joint configurations (combining 2 adhesives and 2 adherents). Moreover, deliberately produced bad surface preparations have been tested. From the test results, it has been observed that the driven wedge test exhibits an equivalent behavior to the double cantilever beam test and has a similar level of sensitivity to the quality of the bonded joint.

Índice general

Volumen I: Memoria y Anexos

1 Uniones adhesivas en materiales composites	25
2 Determinación de la calidad de las uniones adhesivas	31
3 Probetas. Fabricación y caracterización	55
4 Análisis y propuestas de mejora del ensayo DCB	97
5 Ensayo alternativo de propagación de grieta por avance forzado de cuña (WDT)	125
6 Ensayo alternativo WDT: análisis numérico	159
7 Ensayo alternativo WDT: procedimiento experimental.	175
8 Resultados experimentales	199
9 Conclusiones y futuras líneas de trabajo	221
Bibliografía	226
A Planos utillajes	233
B Equipamiento utilizado	255
C Fabricación de las probetas	261
D Inspección fractográfica de la superficie dañada de las probetas	271
E Listado de las campañas de ensayo realizadas	281

Volumen II: Resultados de las campañas experimentales (1/2)

1 Contenido del documento	7
2 Resultados de los ensayos experimentales	9

Bibliografía	449
---------------------	------------

Volumen III: Resultados de las campañas experimentales (2/2)

1 Contenido del documento	7
----------------------------------	----------

2 Resultados de los ensayos experimentales	9
---	----------

Bibliografía	389
---------------------	------------

Volumen I
Memoria y Anexos

Índice de figuras

1.1	Componentes de composite fabricados con fibra de carbono y resina epoxy (CFRP) del modelo Airbus A380.	25
1.2	Esquema del ensayo DCB.	27
2.1	Modos de propagación de la grieta en función de las cargas (Anderson, 1995). . .	32
2.2	Esquema del ensayo experimental de pelado en T, Shields (1985).	34
2.3	Esquema del ensayo de pelado a 180°, Shields (1985).	34
2.4	Esquema de los ensayos de pelado con rodillos flotantes y con tambor flotante. .	35
2.5	Esquema del perfil de las probetas para ensayos de doble viga en voladizo con entalla (ASTM D3433-99(2005)).	36
2.6	Esquema del ensayo cuña según la norma ASTM D3762-03.	37
2.7	Esquema de la unión adhesiva con adherentes de composite (Blackman et al., 2003). .	38
2.8	Esquema del ensayo de propagación de grieta por avance forzado de cuña (Adams et al., 2009).	39
2.9	Esquema de la cuña con rodamientos (Glessner et al., 1989).	39
2.10	Esquema del montaje experimental de Sener et al. (2002).	40
2.11	Esquema del ensayo de avance forzado de cuña con plasticidad en los brazos de la probeta, Pardoen et al. (2005).	41
2.12	Esquema del ensayo de avance forzado de cuña para separar la lámina fina (Williams, 1998).	42
2.13	Obtención de una sección equivalente para considerar el efecto de la rigidez de la lámina de adhesivo sobre la rigidez de uno de los brazos de la probeta (Penado, 1993).	44
2.14	Simplificación realizada en el análisis de teoría de vigas simple.	45
2.15	Fundaciones elásticas para representar la deformación de los brazos de la probeta. .	45
2.16	Descomposición de una probeta en un modelo sándwich y un brazo libre de la probeta.	46
2.17	Esquema de las formulaciones basadas en los modelos de fundación elástica. . . .	49
2.18	Representación esquemática de los modelos de zona cohesiva para uniones adhesivas. .	50
2.19	Deformaciones en la probeta producidas por las tensiones térmicas residuales (Guo et al., 2006).	53
3.1	Dimensiones de las probetas para ensayos de tracción longitudinal, dimensiones en mm.	57

3.2	Dimensiones de las probetas para ensayos de tracción transversal, dimensiones en mm.	58
3.3	Dimensiones de las probetas para ensayos de cortadura en el plano, dimensiones en mm.	58
3.4	Dimensiones de las probetas para ensayos DCB, dimensiones en mm.	59
3.5	Dimensiones de las probetas para ensayos DCB de uniones adhesivas, dimensiones en mm.	59
3.6	Nomenclatura de los paneles de un material y las uniones adhesivas.	62
3.7	Nomenclatura de los subpaneles.	62
3.8	Nomenclatura de los paneles para realizar los tacones de fibra de vidrio.	63
3.9	Bolsa de vacío y materiales auxiliares. El símbolo \rightarrow indica la dirección del flujo de aire.	64
3.10	Corte y obtención de las láminas unidireccionales con orientaciones de la fibra a 0° y a 90° . Dimensiones en mm.	68
3.11	Tiras de material para cortar paneles a $\pm 45^\circ$ a partir de las cintas orientadas a 0° . El primer número indica la pieza y el segundo el recorte.	68
3.12	Dimensiones y corte de las piezas 1 y 2 de la figura 3.11.	68
3.13	Montaje de los recortes de las piezas 1 y 2 de la figura 3.11.	69
3.14	Fijación de la primera lámina sobre el soporte de aluminio.	70
3.15	Etapas del proceso de laminado de un panel.	71
3.16	Colocación del inserto de teflón en un panel para ensayos de fractura interlaminar con $A_0 = 60 \text{ mm}$, dimensiones en mm.	73
3.17	Identificación del panel y marca de orientación de las fibras a 0°	73
3.18	Montaje de la bolsa de vacío para el curado de los adherentes y el proceso de encolado secundario	74
3.19	Valores de presión y temperatura para el curado en autoclave de los preimpregnados.	75
3.20	Detalle del extremo de la unión adhesiva durante su montaje.	76
3.21	Montaje de una unión adhesiva con una pregrieta inicial de 60 mm. Dimensiones en mm.	77
3.22	Encintado de una unión adhesiva.	78
3.23	Esquema de corte de los tacones de fibra de vidrio: probetas para ensayos de tracción longitudinal (izquierda) y tracción transversal (derecha). Dimensiones en mm.	79
3.24	Recorte de los paneles a los cuales se adherirán los tacones. Dimensiones en mm.	79
3.25	Esquema para encintar los tacones a los paneles de carbono.	80
3.26	Valores de presión y temperatura para el curado de adhesivos en autoclave. Las uniones adhesivas se han curado a 180°C o 160°C	80
3.27	Marcaje de las probetas para conocer su posición dentro del panel	81
3.28	Ejemplo del sistema de codificación en una de las probetas.	82
3.29	Puntos de medición del ancho y del espesor de las probetas de $250 \times 15 \text{ mm}$. Probetas para ensayos de tracción longitudinal. Dimensiones en mm.	83

3.30	Puntos de medición del ancho y del espesor de las probetas de 175×25 mm. Probetas para ensayos de tracción transversal y cortadura en el plano. Dimensiones en mm.	83
3.31	Puntos de medición del ancho y del espesor de las probetas de 250×25 mm. Probetas para ensayos DCB y uniones adhesivas. Dimensiones en mm.	83
3.32	Ejemplo de la determinación de los parámetros E_x y ν_{xy} a partir de los datos del extensómetro biaxial. Datos experimentales de la probeta A1/01/05.	85
3.33	Ejemplo de la determinación de los valores de σ_x^u y ϵ_x^u a partir de los datos del extensómetro uniaxial. Datos experimentales de la probeta A1/01/05.	86
3.34	Ejemplo de la determinación de los valores de E_y , σ_y^u y ϵ_y^u del ensayo de tracción transversal. Datos experimentales de la probeta A1/12/06.	87
3.35	Ejemplo de la determinación de G_{xy} y la deformación a cortante máxima de la probeta A1/03/01.	89
3.36	Ejemplo de la determinación de G_{xy} , τ_{xy}^u y γ_{xy}^u de un ensayo de cortante interlaminar en el cuál $\gamma_{xy}^u < \gamma_{xys}$. Datos experimentales de la probeta A1/03/05 en dos ciclos de carga y descarga.	89
3.37	Utillajes de sujeción mecánica para fijar la probeta a la máquina de ensayo.	91
3.38	Representación de los datos de G_{IC} en función de a de la probeta T1/07/08, el valor de G_{IC} se estabiliza para valores de $a > 100mm$	92
3.39	Marcaje lateral de las probetas interlaminares de T800S/M21.	92
3.40	Curva del ensayo experimental de sujeción del utillaje a la probeta.	94
4.1	Defectos en la unión de los utillajes causados por las irregularidades superficiales de las probetas.	99
4.2	Utillajes propuestos por las normas de ensayo ISO 15024 y ASTM D5528-01(2007)e3.100	
4.3	Esquema del diseño del aplicador de carga de Brandt (1998): a) esquema sin probeta; b) mecanismo de sujeción con la probeta.	101
4.4	Esquema del diseño del aplicador de carga de Blanco (2005).	101
4.5	Utillajes de sujeción mecánica desarrollados por Vicens et al. (2006).	102
4.6	Utillajes de sujeción mecánica desarrollados por el INTA (Vicens et al., 2006).	102
4.7	Esquema del utillaje <i>Side Clamped Beam</i> , SCB.	103
4.8	Despiece del utillaje SCB.	104
4.9	Ejemplo del montaje de los utillajes y la probeta en la máquina de ensayo.	104
4.10	Ángulo de incidencia y altura de la línea del mecanismo de sujeción del utillaje a la probeta.	105
4.11	Esquema del pandeo producido en uno de los brazos de la probeta por la fuerza de apriete descentrada.	105
4.12	Vista frontal del utillaje y la probeta. Rotura transversal de la probeta.	106
4.13	Esquema del ensayo experimental utilizado para determinar la fuerza de sujeción de los utillajes SCB.	106
4.14	Curva del ensayo experimental de sujeción del utillaje a la probeta.	107
4.15	Marcas que dejan los utillajes en los laterales de la probeta.	107

4.16	Detalle de la sujeción del utillaje para una probeta de espesor $2h = 2.8 \text{ mm}$ con $l_4 = 1.3 \text{ mm}$	108
4.17	Relación entre a_0 y la longitud del inserto de teflón en función de las dimensiones del utillaje.	109
4.18	Longitud del inserto de teflón en función de G_{IC} . $P_{max} = 300 \text{ N}$	110
4.19	Espesor máximo de probeta que puede analizarse en función de G_{IC} para distintos valores de $A_0 = 60, 70 \text{ y } 80 \text{ mm}$. $P_{max} = 300 \text{ N}$	111
4.20	Comparación de los resultados de G_{IC} para los distintos utillajes. Métodos de reducción de datos MBT y MCC según ISO 15024. Probetas de AS4/8552.	113
4.21	Comparación de los resultados de G_{IC} para los distintos utillajes. Métodos de reducción de datos MBT y MCC según ISO 15024. Probetas de T800S/M21.	113
4.22	Curvas fuerza-desplazamiento de un ensayo DCB continua o discontinua.	115
4.23	Representación del efecto <i>stick-slip</i> en el ensayo experimental DCB de la probeta T1/F1/07/06.	116
4.24	Esquema de la curva $P(\delta_y)$ de un ensayo DCB con <i>stick-slip</i> . Superposición de la curva de G_{in} constante y puntos de paro de crecimiento de grieta G_a	118
4.25	Esquema de la curva $P(\delta_y)$ de un ensayo DCB con <i>stick-slip</i> . Variación de P debido al incremento de longitud de grieta de a_i a a_j	118
4.26	Determinación de los valores de P , δ_y y a de un ensayo DCB, puntos para obtener G_{in} . Probeta T1/E1/07/06. Se ha reducido el número de puntos experimentales para visualizar más claramente los puntos en los cuales se determinan P , δ_y y a	120
4.27	Marcaje lateral de las uniones adhesivas para ensayos DCB de propagación de grieta con <i>stick-slip</i> . Unidades en mm.	122
4.28	Propagación a saltos del frente de grieta de la probeta T1/E1/07/06. Determinación de a_f	123
5.1	Esquema del ensayo de apertura de grieta WDT.	126
5.2	Secuencia del ensayo WDT.	127
5.3	Representación de las curvas F_{PUSH} , G y a en función de δ de un ensayo WDT teórico.	128
5.4	Punto de contacto entre la cuña y la probeta, y posición del punto de contacto respecto al centro de la cuña.	131
5.5	Representación esquemática del ensayo WDT para analizar las fuerzas que intervienen.	132
5.6	Fuerzas que actúan sobre la cuña durante su avance.	134
5.7	Descomposición de las fuerzas de contacto que actúan sobre la cuña durante su avance.	135
5.8	Fuerzas que actúan sobre la cuña durante su retroceso.	136
5.9	Descomposición de las fuerzas de contacto que actúan sobre la cuña durante su retroceso.	137
5.10	Posición de los puntos de contacto A y B de la formulación simplificada.	139
5.11	Curvas de $\hat{F}(\hat{a})$ y curvas de error de las formulaciones exacta y simplificada del WDT con dos coeficientes de fricción: $\mu = 0.1$ y $\mu = 0.3$	142

5.12	Dimensiones de la probeta analizada.	145
5.13	Simplificación de la apertura de los brazos de la probeta.	145
5.14	Ratio de la flexibilidad entre las simulaciones lineal y no lineal.	146
5.15	Simplificación realizada en la formulación analítica del WDT.	147
5.16	Equivalencia del ensayo WDT al de una viga en voladizo.	149
5.17	Ajuste de la fase de introducción de la curva $F_{PUSH}(\delta)$ experimental para obtener μ	154
5.18	Curva de ajuste y curva de error (error absoluto entre los datos experimentales y el ajuste) de la fase de iniciación del ensayo WDT, probeta A1/F1/04/10.	155
5.19	Curvas de $a(\delta)$ y $G_{IC}(\delta)$ en la fase de propagación del ensayo WDT, probeta T1/E1/02/06.	156
5.20	Determinación de U_{ext} y U_{dis} a partir de las curvas de $F_{PUSH}(\delta)$ y $F_{Fx}(\delta)$ en la fase de propagación del ensayo WDT.	157
6.1	Dominio de la pieza Ω en la cual hay una discontinuidad Γ_d (Turón et al., 2007).	161
6.2	Leyes constitutivas bilineales para los modos de fractura I y II (Turón et al., 2007).	162
6.3	Definición del mallado de la cuña y la probeta. Unidades en mm (el. = elementos).	164
6.4	Condiciones de contorno aplicadas sobre la probeta.	165
6.5	Secuencia de la simulación numérica.	166
6.6	Resultados de la simulación con fricción entre cuña y probeta.	167
6.7	Componentes verticales y horizontales de las fuerzas de contacto y fricción entre cuña y probeta.	168
6.8	Esquema representativo de la pérdida de rigidez de los elementos de la zona cohesiva.	169
6.9	Evolución de la l_{cz} y F_{PUSH} en función del porcentaje de tiempo del análisis.	170
6.10	Resultados del ajuste de μ y a_0 del ensayo virtual con $G_{IC} = 1100 J/m^2$ y $\tau_1^3 = 37 MPa$	171
6.11	Evolución de la l_{cz} y F_{PUSH} en función del porcentaje de tiempo del análisis, realizando un segundo ciclo de avance y retroceso de la cuña.	173
7.1	Esquema general de los utillajes para realizar el ensayo WDT.	176
7.2	Despiece de la cuña.	177
7.3	Esquema del mecanismo de apertura automática de la probeta.	177
7.4	Parámetros de la pinza, del mecanismo de apertura de los brazos de la probeta.	178
7.5	Mecanismo de sujeción de la probeta a la máquina de ensayo.	178
7.6	Montaje experimental del ensayo de propagación de grieta por avance forzado de cuña (WDT).	179
7.7	Planos de apertura de los brazos de la probeta y de ensayo.	180
7.8	Secuencia de introducción de la cuña en la probeta, y los puntos los puntos de contacto entre los clips de la cuña y el utillaje de apertura o entre la cuña y la probeta.	181
7.9	Curva $F_{PUSH}(\delta)$ de uno de los primeros ensayos WDT. Probeta A1/F1/03/06.	182
7.10	Superficie fracturada una vez finalizado el ensayo WDT. Probeta A1/F1/03/06.	182
7.11	Imagen en negativo de la superficie fracturada de la probeta A1/F1/03/06.	183

7.12	Regiones analizadas de la superficie fractura de la probeta.	183
7.13	Imágenes de las marcas del tejido pelable en la zona del inserto de teflón. Imágenes en perspectiva.	184
7.14	Imágenes del inserto de teflón dónde el adhesivo fluyó durante el proceso de curado. 185	
7.15	Imagen de la superficie fracturada de la unión en la zona sobre la cual no ha pasado la cuña. Imagen en perspectiva obtenida con el MER, a 50 aumentos. . .	185
7.16	Exceso de área superficial. Resultados de las 3 superficies analizadas: inserto, inserto con adhesivo y zona de la propagación de grieta.	186
7.17	Superficies analizadas con el microscopio confocal para obtener S_{pr}/S_{re}	186
7.18	Esquema de la curva $F_{PUSH}(\delta)$ del ensayo experimental en 2 ciclos.	188
7.19	Curva de F_{PUSH} en función del tiempo del ensayo experimental. Curva de resultados de la probeta A1/F1/07/03.	189
7.20	Regiones que se han analizado en la superficie fracturada.	190
7.21	Ampliación de la superficie del adhesivo de la figura 7.21, a 100 aumentos.	191
7.22	Imagen de la zona dañada por el paso de la cuña. Imagen obtenida con el MER, a 100 aumentos.	192
7.23	Ampliación de la superficie del adhesivo de la figura 7.22, a 200 aumentos.	192
7.24	Imágenes obtenidas con el microscopio confocal de la superficie dañada de la probeta por el paso de la cuña. Unidades en μm	193
7.25	Etapas 1 del ensayo WDT: propagación de la grieta en el plano del adhesivo.	194
7.26	Etapas 2 del ensayo WDT: apertura manual de los brazos de la probeta.	195
7.27	Etapas 3 del ensayo WDT: determinación del coeficiente de fricción.	196
7.28	Posición del cero de desplazamiento de la cuña, distancia inicial entre la cuña y las garras de sujeción de la probeta. Unidades en mm.	197
7.29	Etapas 3 del ensayo WDT: determinación del coeficiente de fricción.	198
7.30	Etapas 3 del ensayo WDT: determinación del coeficiente de fricción.	198
8.1	Curvas $P(\delta_y)$ de las probetas de T800S/M21 con la preparación superficial óptima. 201	
8.2	Curvas $P(\delta_y)$ de las probetas de AS4/8552 con la preparación superficial óptima. 202	
8.3	Curvas $P(\delta_y)$ de las probetas de T800S/M21 y AS4/8552 con la preparación superficial inadecuada.	203
8.4	Resultados de G_{IC} de las uniones adhesivas.	204
8.5	Variación de G_{IC} en función de la preparación superficial y de la temperatura de curado respecto la preparación óptima (PS1 a 180°).	205
8.6	Resultados normalizados de G_{IC} de cada lote de probetas, en función de $G_{IC}(PROP)$. 206	
8.7	Efecto <i>stick-slip</i> en las curvas $P(\delta_y)$, $a(\delta_y)$ y en la superficie de la probeta.	206
8.8	Superficie fracturada de la probeta T1/F1/05/06, sobre la cuál se ha realizado un análisis fractográfico de las zonas de crecimiento rápido (bandas blancas) y lento del frente de grieta.	207
8.9	Imagen de la superficie fracturada de una de las probetas a $10\times$ en la cual se ha marcado la zona de crecimiento lento del frente de grieta.	208
8.10	Ampliaciones a $20\times$ y $50\times$ de la región de crecimiento lento del frente de grieta. 208	
8.11	Ampliación a $1000\times$ de la región de crecimiento lento del frente de grieta.	209

8.12	Imágenes de otra región de crecimiento lento del frente de grieta.	210
8.13	Ampliación a 1000× de una región con crecimiento lento y rápido del frente de grieta.	210
8.14	Imágenes de una región de crecimiento rápido del frente de grieta.	211
8.15	Imágenes obtenidas con el MER del punto C de la zona de crecimiento rápido del frente de grieta.	211
8.16	Curvas $F_{PUSH}(\delta)$ de las probetas de T800S/M21 con la preparación superficial óptima.	212
8.17	Curvas $F_{PUSH}(\delta)$ de las probetas de AS4/8552 con la preparación superficial óptima.	213
8.18	Curvas $F_{PUSH}(\delta)$ de las probetas de T800S/M21 y AS4/8552 con la preparación superficial inadecuada.	214
8.19	Comparación de los valores de G_{IC} obtenidos a partir de los dos métodos experimentales: DCB y WDT.	215
8.20	Valores normalizados de G_{IC} en función de $G_{IC}(PROP)$ del ensayo DCB.	215
8.21	Comparación de la sensibilidad de los métodos de ensayo experimental para las configuraciones de probeta A1/E1 y A1/F1.	217
8.22	Comparación de la sensibilidad de los métodos de ensayo experimental para las configuraciones de probeta T1/E1 y T1/F1.	217
8.23	Superficies fracturadas de dos probetas con dos tipos de preparación superficial: óptima (PS1) y inadecuada (PS2).	218
D.1	Esquema de las secciones longitudinales y transversales que se he han obtenido de una probeta sin fracturar.	272
D.2	Puntos analizados de la superficie fracturada.	273
D.3	Imagen en perspectiva de una región del inserto de teflón a 50×.	274
D.4	Ampliación de la región central de la figura D.3 a 500×.	275
D.5	Imagen en perspectiva de un punto de la región fracturada en la cual se produjo un cambio de plano del frente de grieta tomada a 50 aumentos.	276
D.6	Imagen del <i>haz de fibras</i> de la superficie del adhesivo a 500×.	277
D.7	Imágenes a 100× de las superficie del adhesivo y del adherente de la figura D.5.	277
D.8	Imagen de otro punto de la superficie creada por la propagación de la grieta en la que ha habido un cambio de plano del frente de grieta. Imagen tomada a 20× aumentos.	278
D.9	Secuencia de ampliaciones que relaciona la posición de la zona de la figura D.10 en la superficie de la figura D.8.	279
D.10	Imagen de la superficie fracturada del adhesivo a 3000×.	279

Índice de Tablas

3.1	Tipología de probetas fabricadas.	56
3.2	Configuraciones de las uniones adhesivas	61
3.3	Datos de los paneles fabricados.	61
3.4	Secuencias de fabricación de los distintos tipos de paneles: laminados con y sin tacones, uniones adhesivas, paneles para ensayos de fractura interlaminar.	67
3.5	Dimensiones de los insertos de teflón en función del tipo de probeta y la longitud de la pregrieta	69
3.6	Material fungible para elaborar la bolsa de vacío	75
3.7	Parámetros de calentamiento, estabilización y enfriamiento del ciclo de curado.	76
3.8	Parámetros de calentamiento, estabilización y enfriamiento del ciclo de curado de las uniones adhesivas.	80
3.9	Máquinas de ensayo utilizadas para caracterizar las propiedades de los adherentes.	84
3.10	Ensayo de tracción longitudinal: listado de probetas.	86
3.11	Ensayo de tracción transversal: listado de probetas.	87
3.12	Listado de probetas para el ensayo de cortadura en el plano.	90
3.13	Valores promedios de las propiedades de los adherentes AS4/8552 y T800S/M21.	90
3.14	Listado de probetas para los ensayos de fractura interlaminar.	94
3.15	Valores de G_{IC} de iniciación y propagación de los adherentes AS4/8552 y T800S/M21.	95
4.1	Propiedades de las probetas y el utillaje para determinar A_0 en función de G_{IC}	110
4.2	Campañas de ensayos de deslaminación con los utillajes propuestos por la norma de ensayo ISO 15024 y los nuevos utillajes de agarre mecánico lateral, SCB.	112
4.3	Valores promedio de G_{IC} y errores absoluto y relativo de los ensayos de deslaminación con los utillajes SCB y los de la norma AITM 1-0053.	114
5.1	Módulos de Young según las hipótesis de tensión y deformación plana.	144
5.2	Propiedades elásticas del material.	144
5.3	Comparación de los resultados de C de las distintas alternativas.	148
6.1	Propiedades elásticas de las capas que constituyen los adherentes.	163
6.2	Determinación de la l_{cz} , y ajuste de μ , a_0 y G_{IC}	171
6.3	Determinación de la l_{cz} , y ajuste de μ , a_0 y G_{IC} en el segundo ciclo de avance y retroceso de la cuña.	173
7.1	Propiedades elásticas y dimensiones de las probetas, y dimensiones de la cuña necesarias para realizar el ajuste de μ	189

7.2	Valores del μ de cada ciclo de carga.	190
8.1	Campañas de ensayos de las uniones adhesivas.	200
A.1	Listado de los planos de los utillajes.	233
C.1	Información de todos los paneles fabricados.	262
C.2	Tipos de corte para obtener las probetas y los tacones.	263
E.1	Campañas, lotes y probetas analizadas.	282

Lista de símbolos

Símbolo	Descripción
a	longitud de grieta.
\bar{a}	en un ensayo WDT, distancia entre el frente de grieta y el centro de curvatura de la punta de la cuña.
A	parámetro de ajuste de la rigidez de la fundación elástica. Según Kaninen (1973) $A=2$, según Penado (1993) $A=4$.
a_0	en ensayos DCB, longitud de la pregrieta inicial. En ensayos WDT distancia inicial entre el frente de grieta y el centro de la cuña.
a_{0C}	distancia inicial corregida entre el frente de grieta y el centro de la cuña (ensayo WDT).
a_{0MEF}	en el ensayo virtual WDT, distancia inicial entre el frente de grieta y el centro de la cuña.
A_0	longitud del inserto de teflón.
a_C	longitud de grieta corregida (Williams, 1998).
a_f, a_{max}	valores de la longitud de grieta medidos en δ_{yf} (ver la definición de δ_{y_0} y δ_{yf}).
a_{manual}	longitud de grieta abierta manualmente (ensayo WDT).
B	ancho de la probeta.
c	longitud de la fundación elástica. Longitud del modelo sandwich (Penado, 1993).
C	flexibilidad de uno de los brazos de la probeta.
C_L	flexibilidad de uno de los brazos de la probeta obtenido de una simulación numérica considerando un comportamiento lineal.
C_M	componente de la flexibilidad producida por el efecto de la flexión.
C_{MEF}	flexibilidad calculada de la simulación numérica.
C_{NL}	flexibilidad de uno de los brazos de la probeta obtenido de una simulación numérica considerando un comportamiento no lineal (grandes deformaciones).
C_V	componente de la flexibilidad producida por el efecto del cortante.

Símbolo	Descripción
d	distancia horizontal relativa entre los sensores y la cuña (Glessner et al., 1989).
d_1	distancia que se desplaza la cuña durante el primer ciclo de avance y retroceso.
d_2	distancia que se desplaza la cuña durante el segundo ciclo de avance y retroceso.
d	variable de daño escalar (Turon et al., 2007).
D_{ij}	matriz constitutiva que relaciona τ_i en función de Δ_i (Turon et al., 2007).
E_w	módulo de Young de la cuña.
E_x	módulo de Young en la dirección de las fibras del adherente.
\bar{E}_x	módulo de Young en la dirección de las fibras del adherente según la hipótesis de deformación plana.
$E_x^{(1)}$	módulo de Young en la dirección de las fibras del adherente Penado (1993).
$E_x^{(2)}$	módulo de Young del adhesivo Penado (1993).
E_y	módulo de Young en la dirección transversal a la de las fibras.
\bar{E}_y	módulo de Young en la dirección transversal a la de las fibras según la hipótesis de deformación plana.
f_1, f_2	desplazamiento vertical de los sensores (Glessner et al., 1989).
F	parámetro corrector de la rotación adicional en los brazos de la probeta en un ensayo DCB (norma ISO 15024).
\bar{F}	función de carga y descarga de la ley constitutiva bilineal (Turon et al., 2007).
F_N, F_{Nx}, F_{Ny}	fuerza de contacto normal de la cuña con los brazos de la probeta, y sus componentes horizontal y vertical.
F_F, F_{Fx}, F_{Fy}	fuerza de fricción entre la cuña y la probeta, y sus componentes horizontal y vertical.
F_C, F_{Cx}, F_{Cy}	fuerza de contacto total entre la cuña y la probeta, y sus componentes horizontal y vertical.
F_{PULL}	fuerza de empuje realizada sobre la cuña para provocar su retroceso hasta la posición inicial.
F_{PUSH}	fuerza de empuje realizada sobre la cuña para provocar su avance.
G	energía disponible para la fractura
$G(\cdot)$	función escalar monótonica que gobierna la degradación (Turon et al., 2007).
G_a	energía disponible para la fractura en el punto de paro de crecimiento de grieta (cuando hay <i>stick-slip</i>).

Símbolo	Descripción
G_C	tenacidad a la fractura.
G_{in}	energía disponible para la fractura de iniciación (cuando hay <i>stick-slip</i>).
G_I	energía disponible para la fractura en modo I.
G_{IC}	tenacidad a la fractura en modo I.
G_{IC_0}	tenacidad a la fractura asociada con la respuesta de la zona cohesiva (Pardoen et al., 2005).
$G_{IC_{MEF}}$	tenacidad a la fractura introducida en el ensayo virtual WDT.
G_{IC_P}	contribución a la tenacidad a la fractura debida a la disipación plástica de la lámina de adhesivo (Pardoen et al., 2005).
G_{IIC}	tenacidad a la fractura en modo II.
G_{max}, G_{min}	rango de trabajo de la energía disponible para la fractura en los ensayos a fatiga.
G_{xy}	módulo a cortante del adherente en el plano xy .
G_{yz}	módulo a cortante del adherente fuera del plano (yz).
h	espesor de uno de los brazos de la probeta.
h_1, h_2	espesor de los adherentes del modelo sándwich (Wang et al., 2003a).
I_z	inercia de uno de los brazos de la probeta.
K	fuerza normal de contacto entre la cuña y la probeta (Williams, 1998). O factor de penalización (Turon et al., 2007).
K_V	rigidez a cortante (Olsson, 1992).
k_L	rigidez transversal de las fundaciones elástica de Winkler y Pasternak.
k_R	rigidez rotacional de la fundación elástica de Pasternak.
l_1	distancia vertical desde el centro de uno de los brazos de la probeta hasta el punto de aplicación de la carga (P) de un utillaje para ensayos DCB (norma ISO 15024).
l_2	distancia horizontal entre el punto de aplicación de la carga y el extremo de la probeta de un utillaje tipo bloque para ensayos DCB (norma ISO 15024).
l_3	longitud del utillaje para ensayos DCB (norma ISO 15024).
l_4	espesor de agarre de la pinza del utillaje SCB.
l_{cz}	longitud de la zona cohesiva.
l_{pre}	longitud de la pregrieta respecto la posición del inserto de teflón.
L	longitud total de la probeta.
N	parámetro corrector de la rigidez adicional introducida por los utillajes en un ensayo DCB (norma ISO 15024).

Símbolo	Descripción
N_{ix}, V_{ix}, M_{ix}	esfuerzo normal, cortante y momento flector del modelo sándwich desarrollado por Wang et al. (2003a). El subíndice i indica el adherente al cual pertenecen ($i = 1$ adherente superior, $i = 2$ adherente inferior).
P	fuerza de apertura de los brazos de la probeta.
\bar{P}	fuerza de estiramiento de los brazos de la probeta (Wang et al., 2003a).
P_0	fuerza de contacto vertical entre los brazos de la probeta (Guo et al., 2006).
P_{max}	fuerza de agarre máxima del utillaje SCB.
r^t	umbral de degradación en el instante de tiempo t (Turon et al., 2007).
r_w	radio de curvatura de la punta de la cuña.
R_{f1}, R_{f2}	radio de curvatura de los adherentes deformados plásticamente (Pardo et al., 2005).
S_{pr}	superficie proyectada para determinar el exceso de área superficial.
S_{re}	superficie real para determinar el exceso de área superficial.
t	espesor de la lámina de adhesivo.
u_1, u_2	apertura de los brazos de la probeta (Glessner et al., 1989).
u_i^\pm	desplazamientos respecto un eje de coordenadas cartesiano de las caras superior e inferior de la discontinuidad (Turon et al., 2007).
$[[u_i]]$	diferencia de los desplazamientos a la largo de la discontinuidad (Turon et al., 2007).
U_{ef}	energía elástica final de los brazos de la probeta en un ensayo DCB.
U_{ext}	energía aportada al sistema por las fuerzas externas (ensayo WDT).
U_{def}	energía de deformación de los brazos de la probeta (ensayo WDT).
U_{dis}	energía disipada durante la propagación en un ensayo DCB.
U_{tot}	energía necesaria para propagar la grieta en un ensayo WDT.
\bar{x}_i	desplazamiento respecto la configuración deformada (Turon et al., 2007).
X_i	coordenadas de posición de los puntos de un dominio Ω respecto la configuración de referencia (Turon et al., 2007).
$y(x)$	ecuación de la deformada de uno de los brazos de la probeta.
α	ángulo de contacto entre la cuña y la probeta (Williams, 1998).
α_1	ángulo de incidencia de la pinza de agarre del utillaje SCB y del utillaje para ensayos WDT.
γ	ángulo de inclinación del utillaje respecto la base (Williams, 1998).
γ_{xy}	deformación angular en el plano xy .
γ_{xy}^u	deformación angular última en el plano xy .

Símbolo	Descripción
γ_{xys}	umbral de saturación de la deformación angular del extensómetro biaxial.
δ	desplazamiento horizontal de la cuña.
δ_0, δ_f	desplazamiento inicial y final de la cuña en un ensayo WDT.
δ_{wy}	separación vertical que produce la cuña en uno de los brazos de la probeta.
δ_y	desplazamiento vertical de los brazos de la probeta.
δ_{y0}, δ_{yf}	desplazamiento inicial y final de los brazos de la probeta en un ensayo DCB.
δ_{yM}	componente de δ_y producido por el efecto de la flexión en los brazos de la probeta (Olsson, 2007).
δ_{yV}	componente de δ_y producido por el efecto del cortante (Olsson, 2007).
δ_{yW}	componente de δ_y producido por la fundación elástica (Olsson, 2007).
δ_{ySV}	componente de δ_y producido por las rotaciones en el frente de grieta debidas al efecto de Saint-Venant (Olsson, 2007).
Δ_i	componentes del tensor de saltos de desplazamiento en el sistema de coordenadas local en la configuración deformada (Turón et al., 2007).
Δa	incremento de la longitud de grieta.
ϵ_x	deformación unitaria en la dirección x de las fibras.
ϵ_x^u	deformación unitaria última en la dirección x de las fibras.
ϵ_y	deformación unitaria en la dirección y transversal a las fibras.
ϵ_y^u	deformación unitaria última en la dirección y transversal a las fibras.
$\bar{\theta}$	ángulo de inclinación de los brazos de la probeta en el punto de aplicación de la carga (Wang et al., 2003a).
Θ_{ij}	tensor de rotación (Turón et al., 2007).
μ	coeficiente de fricción.
$\dot{\mu}$	parámetro que define las condiciones de degradación de Kuhn-Tucker (Turón et al., 2007).
μ_{MEF}	coeficiente de fricción introducido en el ensayo virtual.
ν_w	coeficiente de Poisson de la cuña.
ν_{xy}	coeficiente de Poisson en el plano xy (plano del laminado).
ν_{yx}	coeficiente de Poisson en el plano yx (plano del laminado).
ν_{yz}	coeficiente de Poisson en el plano yz (plano transversal).
ν_{zx}	coeficiente de Poisson en el plano zx (plano del laminado).
ν_{zy}	coeficiente de Poisson en el plano zy (plano transversal).
σ_x	tensión normal en la dirección x de las fibras.

Símbolo	Descripción
σ_x^u	tensión normal última en la dirección x de las fibras.
σ_y	tensión normal en la dirección y transversal a las fibras.
σ_y^u	tensión normal última en la dirección y transversal a las fibras.
τ_1^0, τ_2^0	tensiones normales y a cortante máximas de la zona cohesiva (Turon et al., 2007).
τ_i	tracciones en la zona cohesiva en función de los saltos de desplazamiento (Turon et al., 2007).
τ_{xy}	tensión a cortante en el plano xy .
τ_{xy}^u	tensión a cortante última en el plano xy .
ϕ	ángulo de inclinación del tramo inicial de los brazos de la probeta (Wang et al., 2003a).
χ	parámetro corrector de la longitud de grieta en la fundación elástica de Pasternak (Williams, 1998).
λ	norma de los saltos de desplazamiento de los modos I y II: Δ_1 y Δ_2 (Turon et al., 2007).
ψ	energía libre de material por unidad de superficie (Turon et al., 2007).
ψ^0	energía libre de material virgen por unidad de superficie (Turon et al., 2007).

Lista de acrónimos

Acrónimo	Descripción
5%/MAX	Método para determinar la iniciación de la propagación de grieta a partir del incremento del 5% de la curva de flexibilidad o el punto máximo de la curva $P(\delta)$ del ensayo.
A1	Acrónimo que se ha utilizado para designar al adherente AS4/8552.
ACZ	<i>Adherents + Cohesive Zone model</i> , modelo de simulación de la propagación de la grieta desarrollado por Pardoén et al. (2005), en el cual no se tienen en cuenta las propiedades elásticas de la lámina de adhesivo.
AACZ	<i>Adherents + Adhesive + Cohesive zone model</i> , modelo de simulación de la propagación de la grieta desarrollado por Pardoén et al. (2005), en el cual si se tienen en cuenta las propiedades elásticas de la lámina de adhesivo.
CBT	<i>Corrected Beam Theory</i> , Teoría de Vigas Corregida. A este método también se lo denomina MBT (<i>Modified Beam Theory</i> o Teoría de Vigas Modificada).
DCB	<i>Double Cantilever Beam test</i> , ensayo de Doble Viga en Voladizo.
E1	Acrónimo que se ha utilizado para designar al adhesivo EA9596.
ECM	<i>Experimental Compliance Method</i> , Método de la Flexibilidad Experimental.
F1	Acrónimo que se ha utilizado para designar al adhesivo FM300K.
FWT	<i>Forced Wedge Test</i> , Ensayo de avance Forzado de Cuña desarrollado en el trabajo de Adams et al. (2009) para evaluar la durabilidad de las uniones adhesivas.
IWP	<i>Impact Wedge Test</i> , Ensayo Wedge de Impacto (Blackman et al., 2000).
MBT	<i>Modified Beam Theory</i> , Teoría de Vigas Modificada. A este método también se lo denomina CBT (<i>Corrected Beam Theory</i> o Teoría de Vigas Corregida).
MCC	<i>Modified Compliance Calibration</i> , Calibración de la Flexibilidad Modificada.
NL	Método para determinar la iniciación de la propagación de grieta a partir de la pérdida de linealidad de la curva de flexibilidad.

Acrónimo	Descripción
PROP _{5u}	Promedio de valores de los 5 últimos puntos de la curva de propagación de la grieta del ensayo DCB.
PS1	Acrónimo usado, en la nomenclatura de las campañas de ensayo, para designar a la preparación superficial óptima, realizada con tejido pelable preimpregnado.
PS2	Acrónimo usado, en la nomenclatura de las campañas de ensayo, para designar a la preparación superficial inadecuada, realizada con tejido desmoldeante.
SBT	<i>Simple Beam Theory</i> , Teoría de Vigas Simple.
SCB	Utillaje <i>Side Clamped Beam</i> , o utillaje de agarre lateral de la probeta.
T1	Acrónimo que se ha utilizado para designar al adherente T800S/M21.
UA	Acrónimo usado, en la nomenclatura de las campañas de ensayo, para designar al ensayo DCB de uniones adhesivas.
UD	Acrónimo usado, en la nomenclatura de las campañas de ensayo, para designar al los ensayos con probetas con laminados unidireccionales y sin adhesivo.
VIS	Método visual para determinar el punto de iniciación de la propagación de grieta.
VCCT	<i>Virtual Crack Closure Technique</i> , Método de Crecimiento Virtual de Grieta.
WDT	<i>Wedge Driven Test</i> , ensayo de propagación de grieta por avance forzado de cuña. Es el ensayo alternativo al DCB que se ha desarrollado en este trabajo.
WED	Acrónimo usado, en la nomenclatura de las campañas de ensayo, para designar al ensayo de propagación de grieta por avance forzado de cuña.

Índice

Volumen I: Memoria y Anexos

1 Uniones adhesivas en materiales composites	25
1.1 Introducción	25
1.1.1 Ensayos experimentales para caracterizar la unión adhesiva: ensayo de doble viga en voladizo, DCB	27
1.2 Motivación del trabajo	27
1.3 Objetivos	28
1.4 Descripción del trabajo realizado	28
2 Determinación de la calidad de las uniones adhesivas	31
2.1 Introducción	31
2.2 Tipos de fallo en las uniones adhesivas	31
2.3 Ensayos experimentales para caracterizar las uniones adhesivas	32
2.3.1 Ensayos de pelado	33
2.3.2 Ensayos de pelado con adherentes flexibles	33
2.3.3 Ensayos de pelado con un adherente rígido y otro flexible	34
2.3.4 Ensayos con dos adherentes rígidos	35
2.4 Métodos experimentales para caracterizar uniones adhesivas entre laminados de composite	37
2.4.1 Modificaciones del ensayo de doble viga en voladizo	37
2.4.2 Modificaciones del ensayo cuña	38
2.5 Métodos de análisis de los resultados	42
2.5.1 Modelos analíticos	43
2.5.2 Análisis de la deformación de los brazos de la probeta a partir de modelos de fundación elástica	46
2.5.3 Simulaciones numéricas	49
2.6 Dependencias extrínsecas del valor de G_{IC} determinado experimentalmente . . .	50
2.6.1 Restricciones geométricas	51
2.6.2 Tensiones térmicas residuales	52
2.6.3 Efecto del cortante	53
2.6.4 Crecimiento del frente de grieta a saltos (<i>stick-slip</i>)	53
3 Probetas. Fabricación y caracterización	55
3.1 Introducción	55

3.2	Materiales de partida	55
3.3	Tipología de probetas	56
3.3.1	Probetas de tipo 1 para ensayos de tracción longitudinal	57
3.3.2	Probetas de tipo 2 para ensayos de tracción transversal	57
3.3.3	Probetas de tipo 3 para ensayos de cortadura en el plano	57
3.3.4	Probetas de tipo 4 para la propagación de grietas interlaminares en modo I en los adherentes	58
3.3.5	Probetas de tipo 5, uniones adhesivas	58
3.4	Fabricación de las probetas	60
3.4.1	Identificación de los paneles	61
3.4.2	Dimensiones de los paneles	63
3.4.3	Trazabilidad de los paneles. Control y almacenamiento de los materiales iniciales	63
3.4.4	Materiales auxiliares para crear la bolsa de vacío	64
3.4.5	Instalaciones y equipamiento	65
3.4.6	Procesos de fabricación	66
3.5	Ensayos Experimentales	81
3.5.1	Trazabilidad de las probetas	81
3.5.2	Medición del ancho y espesor de las probetas	82
3.5.3	Acondicionamiento de las probetas	83
3.5.4	Equipos	84
3.5.5	Procedimientos para caracterizar las propiedades elásticas de los adherentes y su resistencia	85
3.5.6	Propiedades fuera del plano del laminado	89
3.5.7	Resultados de los ensayos de caracterización de los adherentes	90
3.5.8	Procedimientos para determinar la tenacidad a la fractura para la deslaminación en modo I de los adherentes	91
3.5.9	Datos del ensayo	93
3.5.10	Resultados de los ensayos DCB	93
4	Análisis y propuestas de mejora del ensayo DCB	97
4.1	Introducción	97
4.2	El ensayo DCB para uniones adhesivas	98
4.2.1	Preparación de la probeta y duración del ensayo	98
4.3	Diseño de un utillaje de sujeción mecánica de la probeta	100
4.3.1	Motivación y precedentes	100
4.3.2	Especificaciones	102
4.3.3	Descripción del diseño	103
4.3.4	Dominio de uso del utillaje SCB	105
4.3.5	Dimensionamiento del ensayo con utillajes SCB	108
4.3.6	Campaña de validación del nuevo utillaje	111
4.4	Análisis de resultados del ensayo DCB de uniones adhesivas	114
4.4.1	Propagación de la grieta a saltos o efecto <i>stick-slip</i>	114

4.4.2	Descripción del efecto <i>stick-slip</i>	115
4.4.3	Reducción de datos de un ensayo DCB con propagación de grieta a saltos	119
4.5	Cambios en la metodología experimental de los ensayos DCB de uniones adhesivas con <i>stick-slip</i>	121
4.5.1	Preparación de las probetas	121
4.5.2	Realización del ensayo experimental	122
4.5.3	Tratamiento de los datos experimentales	123
5	Ensayo alternativo de propagación de grieta por avance forzado de cuña (WDT)	125
5.1	Introducción	125
5.2	Descripción del ensayo alternativo	125
5.2.1	Curva teórica de resultados	126
5.2.2	Obtención de G_{IC} a partir de los resultados del ensayo WDT	128
5.3	Descripción analítica del ensayo	130
5.3.1	Fase de introducción y descarga	130
5.3.2	Corrección de la flexibilidad	146
5.3.3	Fase de propagación	148
5.3.4	Cálculo directo de G_{IC}	152
5.4	Métodos de reducción de datos	153
5.4.1	Determinación del coeficiente de fricción (μ)	154
5.4.2	Métodos de cálculo de G_{IC}	155
6	Ensayo alternativo WDT: análisis numérico	159
6.1	Introducción	159
6.2	Descripción del modelo numérico	159
6.2.1	Tipos de elementos	160
6.2.2	Formulación de los elementos cohesivos	160
6.2.3	Materiales	163
6.2.4	Definición de la malla	164
6.2.5	Condiciones de contorno	165
6.2.6	Definición de la secuencia del ensayo virtual	165
6.2.7	Resultados de la simulación	166
6.3	Análisis de las fuerzas de contacto entre cuña y probeta	167
6.3.1	Análisis de los resultados numéricos	168
6.4	Efecto de la longitud cohesiva en la reducción de datos	168
6.4.1	Definición de la zona cohesiva	169
6.5	Influencia de la l_{cz} en el cálculo de μ y G_{IC}	170
6.5.1	Resultados del ajuste de μ	170
6.6	Modificación del ensayo experimental en dos ciclos de avance y retroceso de la cuña	172
7	Ensayo alternativo WDT: procedimiento experimental.	175
7.1	Introducción	175
7.2	Diseño de los utillajes	175

7.2.1	La cuña	176
7.2.2	Mecanismo de apertura de los brazos de la probeta	176
7.2.3	Colocación de la probeta en la máquina de ensayo	178
7.2.4	Proceso de apertura de los brazos de la probeta	178
7.3	Pruebas experimentales iniciales	180
7.3.1	Análisis de las curvas $F_{PUSH}(\delta)$ de las pruebas iniciales	180
7.3.2	Importancia en la determinación del coeficiente de fricción: métodos experimentales para obtener μ	187
7.4	Análisis de la variación de la rugosidad superficial producida por el paso de la cuña	188
7.4.1	Resultados de los ensayos experimentales	188
7.4.2	Análisis fractográfico del efecto del paso de la cuña por la superficie fracturada	189
7.4.3	Discusión de los resultados	193
7.5	Obtención de una superficie fracturada para determinar μ	193
7.6	Metodología experimental	195
7.6.1	Realización del cero de desplazamiento	196
7.6.2	Realización del ensayo experimental	196
8	Resultados experimentales	199
8.1	Introducción	199
8.2	Campañas de ensayo	200
8.3	Resultados experimentales del ensayo DCB	201
8.3.1	Inspección fractográfica de una probeta con <i>stick-slip</i>	207
8.4	Resultados experimentales del ensayo WDT	212
8.5	Comparación de los ensayos DCB y WDT	214
8.6	Análisis de la sensibilidad de la preparación superficial de las probetas	216
8.7	Discusión de los resultados	217
8.8	Valoración final del ensayo WDT	219
9	Conclusiones y futuras líneas de trabajo	221
9.1	Resumen del trabajo realizado	221
9.2	Conclusiones	222
9.3	Futuras líneas de trabajo	223
	Bibliografía	226
A	Planos utillajes	233
B	Equipamiento utilizado	255
B.1	Máquinas de ensayo	256
B.2	Transductores de fuerza	257
B.3	Transductores de desplazamiento	259
B.4	Instrumentos de metrología	260
C	Fabricación de las probetas	261

C.1	Introducción	261
C.2	Listado de paneles fabricados	261
C.3	Tipo de corte	263
C.3.1	Corte 1	264
C.3.2	Corte T1	265
C.3.3	Corte 2	266
C.3.4	Corte T2	267
C.3.5	Corte 3	268
C.3.6	Corte 4	269
D	Inspección fractográfica de la superficie dañada de las probetas	271
D.1	Introducción	271
D.2	Métodos de inspección fractográfica	271
D.3	Análisis fractográfico	272
D.3.1	Imagen de la sección de la probeta sin fracturar	272
D.3.2	Análisis superficial de la probeta fracturada	273
E	Listado de las campañas de ensayo realizadas	281

Capítulo 1

Uniones adhesivas en materiales composites

1.1. Introducción

El uso de materiales composites en componentes que realizan una función estructural ha experimentado un gran crecimiento en la industria aeronáutica desde la aparición en el mercado del modelo Airbus A380. Debido a su envergadura, para minimizar el peso, y por tanto disminuir el consumo de combustible y los costes operacionales, ciertos componentes del fuselaje del avión se han producido con materiales composites de alta resistencia (composites de fibra de carbono y resina epoxy). Algunos de estos componentes se muestran en la figura 1.1.



Figura 1.1: Componentes de composite fabricados con fibra de carbono y resina epoxy (CFRP) del modelo Airbus A380.

El diseño del modelo A380 ha abierto nuevas vías de diseño en el campo aeronáutico, dando paso a la fibra de carbono como material predominante en el fuselaje del avión. El cambio se está produciendo con tanta fuerza, que ha empezado una lucha entre las dos empresas con más presencia en el sector aeronáutico, Airbus y Boeing, para el diseño de nuevos aviones con un

elevado porcentaje de material composite (un 50 % en el Airbus A350 o el Boeing 787), en los cuales gran parte del composite es de fibra de carbono y resina epoxy.

Los componentes de composite que realizan funciones estructurales se fabrican a partir de uniones entre elementos tipo membrana y rigidizadores estructurales. La membrana es un laminado de composite que define la geometría de la pieza. Su espesor es pequeño en comparación con la dimensión total de la pieza, y por si solo presenta pandeo si se somete a cargas de compresión. Para aumentar la rigidez de este elemento y evitar el pandeo se le unen unos elementos rigidizadores denominados *larguerillos*. Los *larguerillos* son vigas laminadas con perfiles en forma de I, T, L, U o W. Las uniones entre la membrana y el rigidizador se curan directamente o se realizan mediante un adhesivo estructural, para obtener una transmisión de los esfuerzos entre los subcomponentes lo más homogénea posible.

Los procedimientos de fabricación más comunes para realizar las uniones adhesivas entre los componentes de composite son el cocurado y el encolado secundario. La diferencia entre los procedimientos depende de la secuencia de operaciones de curado de los materiales. El cocurado consiste en curar en primer lugar uno de los dos subcomponentes y posteriormente curar el otro con la lámina del adhesivo. En el proceso de encolado secundario se realizan dos curados: se curan por separado los subcomponentes de composite (membrana y refuerzo) y posteriormente se realiza un ciclo de curado de la unión adhesiva. Este proceso es el que se utiliza habitualmente para curar piezas de grandes dimensiones, porque resulta más económico curar por separado cada uno de los componentes y realizar la unión posteriormente. Los especímenes que se han analizado en este trabajo se han fabricado con la técnica de encolado secundario. No obstante, los métodos de análisis que se describen son de utilidad para analizar probetas obtenidas con ambos procedimientos de fabricación.

Uno de los aspectos más importantes de la fabricación de una unión adhesiva es la preparación superficial de los componentes a unir (adherentes), puesto que determina en gran medida su calidad. Una mala preparación superficial puede ocasionar que, en condiciones de servicio de la estructura, los adherentes se separen (Hart-Smith, 1999). La presencia de humedad, de suciedad en la superficies de los adherentes o de agentes químicos incompatibles con el adhesivo reducen significativamente la capacidad resistente de la unión. Por consiguiente, deben prepararse previamente las superficies limpiándolas con productos adecuados, y creando la rugosidad superficial necesaria para tener una buena adherencia química y mecánica de la unión.

Para reducir el tiempo de preparación de las superficies se utilizan tejidos pelables preimpregnados en resina. Estos tejidos se colocan sobre las superficies de los adherentes antes de curarlos. El tejido pelable se cura juntamente con el laminado y, una vez acabado el proceso de curado, se retira antes del montaje de la unión adhesiva. De esta manera se obtiene una superficie limpia, sin presencia de residuos o suciedad. Por otra parte, al retirar el tejido pelable también se obtiene una superficie rugosa, de manera que se consigue una buena resistencia mecánica de la unión. Sin embargo, se puede dar el caso que el tejido pelable preimpregnado no sea compatible con el adhesivo o el adherente, y que por tanto cause una disminución de la resistencia de la unión.

1.1.1. Ensayos experimentales para caracterizar la unión adhesiva: ensayo de doble viga en voladizo, DCB

Para analizar la compatibilidad de los pelables preimpregnados y, en general, la calidad de la unión, se llevan a cabo ensayos experimentales. Los ensayos que se utilizan de forma habitual para validar la calidad de la unión adhesiva son ensayos de pelado. Consisten en separar los dos adherentes de la unión en dirección perpendicular al plano del adhesivo, y determinar su resistencia a la fractura en modo I. El ensayo de pelado que más se utiliza entre elementos de material composite es el de doble viga en voladizo (*double cantilever beam test*, DCB). Este ensayo de pelado permite analizar una unión adhesiva formada por dos adherentes rígidos.

Las probetas de uniones adhesivas para el ensayo DCB están formadas por dos laminados de composite unidos por un adhesivo. En uno de los extremos de la probeta se introduce una lámina de teflón para generar una pregrieta inicial. Durante el ensayo experimental se separan los brazos de la probeta para propagar una grieta en el plano medio del adhesivo, ver figura 1.2.

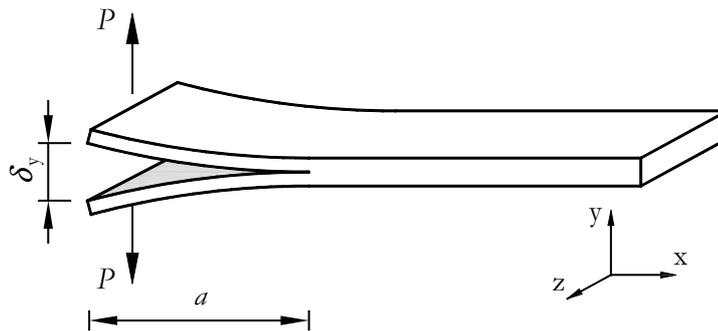


Figura 1.2: Esquema del ensayo DCB.

Durante el ensayo se miden los valores de fuerza (P), desplazamiento (δ_y) y longitud de grieta (a) en cada incremento de tiempo. A partir de estos datos, se puede calcular la tenacidad a la fractura en modo I, G_{IC} de la unión. Ésta es la energía necesaria para generar una unidad de superficie de grieta y es una buena indicación de la calidad de la unión. Cuanto más alto es el valor de G_{IC} mejor es la calidad de la unión adhesiva.

1.2. Motivación del trabajo

La aplicación del ensayo DCB en un entorno industrial presenta ciertos inconvenientes, tanto a nivel del proceso de fabricación de las probetas como en la determinación de los resultados. El tiempo de preparación de la probeta es muy largo en comparación al tiempo de ensayo. A la probeta se le deben unir unos utillajes de introducción de carga para acoplarla a la máquina de ensayo, esta unión se realiza mediante el uso de un adhesivo. Por consiguiente, antes de realizar el ensayo experimental se deben realizar las operaciones de pegado del utillaje, cuyo tiempo de

preparación puede durar de 2 a 24 h, en función de lo que tarde en curar el adhesivo. Por otra parte, el ensayo presenta efectos dinámicos en la propagación de la grieta que pueden alterar la coherencia de los resultados. En función de la configuración del ensayo experimental y de la probeta la propagación de la grieta puede ser continua o puede producirse a saltos, efecto conocido como *stick-slip*. Hasta la fecha, los autores que han detectado este fenómeno (Blackman and Kinloch, 2001, Ashcroft et al., 2001) no contemplan ningún tipo de modificación para adaptar la metodología de tratamiento de datos experimentales a este tipo de efecto.

Por consiguiente, existe una posibilidad de mejorar el ensayo DCB tanto a nivel de preparación de las probetas como en relación a la determinación de los resultados experimentales.

Así mismo, a propuesta de la empresa Airbus, se consideró conveniente explorar la posibilidad de definir un ensayo alternativo al ensayo DCB, que sea más rápido que el actual en cuanto al tiempo de preparación de las probetas y al tratamiento de los resultados experimentales. El nuevo método experimental debe ser sensible a la calidad de la unión del mismo modo que el actual DCB.

1.3. Objetivos

Este trabajo tiene como objetivo introducir mejoras en los métodos experimentales para evaluar la calidad de las uniones adhesivas. Por un lado se propone mejorar el ensayo de doble viga en voladizo (DCB) para la determinación de la tenacidad a la fractura, y por otro lado desarrollar un ensayo alternativo mejor, en tiempo de ejecución y en la sencillez del tratamiento de los datos, que el que se utiliza actualmente.

Para el ensayo de doble viga en voladizo esta tesis propone las siguientes mejoras:

- Diseñar unos nuevos utillajes de sujeción de la probeta: desarrollar un sistema de sujeción mecánica de la probeta para reducir el tiempo de preparación.
- Mejorar los métodos de tratamiento de los datos experimentales: adaptar los métodos de tratamiento de los datos teniendo en cuenta los efectos dinámicos del *stick-slip*.

Por otra parte, se propone un método alternativo de ensayo al DCB, para determinar la tenacidad a la fractura de las uniones adhesivas con un tiempo de ejecución menor. Como resultado del ensayo se debe determinar un parámetro equivalente a la tenacidad a la fractura en modo I que cuantifique la calidad de la unión.

1.4. Descripción del trabajo realizado

El trabajo que se ha realizado para cumplir los objetivos, y que se detalla en los siguientes capítulos, se resume a continuación.

En primer lugar, en el capítulo 2 se presenta una revisión del estado de las técnicas experimentales para la determinación de la calidad de las uniones adhesivas estructurales entre materiales compuestos. En esta revisión se describen los distintos tipos de ensayos experimentales que se llevan a cabo, los métodos de simulación de las uniones adhesivas y de tratamiento de los resultados experimentales, y los factores que afectan en los resultados de la unión.

A continuación, en el capítulo 3 se describen los procesos de fabricación de las probetas que se han ensayado experimentalmente en este trabajo. Se han preparado distintas configuraciones de probetas para tener un amplio rango de preparaciones superficiales. En el mismo capítulo, se incluyen los resultados de los ensayos experimentales de caracterización de las propiedades de los constituyentes. Estos resultados se han utilizado en los capítulos posteriores para alimentar las simulaciones por elementos finitos y los métodos analíticos de tratamiento de los datos experimentales.

Seguidamente, en el capítulo 4 se presentan las modificaciones que se proponen para el ensayo de doble viga en voladizo de uniones adhesivas entre adherentes de composite. Estas modificaciones consisten en el diseño de un nuevo utillaje de sujeción de la probeta, y en la modificación de la metodología de tratamiento de los datos experimentales, para determinar la G_{IC} del adhesivo en presencia de propagación a saltos del frente de grieta.

En cuarto lugar, en los capítulos 5, 6 y 7 se presenta un método para determinar la calidad de las uniones adhesivas, basado en la propagación de grieta por la introducción de una cuña a velocidad constante en el plano del adhesivo. En el capítulo 5 se describe la formulación analítica del ensayo, la cual se divide en dos pasos: la determinación del coeficiente de fricción y el cálculo de la tenacidad a la fractura en modo I de la unión. En el capítulo 6 se compara la formulación analítica con una simulación numérica del ensayo experimental. Y en el capítulo 7 se establece la metodología experimental de ensayo.

Finalmente, en el capítulo 8 se comparan los resultados obtenidos mediante el uso de los dos ensayos experimentales: doble viga en voladizo y el ensayo de propagación de grieta por avance forzado de cuña. Y en el capítulo 9, se presentan las conclusiones del trabajo y las actividades futuras que el autor desea llevar a cabo como continuación a este trabajo.

Capítulo 2

Determinación de la calidad de las uniones adhesivas

2.1. Introducción

Tal y como se ha indicado en el capítulo anterior, los objetivos de este trabajo son la mejora del ensayo experimental de doble viga en voladizo que actualmente utiliza la industria aeronáutica para evaluar la calidad de las uniones adhesivas, y el desarrollo de un método de ensayo alternativo para evaluar esta calidad de un modo más eficiente para un entorno industrial. Antes de llevar a cabo estas tareas se ha realizado una revisión del estado y las necesidades de las técnicas relacionadas.

En primer lugar, para situar al lector, se realiza una breve introducción de los tipos de fallo que pueden producirse en una unión adhesiva, y los modos de propagación de grieta. A continuación, se presentan los distintos métodos de ensayo experimental para caracterizar la calidad de las uniones adhesivas entre composites, entre los cuales destacan los ensayos de pelado, y en especial los ensayos de doble viga en voladizo (o *double cantilever beam test*, DCB) y de introducción de cuña (*wedge*). En tercer lugar se describen las estrategias que se utilizan para simular el comportamiento de la unión. y finalmente, se indican los factores que influyen en los resultados del ensayo experimental, en relación a las propiedades de los constituyentes y a la respuestas del ensayo experimental.

2.2. Tipos de fallo en las uniones adhesivas

En el capítulo 1, se han presentado dos tipos de unión adhesiva entre laminados de composite, que se utilizan de forma común en los procesos de fabricación de la industria aeronáutica: las uniones cocuradas y los encolados secundarios. Ambos tipos de unión están formados por dos adherentes unidos por una lámina de adhesivo. Al realizar un ensayo experimental, o durante la puesta en servicio en un componente estructural, pueden presentarse tres tipos de fallo de la unión adhesiva: puede producirse un fallo en el adhesivo (fallo cohesivo), puede fallar la interfase

entre el adhesivo y adherente (fallo adhesivo), o puede que la grieta progrese hacia el adherente, y que por tanto se produzca una deslaminación (fallo interlaminar). Los distintos tipos de fallo pueden ocurrir de forma individual o por la combinación de dos fallos, e incluso pueden producirse los tres tipos de fallo al mismo tiempo.

Por otra parte, existen tres modos de propagación de una grieta en función de las cargas que intervienen (Anderson, 1995):

- Modo I: en este modo los desplazamientos de las caras adyacentes a la grieta toman una dirección perpendicular al plano del adhesivo. Los ensayos de pelado que se presentan en las siguientes secciones reproducen este modo de fallo.
- Modo II: se genera un cortante en el plano del adhesivo que sigue la dirección de la propagación.
- Modo III: se genera un cortante en el plano del adhesivo que sigue una dirección perpendicular a la de la propagación.

En la figura 2.1 se representan los tres modos de propagación de grieta. Del mismo modo que ocurre con los tipos de fallo, puede presentarse un solo modo de propagación o la combinación de 2 o de incluso de los 3 modos. En uniones adhesivas con adherentes de composite, es frecuente que se produzca una combinación de los modos I y II, denominada propagación en modo mixto I-II.

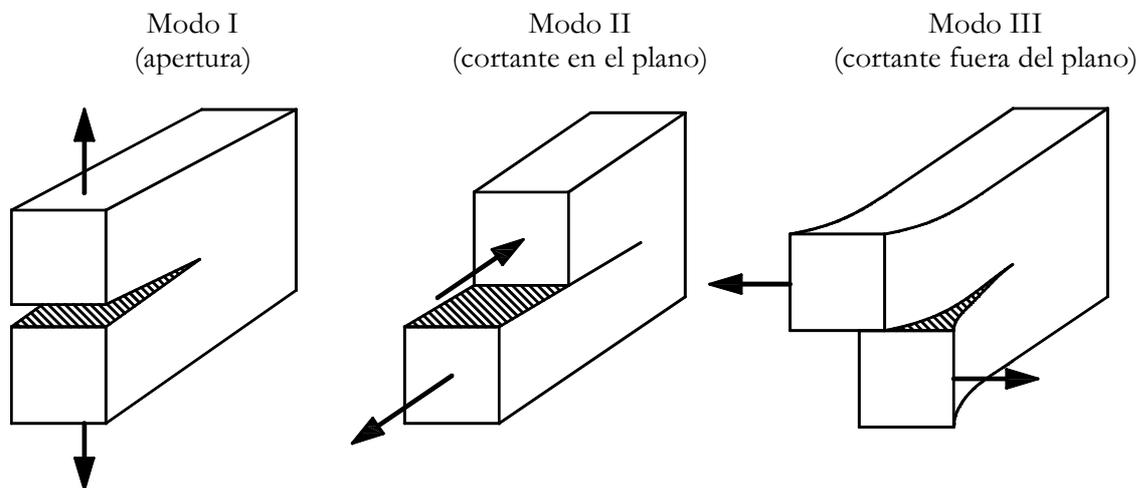


Figura 2.1: Modos de propagación de la grieta en función de las cargas (Anderson, 1995).

2.3. Ensayos experimentales para caracterizar las uniones adhesivas

Las uniones adhesivas entre elementos estructurales trabajan en gran parte a cortante. Por ejemplo entre un elemento del fuselaje y un refuerzo longitudinal (emphlarguerillo) las cargas

se transmiten a través del adhesivo por cortante. Por consiguiente, para determinar la carga máxima que es capaz de resistir el adhesivo se realizan ensayos a cortante. Existen algunos ensayos normalizados como el de solapamiento simple (*single lap joint*) normalizado según ASTM D1002-05, el de solapamiento doble (*double lap shear test*) normalizado según ASTM D3528-96(2008), o el de solapamiento simple con ensamblajes (*single lap joint laminated assemblies test*) normalizado según ASTM D3165-07. En estos ensayos experimentales la unión adhesiva se forma por un solapamiento de los adherentes, y el ensayo se realiza estirando los adherentes creando una tensión a cortante en la unión adhesiva (Petrie, 2000). Sin embargo, en las terminaciones de la unión los efectos del pelado son muy importantes.

Por otra parte, si se desea evaluar la calidad de una unión adhesivas se debe utilizar un ensayo de pelado, porque es más sensible a la preparación superficial y a la calidad de la unión en general que el de cortante. A continuación se describen los ensayos experimentales de pelado que se utilizan para evaluar la calidad de las uniones adhesivas entre distintos tipos de adherentes: flexibles, rígidos o la combinación de los dos.

2.3.1. Ensayos de pelado

Tal y como se ha comentado en el capítulo 1, los ensayos de pelado son ensayos de propagación de la grieta en modo I. A partir de los resultados experimentales se obtiene un valor de la resistencia a pelado de la unión. Los parámetros experimentales que se controlan en el ensayo son: la carga de pelado, el desplazamiento realizado y el ángulo y la velocidad de pelado.

Se han agrupado los diferentes tipos de ensayos de pelado en tres categorías: los ensayos de pelado con adherentes flexibles, con un adherente flexible y otro rígido, y finalmente ensayos de pelado con los dos adherentes rígidos. A continuación se presentan los ensayos que pertenecen a cada una de las tres categorías y que están normalizados. Antes de presentar los ensayos, debe mencionarse que la mayor parte las normas que existen se han diseñado para uniones adhesivas entre adherentes metálicos.

2.3.2. Ensayos de pelado con adherentes flexibles

Estos ensayos están ideados para caracterizar uniones formadas por dos adherentes flexibles unidos por una lámina de adhesivo. Un ensayo normalizado es el de pelado en T (ASTM D1876-08), ver el esquema en la figura 2.2. El ensayo consiste en aplicar una carga de tensión para separar dos flejes metálicos unidos por un adhesivo una distancia de $3/4$ de la longitud total de la probeta. La carga se aplica sobre el extremo de la probeta que no está unido, doblando los flejes un ángulo de 90° respecto al plano del adhesivo. Es un ensayo particularmente útil para separar uniones con adhesivos de alta resistencia (Shields, 1985). Sin embargo, el ensayo presenta problemas de repetitividad porque no se controla el ángulo de pelado que depende de las propiedades de los adherentes y de la lámina de adhesivo (Petrie, 2000).

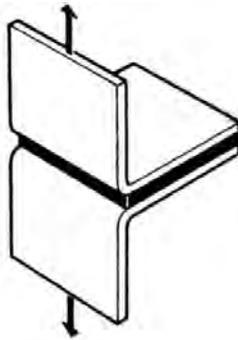


Figura 2.2: Esquema del ensayo experimental de pelado en T, Shields (1985).

2.3.3. Ensayos de pelado con un adherente rígido y otro flexible

En este tipo de ensayos experimentales se separa un elemento flexible de una superficie rígida. El elemento flexible es un fleje metálico de aluminio o de acero. Y el elemento rígido puede ser un pasamano metálico o un panel de abeja de un laminado tipo sándwich. Para este tipo de probetas existen 3 ensayos normalizados: ensayo de pelado a 180° , el de pelado con rodillos flotantes y de pelado con tabor flotante. Estos ensayos permiten obtener menos dispersión en los resultados que el ensayo de pelado en T porque resulta más fácil controlar el ángulo girado por los adherentes. A continuación se describen las principales características de cada uno de ellos.

El ensayo de pelado a 180° es una versión del de pelado en T. Está normalizado según ASTM D903-98(2004). El adherente flexible se estira un ángulo de 180° respecto al rígido. El ensayo puede utilizarse si uno de los dos adherentes es suficientemente flexible, como para permitir un giro de 180° cerca del punto de aplicación de la carga, ver figura 2.3.

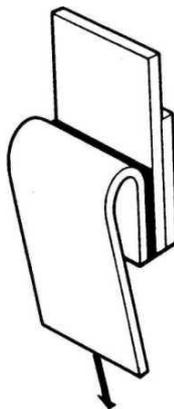


Figura 2.3: Esquema del ensayo de pelado a 180° , Shields (1985).

La segunda alternativa que se presenta es el ensayo de pelado con rodillos flotantes, ver figura 2.4(a). Está normalizado según ASTM D3167-03a(2004). El adherente flexible se estira a través de un sistema que realiza la función de carrete, formado por dos rodillos, para mantener un ángulo de pelado constante. Este ensayo se utiliza para analizar la durabilidad de los adhesivos estructurales entre elementos metálicos, pero puede aplicarse en ensayos experimentales con ma-

teriales composites. Para ello se utiliza un fleje de aluminio adherido a un laminado de carbono unidireccional con las láminas orientadas a 0° . El resultado del ensayo es válido si el adhesivo se separa antes del laminado de composite, en vez de hacerlo respecto al fleje. Para conseguirlo es necesario anodizar las láminas de aluminio antes de realizar la unión (Hart-Smith, 1999). Bardis and Kedward (2002) intentaron utilizar este ensayo en una unión adhesiva entre 2 laminados de composite. Se cambió el fleje metálico por un laminado de composite con una sola capa. Los resultados del ensayo no fueron satisfactorios porque el radio de curvatura del tambor era demasiado pequeño y la lámina de composite siempre se rompía antes de iniciarse la propagación.

El último ensayo normalizado con un adherente flexible y otro rígido que se presenta es el de pelado con tambor flotante (ASTM D1781-98(2004)). El ensayo consiste en separar el adherente flexible del rígido enrollándolo en un tambor, fijando el adherente rígido a la máquina de ensayo por el extremo superior. El adherente flexible se une a un tambor, en el cual a su vez hay enrollados dos flejes. Al estirar los flejes del tambor se realiza el pelado de la unión (ver figura 2.4(b)). El tambor permite controlar el ángulo de pelado reduciendo la dispersión de los resultados del ensayo. El ensayo fue desarrollado para obtener la resistencia de pelado entre las tapas y el panel de abeja de laminados sándwich para la industria aeronáutica (Petrie, 2000, Shields, 1985).

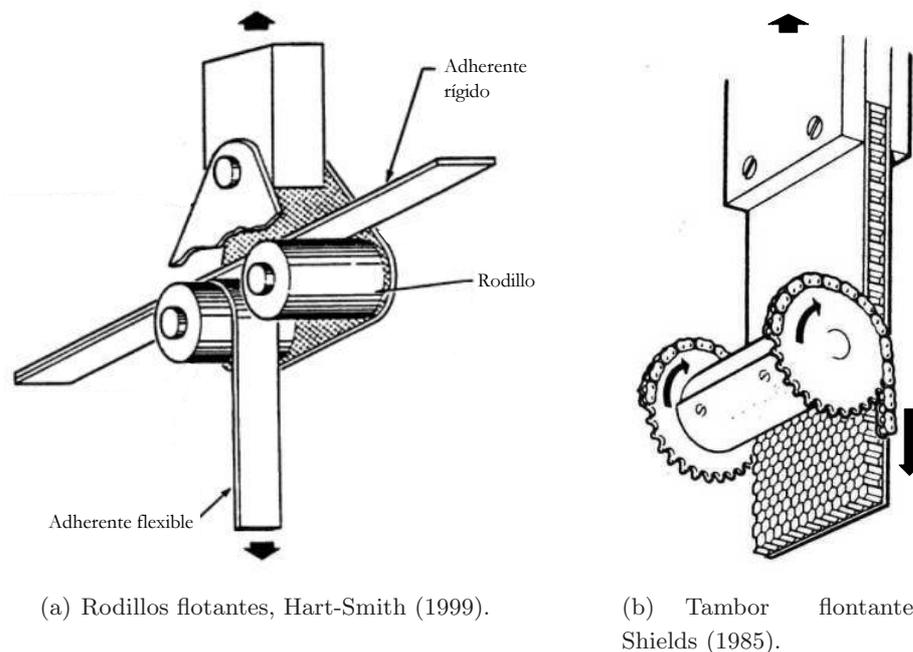


Figura 2.4: Esquema de los ensayos de pelado con rodillos flotantes y con tambor flotante.

2.3.4. Ensayos con dos adherentes rígidos

Este tipo de ensayos son los que teóricamente permiten analizar uniones adhesivas entre laminados rígidos de composite. Existen dos tipos de ensayos de pelado con adherentes rígidos: el de doble viga en voladizo con entalla final y el de cuña.

El ensayo de doble viga en voladizo con entalla final se utiliza para medir la tenacidad a la fractura en modo I, G_{IC} , de las uniones adhesivas entre adherentes metálicos mecanizados planos o de espesor variable, ver figura 2.5. El ensayo experimental esta normalizado según ASTM D3433-99(2005) y se basa en los trabajos previos de Ripling et al. (1964) y Mostovoy et al. (1971). Recientemente se ha publicado un nuevo estándar que contempla tanto los ensayos experimentales de uniones adhesivas con adherentes metálicos (y con entalla final) y la uniones adhesivas entre laminados de material compuesto (ISO 25217).

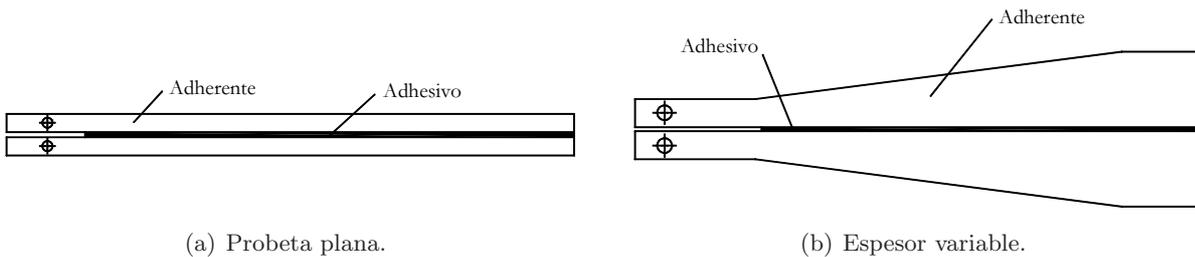


Figura 2.5: Esquema del perfil de las probetas para ensayos de doble viga en voladizo con entalla (ASTM D3433-99(2005)).

Este ensayo experimental consiste en separar los brazos de la probeta para propagar una grieta por el plano del adhesivo. Del ensayo experimental se obtienen los datos del desplazamiento de los brazos de la probeta, la fuerza necesaria para realizar su apertura y la posición del frente de grieta. A partir de estos datos se determina el valor de la tenacidad a la fractura en modo I de la unión. La norma de ensayos ASTM D3433-99(2005) distingue entre 2 tipos de propagación del frente de grieta: continua y discontinua. Si la propagación es continua se obtiene un valor de la tenacidad a la fracture en modo I, G_{IC} . Por otra parte, si la propagación se produce a saltos (efecto conocido como *stick-slip*, ver la descripción detallada del fenómeno en la sección 4.4.2 del capítulo 4) se obtienen dos valores de G : uno de crecimiento/iniciación de la grieta (G_{in}) y otro de detención (o *arrest*) del crecimiento de grieta (G_a).

Otro tipo de ensayo es el de introducción de cuña o ensayo de cuña (*wedge test*), ver figura 2.6. Para uniones adhesivas entre adherentes de aluminio el ensayo está normalizado según ASTM D3762-03. El ensayo experimental consiste en introducir una cuña en el plano del adhesivo de la probeta para crear una tensión en la zona del frente de grieta. El conjunto de cuña y probeta se almacenan en un ambiente de elevada temperatura y humedad, y se realizan mediciones del crecimiento de grieta en función del tiempo. Este tipo de ensayo ha demostrado ser muy fiable en predecir la durabilidad de las preparaciones superficiales (Hart-Smith, 1999, Bardis and Kedward, 2001, Armstrong, 1996).

El ensayo de cuña da indicaciones cualitativas de la bondad de la preparación superficial. Permite diferenciar con exactitud las variaciones de la preparación superficial de los adherentes y la durabilidad de la unión en función de los parámetros ambientales. Sin embargo, se han publicado algunos trabajos que proporcionan una metodología para obtener de forma cuantitativa los valores de tenacidad a la fractura de la unión (Cognard, 1986, 1987).

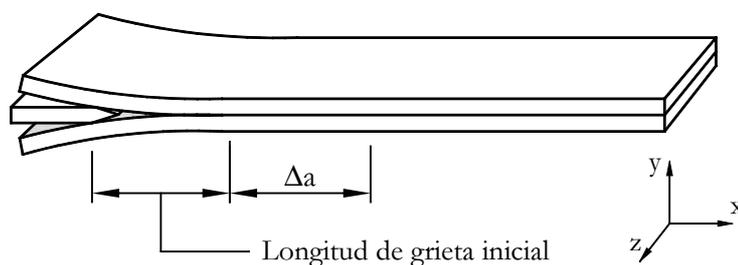


Figura 2.6: Esquema del ensayo cuña según la norma ASTM D3762-03.

2.4. Métodos experimentales para caracterizar uniones adhesivas entre laminados de composite

Los procedimientos normalizados de ensayo que se han presentado en la sección anterior son para uniones adhesivas con adherente metálicos. Sin embargo, las uniones adhesivas que se analizan en este trabajo son con adherentes de composite.

Los ensayos experimentales adecuados para este propósito son los que permiten el análisis de uniones adhesivas entre dos adherentes rígidos, como el de doble viga en voladizo (DCB) o el de cuña. En esta sección se describen los avances que se han llevado a cabo en el análisis de uniones adhesivas entre laminados de composite a partir de ensayos de doble viga en voladizo o de cuña.

2.4.1. Modificaciones del ensayo de doble viga en voladizo

A partir de la norma de ensayo con adherentes metálicos (ASTM D3433-99(2005)) se desarrolló un protocolo de ensayo para evaluar la tenacidad a la fractura en modo I de las uniones adhesivas (Blackman and Kinloch, 2001). En paralelo se realizó una campaña experimental para validar los métodos de tratamiento de datos propuestos por el mismo protocolo y los resultados de los ensayos según la norma ASTM D3433-99(2005). Los resultados de la campaña de ensayos se recogen en el trabajo de Blackman et al. (2003).

Posteriormente, se ha desarrollado un estándar británico (BS 7991) basado en el protocolo de ensayos (Blackman and Kinloch, 2001). Y recientemente a finales de 2009, se ha publicado una norma ISO (ISO 25217) a partir del estándar británico.

La metodología propuesta en estos trabajos permite tanto el uso de probetas metálicas como de laminados de composite unidireccionales. El diseño de las probetas metálicas es el mismo que el que se define en el estándar ASTM D3433-99(2005). Y para las probetas de composite se considera una unión adhesiva con dos adherentes de composite a la cual se le han unido dos bloques en la zona de la pregrieta inicial para fijarla a la máquina de ensayo (ver figura 2.7).

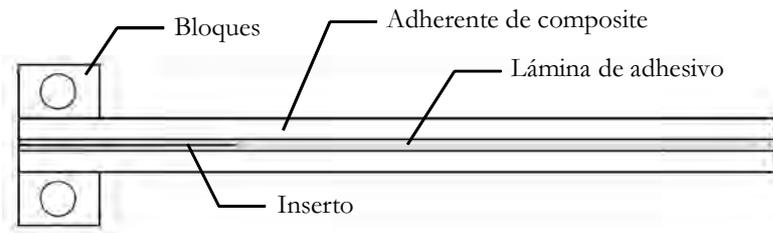


Figura 2.7: Esquema de la unión adhesiva con adherentes de composite (Blackman et al., 2003).

2.4.2. Modificaciones del ensayo cuña

El ensayo cuña de la norma ASTM D3762-03 es un método simple para analizar la durabilidad de las uniones adhesivas (Sener et al., 2002). Sin embargo, cuando se pretende utilizar para determinar la tenacidad a la fractura presenta algunos inconvenientes, como la determinación con exactitud de la posición del frente de grieta o el tiempo que se tarda en realizar el ensayo experimental. Por otra parte, el estándar está pensado para utilizarlo en uniones adhesivas con adherentes metálicos.

Para reducir el tiempo de ensayo y tener un mayor control de la propagación de la grieta, han surgido algunos trabajos que definen un nuevo tipo de ensayo: un ensayo de propagación de la grieta por avance forzado de cuña (Adams et al., 2009, Glessner et al., 1989, Sener et al., 2002, Pardoen et al., 2005). La mayor parte de estos ensayos se han realizado con uniones adhesivas entre adherentes metálicos excepto el trabajo de Glessner et al. (1989) en el cuál se utilizaron probetas de composite.

Estos y otros trabajos han intentado conseguir un ensayo de cuña para determinar el valor de la tenacidad a la fractura de la unión adhesiva (G_{IC}), ya que el ensayo de propagación de la grieta por avance forzado de cuña puede llegar a ser rápido y automatizable, y por tanto muy ventajoso respecto el ensayo DCB.

2.4.2.1. El ensayo de propagación de grieta por avance forzado de cuña

El ensayo de propagación de grieta por avance forzado de cuña es una modificación del método experimental que se describe en el estándar ASTM D3762-03, y consiste en hacer avanzar una cuña a velocidad constante por el plano del adhesivo (Adams et al., 2009), ver figura 2.8.

La cuña se desplaza hacia el frente de grieta hasta que empieza a propagarse. Durante la propagación de la grieta, la distancia entre la cuña y la probeta se mantiene constante (Glessner et al., 1989). Sin embargo, cuando la cuña se desplaza por la superficie fracturada del adhesivo, esta pasa por superficies de diferente rugosidad que pueden dar lugar a inestabilidades en los resultados por culpa del coeficiente de fricción (Adams et al., 2009). Para evitar tener que determinar el coeficiente de fricción se desarrollaron una serie de métodos experimentales: el diseño de un utillaje sin fricción (Glessner et al., 1989), la medición de la apertura de los brazos de la probeta (Sener et al., 2002), o la obtención de longitud de grieta a partir de la deformación

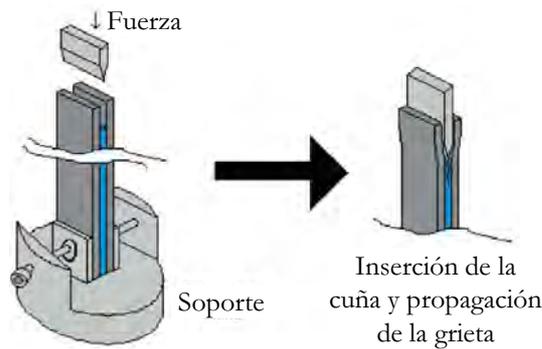


Figura 2.8: Esquema del ensayo de propagación de grieta por avance forzado de cuña (Adams et al., 2009).

permanente de los adherentes, en el caso de adherentes metálicos (Pardoen et al., 2005).

Históricamente, la primera alternativa es la propuesta por Glessner et al. (1989) en colaboración con la empresa General Electric, y consiste en reducir al máximo el coeficiente de fricción entre la superficie de la cuña y la superficie fracturada del adhesivo. Glessner et al. (1989) diseñaron un utillaje de cuña con dos filas de rodamientos en la punta, ver figura 2.9.

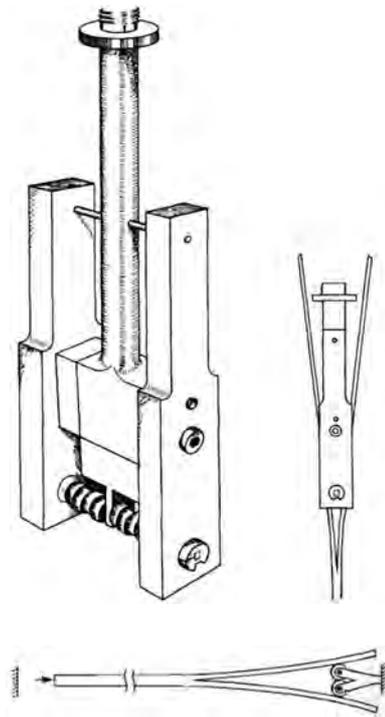


Figura 2.9: Esquema de la cuña con rodamientos (Glessner et al., 1989).

La punta de la cuña tiene dos filas de rodamientos con los ejes de rotación paralelos y separados una cierta distancia. A medida que avanza la cuña, una de las filas gira en sentido horario y la otra en sentido anti horario, de manera que en los puntos de contacto de la cuña con la probeta prácticamente no hay fricción. En el trabajo de Glessner et al. (1989) se define una expresión simplificada de la energía disponible para la fractura en modo I a partir del trabajo realizado para propagar la grieta:

$$G_I = \frac{F_{PUSH}}{B} \quad (2.1)$$

Siendo F_{PUSH} la fuerza de empuje de la cuña y B el ancho de la probeta.

Otra propuesta es la desarrollada por Sener et al. (2002), según la cual se propone un método para medir de forma automática la longitud del frente de grieta. El método consiste en acoplar dos sensores de desplazamiento para medir la separación de los brazos de la probeta, ver figura 2.10. Este método se utiliza tanto para el ensayo con avance forzado de cuña como para el ensayo estático definido en el estándar ASTM D3762-03.

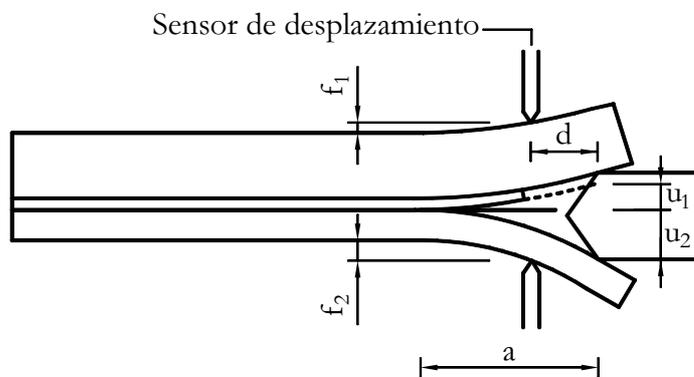


Figura 2.10: Esquema del montaje experimental de Sener et al. (2002).

A partir del desplazamiento de los sensores (f_1 y f_2), de la posición relativa entre los sensores y la cuña (d) y de la apertura de los brazos de la probeta (u_1 y u_2), se determina la longitud del frente de grieta (a).

El tercer método que se presenta está ideado para probetas metálicas y es un ensayo de avance forzado de cuña creando plasticidad en los brazos de la probeta, denominado por sus autores como *plastic wedge test* (Thouless et al., 1998, Kafkalidis et al., 2000, Ferracin et al., 2003, Pardoën et al., 2005). El ensayo consiste en separar los brazos de la probeta para que se deformen plásticamente y, a partir de las deformaciones permanentes, determinar la longitud de la grieta, ver figura 2.11. Para realizar este ensayo experimental se debe disponer de adherentes capaces de deformarse plásticamente, y diseñar los brazos de la probeta para que se produzcan deformaciones permanentes. La longitud de grieta se determina en la zona de propagación, en la cual, la distancia entre la cuña y el frente de grieta (a) se mantiene constante. Si a es constante también lo es el radio de curvatura de los adherentes deformados (R_{f1} y R_{f2}).

Recientemente Adams et al. (2009) han publicado un trabajo en el cual se comparan el ensayo DCB, el de introducción de cuña según la norma ASTM D3762-03 y el de avance forzado de cuña (*forced wedge test*, FWT) para evaluar la durabilidad de las uniones adhesivas. A pesar de que el ensayo FWT parece más fácil de controlar que el de introducción de cuña (ASTM D3762-03), los autores descartan encarecidamente su uso debido a la dependencia con el coeficiente de fricción,

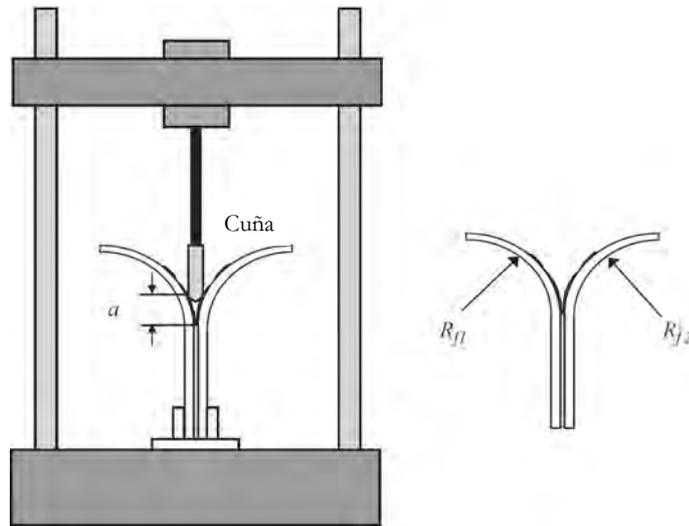


Figura 2.11: Esquema del ensayo de avance forzado de cuña con plasticidad en los brazos de la probeta, Pardoen et al. (2005).

y porque en los ensayos realizados no encuentran una relación entre el avance de la grieta y el movimiento de la cuña, de manera que no se consigue determinar una expresión de la G_{IC} de la unión en función de la fuerza de empuje y del desplazamiento de la cuña.

Finalmente en el trabajo de Estefani et al. (2007) se presenta un estudio preliminar de un ensayo de pelado de uniones adhesivas basado en la introducción de un cilindro macizo entre las láminas de la probeta. En un extremo de la probeta se conecta a una de las mordazas de la máquina y el utillaje se conecta a la otra mordaza. El diseño presenta algunos inconvenientes como la asimetría de la carga aplicada en el plano medio del adhesivo. Por otra parte en el trabajo no se ha descrito ningún sistema de introducción de forma automática del cilindro en la probeta, de manera que debe realizarse manualmente, con el consecuente aumento de tiempo del ensayo experimental.

2.4.2.2. Métodos de reducción de datos teniendo en cuenta el efecto de la fricción

Aunque no se aplicó directamente a un ensayo de introducción forzada de cuña, Williams (1998) desarrolló una formulación analítica teniendo en cuenta el efecto del coeficiente de fricción. En su trabajo se simula un ensayo de separación de una lámina fina respecto de una base infinitamente rígida, mediante el avance forzado de una cuña, ver figura 2.12.

A partir de la suma vectorial de las fuerzas se establece una relación entre las fuerzas de contacto en la cuña y la fuerza de empuje aplicada en la propia cuña:

$$\frac{F_{PUSH}}{P} = \tan \alpha \cdot Z \quad (2.2)$$

Siendo F_{PUSH} la fuerza de empuje de la cuña, P la fuerza de contacto de la cuña con la base

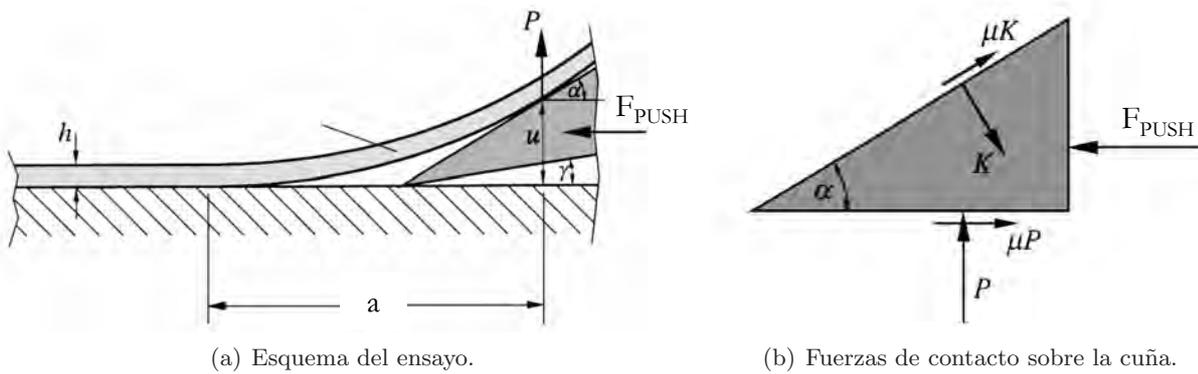


Figura 2.12: Esquema del ensayo de avance forzado de cuña para separar la lámina fina (Williams, 1998).

y α el ángulo de contacto entre la cuña y la lámina fina. Z es una variable que depende de α y del coeficiente de fricción μ :

$$Z = \frac{1 + (\mu / \tan \alpha)}{1 - \mu \tan \alpha} \quad (2.3)$$

A partir del balance energético entre la energía aportada al sistema por el trabajo de las fuerzas externas y la energía disipada por efectos de fricción, se puede calcular la energía disponible para la fractura con la siguiente expresión:

$$G = \left(\frac{F_{PUSH}}{B} \right) \tan \left(\frac{1 - \mu \tan \alpha}{\tan \alpha + \mu} \right) = \left(\frac{P}{B} \right) \tan \alpha \quad (2.4)$$

2.5. Métodos de análisis de los resultados

En este apartado se presenta una revisión de los métodos de análisis de resultados y de simulación que se utilizan para reproducir el comportamiento de las uniones adhesivas. La revisión se ha centrado en la simulación del comportamiento de los ensayos DCB y los de propagación de grieta por avance forzado de cuña. El comportamiento de este tipo de ensayos puede representarse de dos maneras distintas, a partir de modelos analíticos o a partir de simulaciones numéricas por el método de los elementos finitos.

Los modelos analíticos proporcionan una respuesta global del ensayo. Son los precursores de los modelos numéricos para simular las uniones adhesivas, como por ejemplo los modelos de zona cohesiva de Pardo et al. (2005) o de Tvergaard and Hutchinson (1996). También se utilizan como métodos de reducción de datos de los ensayos experimentales, ofrecen una solución analítica para cuantificar la tenacidad a la fractura en modo I de la unión (Penado, 1993, Olsson, 1992, Williams, 1989, Wang et al., 2003a).

Por otra parte, para reproducir la fractura de la unión adhesiva también se realizan simulaciones numéricas basadas en el método de los elementos finitos. Su principal ventaja respecto los

modelos analíticos es que se pueden analizar los efectos locales de tensiones y deformaciones en la zona del frente de grieta, y pueden contemplar los procesos no estacionarios de la fractura (Wang et al., 2003a). Una de las estrategias de simulación numérica se basa en el uso de elementos cohesivos para representar la respuesta del adhesivo y simular la propagación de la grieta (Pardoen et al., 2005). Otro método es a partir del crecimiento virtual de grieta (*virtual crack closure technique*, VCCT).

2.5.1. Modelos analíticos

Tal y como se ha comentado anteriormente, los modelos analíticos ofrecen una respuesta global del ensayo experimental. Se utilizan para reproducir el comportamiento de la unión, y también como método de tratamiento de datos experimentales. A partir de los datos del ensayo (fuerza, desplazamiento, longitud de grieta) y de las dimensiones de la probeta se puede obtener un parámetro cuantitativo para estimar la calidad de la unión adhesiva. A este procedimiento se lo llama reducción de datos y consiste en pasar de una serie de datos experimentales a un único parámetro con significado físico que se considera que gobierna el proceso de fractura de la unión. La mayoría de métodos analíticos utilizan como parámetro de comparación la tenacidad a la fractura (Blackman et al., 2003, Williams, 1989). En algunos casos se hace uso del factor de intensidad de tensiones (Penado, 1993).

Básicamente el comportamiento de la unión adhesiva puede representarse analíticamente de tres maneras distintas: a partir de la teoría de vigas (Blackman et al., 2003), considerando la viga sobre una fundación elástica (Williams, 1989), o a partir de un modelo sándwich (Wang et al., 2003a).

2.5.1.1. Modelos analíticos basados en la teoría de vigas

Los métodos analíticos basados en la teoría de vigas consideran los brazos libres de la probeta como dos vigas en voladizo encastadas en la zona del frente de grieta. Existen 3 métodos de reducción de datos referidos en los estándares ASTM D3433-99(2005) y ISO 25217, y las normas para ensayos de fractura interlaminar en modo I: ISO 15024 y ASTM D5528-01(2007)e3. Los métodos de reducción de datos que se presentan son la teoría de vigas simple (*simple beam theory*, SBT), la teoría de vigas corregida (*corrected beam theory*, CBT) y el método de la flexibilidad experimental (*experimental compliance method*, ECM). En los métodos de reducción de datos no se tiene en consideración los efectos de la rigidez de la lámina de adhesivo en los brazos de la probeta.

Sin embargo, puede tenerse en cuenta la contribución de la lámina de adhesivo obteniendo una sección equivalente de la probeta (Penado, 1993), ver figura 2.13.

Los 3 métodos de reducción de datos que se presentan: SBT, CBT y ECM, se fundamentan en la ecuación de Irwin-Kies en la cuál la energía disponible para la fractura modo I (G_I) se

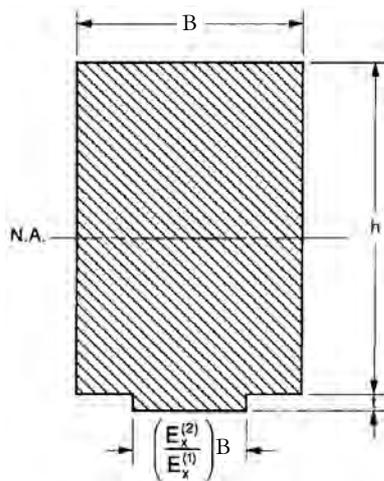


Figura 2.13: Obtención de una sección equivalente para considerar el efecto de la rigidez de la lámina de adhesivo sobre la rigidez de uno de los brazos de la probeta (Penado, 1993).

determina a partir de la derivación de la flexibilidad (C) en función de la longitud de grieta (a):

$$G = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da} \quad (2.5)$$

Cada método es una alternativa para determinar la flexibilidad de los brazos de la probeta. En el caso de la teoría de vigas simple, la flexibilidad se determina a partir de la teoría de vigas sin tener en cuenta el efecto del cortante (teoría de vigas de Euler-Bernoulli). En la teoría de vigas corregidas, se corrige la longitud de grieta añadiendo un incremento Δ que tiene en consideración las rotaciones adicionales en el frente de grieta. Y finalmente, en el caso de la calibración experimental de la flexibilidad, se realiza una calibración de la flexibilidad a partir de una ley potencial que relaciona la flexibilidad y la longitud de grieta.

2.5.1.2. Modelos analíticos basados en la fundación elástica

Los modelos analíticos basados en la teoría de vigas consideran que los brazos de la probeta son vigas en voladizo encastadas en el frente de grieta, ver figura 2.14. En función de estas hipótesis, se considera que no hay rotaciones de los brazos de la probeta en la zona del frente de grieta, cuando en realidad si las hay.

Una método alternativo para calcular la deformada de los brazos de la probeta es considerar la viga parcialmente soportada sobre una fundación elástica, ver figura 2.15. La fundación elástica se entiende como una cama de muelles que simulan la rigidez transversal del material. Hay dos tipos de fundación elástica: la de Winkler, figura 2.15(a), que considera una fundación únicamente con rigidez transversal k_L , y la de Pasternak, figura 2.15(b), que considera tanto de la rigidez transversal k_L así como la rotacional k_R .

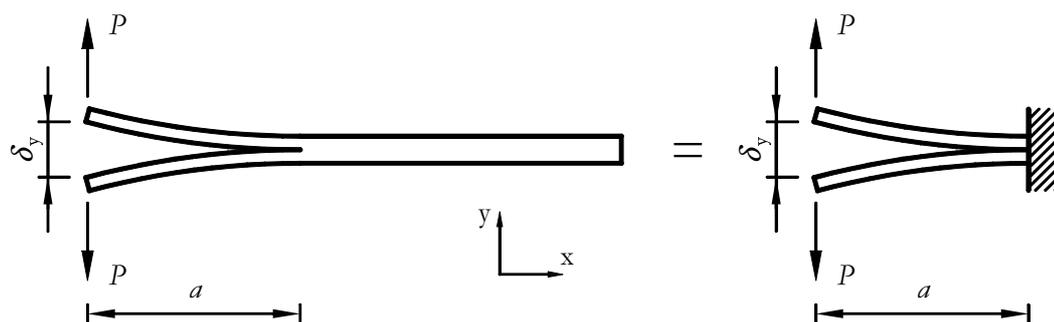


Figura 2.14: Simplificación realizada en el análisis de teoría de vigas simple.

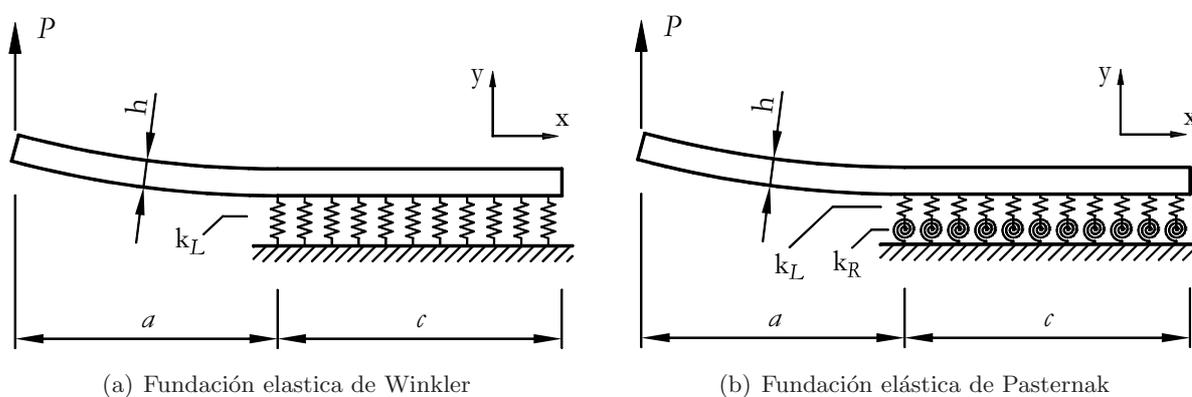


Figura 2.15: Fundaciones elásticas para representar la deformación de los brazos de la probeta.

2.5.1.3. Modelo sándwich

La tercera alternativa para representar el comportamiento de la unión adhesiva es considerar la probeta como un panel sándwich sujeto a una carga arbitraria. El modelo fue desarrollado por (Wang et al., 2003a) y es una mejora del modelo analítico previamente desarrollado por Crocombe and Bigwood (1992), que tiene en cuenta la deformación a flexión y a cortante, y la respuesta no lineal del diagrama de tensiones-deformaciones de los adherentes. El adhesivo se simula como una serie de muelles a tensión y a cortante con un comportamiento no-lineal, acoplados con un criterio de fluencia de von Misses. En el trabajo de (Wang et al., 2003a) se acopla el modelo desarrollado por el mismo autor a un modelo existente que simula la parte libre del adherente en la zona del inserto (Moidu et al., 1998), ver figura 2.16.

Los resultados del modelo analítico desarrollado por Wang et al. (2003a) se comparan con las simulaciones de un modelo numérico de elementos finitos. El modelo sándwich predijo la respuesta general del modelo de elementos finitos, sin embargo las predicciones no fueron tan buenas cerca del frente de grieta.

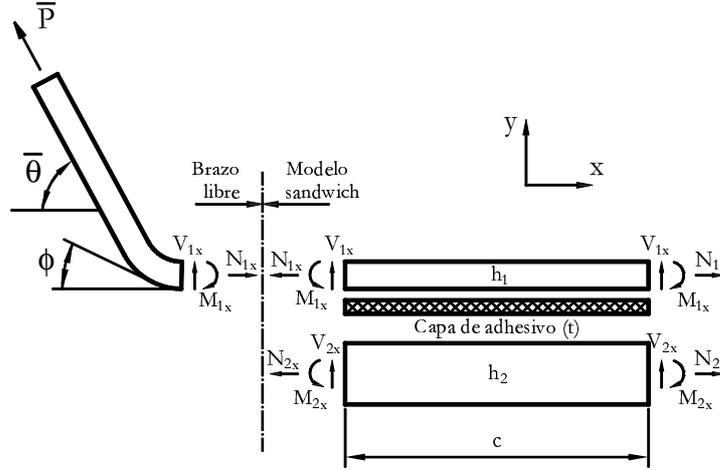


Figura 2.16: Descomposición de una probeta en un modelo sándwich y un brazo libre de la probeta.

2.5.2. Análisis de la deformación de los brazos de la probeta a partir de modelos de fundación elástica

Los modelos de fundación elástica que se han descrito en la sección anterior permiten reproducir con bastante exactitud la deformación que experimentan los brazos de la probeta, en probetas de doble viga en voladizo (Olsson, 2007).

A continuación se presentan una serie de soluciones basadas en los modelos de fundación elástica de Winkler y Pasternak. Los modelos que se describen tienen en común que ofrecen una expresión simple de la flexibilidad en función de la longitud de grieta y derivable en función de a , para obtener la energía disponible para la fractura.

2.5.2.1. Fundación elástica para materiales ortotrópicos

En el trabajo de Ozdil and Carlsson (1999) se presenta un modelo de fundación elástica para materiales ortotrópicos basado en la formulación desarrollada previamente por Kanninen (1973) para materiales isotrópicos. La expresión de la flexibilidad de la probeta en el punto de aplicación de la carga (C) para probetas que cumplen la condición $c \gg h$, siendo c la longitud de la zona con fundación elástica y h el espesor de uno de los adherentes (ver figura 2.15(a)), es:

$$C = \frac{8}{E_x B} \left(\frac{a^3}{h^3} \right) \left[1 + \frac{3}{\Gamma a} + \frac{3}{\Gamma^2 a^2} + \frac{3}{2\Gamma^3 a^3} \right] \quad (2.6)$$

B es el ancho de la probeta, E_x el módulo de Young del adherente en la dirección de las fibras, a la longitud de grieta y Γ :

$$\Gamma^4 = \frac{3k_L}{E_x B h^3} \quad (2.7)$$

k_L es la rigidez longitudinal de la fundación elástica, que se define a partir de la siguiente expresión:

$$k_L = \frac{2E_y B}{h} \quad (2.8)$$

Siendo E_y el módulo de Young en la dirección transversal a las fibras. Para determinar k_L se considera que la distribución de tensiones es constante en toda la fundación elástica.

2.5.2.2. Fundación elástica para materiales ortotrópicos con el efecto del cortante

Otro modelo es el de Penado (1993), en el cual se utiliza la misma formulación que Ozdil and Carlsson (1999) para materiales ortotrópicos, pero incluye la componente de la deformada producida por el efecto del cortante en la zona del frente de grieta. La flexibilidad de los brazos de la probeta se expresa como:

$$C = C_M + C_V = \frac{4}{E_x B \Gamma^3 h^3} [2\Gamma^3 a^3 + 6\Gamma^2 a^2 + 6\Gamma a + 3] + \frac{3a}{2B G_{xy} h} \quad (2.9)$$

Siendo C_M la flexibilidad causada por el efecto de la flexión y C_V la flexibilidad causada por el efecto del cortante:

$$C_V = \frac{3a}{2B G_{xy} h} \quad (2.10)$$

G_{xy} es el módulo a cortante del material en el plano xy , ver figura 2.15. Penado expresa la rigidez de la fundación elástica k_L como:

$$k_L = \frac{A E_y B}{h} \quad (2.11)$$

Dónde A es un parámetro de ajuste de la rigidez de la fundación elástica. Penado considera $A = 4$ para expresar la rigidez de la fundación elástica, a diferencia de Kanninen (1973) y Ozdil and Carlsson (1999) que consideran $A = 2$. Penado escoge un valor diferente porque con $A = 4$ su modelo se ajusta mejor a los resultados experimentales.

2.5.2.3. Fundación elástica con efecto del cortante y efectos locales de rotación en el frente de grieta

El modelo se describe en el trabajo de Olsson (1992), en el cual se presenta una formulación basada en una fundación elástica de Winkler, que incluye el efecto del cortante en los brazos de la probeta y los efectos locales en la zona del frente de grieta. La deformada total de la probeta se determina como la superposición lineal de múltiples desplazamientos:

$$\delta_y = \delta_{yM} + \delta_{yV} + \delta_{yW} + \delta_{ySV} \quad (2.12)$$

Siendo δ_y el desplazamiento total de los brazos de la probeta en el punto de aplicación de la carga, δ_{yM} el desplazamiento producido por la flexión en los brazos libres, δ_{yV} la componente producida por el cortante, δ_{yW} la parte de desplazamiento producido por la fundación elástica y δ_{ySV} es el desplazamiento producido por las rotaciones locales que tienen lugar en el frente de grieta debidas al efecto de Saint Venant.

A partir de la suma de los desplazamientos se obtiene una expresión de la flexibilidad en función de la longitud de grieta:

$$C = \frac{8}{E_x B} \left[\alpha_0 + \alpha_1 \left(\frac{a}{h} \right) + \alpha_2 \left(\frac{a}{h} \right)^2 + \alpha_3 \left(\frac{a}{h} \right)^3 \right] \quad (2.13)$$

Siendo:

$$\begin{aligned} \alpha_0 &= \frac{3}{2} \left(\frac{E_x}{E_y} \right)^{\frac{3}{4}} \\ \alpha_1 &= \frac{E_y}{4K_V G_{xy}} + 3 \sqrt[3]{\frac{E_x}{6E_y}} \\ \alpha_2 &= 3 \sqrt[4]{\frac{E_x}{6E_z}} + \frac{3}{2\pi} \sqrt{\frac{E_x}{G_{xy}}} \\ \alpha_3 &= 1 \end{aligned} \quad (2.14)$$

El parámetro K_V es la rigidez a cortante, Olsson considera $K_V = 5/6$. Para definir la rigidez de la fundación elástica k_L se utiliza el mismo valor que el propuesto en la formulación de Kanninen, ver ecuación 2.7.

2.5.2.4. Fundación elástica de Pasternak

Tal y como se ha descrito anteriormente, la fundación de Pasternak tiene en cuenta las rigideces longitudinales y rotacionales de la zona del adhesivo. En el trabajo de Williams (1989) se aplica este tipo de fundación a una probeta DCB. El modelo de fundación elástica empleado es el mismo que se utiliza para corregir la rotación en el frente de grieta en los ensayos de tenacidad a la fractura en modo I (ASTM D5528-01(2007)e3 o ISO 15024 y en modo mixto I-II, ASTM D6671/D6671M-06. Se considera una fundación elástica con dos rigideces: la transversal k_L y la rotacional k_R . Williams propone una solución semiempírica basada en la corrección de la longitud de grieta en la cual se expresa la flexibilidad de los brazos de la probeta como:

$$C = \frac{2a_c^3}{3E_x I_z} \quad (2.15)$$

Siendo I_z la inercia del brazo de la probeta respecto el eje z del sistema de coordenadas cartesiano de la probeta (ver figura 2.15) y a_c la longitud de grieta corregida:

$$a_c = a + \chi h \quad (2.16)$$

χ es el parámetro corrector de la longitud de grieta:

$$\chi = \sqrt{\frac{E_x}{11G_{xy}} \left[3 - 2 \left(\frac{\Gamma}{\Gamma + 1} \right)^2 \right]} \quad (2.17)$$

Dónde Γ :

$$\Gamma = 1.18 \frac{\sqrt{E_x E_y}}{G_{xy}} \quad (2.18)$$

2.5.2.5. Comparación de las formulaciones

En la figura 2.17 se representa un esquema con las características de cada una de las formulaciones basadas en la fundación elástica que se proponen en este trabajo (Olsson, 2007).

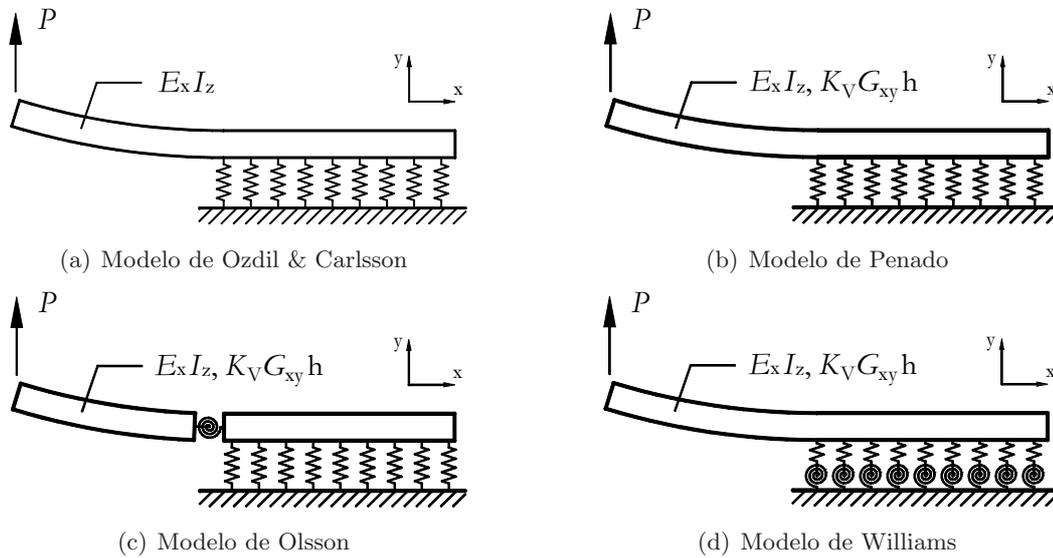


Figura 2.17: Esquema de las formulaciones basadas en los modelos de fundación elástica.

2.5.3. Simulaciones numéricas

Las simulaciones numéricas analizar los efectos locales que ocurren durante el ensayo experimental, sin embargo no ofrecen una solución global para poderla utilizar como método de reducción de datos.

Un método para simular la propagación de la grieta y describir la respuesta del adhesivo es mediante modelos de zona cohesiva. Originariamente estos modelos se emplearon para simular la propagación de la grieta entre dos láminas de composite. Existen dos alternativas para su aplicación en uniones adhesivas (Pardoén et al., 2005): los modelos que tienen en cuenta los adherentes y la zona cohesiva (modelos ACZ: *Adherents + Cohesive Zone model*) y los modelos que tienen en cuenta los adherentes, la zona cohesiva y el comportamiento del adhesivo por separado (modelos AACZ: *Adherents + Adhesive + Cohesive zone model*). La diferencia entre los dos modelos es tener en cuenta o no las propiedades de la lámina de adhesivo de forma independiente al proceso de fractura de la unión, ver figura 2.18.

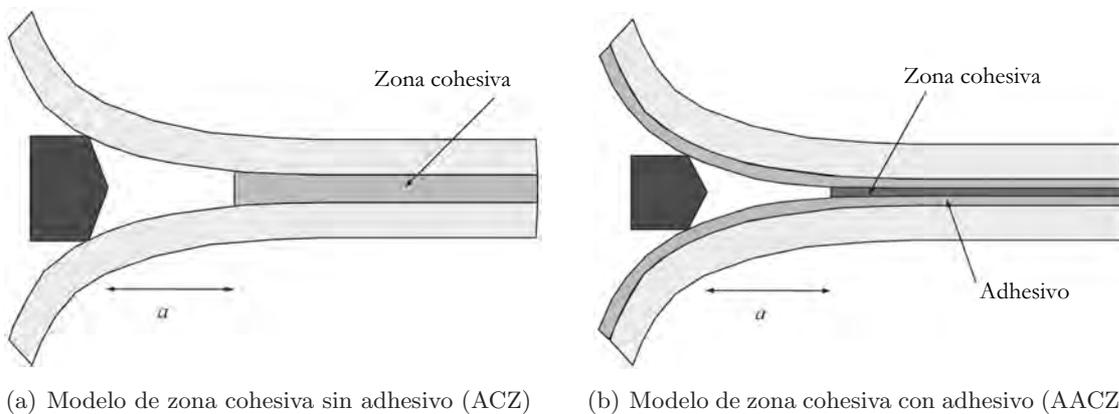


Figura 2.18: Representación esquemática de los modelos de zona cohesiva para uniones adhesivas.

El modelo ACZ considera solamente dos constituyentes: los adherentes y la capa de adhesivo, que se representa completamente por los elementos de la zona cohesiva (Pardoén et al., 2005), ver figura 2.18(a). Las propiedades de la zona cohesiva pueden determinarse a partir de los análisis experimentales (Ferracin et al., 2003).

En el modelo AACZ se tienen en cuenta las propiedades de la lámina de adhesivo. El modelo considera las propiedades de la zona cohesiva independientes de las de la lámina de adhesivo y los adherentes. En el trabajo de Pardoén et al. (2005) se simula la lámina de adhesivo con un comportamiento plástico considerando un criterio de Drucker-Pragger. En la figura 2.18(b) se muestra un esquema del modelo AACZ.

2.6. Dependencias extrínsecas del valor de G_{IC} determinado experimentalmente

Los métodos de reducción de datos utilizados para obtener el valor de la tenacidad a la fractura (G_{IC}) a partir de los resultados de los ensayos anteriormente citados, tienen su fundamento en la mecánica de la fractura lineal y elástica. Ésta asume que el comportamiento del material es puramente elástico a excepción de una pequeña zona en la vecindad de la punta de la grieta, mucho menor que cualquier otra dimensión del problema (tamaño de grieta o dimensiones de la

probeta).

Sin embargo, tanto el adhesivo como los adherentes pueden presentar comportamientos que van más allá del propio comportamiento elástico. El adhesivo puede presentar una plasticidad notable y las grietas interlaminares en los composites obedecen a un comportamiento cuasi-frágil, en el que aparece una zona de daño (o cohesiva) por delante del frente de grieta.

Cada uno de estos dos comportamientos (plasticidad y/o daño) conlleva una disipación de energía que depende de factores que no son intrínsecos a la interfase (a la unión propiamente).

La contribución de estos fenómenos a la energía de fractura y el hecho de que éstos no están contemplados en los métodos de reducción de datos experimentales, conlleva que el valor de G_{IC} determinado experimentalmente dependa de aspectos intrínsecos a la unión adhesiva (rigidez y espesor del adherente, grosor del adhesivo, etc.). Algunos de estos aspectos se presentan a continuación.

2.6.1. Restricciones geométricas

Se entienden por restricciones geométricas a las propiedades geométricas del espécimen que tienen un efecto sobre los valores de la tenacidad a la fractura de la unión adhesiva. Existen dos tipos de restricciones geométricas (Pardoen et al., 2005):

- Restricciones internas: influencia del espesor y del ancho de la lámina de adhesivo en la determinación de G_{IC} (Pardoen et al., 2005).
- Restricciones externas: como afecta el espesor de los adherentes a la tenacidad a la fractura del adhesivo (Wang et al., 2003b).

En el trabajo de Pardoen et al. (2005) se describe un método para establecer la relación entre el espesor de la lámina de adhesivo y la tenacidad a la fractura de la unión adhesiva. La unión adhesiva se representa a partir de la siguiente expresión:

$$G_{IC} = G_{IC_0} + G_{IC_P} \quad (2.19)$$

En la cual G_{IC_0} es la tenacidad a la fractura asociada con la respuesta de la zona cohesiva y G_{IC_P} es la contribución extra debida a la disipación plástica de la lámina de adhesivo. Si la lámina de adhesivo es suficientemente fina, esta plastificará completamente. Para adhesivos de pequeño espesor, la contribución plástica crecerá en función del espesor de la lámina de adhesivo. El parámetro G_{IC_P} tiende a crecer hasta que se estabiliza para valores de espesor mayores.

Otros autores (Yan et al., 2001, Daghyani et al., 1995) asocian los mecanismos de fractura frágil y fractura dúctil en función del espesor de la lámina de adhesivo. El proceso de fractura está controlado por una tensión de apertura que es proporcional al espesor de la lámina de adhesivo (Yan

et al., 2001).

Por otra parte, en el trabajo de Ikeda et al. (2000) se analiza el volumen de la zona plástica y el campo de tensiones cerca del frente de grieta. Según el trabajo de Ikeda et al. el volumen de la zona plástica no puede relacionarse directamente con la variación de la tenacidad a la fractura del adhesivo. La disminución del espesor de la lámina de adhesivo aumenta el valor de la tensión cerca del frente de grieta, con lo cuál disminuye el valor de la tenacidad a la fractura en modo I del adhesivo.

Por lo que respecta a las restricciones geométricas externas, en el trabajo de Pardoen et al. (2005) se analiza la contribución del espesor de los adherentes en relación a la tenacidad a la fractura en modo I. La flexión de adherentes de poco espesor tiende a provocar deformaciones plásticas en el adhesivo y por consiguiente se incrementa la tenacidad a la fractura de la unión.

2.6.2. Tensiones térmicas residuales

Otro efecto que puede producir una variación de la energía de la fractura en modo I de la unión son las tensiones térmicas residuales que aparecen durante la etapa de enfriamiento del proceso de curado.

En el trabajo de Chen and Dillard (2001) se define una expresión analítica para determinar el valor de las tensiones térmicas residuales, en función de la diferencia de temperaturas del proceso de enfriamiento y de los coeficientes de expansión térmica de los constituyentes de la unión.

Por otra parte, en el trabajo de Guo et al. (2006) se analizan las deformaciones residuales que experimentan los brazos de la probeta como consecuencia del salto térmico del curado de la unión adhesiva. Se analizan dos casos: la aparición de tensiones residuales de compresión en la capa de adhesivo que provocan que los brazos de la probeta se abran (caso I de la figura 2.19), o tensiones en la capa de adhesivo que provocan que los brazos de la probeta se doblen hacia adentro hasta que aparece una fuerza de contacto P_0 (caso II de la figura 2.19).

En el trabajo de Guo et al. (2006) se considera que para propagar la grieta de la unión se debe vencer la tenacidad a la fractura del adhesivo y las tensiones térmicas residuales. La tenacidad a la fractura total puede obtenerse por el método de superposición si los materiales son lineales y elásticos y los ángulos de giro que sufren los brazos de la probeta són pequeños.

Finalmente Tvergaard and Hutchinson (1996) presentan un modelo numérico para analizar la propagación de grieta en la interfase entre el adherente y el adhesivo basado en los trabajos previos de los mismos autores (Tvergaard and Hutchinson, 1992, 1993, 1994). En el trabajo desarrollado por Tvergaard and Hutchinson (1996) se observa que las tensiones térmicas residuales pueden afectar a la posición del pico de tensión que se encuentra justo delante del frente de grieta, llegándose a producir, en ciertos casos pequeñas cavidades justo delante del frente de

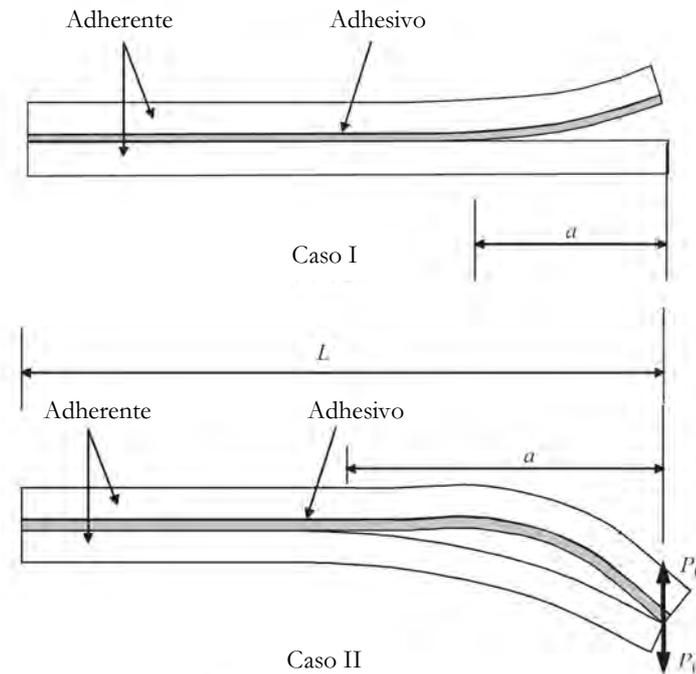


Figura 2.19: Deformaciones en la probeta producidas por las tensiones térmicas residuales (Guo et al., 2006).

grieta.

2.6.3. Efecto del cortante

En el trabajo de Penado (1993) se analiza la influencia del cortante en la determinación de la G_{IC} durante un ensayo de doble viga en voladizo. El efecto del cortante tiene influencia en probetas con longitudes de inserto cortas. El efecto del cortante depende de la relación entre el espesor de los brazos de la probeta h y la longitud de grieta a . Penado establece una relación límite entre h y a , en la cual considera que los efectos del cortante tienen muy poca influencia en G_{IC} si $h/a < 0.4$.

2.6.4. Crecimiento del frente de grieta a saltos (*stick-slip*)

Como se verá mas adelante (en la sección 4.4.2 del capítulo 4), el crecimiento a saltos del frente de grieta (o *stick-slip*) introduce una dependencia del valor de G_{IC} determinado experimentalmente con las propiedades geométricas y de rigidez del adherente. Los intervalos de crecimiento lento, donde se da una importante contribución de deformación plástica se suceden con intervalos de progresión de grieta a alta velocidad. La importancia relativa de unos y otros depende de factores extrínsecos a la interfase como la capacidad de almacenar energía elástica de los adherentes (que se libera en los intervalos de progresión rápida) y que depende de factores geométricos y de rigidez.

Capítulo 3

Probetas. Fabricación y caracterización

3.1. Introducción

Para validar los métodos de ensayo que se presentan en este trabajo se ha llevado a cabo una serie de campañas experimentales. En éstas se ha comparado el valor de G_{IC} de diferentes configuraciones de unión adhesiva (en función de los materiales utilizados). También se ha evidenciado la sensibilidad de los ensayos propuestos a la calidad de la unión adhesivas, mediante el uso de probetas con distintas preparaciones superficiales de los adherentes y dos temperaturas de curado de la lámina de adhesivo.

En la parte inicial de este capítulo se describen los procedimientos de fabricación de las uniones adhesivas. Así mismo, en el capítulo, también se incluyen los procesos de fabricación de las probetas de cinta unidireccional, que se han utilizado para caracterizar las propiedades de los adherentes de la unión. Y finalmente, en la última parte del capítulo se describen los ensayos experimentales que se han realizado con las probetas de un solo material para determinar las propiedades elásticas de los adherentes de la unión, la resistencia última y la tenacidad a la fractura para la propagación de grietas interlaminares en modo I. Estas propiedades experimentales se han utilizado en los capítulos posteriores para alimentar modelos analíticos y las simulaciones numéricas.

Debido a la relevancia que tienen en el contenido de la tesis, las cuestiones experimentales relacionadas con los ensayos de uniones adhesivas se han detallado en los capítulos 4, 5, 6 y 7.

3.2. Materiales de partida

Para elaborar las uniones adhesivas se han utilizado 2 adherentes (AS4/8552 y T800S/M21) y dos adhesivos estructurales (FM300K y EA9695) compatibles con los adherentes. Fruto de su combinación se han obtenido 4 tipos de unión adhesiva.

Los adherentes que se han utilizado son laminados de material composite preimpregnado de fibra de carbono y resina epoxy para uso aeronáutico. Las cintas de preimpregnado están formadas por fibras continuas orientadas a 0° de módulo intermedio (230-300 GPa), con alta resistencia a tracción (4.5-5.9 GPa) y con una matriz epoxy endurecida para resistir cargas a temperaturas inferiores a 121°C . El espesor nominal de cada lámina, según la hoja del fabricante, es de 0.130 mm para el AS4/8552 y 0.193 mm para el T800S/M21. Ambos materiales son del fabricante Hexcel Composites, y han sido suministrados por Airbus España en cintas bobinadas de 30 cm de ancho. El laminado se ha creado a partir del corte de la cinta y del posterior apilado de capas de material.

Los adhesivos que se han utilizado son láminas de material preimpregnado de epoxy, con un tejido embebido en el interior que actúa como tejido portador (*carrier*) para asegurar un espesor constante del adhesivo en la probeta. El adhesivo FM300K es del fabricante Cytex Composites y el adhesivo EA9695 de Loctite, ambos han sido suministrados por Airbus España en cintas bobinadas de 120 cm de ancho.

3.3. Tipología de probetas

En la tabla 3.1 se indican los tipos de probetas producidos. Se han clasificado en función de los ensayos experimentales realizados.

Tipo de probeta	Ensayo experimental asociado	Probeta	Objetivo del ensayo
1	Tracción longitudinal	Adherente + tacones ¹	Caracterizar las propiedades elásticas de los adherentes
2	Tracción transversal	Adherente + tacones ¹	
3	Cortadura en el plano	Adherente	
4	Doble viga en voladizo (DCB)	Adherente + inserto	Determinar G_{IC} de los adherentes
5	DCB / WDT ²	Adherente + adhesivo	Caracterizar uniones adhesivas

Tabla 3.1: Tipología de probetas fabricadas.

¹Tacones de fibra de vidrio.

²El ensayo de propagación de grieta por avance forzado de cuña (*Wedge Driven Test*, WDT) es el ensayo alternativo al de doble viga en voladizo (*Double Cantilever Beam test*, DCB) que se presenta en los capítulos 5, 6 y 7.

3.3.1. Probetas de tipo 1 para ensayos de tracción longitudinal

Estas probetas se han definido según la norma de ensayo ASTM D3039/D3039M-08, con una secuencia de apilamiento $[0]_6$ y las dimensiones indicadas en la figura 3.1, siguiendo las recomendaciones de la norma. Se han adherido tacones en la zona de sujeción de la probeta para evitar que la rotura se produjera en sus extremos debido al efecto de la concentración de tensiones. Los tacones se fabricaron a partir de laminados de fibra de vidrio Hexply 8552/42%/120/Glass, con una secuencia de apilamiento de $[+45/-45]_4$ y unas dimensiones de 56 mm de longitud \times 15 mm de ancho (el de la probeta) \times 0.9 mm de espesor.

A partir de la relación entre el espesor de probeta y el número de capas se ha obtenido un espesor aproximado por capa de 0.2 mm. Para el material AS4/8552, el valor del espesor obtenido experimentalmente difiere de los datos proporcionados por el fabricante (0.130 mm). A efectos de cálculo, se ha utilizado el valor obtenido de las mediciones experimentales (0.2 mm).

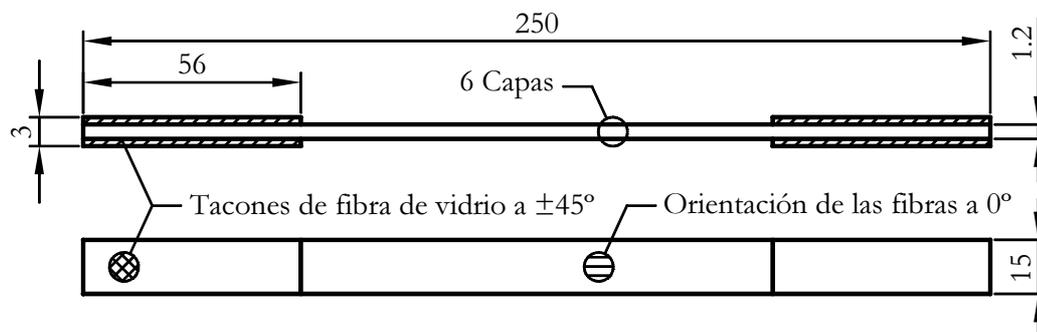


Figura 3.1: Dimensiones de las probetas para ensayos de tracción longitudinal, dimensiones en mm.

3.3.2. Probetas de tipo 2 para ensayos de tracción transversal

Las probetas se han definido según la norma de ensayo ASTM D3039/D3039M-08, con una secuencia de apilamiento $[90]_{12}$ y las dimensiones indicadas en la figura 3.2, siguiendo las recomendaciones de la norma. Se han unido tacones de fibra de vidrio en la zona de sujeción para evitar que la rotura de la probeta se produjera en los extremos. Se han utilizado tacones con el mismo material, la misma secuencia de apilamiento y espesor que los empleados en los ensayos de tracción longitudinal ($[+45/-45]_4$ y 0.9 mm respectivamente). Las dimensiones del tacon son de 25 mm de longitud por 25 mm de ancho, ver figura 3.2.

Para este tipo de probetas, y considerando un espesor de 0.2 mm por capa, el espesor aproximado de este tipo de probetas es de 2.4 mm.

3.3.3. Probetas de tipo 3 para ensayos de cortadura en el plano

Estas probetas se han definido según la norma de ensayo ASTM D3518/D3518M-94(2007), con una secuencia de apilamiento $[(+45/-45)_4]_S$ y las dimensiones indicadas en la figura 3.3, si-

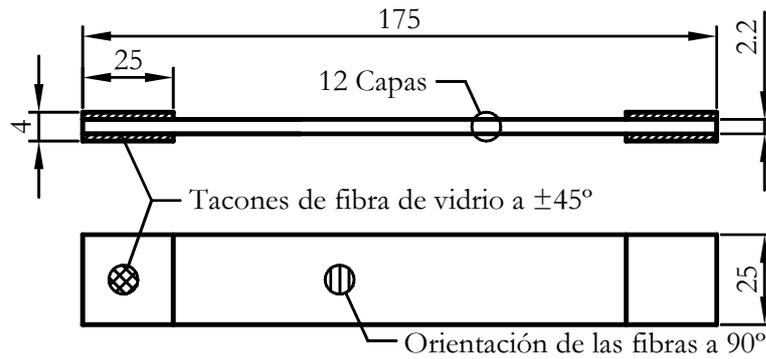


Figura 3.2: Dimensiones de las probetas para ensayos de tracción transversal, dimensiones en mm.

guiendo las recomendaciones de la norma. No se han adherido tacones de fibra de vidrio a la probeta.

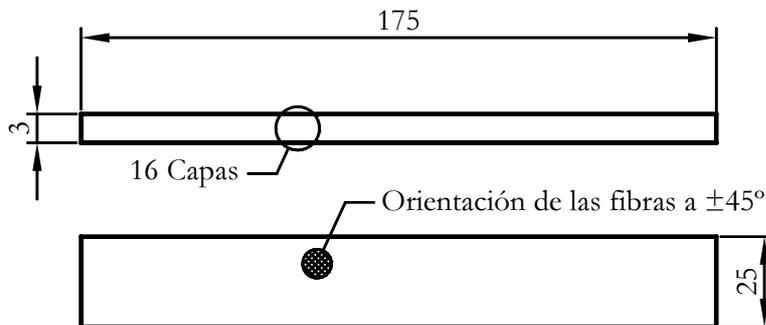


Figura 3.3: Dimensiones de las probetas para ensayos de cortadura en el plano, dimensiones en mm.

3.3.4. Probetas de tipo 4 para la propagación de grietas interlaminares en modo I en los adherentes

Las probetas se han diseñado para realizar ensayos de determinación de la tenacidad a la fractura en modo I (G_{IC}), ensayos de doble viga en voladizo (DCB). Se han considerado las normas ISO 15024, ASTM D5528-01(2007)e3 y AITM 1-0053 como documentos de referencia.

La geometría de la probeta y la configuración del laminado se indican en la figura 3.4. Las probetas tienen un espesor total de $2h = 4.5 \text{ mm}$ y una secuencia de apilamiento $[0_{12}/d/0_{12}]$. En uno de los extremos de la probeta se ha creado una grieta inicial de longitud $A_0 = 60 \text{ mm}$ de longitud, introduciendo una lámina de teflón de $15 \mu\text{m}$ de espesor entre los subpaneles, ver detalle de la figura 3.4. En la secuencia de apilamiento d indica la posición del inserto de teflón.

3.3.5. Probetas de tipo 5, uniones adhesivas

Tal y como se ha comentado en la introducción del capítulo, para realizar la validación de los métodos de ensayo que se presentan en los capítulos 4, 5, 6 y 7 se han fabricado diferentes con-



Figura 3.4: Dimensiones de las probetas para ensayos DCB, dimensiones en mm.

figuraciones de unión adhesiva, con distintos tipos de preparación superficial de los adherentes y temperatura de curado de la lámina de adhesivo.

Las uniones adhesivas se han producido a partir del encolado de dos laminados precurados de fibra de carbono (adherentes) mediante una lámina de adhesivo. Las probetas se han fabricado para realizar ensayos de propagación de grieta interlaminar en modo I, ensayos de doble viga en voladizo (*double cantilever beam tests*, DCB). Se han utilizado las normas de ensayo ISO 15024, ASTM D5528-01(2007)e3 y AITM 1-0053 como documentos de referencia.

Las dimensiones de las probetas se indican en la figura 3.5. Las probetas tienen un espesor total $2h = 3 \text{ mm}$ y una secuencia de apilamiento de $[0_s/ad/0_s]$, ad indica la posición de la lámina de adhesivo. El parámetro t de la figura 3.5 es el espesor de la lámina del adhesivo.



Figura 3.5: Dimensiones de las probetas para ensayos DCB de uniones adhesivas, dimensiones en mm.

Se ha generado una grieta inicial ($A_0 = 60 \text{ mm}$) en uno de los extremos de la probeta. A diferencia de las probetas para ensayos de deslaminación, se ha utilizado una lámina de teflón doblada con el pliegue hacia el interior de la probeta (ver detalle de la figura 3.5), para que el frente de grieta fuera lo más afilado posible y para compensar parte del espesor de la lámina de adhesivo.

3.3.5.1. Uniones adhesivas producidas

Se han preparado 4 tipos de unión adhesiva a partir de la combinación de los 2 adherentes y 2 adhesivos de partida. Por cada combinación de material se han seguido 3 procesos de preparación

de las probetas:

- Probetas con una preparación superficial óptima: utilizando un tejido pelable preimpregnado compatible con adherentes y adhesivos, y realizando el curado de la unión 180 °C.
- Probetas con una preparación superficial inadecuada: sin el tejido pelable pero realizando el curado de la unión a 180 °C.
- Probetas en las cuales el adhesivo se ha curado a una temperatura inadecuada: se ha curado la unión a una temperatura inferior (160 °C en vez de 180 °C). La preparación superficial se ha realizado con el tejido pelable preimpregnado.

La función del pelable preimpregnado es obtener una rugosidad superficial controlada y adecuada antes de curar cada uno de los adherentes. Se ha colocado una lámina de pelable preimpregnado sobre sus dos caras¹. Se ha utilizado el pelable *Cycom 69-43 %-Release ply F-95-1168* distribuido por *Cytech Composites*. El material es un preimpregnado formado por un tejido embebido en resina epoxy. Antes de realizar la unión adhesiva, se ha separado el tejido pelable de los adherentes obteniendo una superficie limpia (sin residuos superficiales) y rugosa. La rugosidad ha sido causada por la marca del tejido sobre la superficie del adherente, proporcionando un agarre mecánico adicional entre el adhesivo y el adherente.

En las probetas que se han preparado con la preparación superficial inadecuada el pelable se ha substituido por una película de tejido desmoldeante.

En la tabla 3.2 se indican las configuraciones de uniones adhesivas que se han producido: 4 combinaciones de material (2 adherentes y 2 adhesivos), 2 temperaturas de curado de la unión (160 C° y 180 C°) y 2 preparaciones superficiales (con y sin pelable preimpregnado).

3.4. Fabricación de las probetas

Las probetas se han producido a partir del corte de paneles (placas rectangulares de laminados). Se han producido paneles de dos dimensiones: de 300×300 mm (paneles de carbono y uniones adhesivas) y de 350×300 mm (paneles para tacones de fibra de vidrio).

Los paneles que se han fabricado para la obtención de las probetas se indican en la tabla 3.3. En la tabla C.1 del anexo C se incluyen datos adicionales como el número de probetas obtenidas de cada panel y sus dimensiones, o los datos referentes a la producción y el corte de los paneles para tacones de fibra de vidrio. La codificación de los paneles se describe en los siguientes subapartados.

¹Se coloca un tejido pelable preimpregnado en ambas caras para tener la misma rugosidad superficial. También porque durante el proceso de curado de los adherentes el tejido pelable se contrae más que el laminado. Con una sola lámina de pelable después del curado el panel quedaría deformado.

Adherente	Adhesivo	Preparación superficial de los adherentes	Temperatura de curado de la unión
AS4/8552	FM300K	Pelable preimpregnado	160 °C
		Pelable preimpregnado	180 °C
		Sin preparación	180 °C
AS4/8552	EA9695	Pelable preimpregnado	160 °C
		Pelable preimpregnado	180 °C
		Sin preparación	180 °C
T800S/M21	FM300K	Pelable preimpregnado	160 °C
		Pelable preimpregnado	180 °C
		Sin preparación	180 °C
T800S/M21	EA9695	Pelable preimpregnado	160 °C
		Pelable preimpregnado	180 °C
		Sin preparación	180 °C

Tabla 3.2: Configuraciones de las uniones adhesivas

Panel	Adherente	Adhesivo	Secuencia apilamiento	Panel	Adherente	Adhesivo	Secuencia apilamiento
A1/01	AS4/8552	-	[0 ₆]	T1/01	T800S/M21	-	[0 ₆]
A1/03	AS4/8552	-	[+45/ - 45] _{4S}	T1/03	T800S/M21	-	[+45/ - 45] _{4S}
A1/04	AS4/8552	-	[0 ₁₂ /d/0 ₁₂]	T1/04	T800S/M21	-	[0 ₁₂ /d/0 ₁₂]
A1/05	AS4/8552	-	[0 ₁₂ /d/0 ₁₂]	T1/05	T800S/M21	-	[0 ₁₂ /d/0 ₁₂]
A1/06	AS4/8552	-	[0 ₁₂ /d/0 ₁₂]	T1/06	T800S/M21	-	[0 ₁₂ /d/0 ₁₂]
A1/07	AS4/8552	-	[0 ₁₂ /d/0 ₁₂]	T1/07	T800S/M21	-	[0 ₁₂ /d/0 ₁₂]
A1/12	AS4/8552	-	[90 ₁₂]	T1/15	T800S/M21	-	[90 ₁₂]
A1/E1/02	AS4/8552	EA9695	[0 ₈ /ad/0 ₈]	T1/E1/02	T800S/M21	EA9695	[0 ₈ /ad/0 ₈]
A1/E1/03	AS4/8552	EA9695	[0 ₈ /ad/0 ₈]	T1/E1/03	T800S/M21	EA9695	[0 ₈ /ad/0 ₈]
A1/E1/07	AS4/8552	EA9695	[0 ₈ /ad/0 ₈]	T1/E1/07	T800S/M21	EA9695	[0 ₈ /ad/0 ₈]
A1/E1/08	AS4/8552	EA9695	[0 ₈ /ad/0 ₈]	T1/E1/08	T800S/M21	EA9695	[0 ₈ /ad/0 ₈]
A1/F1/03	AS4/8552	FM300K	[0 ₈ /ad/0 ₈]	T1/F1/02	T800S/M21	FM300K	[0 ₈ /ad/0 ₈]
A1/F1/04	AS4/8552	FM300K	[0 ₈ /ad/0 ₈]	T1/F1/03	T800S/M21	FM300K	[0 ₈ /ad/0 ₈]
A1/F1/07	AS4/8552	FM300K	[0 ₈ /ad/0 ₈]	T1/F1/05	T800S/M21	FM300K	[0 ₈ /ad/0 ₈]
A1/F1/10	AS4/8552	FM300K	[0 ₈ /ad/0 ₈]	T1/F1/07	T800S/M21	FM300K	[0 ₈ /ad/0 ₈]
A1/F1/11	AS4/8552	FM300K	[0 ₈ /ad/0 ₈]	T1/F1/08	T800S/M21	FM300K	[0 ₈ /ad/0 ₈]
A1/F1/13	AS4/8552	FM300K	[0 ₈ /ad/0 ₈]				

Tabla 3.3: Datos de los paneles fabricados.

3.4.1. Identificación de los paneles

La nomenclatura del panel se ha definido en función de sus constituyentes y del orden de fabricación. Se han identificado dos tipos de panel: paneles de un material (un adherente) y paneles correspondientes a uniones adhesivas (dos adherentes y un adhesivo). Todas las uniones adhesivas se han fabricado utilizando el mismo material para los dos adherentes.

Los paneles de un solo material se han identificado con un código para el material (A para el

adherente AS4/8552 o T para T800S/M21) seguido del numero de cinta bobinada de material y del indicador del orden de fabricación, ver figura 3.6(a).

Las uniones adhesivas se han identificado con un código para el adherente (A o T), uno para el adhesivo (E para el EA9695 o F para el FM300K), el número de cinta bobinada de material y el indicador del orden de fabricación, ver figura 3.6(b).

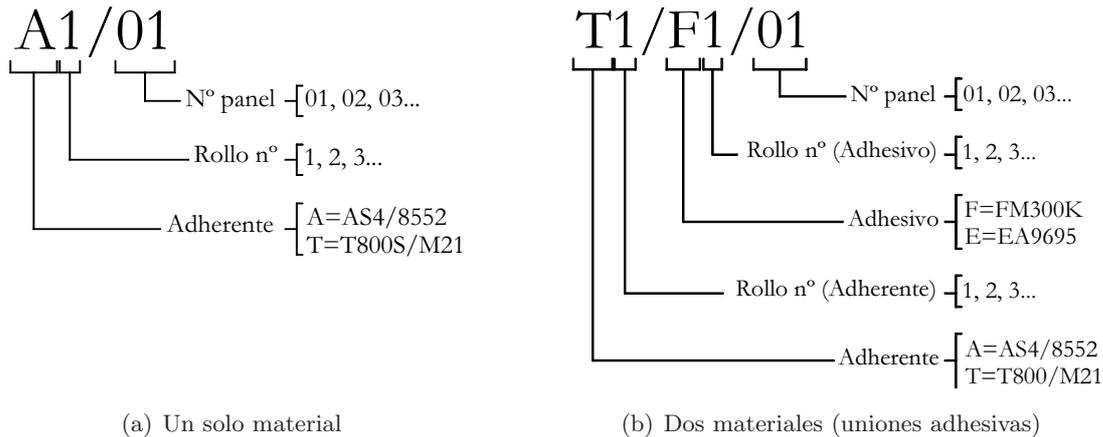


Figura 3.6: Nomenclatura de los paneles de un material y las uniones adhesivas.

Como únicamente se disponía de una sola cinta bobinada de cada uno de los materiales iniciales, los adherentes se han codificado como A1 y T1 y los adhesivos como F1 y E1. El orden de fabricación indica el número de panel fabricado con un mismo adherente (probetas de un material), o con un mismo adherente y adhesivo (uniones adhesivas).

3.4.1.1. Identificación de los subpaneles

Para la obtención de cada unión adhesiva se han fabricado 2 paneles de adherente, designados como subpaneles¹. Su nomenclatura se indica en la figura 3.7. Los subpaneles se han identificado con el nombre del panel y las terminaciones A o B. Una vez realizada la unión adhesiva, se ha dispuesto de un solo panel que se ha identificado con el código de la figura 3.6(b).

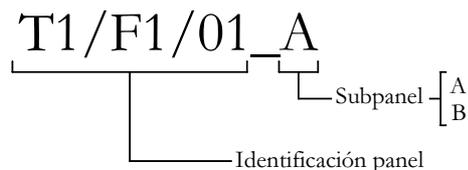


Figura 3.7: Nomenclatura de los subpaneles.

¹Los subpaneles se han curado por separado. Una vez curados se han unido con el adhesivo y se ha realizado un segundo ciclo de curado.

3.4.1.2. Identificación de los tacones de fibra de vidrio

Los paneles de fibra de vidrio, de cuyo corte se obtienen los tacones, se han identificado con el código $5T_1$ y el indicador del orden de fabricación. La nomenclatura se indica en la figura 3.8.

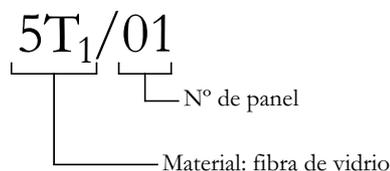


Figura 3.8: Nomenclatura de los paneles para realizar los tacones de fibra de vidrio.

3.4.2. Dimensiones de los paneles

Para fabricar los paneles de carbono y las uniones adhesivas se ha dispuesto de cintas bobinadas de 300 mm de ancho. Para aprovechar el ancho de la cinta y realizar los mínimos solapes en los laminados orientados a 0° y a 90° se han definido los paneles de 300×300 mm. El espesor del laminado y la secuencia de apilamiento ha variado en función del tipo de probeta.

Los paneles de los cuales se han obtenido los tacones de fibra de vidrio se han definido con unas dimensiones de 350×300 mm, para que una vez cortados los tacones ocuparan todo el ancho del panel de carbono. Se ha obtenido un espesor aproximado del panel de 0.9 mm con una secuencia de apilamiento de $[+45/-45]_4$.

3.4.3. Trazabilidad de los paneles. Control y almacenamiento de los materiales iniciales

3.4.3.1. Trazabilidad de los paneles

Para realizar un seguimiento exhaustivo y trazable del proceso de fabricación a cada panel se le ha asignado una hoja de registro que contiene la información de las operaciones realizadas. Los datos registrados en la hoja de acompañamiento son:

- Información general del panel: código y tipología (laminado de carbono, laminado de carbono con pre grieta inicial, unión adhesiva o tacón de fibra de vidrio).
- Información sobre el laminado del panel o de los subpaneles: nombre o código de la persona que realiza la operación de laminado, fecha de laminación, tipo de fibra/resina del material inicial y secuencia de apilamiento de capas.
- Curado del panel: nombre del responsable del curado de los paneles, fecha de curado, autoclave, nombre del ciclo de curado.
- Corte del panel: responsable del corte del panel, fecha y esquema de corte.
- Observaciones adicionales.

3.4.3.2. Control y almacenamiento de los materiales de partida

Los materiales preimpregnados a partir de los cuales se han fabricado las probetas (adherentes, adhesivos y el pelable preimpregnado) contienen resinas reactivas semicuradas. Para evitar que el curado continúe progresando, el almacenaje de estos materiales se realiza bajo refrigeración (a $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$), con lo que se consigue disminuir la velocidad de polimerización. Los materiales de partida tuvieron un tiempo de vida aproximado de 300 horas sin refrigeración.

Para procesar correctamente estos materiales se han descongelado lentamente hasta que han alcanzado la temperatura de manipulación, entre 15 y $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. En la fase de descongelación se ha conservado el preimpregnado en su envoltorio original, hasta que se ha quedado completamente seco, para evitar que adquiriera humedad.

El tiempo de exposición a temperatura ambiente se ha indicado en las hojas de control de los materiales, estas hojas contenían información de:

- Los datos del material: código de identificación, fecha de caducidad a $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ (la refrigeración del material solamente retrasa la velocidad de curado de la resina, no la detiene completamente), cantidad de material disponible (m^2) y tiempo de vida disponible a temperatura ambiente.
- Las operaciones de manipulación y/o transporte realizadas: nombre de la persona responsable, descripción de la operación, tiempo de vida y cantidad de material disponible una vez finalizada la operación.

3.4.4. Materiales auxiliares para crear la bolsa de vacío

El curado de los paneles y las uniones adhesivas se ha realizado en un autoclave a temperaturas entre $160\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $185\text{ }^{\circ}\text{C}$, y presiones entre 3.1 y 6.9 bar. Para eliminar las burbujas de aire embebidas en el laminado se ha realizado el curado dentro de una bolsa de vacío, ver figura 3.9.

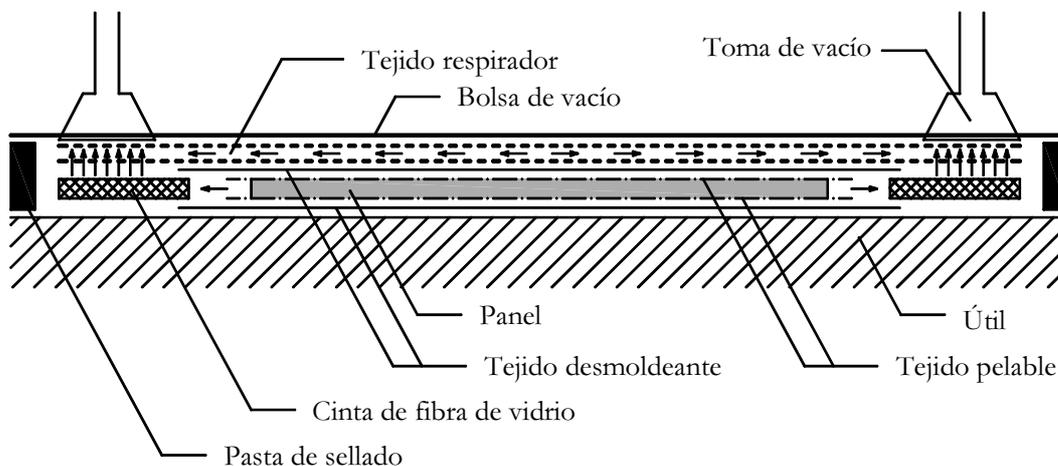


Figura 3.9: Bolsa de vacío y materiales auxiliares. El símbolo \rightarrow indica la dirección del flujo de aire.

Para preparar la bolsa de vacío se han utilizado los siguientes materiales auxiliares:

- Película separadora: usada como desmoldeante para facilitar la extracción del panel de la cara del útil. Se ha utilizado una película *RF-242-B* de la casa comercial *TYGAVAC ADVANCED MATERIALS* de 0.025 mm de espesor y sin microperforar¹. También se ha utilizado esta película para crear la pregrieta inicial en probetas para ensayos de fractura interlaminar y uniones adhesivas.
- Tejido respirador: usado como vía de salida de aire para realizar el vacío dentro de la bolsa. Se han utilizado dos tipos de tejido respirador: *AIRWEAVE N-10* y *ULTRAWEAVE 1332*, del fabricante *AIRTECH EUROPE S.A.*
- Cinta de fibra de vidrio comercial: utilizada como canal de salida del aire.
- Cinta de sellado (*dicromato*): para sellar el perímetro de la bolsa de vacío. Se ha utilizado la cinta *GS-43 MR* del fabricante *AIRTECH EUROPE S.A.*
- Película para bolsa de vacío: se ha utilizado una bolsa *NBF-225B* del fabricante *TYGAVAC ADVANCED MATERIALS* de 0.05 mm de espesor.
- Cinta adhesiva de alta resistencia a la temperatura: para fijar los materiales de la bolsa de vacío y para evitar el deslizamiento de los subpaneles durante el curado del adhesivo.

Antes de curar los paneles y los subpaneles se han recubierto sus caras con un pelable preimpregnado en resina, para uniformizar la rugosidad las caras de los paneles de carbono y para proteger las superficies a unir de las uniones adhesivas. Se ha utilizado el pelable *CYCOM 69-43 %-RELEASE PLY F-95-1168* de la casa comercial *Cytech Composites*. Al contener resina preimpregnada, se han aplicado los mismos procedimientos de manipulación y almacenaje que para los preimpregnados de carbono y los adhesivos.

Antes de realizar la unión adhesiva se han limpiado las superficies de los adherentes para eliminar los restos de polvo y suciedad. Se ha utilizado alcohol isopropílico y una gamuza seca compuesta por fibras no tejidas, con un contenido del 55 % de pasta de papel y un 45 % de poliéster.

3.4.5. Instalaciones y equipamiento

La fabricación de los paneles y el corte de las probetas se ha realizado en las instalaciones del Laboratorio de Procesos del Área de materiales Compuestos del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA). Se hizo uso de las siguientes instalaciones:

- Congelador: para almacenar los materiales preimpregnados (los laminados de composite, los adhesivos y el pelable) a -18 °C, prolongando el tiempo de reticulación de la resina.

¹La película separadora no permite el sangrado² de los materiales.

²Sangrado de un material: proceso que ocurre durante el curado, cuando parte de la resina en fase líquida del material fluye hacia el exterior del panel.

- Herramientas para el corte de los preimpregnados de carbono: cúters y guillotinas.
- Equipos para el corte de los preimpregnados de carbono: mesa de corte por control numérico (CNC).
- Bomba de vacío: para compactar los paneles durante el proceso de laminación.
- Autoclave: para realizar el curado de los paneles y las uniones adhesivas a temperaturas entre 160 y 180 °C y a presiones entre 3.1 y 6.9 bar. Para el curado de los paneles se han utilizado 2 autoclaves: uno con capacidad para curar 24 paneles y otro con capacidad para 8 paneles.
- Máquina de corte de probetas: el corte de probetas se ha realizado con un disco continuo con filo de corte de diamante, para tener una desviación del ancho de probeta menor a 0.1 mm.

3.4.6. Procesos de fabricación

La fabricación de las probetas se ha realizado en dos estancias de corta duración, por parte del autor de este trabajo y otros colaboradores del mismo grupo de investigación, en el Área de Materiales Compuestos del INTA. El trabajo realizado ha consistido en la laminación de los paneles de carbono y la preparación de los paneles de las uniones adhesivas para el ciclo de curado del adhesivo, el trabajo ha sido supervisado por el personal responsable del área de fabricación. La preparación de las bolsas de vacío, la propagación de los ciclos de curado y el corte de las probetas ha sido realizado por el personal técnico del INTA.

Se han producido los paneles descritos en la tabla 3.3. Las tareas que se han realizado en cada etapa del proceso de producción de las probetas se resumen en la tabla 3.4.

3.4.6.1. Etapa 1: corte de los preimpregnados

En esta etapa se han definido los esquemas de corte de los preimpregnados de carbono y de fibra de vidrio. Las láminas de carbono se han cortado a 0°, 90° y a ±45°, y las láminas de fibra de vidrio a ±45°. Los preimpregnados tienen un papel protector en una de sus caras, para evitar el contacto entre ellas dentro de la bobina. Se han cortado las láminas de la cinta bobinada junto con el papel protector.

El **corte de láminas de carbono a 0° y 90°** se ha realizado con guillotina, se han cortado láminas de 300×300mm. En la figura 3.10 se indica la disposición de las láminas una vez cortadas para obtener las orientaciones a 0° y 90°.

El **corte de láminas de carbono a ±45°** se ha realizado con la mesa de control numérico. Para este tipo de láminas, se han tenido en cuenta la disposición de los solapes en las capas del laminado. En la figura 3.11 se indican los esquemas de corte de la secuencia de apilamiento de un laminado [(+45/ - 45)₄]_S. Para poder laminar más fácilmente la secuencia de apilamiento

Etapa	Descripción	Laminado sin tacones	Fractura interlaminar	Unión adhesiva	Laminado con tacones
1	Corte de los preimpregnados	•	•	•	•
2	Corte del adhesivo y los materiales auxiliares	•	•	•	•
3	Laminación de paneles o subpaneles	•	•	•	•
3a	Preparación pregrieta interlaminar		•		
4	Identificación panel/subpanel y preparación para el curado	•		•	•
5	Preparación bolsa de vacío	•	•	•	•
6	Ciclo curado de los preimpregnados	•	•	•	•
7	Extracción del tejido pelable	•	•	•	•
7a	Preparación de uniones adhesivas			•	
7b	Preparación de paneles con tacones				•
7c	Ciclo de curado del adhesivo			•	•
8	Recanteo del panel y corte de probetas	•	•	•	•

Tabla 3.4: Secuencias de fabricación de los distintos tipos de paneles: laminados con y sin tacones, uniones adhesivas, paneles para ensayos de fractura interlaminar.

se ha repetido el patrón de corte cada cierto número de láminas, no se ha podido aprovechar el 100 % del material. Las dimensiones de los recortes y el montaje de las láminas a $\pm 45^\circ$ se indican en las figuras 3.12 y 3.13.

El **corte de las láminas de fibra de vidrio** fue realizado por el personal del INTA con la mesa de corte (CNC). Se cortaron láminas de 350×300 mm orientadas a $\pm 45^\circ$.

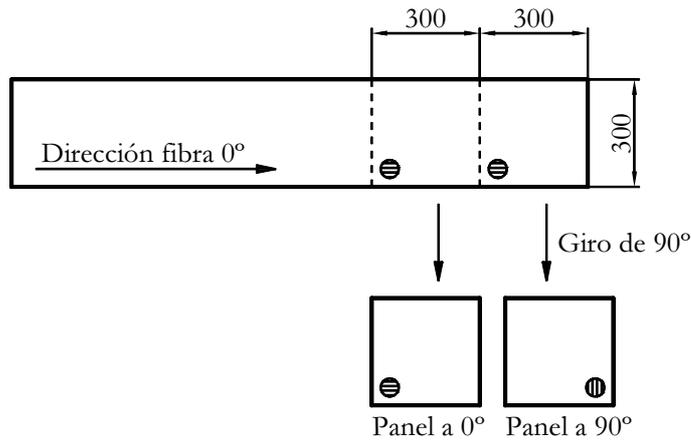


Figura 3.10: Corte y obtención de las láminas unidireccionales con orientaciones de la fibra a 0° y a 90°. Dimensiones en mm.

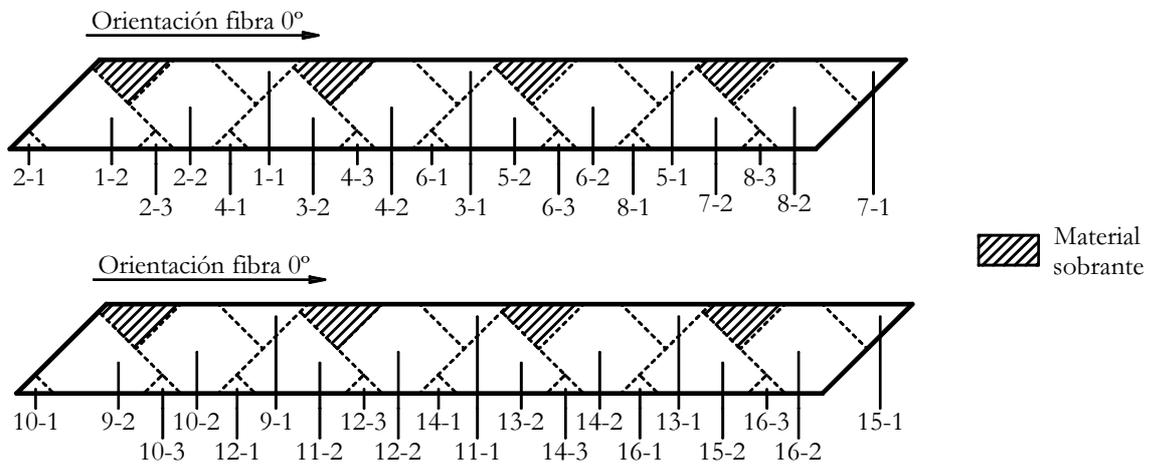


Figura 3.11: Tiras de material para cortar paneles a $\pm 45^\circ$ a partir de las cintas orientadas a 0°. El primer número indica la pieza y el segundo el recorte.

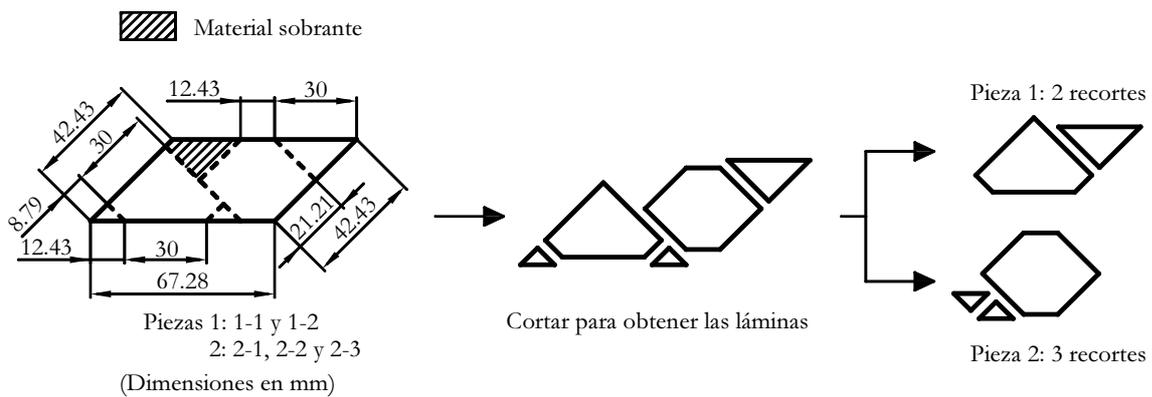


Figura 3.12: Dimensiones y corte de las piezas 1 y 2 de la figura 3.11.

3.4.6.2. Etapa 2: corte de los otros materiales

En esta etapa se definen los esquemas de corte de los adhesivos y de los materiales auxiliares: insertos de teflón y pelable.

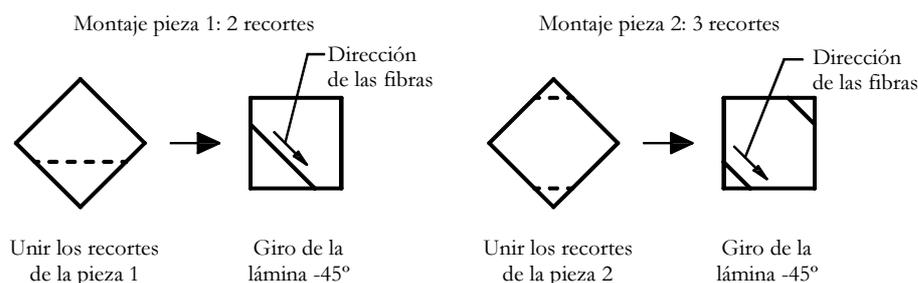


Figura 3.13: Montaje de los recortes de las piezas 1 y 2 de la figura 3.11.

El **corte de los insertos de teflón** se han realizado con un cúter. En la tabla 3.5 se indican las dimensiones de los cortes en función del tipo de probeta. Las dimensiones del corte incluyen un margen de 25 mm en los extremos, para fijar el inserto al panel.

Clase de panel	Long. pregrieta inicial [mm]	Ancho del panel [mm]	Tipo de inserto	Dimensiones corte teflón [mm x mm]
Unión adhesiva	60	300	Lámina doblada	350×220
Interlaminar	60	300	Lámina simple	350×110

Tabla 3.5: Dimensiones de los insertos de teflón en función del tipo de probeta y la longitud de la pregrieta

El **corte de las láminas de adhesivo** se ha realizado con cúter. Se ha dejado un margen de 2 mm desde el recorte de adhesivo y los extremos del panel para reducir la cantidad de adhesivo que sangra durante el curado. Se ha dejado el mismo margen entre el adhesivo y el inserto de teflón. Para un panel de 300×300 mm con una pregrieta inicial de 60 mm se ha cortado una lámina de adhesivo de 296×236 mm.

El **corte del pelable preimpregnado** se ha realizado con cúter. Se han cortado láminas de 400×400 mm para tener un margen de manipulación de unos 50 mm desde los bordes del panel.

3.4.6.3. Etapa 3: Laminación de los paneles y subpaneles

Para producir los paneles y subpaneles se han realizado las siguientes operaciones:

1. Se ha fijado la primera capa del laminado a un soporte por la parte del papel protector, situando en la parte superior la lámina de composite. Se ha orientado la dirección de las fibras a 0° del laminado en paralelo al soporte horizontal, ver figura 3.14.
2. Se ha colocado la segunda capa del panel según la orientación deseada, poniendo en contacto las láminas de composite y dejando el papel protector de la segunda lámina en la parte superior, ver figura 3.15a.

3. Se ha pasado suavemente una espátula o un rodillo de teflón sobre el papel protector de la segunda lámina, para compactar manualmente el laminado. La compactación manual se ha realizado siguiendo la dirección de las fibra de la segunda capa, para no dañar el laminado, ver figura 3.15b.
4. Se ha retirado el papel protector de la segunda capa y se ha colocado otra lámina repitiendo los pasos 2 y 3, ver figura 3.15c.
5. Se han repetido los pasos 2 y 3 hasta completar la secuencia de apilamiento. Se han mantenido los papeles protectores en las capas exteriores del laminado, ver figura 3.15d.

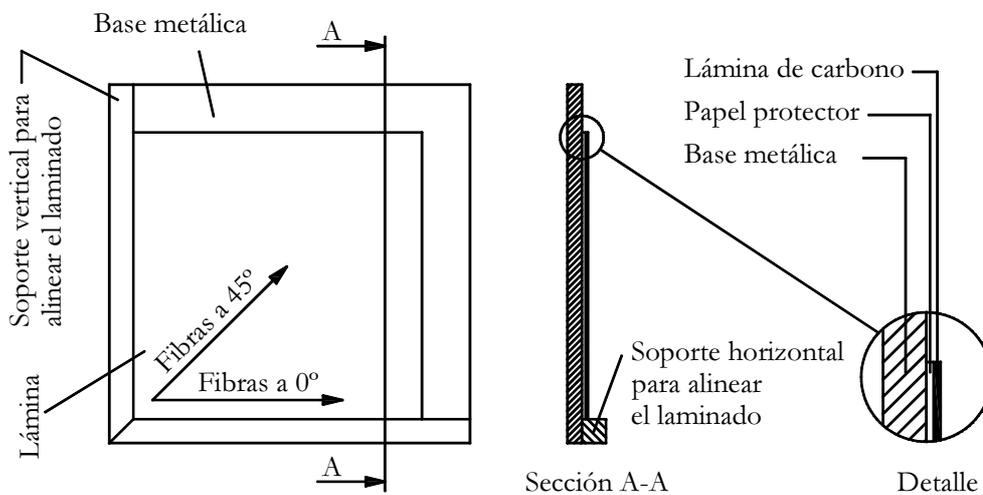


Figura 3.14: Fijación de la primera lámina sobre el soporte de aluminio.

En laminados de más de 6 capas de espesor, se ha interrumpido el proceso de laminación para compactar el laminado al vacío. El proceso de compactación se ha realizado cada 4, 5 o 6 capas, en función del número total de capas del laminado. En un laminado de 12 capas se han realizado 3 procesos de compactado cada 4 capas. En uno de 10 capas se ha realizado la compactación cada 5 capas. Y en uno de 6 capas se ha compactado una sola vez.

La compactación del laminado se ha realizado durante 5 minutos dentro de una bolsa de vacío. Antes de la compactación, se ha marcado el nombre del panel en el papel protector para identificar el laminado.

Para controlar el estado del proceso de laminación, en la hoja de acompañamiento del panel se han indicado la secuencia de laminación de capas y las operaciones de compactación a realizar. Cada operación de laminación o de compactación terminada se ha ido tachando en la misma hoja. Por ejemplo la secuencia de laminación: ~~0/90/0/90~~/c/0/90/90/0/c/90/0/90/0 indica que se trata de un laminado con una secuencia de apilamiento $[0/90]_{3s}$ con tres operaciones de compactación, en el cuál ya se han laminado 2 capas a 0° y 2 a 90° y se ha realizado una operación de compactación (c en la secuencia de laminación).

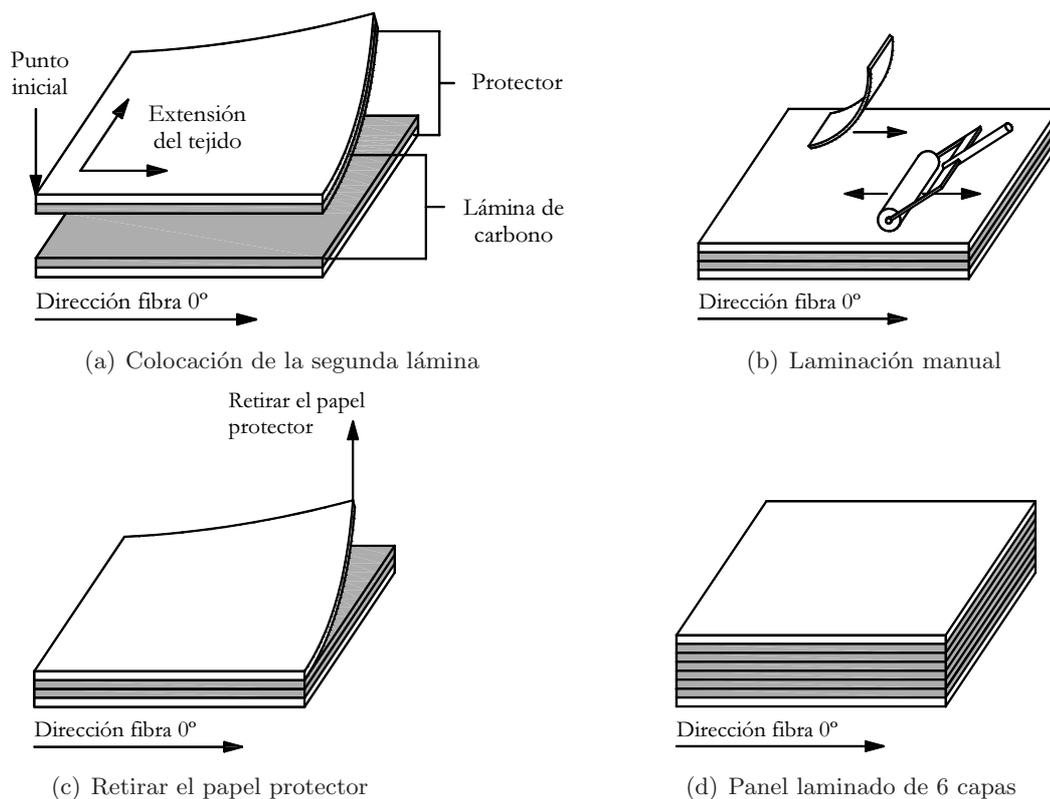


Figura 3.15: Etapas del proceso de laminado de un panel.

Una vez se ha terminado el proceso de apilamiento, y a modo de comprobación, se ha hecho el recuento de capas a partir del número de papeles protectores retirados, ya que una vez compactado el laminado es imposible distinguir su número de capas por observación visual.

La desviación angular máxima permitida entre 2 capas adyacentes ha sido de 2° . En un laminado con capas a 0° se ha considerado una desviación máxima de $[-2^\circ, 2^\circ]$, y en uno a $+45^\circ$ de $[+43^\circ, +47^\circ]$. Para no superar estos límites, se ha utilizado un soporte para alinear las capas durante su laminación, ver figura 3.14.

En las láminas orientadas a $\pm 45^\circ$, al realizar la composición de los cortes de la cinta bobinada se ha alternado su posición para no provocar puntos débiles en el panel. Para realizar la composición se han colocado las capas de material una al lado de la otra, no se han realizado superposiciones de material. Se han dejado un mínimo de 3 capas entre composiciones repetidas.

Si durante el proceso de laminación ha quedado alguna pequeña arruga entre las capas, ésta se ha eliminado pasando suavemente el rodillo o la espátula de teflón en la dirección de las fibras.

El laminado de los paneles se ha realizado a una temperatura entre 20 y 25 $^\circ\text{C}$. Laminar con temperaturas inferiores hubiera provocado una mala adherencia entre láminas. Laminar con temperaturas más altas hubiera provocado que se hubieron obtenido láminas demasiado pegajosas, dificultando su manipulación.

Las herramientas para laminar los paneles así como los procedimientos de laminación fueron proporcionados por el personal técnico especializado del INTA.

3.4.6.4. Etapa 3a: Preparación de la pregrieta interlaminar

Las probetas para ensayos de fractura interlaminar se han producido con una pregrieta inicial en uno de sus extremos. La pregrieta inicial se ha realizado colocando una lámina de teflón en el plano medio del laminado, ver figura 3.16.

Para colocar el inserto de teflón se han realizado los siguientes pasos:

- Se ha laminado la mitad del panel.
- Se ha marcado con un rotulador permanente blanco la cara externa del laminado para indicar la posición del frente de grieta (figura 3.16). A la longitud del frente de grieta deseada, se le ha sumado la longitud de recanteo¹, de 25 mm (para longitudes de pregrieta $A_0 = 60 \text{ mm}$ se ha hecho una marca a 85 mm desde el borde del laminado). La marca se ha extendido hacia los bordes de la cara interna del laminado, para tener dos puntos de referencia donde colocar el inserto.
- Se ha situado el inserto de teflón sobre la superficie de la cara interna del laminado.
- Se ha fijado el inserto de teflón al panel con cinta adhesiva.
- Se ha completado el resto del laminado, compactando al vacío el conjunto, una vez terminado el proceso de laminación.
- Finalmente, se ha identificado el panel con el código y la dirección de las fibras a 0° (ver figura 3.17). Y se ha añadido una capa de pelable preimpregnado sobre las caras externas del panel.

En la figura 3.16 se indican las dimensiones y la colocación de un inserto de teflón en un panel de $300 \times 300 \text{ mm}$ con una pregrieta inicial de $A_0 = 60 \text{ mm}$.

3.4.6.5. Etapa 4: Identificación del panel/subpanel y preparación para el curado

Para identificar los paneles se ha rotulado su código en una de las caras. Junto al nombre se ha indicado la dirección de las fibras orientadas a 0° , ver figura 3.17. Las marcas se han realizado con un rotulador permanente blanco para que permanecieran visibles después del curado y de la extracción del pelable.

Después de identificar el panel, se ha colocado el pelable preimpregnado sobre las caras del laminado, se han retirado los papeles protectores de los laminados y se ha extendido la lámina

¹El recanteo del panel se realiza para eliminar los bordes del panel con espesor variable

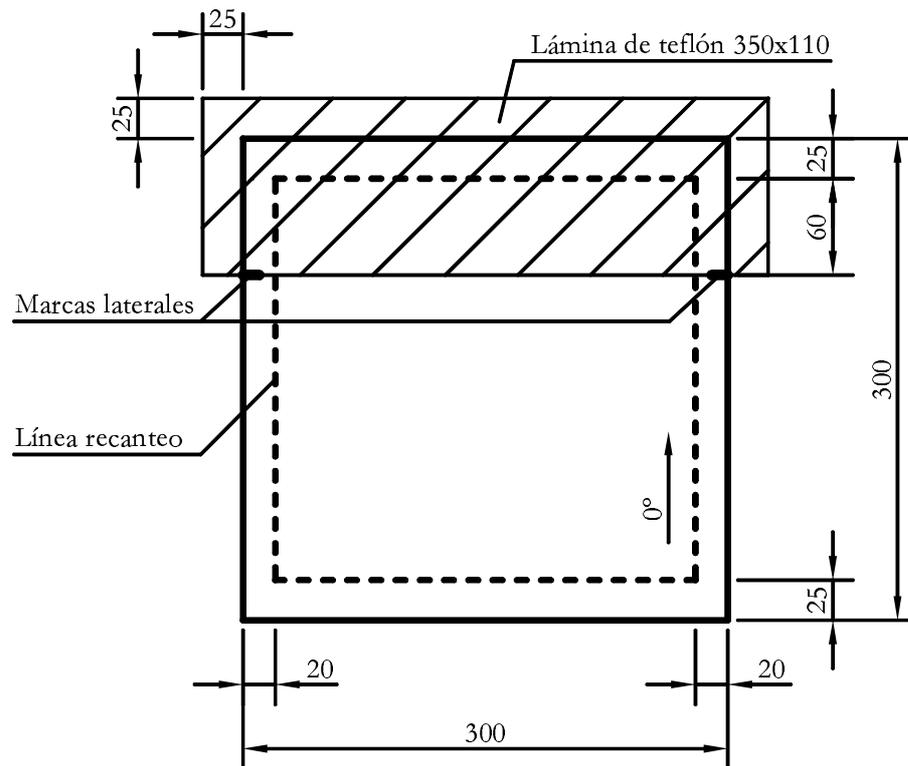


Figura 3.16: Colocación del inserto de teflón en un panel para ensayos de fractura interlaminar con $A_0 = 60 \text{ mm}$, dimensiones en mm.

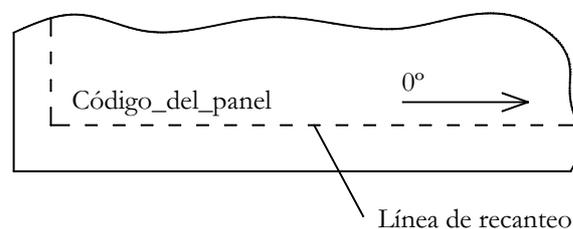


Figura 3.17: Identificación del panel y marca de orientación de las fibras a 0° .

de pelable. Finalmente se ha cortado la parte sobrante del pelable.

3.4.6.6. Etapa 5: Preparación de la bolsa de vacío

Los paneles de preimpregnado de carbono y los tacones de fibra de vidrio se han curado a 185°C y a presiones de 6.9 bar y las uniones se han curado a una temperatura entre 160 y 180°C y a una presión de 3.1 bar. El panel se ha curado dentro de una bolsa de vacío, de esta manera la presión del autoclave se ha aplicado uniformemente sobre el panel y, al mismo tiempo, se ha creado el vacío dentro de la bolsa para eliminar en lo posible la formación de burbujas de aire o microvacíos.

Se ha utilizado la misma configuración de bolsa para el curado de los adherentes y el encolado

secundario de las uniones¹, el esquema de montaje se indica en la figura 3.18.

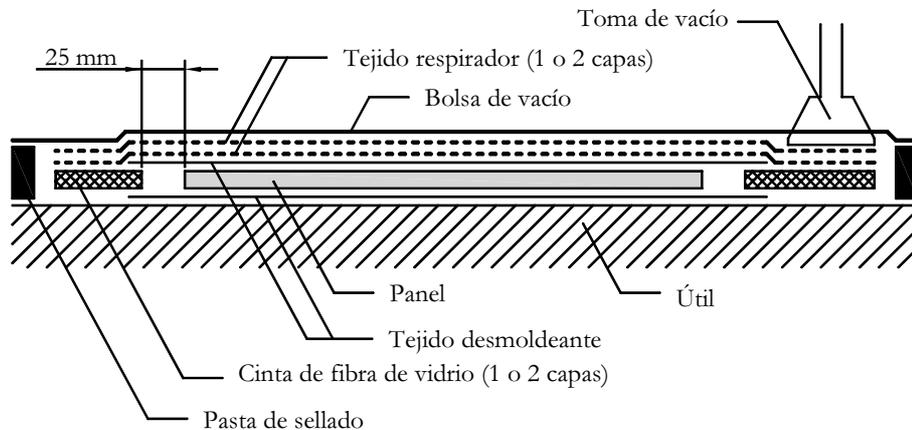


Figura 3.18: Montaje de la bolsa de vacío para el curado de los adherentes y el proceso de encolado secundario

El curado del panel se ha realizado sobre un útil consistente en una placa metálica lisa. Las láminas de teflón han actuado como agente desmoldeante (lámina inferior) y sellante (lámina superior) evitando el sangrado de la resina hacia el tejido respirador. La cinta de fibra de vidrio y el tejido respirador se han utilizado como canales de evacuación del aire, para crear el vacío dentro de la bolsa. En función del tipo de tejido respirador se han utilizado 1 o 2 capas (2 para el tejido *AIRWEAVE N-10* y 1 para el tejido *ULTRAWEAVE 1332*).

Durante el montaje de la bolsa, se ha dejado una distancia mínima de 25 mm entre el preimpregnado y la cinta de fibra de vidrio, para evitar que la resina del panel fluyera hasta la cinta. Sobre el tejido respirador se ha colocado el film de vacío para dar la estanqueidad a la bolsa. Para sellar los extremos de la bolsa se ha utilizado una pasta denominada masilla de cierre o dicromato.

Las referencias comerciales de los materiales auxiliares utilizados para elaborar la bolsa de vacío se indican en la tabla 3.6. Las especificaciones de los materiales se describen en el apartado 3.4.4 de este mismo capítulo.

Durante el proceso de laminación, la compactación de los paneles se ha realizado dentro de otra bolsa de vacío con la misma secuencia de montaje que las del proceso de curado. Sin embargo, esta bolsa se ha fabricado con materiales más resistentes al desgaste por el uso, de esta manera se pudieron compactar todos los paneles reutilizando una única bolsa.

Los montajes de las bolsas de vacío para el curado de los paneles y para las operaciones de compactación fueron realizados por el personal técnico especializado del INTA.

¹Encolado secundario de las uniones: proceso de fabricación de una unión adhesiva consistente en dos ciclos de curado. En el primer ciclo se curan por separado los paneles de carbono que constituyen los adherentes. En el segundo ciclo se cura el adhesivo de la unión.

Tipo de material	Referencia comercial
Bolsa de vacío	<i>NBF-100T</i> de <i>Tygavac</i>
Tejido respirador	<i>AIRWEAVE N-10</i> o <i>ULTRAWEAVE 1332</i> de <i>Airtech</i>
Cinta de fibra de vidrio	Cinta comercial
Film separador	<i>RF-242-B</i> de <i>Airtech</i>
Masilla de cierre	<i>GS-43 MR</i> de <i>Airtech</i>

Tabla 3.6: Material fungible para elaborar la bolsa de vacío

3.4.6.7. Etapa 6: Ciclo de curado de los preimpregnados

Se ha utilizado el mismo ciclo de curado para los preimpregnados de carbono y los de fibra de vidrio. El diagrama de presión y temperatura del ciclo se muestra en la figura 3.19.

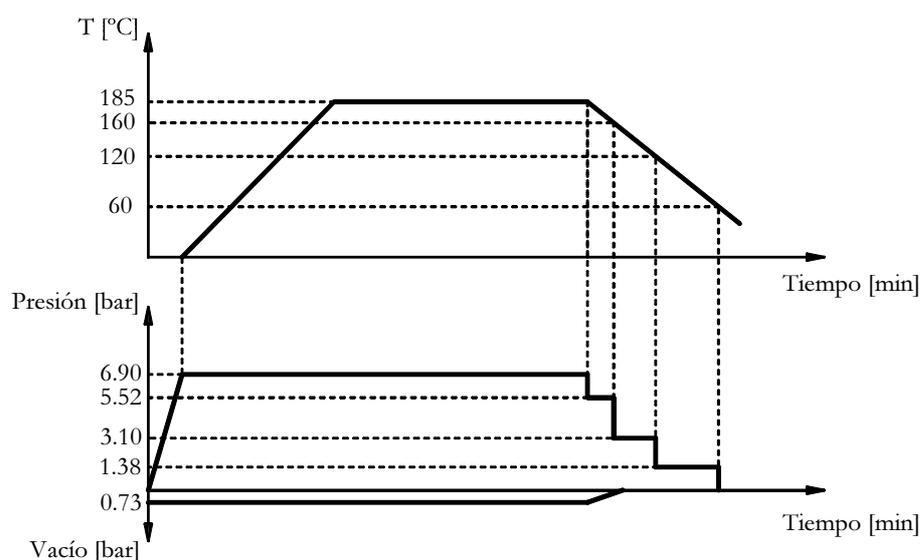


Figura 3.19: Valores de presión y temperatura para el curado en autoclave de los preimpregnados.

En la tabla 3.7 se definen los márgenes tolerables de variación de la velocidad de calentamiento, del tiempo de estabilización y de la velocidad de enfriamiento del ciclo.

El curado se realizó en dos autoclaves de la marca *Scholz*: uno con capacidad para 24 paneles y otro con capacidad para 8. La programación de los ciclos de curado y el seguimiento del curado de los materiales fue realizado por el personal técnico especializado del INTA.

3.4.6.8. Etapa 7: Extracción del pelable

Una vez finalizado el proceso de curado se ha quitado el pelable de las caras de los paneles. En los subpaneles de las uniones adhesivas el pelable de la capa interna (capa de unión) se ha

Parámetro	Curado adherentes
Presión [bar]	6.9
Depresión dentro de la bolsa de vacío [bar]	0.73
Tiempo de calentamiento [min]	82 a 410
Temperatura estabilización [°C]	185±5
Tiempo de estabilización [min]	120 a 180
Tiempo de enfriamiento [min]	≥40
Temperatura de desmoldeo [°C]	≤60

Tabla 3.7: Parámetros de calentamiento, estabilización y enfriamiento del ciclo de curado.

retirado justo antes de realizar la unión adhesiva, para obtener una superficie libre de impurezas.

Para extraer el pelable del panel se ha realizado un pequeño corte en uno de los bordes. A continuación, se ha tirado del tejido pelable en dirección perpendicular a la orientación de las fibras hasta conseguir despegar toda una esquina del panel, evitando crear delaminaciones en la cara del panel (Flinn and Phariss, 2006). Seguidamente se ha tirado del resto del pelable hasta retirarlo totalmente de la superficie. Se ha repetido la operación en la otra cara del panel. Para cortar los bordes y para quitar el tejido se ha utilizado un cúter. Una vez retirado el tejido pelable del panel se han limpiado las superficies con alcohol isopropílico y con una gamuza. Durante la extracción del tejido pelable preimpregnado es recomendable protegerse las manos con unos guantes, porque las superficies del panel son muy abrasivas.

3.4.6.9. Etapa 7a: Preparación de las uniones adhesivas

Debido a la fluidez de la resina en las condiciones de curado, los paneles han presentado variaciones de espesor en los bordes. La cara superior del panel, sobre la cuál se ha aplicado presión, se ha deformado en los extremos. La cara inferior, que estaba en contacto con la base, ha permanecido lisa. Para fabricar las uniones adhesivas se han unido las caras inferiores de los paneles (ver figura 3.20), la zona que presentaba una variación del espesor se ha recanteado durante la operación del corte de las probetas.

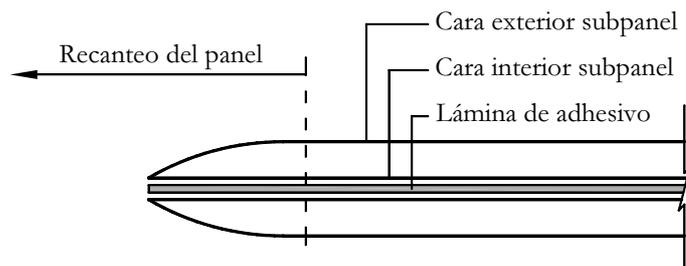


Figura 3.20: Detalle del extremo de la unión adhesiva durante su montaje.

Para producir la unión adhesiva, en primer lugar se ha colocado una lámina de teflón doblada para crear la pregrieta inicial, de manera equivalente a cómo se efectuaron los paneles para probetas de deslaminación, ver figura 3.5. El pliegue de la lámina se ha colocado hacia el interior de la probeta. Para alinear la lámina se ha empleado el mismo proceso que en las probetas de fractura interlaminar, mediante marcas laterales en la cara interior de los subpaneles. Antes de colocar el inserto se ha marcado la posición del frente de grieta en la cara superior del subpanel.

A continuación se ha colocado la lámina de adhesivo. Se ha quitado uno de los papeles protectores del adhesivo para fijarlo al panel. Se ha extendido el adhesivo dejando un margen de 2 mm hasta el borde del panel y hasta el inserto de teflón, ver figura 3.21, el corte de los adhesivos fue realizado teniendo en cuenta este margen. Con esta operación se ha reducido, durante el curado, la cantidad de adhesivo que ha sangrado hacia el exterior del panel.

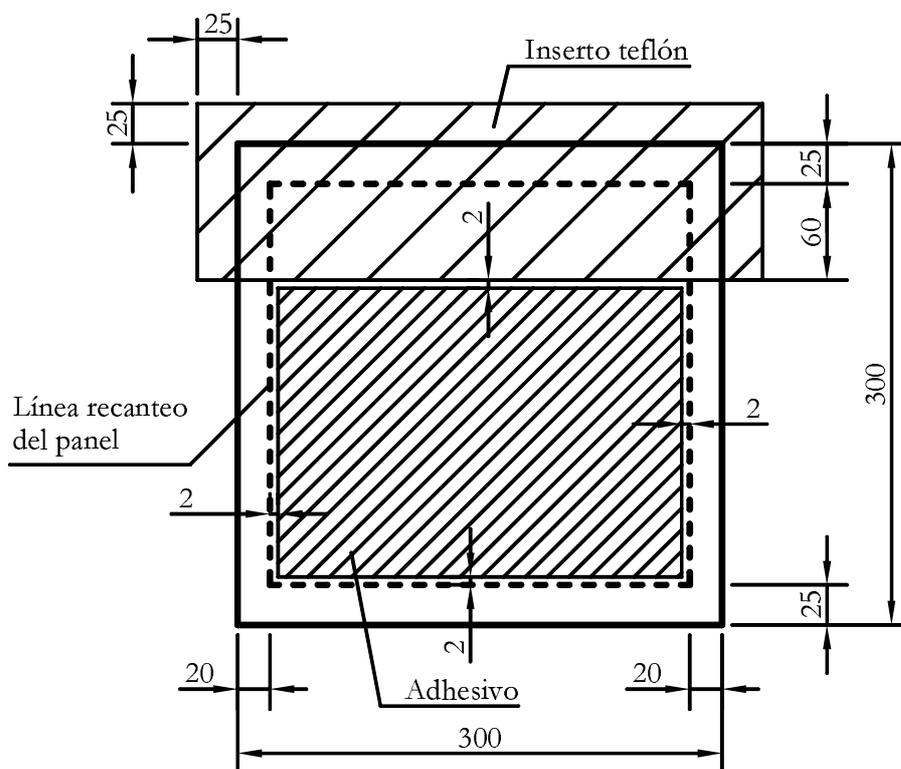


Figura 3.21: Montaje de una unión adhesiva con una pregrieta inicial de 60 mm. Dimensiones en mm.

Una vez fijado el adhesivo se ha retirado el otro papel protector y se ha colocado el segundo subpanel encima, ver figura 3.20.

Durante el curado, se han fijado los subpaneles por las 4 esquinas para evitar su deslizamiento, debido a la fluidez del adhesivo. Se ha utilizado cinta adhesiva de alta resistencia a la temperatura. Para evitar que el resto del panel se ensuciara por el sangrado del adhesivo, se ha colocado una lámina de teflón en cada cara, ver figura 3.22. De esta forma se ha conseguido que, una vez realizado el recorte del panel, su superficie quedara completamente limpia.

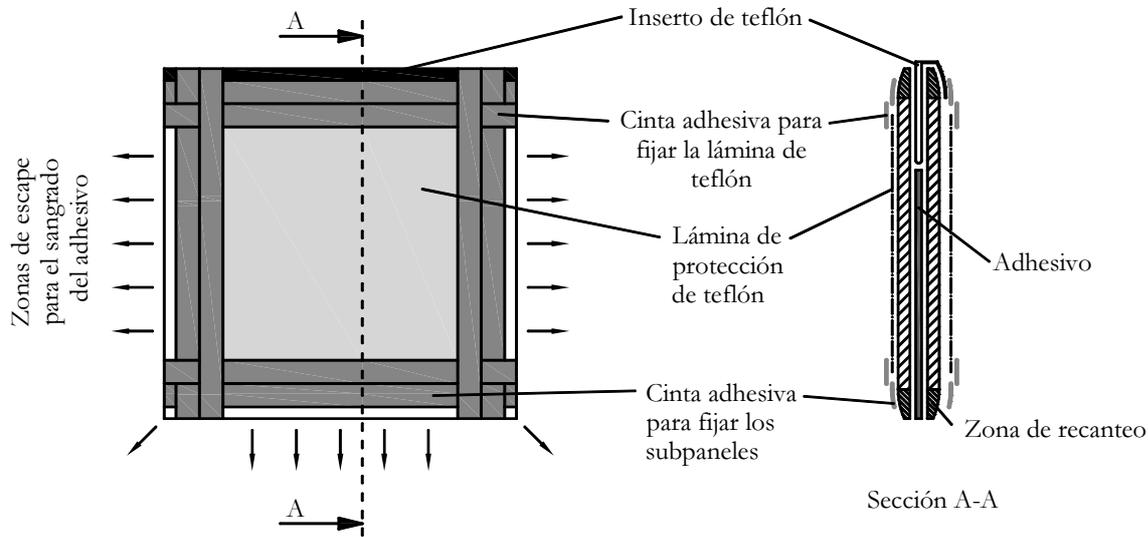


Figura 3.22: Encintado de una unión adhesiva.

3.4.6.10. Etapa 7b: preparación de paneles con tacones de fibra de vidrio

Se han añadido tacones de fibra de vidrio a los laminados unidireccionales orientados a 0° y 90° , de las probetas para ensayos de tracción longitudinal y tracción transversal.

Los tacones se han obtenido de un panel de 350×300 mm. El laminado tenía 8 capas de preimpregnado de fibra de vidrio con una secuencia de apilamiento $[+45/-45]_{2S}$. El ciclo de curado de los tacones ha sido el mismo que el de curado de los paneles de carbono, figura 3.19.

Una vez finalizado el curado, se ha recantado el panel y se han cortado los tacones para poder unirlos a los paneles de carbono, ver figura 3.23. Al realizar el recorte y el corte de los paneles debe tenerse en cuenta, en los esquemas de corte, que el ancho del disco de la máquina de corte es de 2 mm.

Antes de unir los tacones se han recantado dos bordes opuestos del panel de carbono, ver figura 3.24, para tener un espesor constante en la zona de unión. Los otros dos laterales se han recantado una vez curada la unión.

Para unir los tacones se ha utilizado el adhesivo FM300K. Se han curado los tacones en el mismo ciclo que el curado del adhesivo de las uniones adhesivas. Para evitar el deslizamiento de los tacones se han encintado los paneles. El esquema se ha indicado en la figura 3.25. Se han creado agujeros en el encintado para tener zonas de sangrado del adhesivo.

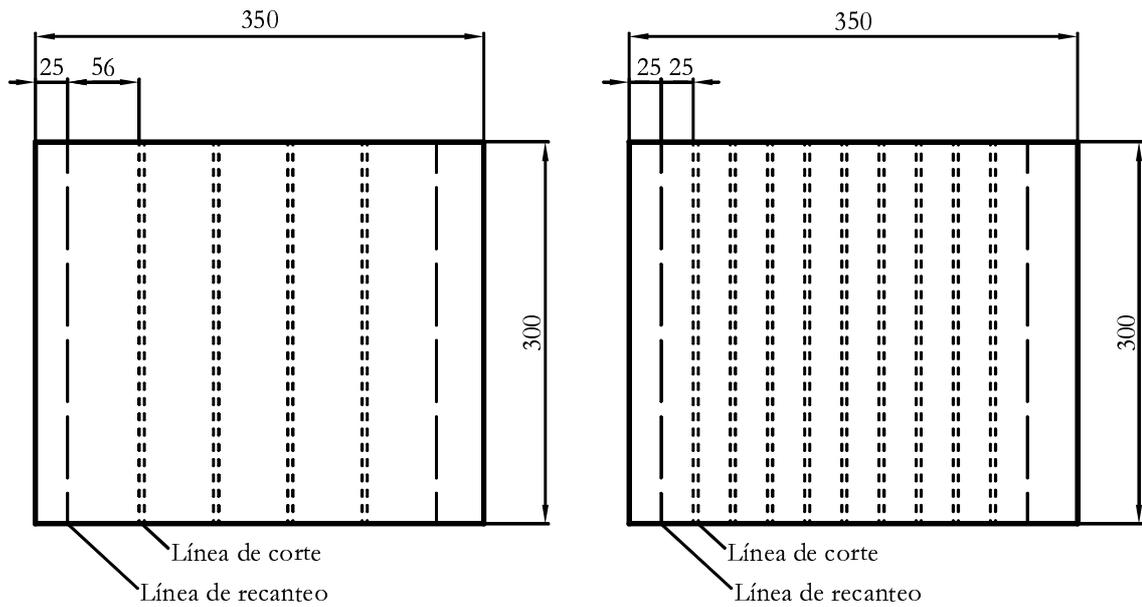


Figura 3.23: Esquema de corte de los tacones de fibra de vidrio: probetas para ensayos de tracción longitudinal (izquierda) y tracción transversal (derecha). Dimensiones en mm.

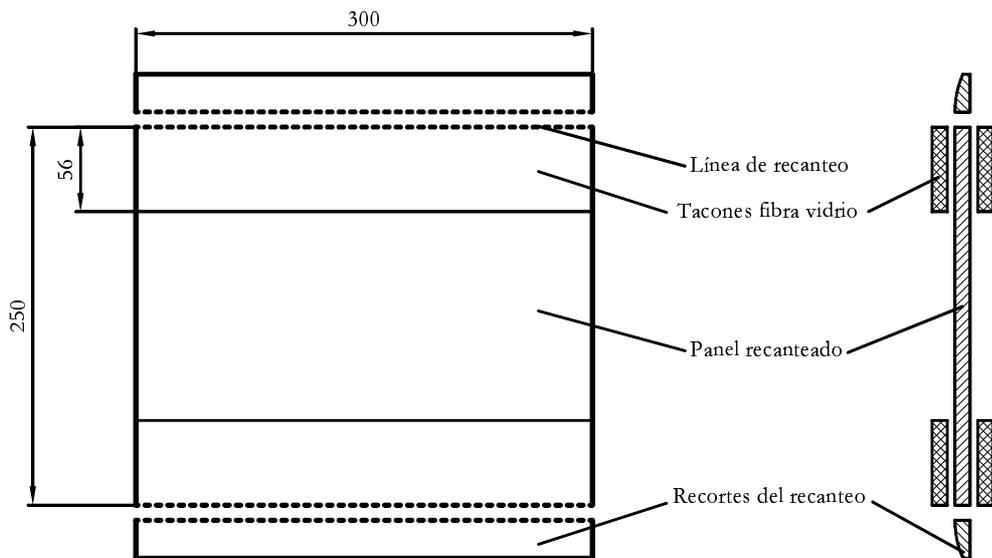


Figura 3.24: Recanteo de los paneles a los cuales se adherirán los tacones. Dimensiones en mm.

3.4.6.11. Etapa 7c: Ciclo de curado del adhesivo

El diagrama de presión y temperatura del ciclo de curado de los adhesivos se indica en la figura 3.26.

En la tabla 3.8 se definen los márgenes de variación de la velocidad de calentamiento, el tiempo de estabilización y la velocidad de enfriamiento del curado de los adhesivos para uniones adhesivas y para los paneles con tacones. El curado se ha realizado en un autoclave.

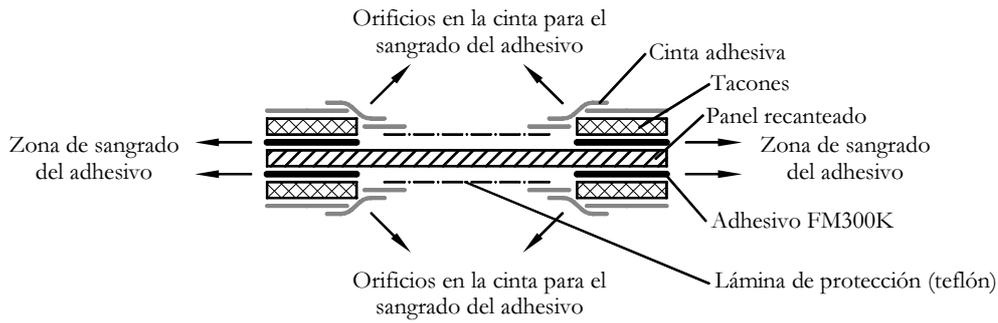


Figura 3.25: Esquema para encintar los tacones a los paneles de carbono.

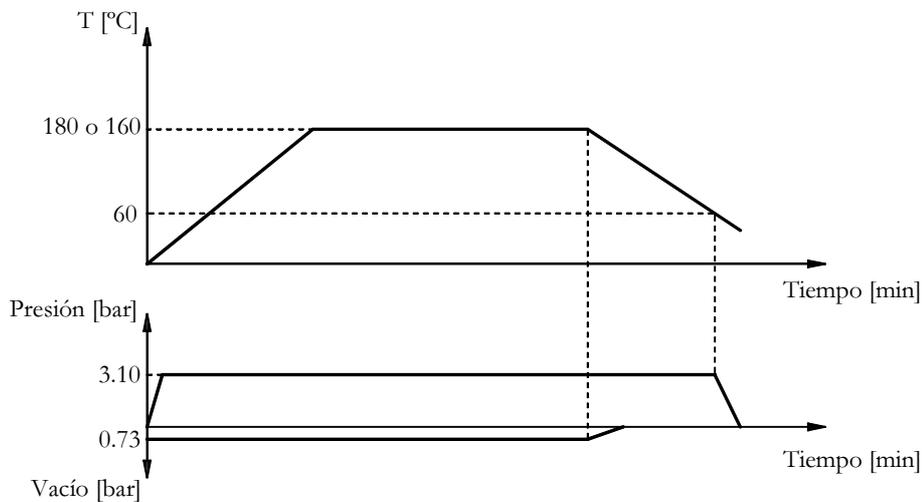


Figura 3.26: Valores de presión y temperatura para el curado de adhesivos en autoclave. Las uniones adhesivas se han curado a 180°C o 160°C.

Parámetro	Encolado secundario
Presión [bar]	3.1
Depresión dentro de la bolsa de vacío [bar]	0.27 a 0.33
Tiempo de calentamiento [min]	57 a 285
Temperatura estabilización [°C]	180±5 o 160±5
Tiempo de estabilización [min]	120 a 180
Tiempo de enfriamiento [min]	≥43
Temperatura de desmoldeo [°C]	≤60

Tabla 3.8: Parámetros de calentamiento, estabilización y enfriamiento del ciclo de curado de las uniones adhesivas.

3.4.6.12. Etapa 8: recantado de paneles y corte de probetas

Una vez curados los paneles, estos presentan una variación de su espesor en los extremos, porque una parte de la resina ha fluido hacia los laterales. Antes de cortar las probetas se han eliminado los bordes del panel para tener un espesor constante, a esta operación se la llama recantar el

panel. Se ha recantado una distancia de 20 a 25 mm desde los bordes del panel.

El recanteo de los paneles y el corte de las probetas se ha realizado con un disco de diamante. Durante el proceso de corte, se ha refrigerado la probeta con taladrina.

Antes de cortar las probetas, se han marcado los paneles para conocer la posición de la probeta dentro del panel. El marcaje del panel se ha realizado en función del tipo de probeta. En la figura 3.27 se han indicado las marcas de un panel recantado para obtener probetas para ensayos de fractura interlaminar en modo I (DCB). Las marcas realizadas en cada panel y los esquemas de corte se han indicado en el Anexo C.

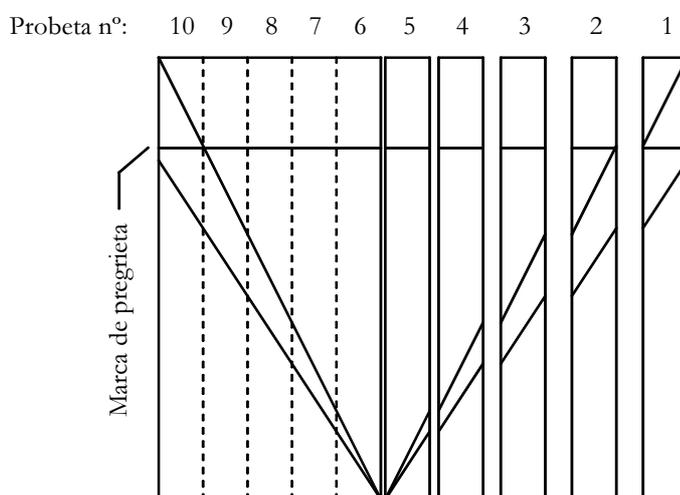


Figura 3.27: Marcaje de las probetas para conocer su posición dentro del panel

3.5. Ensayos Experimentales

En esta sección se describen los procedimientos de ensayo para caracterizar los adherentes de las uniones adhesivas. Se han obtenido las propiedades elásticas y los valores de la tenacidad a la fractura en modo I para la propagación de grietas interlaminares en los adherentes. Los resultados obtenidos se han utilizado para alimentar los modelos de elementos finitos (capítulos 5 y 6), para validar el diseño de unos nuevos utillajes de agarre del ensayo DCB (capítulo 4) y para alimentar los métodos de reducción de datos del ensayo de propagación de grieta por avance forzado de cuña (capítulo 7).

3.5.1. Trazabilidad de las probetas

Para hacer un seguimiento de las operaciones realizadas, y garantizar la trazabilidad, se ha acompañado cada probeta de una hoja de control de ensayo. En esta hoja se han incluido los siguientes datos:

- Información de la probeta: código, tipo de material y dimensiones.
- Operaciones realizadas: preparación de la probeta antes de realizar el ensayo experimental (mediciones y acondicionamiento) e información del ensayo experimental (temperatura, humedad y velocidad de ensayo).
- Incidencias: se han indicado las particularidades o datos adicionales del ensayo experimental.

Los ensayos se han agrupado por lotes de probetas y éstos, a su vez, por campañas de ensayo. El lote se define como un conjunto de probetas de idéntica configuración, a las cuales se les ha realizado el mismo tipo de ensayo experimental. El lote de probetas puede estar compuesto por probetas de paneles distintos, sin embargo estos deben tener las mismas propiedades en cuanto a material, secuencia de apilamiento, dimensiones y proceso de fabricación. Se define la campaña de ensayos como un conjunto de uno o más lotes de probetas con un objetivo experimental común, por ejemplo la caracterización de las propiedades elásticas de un composite o determinar la tenacidad a la fractura de un adhesivo.

Para codificar las probetas se ha tomado como referencia el sistema de codificación de los paneles. Al código del panel se le ha añadido un número que indica la posición física de la probeta dentro del panel. Como ejemplo, en la figura 3.28 se indica el código de la tercera probeta del panel T1/F1/01.

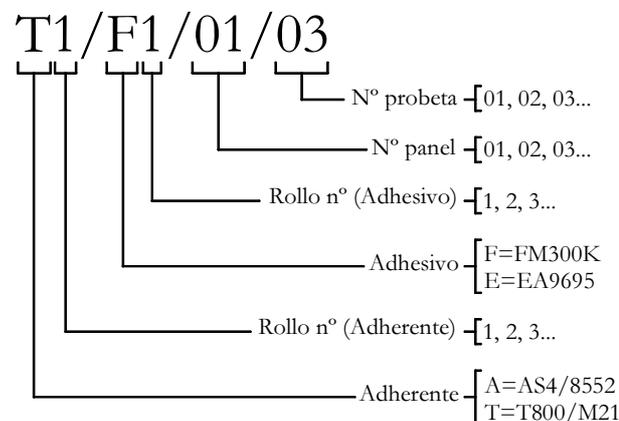


Figura 3.28: Ejemplo del sistema de codificación en una de las probetas.

3.5.2. Medición del ancho y espesor de las probetas

Para determinar la sección de las probetas se han realizado mediciones del ancho y del espesor. Estos parámetros se han utilizado posteriormente para calcular los valores de tensión o deformación. También son parámetros necesarios para el cálculo de la tenacidad a la fractura en los ensayos DCB. A partir de las mediciones realizadas, se ha comprobado que la variación de espesor a lo largo de la probeta estuviera dentro de la tolerancia especificada en la norma de ensayo.

Se han realizado 3 mediciones de anchura en 3 secciones distintas de la probeta: X, Y y Z. Y 9 mediciones de espesor, 3 mediciones en cada una de las secciones X, Y y Z. La localización de las mediciones en relación a la geometría de la probeta se indican en la figuras 3.29, 3.30 y 3.31. Las mediciones se han realizado en zonas de la probeta sin tacones y sin pregrieta inicial.

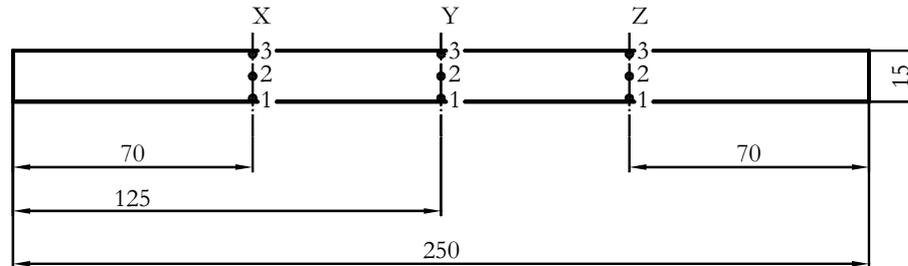


Figura 3.29: Puntos de medición del ancho y del espesor de las probetas de 250×15 mm. Probetas para ensayos de tracción longitudinal. Dimensiones en mm.

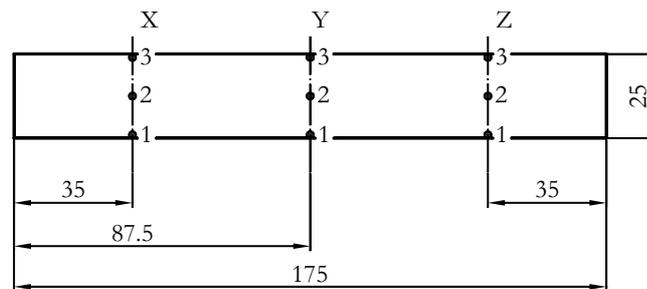


Figura 3.30: Puntos de medición del ancho y del espesor de las probetas de 175×25 mm. Probetas para ensayos de tracción transversal y cortadura en el plano. Dimensiones en mm.

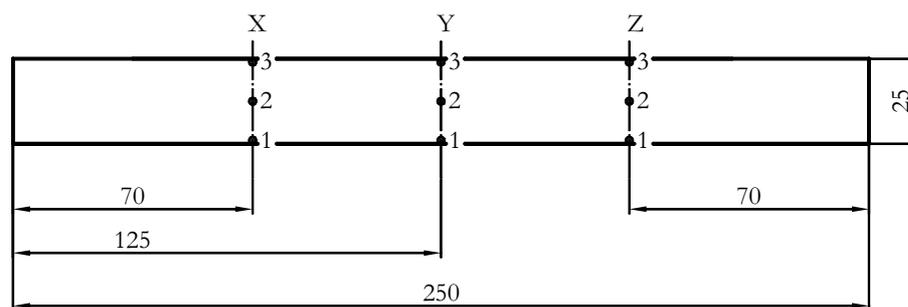


Figura 3.31: Puntos de medición del ancho y del espesor de las probetas de 250×25 mm. Probetas para ensayos DCB y uniones adhesivas. Dimensiones en mm.

3.5.3. Acondicionamiento de las probetas

Una vez producidas las probetas, éstas se han almacenado en un desecador hasta el día del ensayo.

Las probetas se han mantenido en un ambiente seco para evitar que absorban humedad durante su almacenamiento. Los ensayos experimentales se han realizado a temperatura ambiente.

3.5.4. Equipos

En esta sección se describen los equipos que se han utilizado para realizar los ensayos experimentales de caracterización: máquinas de ensayo y transductores. En el Apéndice B se detallan las especificaciones técnicas de todos los equipos utilizados.

3.5.4.1. Máquinas de ensayo

Para caracterizar los adherentes se han utilizado 3 máquinas universales para ensayos a tracción, ver tabla 3.9, en función del tipo de ensayo (carga máxima requerida) y de su disponibilidad en el laboratorio.

Máquina	Fabricante	Carga máxima	Célula de carga	Rango de la célula	Ensayo experimental
MTS 810	<i>MTS</i>	250 KN	250 KN 250 KN	250 KN 25 KN	Tracción Longitudinal Cortadura en el plano
MTS 858	<i>MTS</i>	25 KN 25 KN	25 KN 1 KN	25 KN 1 KN	Tracción Transversal Pruebas iniciales WDT
MTS Insight 100	<i>MTS</i>	100 KN	10 KN	1 KN	Preagrietamiento y DCB

Tabla 3.9: Máquinas de ensayo utilizadas para caracterizar las propiedades de los adherentes.

3.5.4.2. Transductores

En los ensayos de tracción longitudinal, tracción transversal y cortadura en el plano se han utilizado dos extensómetros para medir la deformación de la probeta:

- Extensómetro axial *MTS 634.25*: para medir las deformaciones longitudinales de la probeta. El transductor tiene un rango de 0 a $5 \cdot 10^5 \mu\epsilon$ y permite medir la deformación hasta la rotura de la probeta.
- Extensómetro biaxial *Epsilon 3560*: para medir deformaciones longitudinales y transversales de la probeta. El transductor tiene un rango de $\pm 5 \cdot 10^4 \mu\epsilon$ para deformaciones longitudinales y $\pm 5000 \mu\epsilon$ para deformaciones transversales. Se ha evitado utilizar este sensor hasta la rotura de la probeta para preservar su integridad.

3.5.5. Procedimientos para caracterizar las propiedades elásticas de los adherentes y su resistencia

Para caracterizar las propiedades elásticas de los adherentes se han realizado 3 tipos de ensayos a tracción: tracción longitudinal, tracción transversal y cortadura en el plano.

3.5.5.1. Ensayos de tracción longitudinal

Los ensayos de tracción longitudinal, tracción en la dirección de las fibras, se han realizado según la norma ASTM D3039/D3039M-08. Se han obtenido las propiedades del módulo de Young en la dirección de las fibras (E_x), el coeficiente de Poisson en el plano del laminado (ν_{xy}), y la tensión máxima (σ_x^u) y deformación máxima (ϵ_x^u) en la dirección de las fibras.

El ensayo se ha realizado en dos etapas. Un primer ciclo de carga hasta superar ligeramente las 3000 $\mu\epsilon$ de deformación longitudinal de la probeta (para no dañar la probeta) y descarga hasta el cero de carga. Y un segundo ciclo de carga hasta la rotura de la probeta.

Del primer ciclo de carga se han obtenido los valores de E_x y ν_{xy} mediante el extensómetro biaxial. E_x se ha calculado a partir de la regresión lineal del rango de deformaciones entre 1000 y 3000 $\mu\epsilon$, ver la curva fuerza-desplazamiento en la figura 3.32(a). Y ν_{xy} a partir de la relación entre las deformaciones longitudinales y transversales, ver figura 3.32(b).

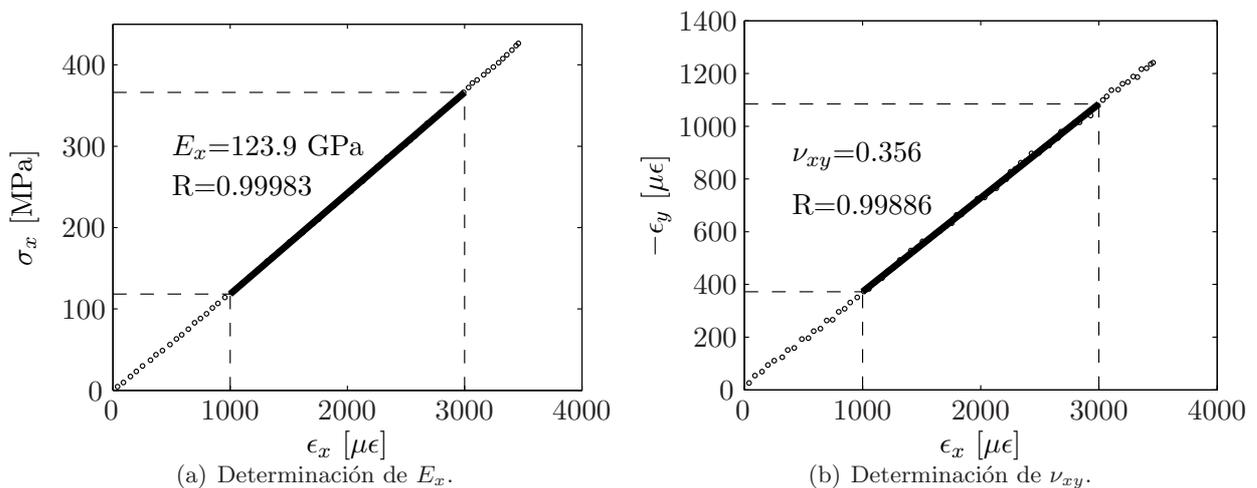


Figura 3.32: Ejemplo de la determinación de los parámetros E_x y ν_{xy} a partir de los datos del extensómetro biaxial. Datos experimentales de la probeta A1/01/05.

Del segundo ciclo de carga se han obtenido los valores de tensión y deformación máxima del material, σ_x^u y ϵ_x^u respectivamente. Se ha utilizado el extensómetro uniaxial para medir las deformaciones, ver figura 3.33.

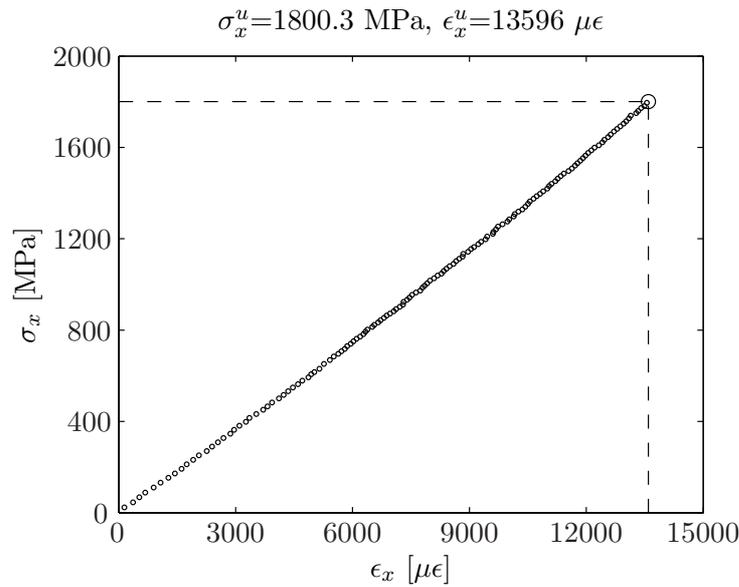


Figura 3.33: Ejemplo de la determinación de los valores de σ_x^u y ϵ_x^u a partir de los datos del extensómetro uniaxial. Datos experimentales de la probeta A1/01/05.

Se han realizado 5 ensayos experimentales válidos para obtener una población estadísticamente significativa, la lista de las probetas ensayadas se indica en la tabla 3.10. En el Volumen II se incluyen las hojas de datos de las probetas. Los ensayos se han realizado dentro de la campaña CARAC_1.

Campaña/Lote	CARAC_1/01	CARAC_1/02
Material	AS4/8552	T800S/M21
Probetas	A1/01/01	T1/01/01
	A1/01/03	T1/01/03
	A1/01/05	T1/01/05
	A1/01/07	T1/01/07
	A1/01/09	T1/01/09

Tabla 3.10: Ensayo de tracción longitudinal: listado de probetas.

3.5.5.2. Ensayos de tracción transversal

Los ensayos de tracción transversal, tracción en la dirección perpendicular a las fibras, se han realizado según la norma la norma ASTM D3039/D3039M-08. Se han obtenido las propiedades del módulo de Young (E_y), la tensión normal máxima (σ_y^u) y la deformación normal máxima (ϵ_y^u) en la dirección perpendicular a las fibras.

Para realizar el ensayo se ha aumentado la carga hasta la rotura de la probeta. En todas las probetas ensayadas la rotura se ha producido a un valor de deformación inferior a 6000 $\mu\epsilon$. Según

la norma de ensayos ASTM D3039/D3039M-08, si $\epsilon_y^u < 6000 \mu\epsilon$ para determinar el valor de E_y se debe tomar un rango de datos entre el 25 % y el 50 % de la deformación máxima a rotura (ϵ_y^u), ver figura 3.34.

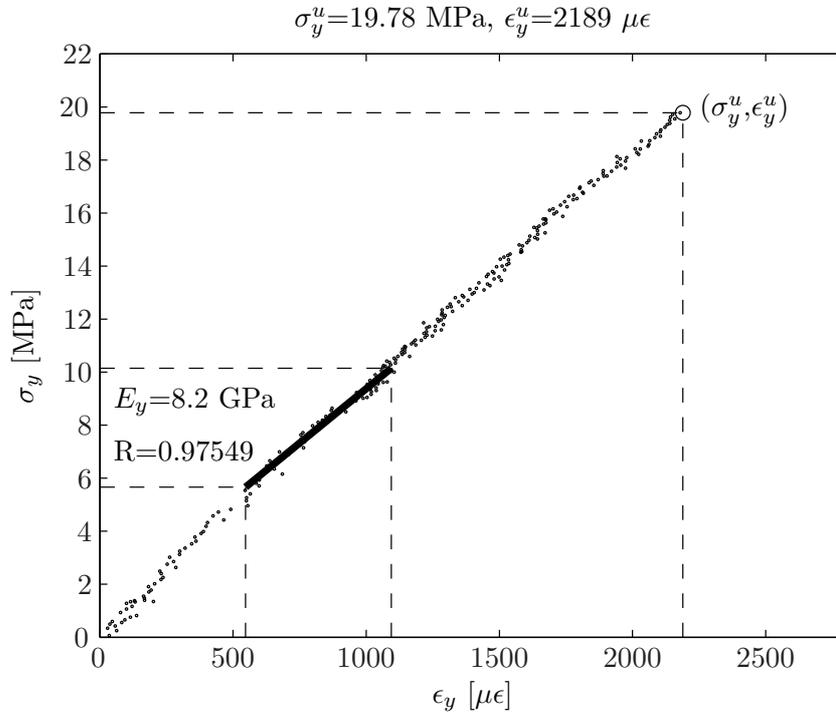


Figura 3.34: Ejemplo de la determinación de los valores de E_y , σ_y^u y ϵ_y^u del ensayo de tracción transversal. Datos experimentales de la probeta A1/12/06.

Se han analizado un total de 5 probetas de cada material, ver tabla 3.11. En el Volumen II se incluyen las hojas de datos de las probetas. Los ensayos experimentales se han realizado dentro de la campaña CARAC_5.

Campaña/Lote	CARAC_5/01	CARAC_5/02
Material	AS4/8552	T800S/M21
Probetas	A1/12/01	T1/15/01
	A1/12/02	T1/15/02
	A1/12/03	T1/15/03
	A1/12/04	T1/15/05
	A1/12/07	T1/15/06

Tabla 3.11: Ensayo de tracción transversal: listado de probetas.

3.5.5.3. Ensayos de cortadura en el plano

Los ensayos de tracción a cortante en el plano del laminado se han realizado según a norma ASTM D3518/D3518M-94(2007). Se han obtenido el valor del módulo a cortante (G_{xy}), la tensión cortante última (τ_{xy}^u) y la deformación a cortante última (γ_{xy}^u). El valor de G_{xy} se ha obtenido como el módulo secante entre tensiones y deformaciones en el rango de $2000 \mu\epsilon$ a $6000 \mu\epsilon$, según la norma ASTM D3518/D3518M-94(2007):

$$G_{xy} = \frac{\tau_{xy}(6000 \mu\epsilon) - \tau_{xy}(2000 \mu\epsilon)}{\gamma_{xy}(6000 \mu\epsilon) - \gamma_{xy}(2000 \mu\epsilon)} \quad (3.1)$$

Siendo la deformación cortante γ_{xy} :

$$\gamma_{xyi} = \epsilon_{xi} - \epsilon_{yi} \quad (3.2)$$

Dónde ϵ_{xi} y ϵ_{yi} son la deformación axial y transversal respectivamente. Estos valores han sido registrados mediante el extensómetro biaxial en cada instante de tiempo i .

El valor de γ_{xy}^u se han determinado a partir de la siguiente condición:

$$\gamma_{xy}^u = \min \begin{cases} 5 \% = 50000 \mu\epsilon \\ \gamma_{xy} \text{ en el punto de tensión cortante máxima} \end{cases} \quad (3.3)$$

Para determinar el valor de la deformación máxima a cortante (γ_{xy}^u) se ha realizado un ensayo preliminar en una de las probetas del lote. El ensayo se ha realizado en dos etapas. Inicialmente se ha cargado y descargado la probeta para determinar G_{xy} , y mediante un extensómetro biaxial se han tomado valores de la deformación longitudinal y transversal de la probeta. A continuación se ha cargado la probeta hasta la rotura para determinar el valor de γ_{xy}^u , se han tomado únicamente valores de la deformación longitudinal mediante el extensómetro axial.

De los datos de la segunda carga, se ha determinado el valor de la deformación cortante máxima de la probeta (γ_{xy}^u), ver figura 3.35(b). Se ha observado que el valor de la deformación cortante máxima del ensayo, hasta la rotura de la probeta, ha sido superior a $50000 \mu\epsilon$ (5%) en todas las probetas ensayadas. Por consiguiente, según la ecuación 3.3 $\gamma_{xy}^u = 50000 \mu\epsilon$. El valor de τ_{xy}^u se ha determinado a partir de γ_{xy}^u de la curva $\tau(\gamma)$.

El extensómetro biaxial tiene un rango de medición suficientemente amplio para obtener valores de la deformación a cortante superiores a las $50000 \mu\epsilon$ antes de llegar al umbral de saturación (γ_{xys}), ver figura 3.36. Como $\gamma_{xys} > 50000 \mu\epsilon$ solamente ha sido necesario realizar un solo ciclo de carga y descarga para el resto de las probetas, en este ciclo se han podido determinar todos los parámetros del ensayo: G_{xy} , τ_{xy}^u y $\gamma_{xy}^u = 50000 \mu\epsilon$.

Se han analizado 5 probetas de cada material, ver tabla 3.12. En el Volumen II se incluyen las hojas de datos de las probetas. Los ensayos experimentales se han realizado dentro de la

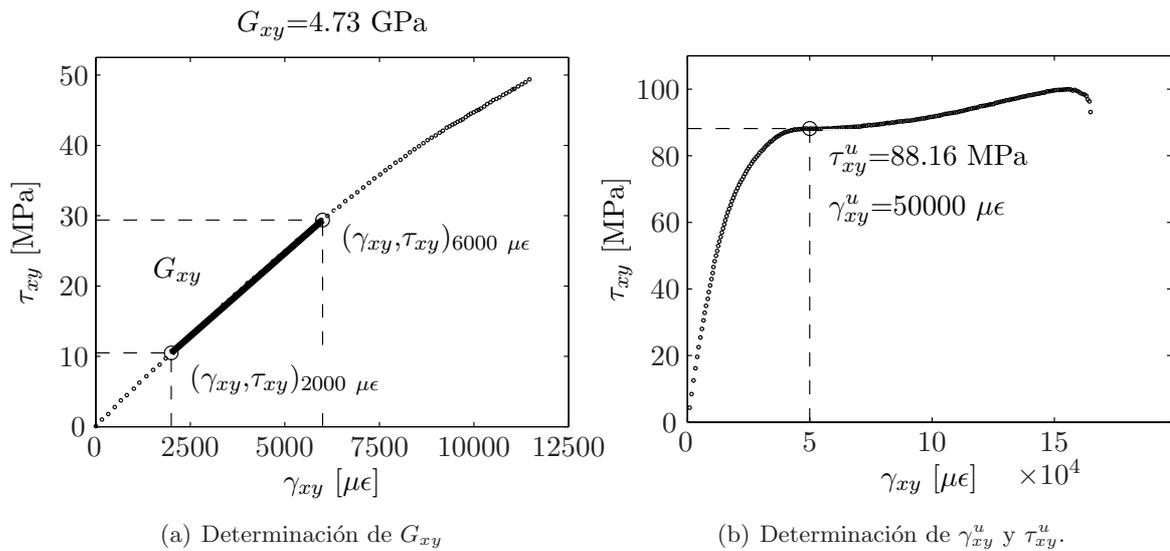


Figura 3.35: Ejemplo de la determinación de G_{xy} y la deformación a cortante máxima de la probeta A1/03/01.

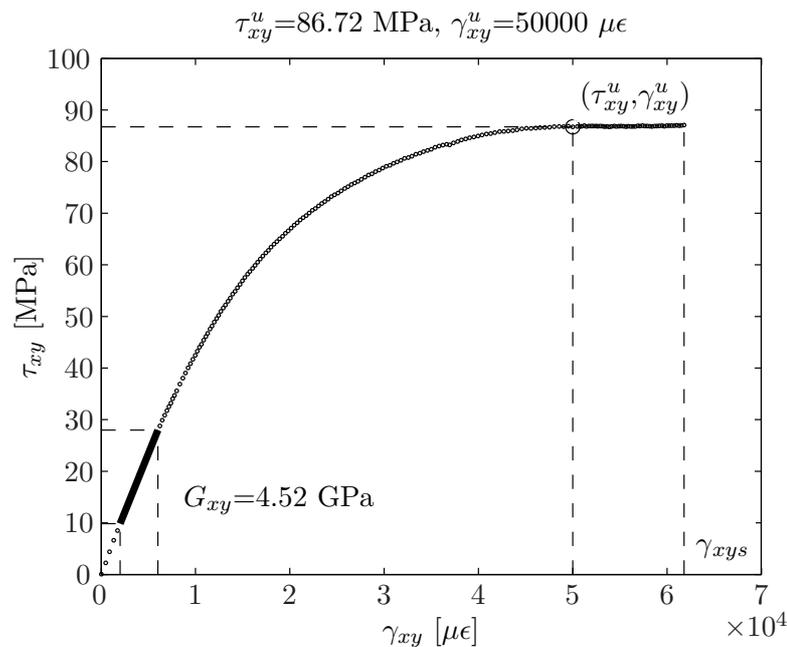


Figura 3.36: Ejemplo de la determinación de G_{xy} , τ_{xy}^u y γ_{xy}^u de un ensayo de cortante interlaminar en el cuál $\gamma_{xy}^u < \gamma_{xys}$. Datos experimentales de la probeta A1/03/05 en dos ciclos de carga y descarga.

campana CARAC.1.

3.5.6. Propiedades fuera del plano del laminado

No se han realizado ensayos experimentales para determinar las propiedades de los adherentes fuera del plano del laminado. El valor del coeficiente de Poisson (ν_{yz}) en el plano transversal se han obtenido de la literatura para los adherentes AS4/8552 (McGowan and Ambur, 1998) y T800S/M21 (Ilyas et al., 2009).

Campaña/Lote	CARAC_1/05	CARAC_1/06
Material	AS4/8552	T800S/M21
Probetas	A1/03/01	T1/03/01
	A1/03/03	T1/03/03
	A1/03/05	T1/03/05
	A1/03/07	T1/03/07
	A1/03/09	T1/03/09

Tabla 3.12: Listado de probetas para el ensayo de cortadura en el plano.

A partir de ν_{yz} se ha calculado el módulo a cortante fuera del plano (G_{yz}) con la ecuación 3.4, suponiendo que el material presentaba un comportamiento transversalmente isótropo. Los valores resultantes se indican en la tabla 3.13.

$$G_{yz} = \frac{E_y}{2(1 + \nu_{yz})} \quad (3.4)$$

3.5.7. Resultados de los ensayos de caracterización de los adherentes

En la tabla 3.13 se listan las propiedades elásticas de los adherentes. Los resultados individuales de cada probeta se detallan en el Volumen II.

	AS4/8552			T800S/M21			Ensayo
	Prom.	Desv. Est.	Coef. Var.	Prom.	Desv. Est.	Coef. Var.	
E_x [GPa]	120.9	3.7	3.1 %	134.7	4.1	3.0 %	Trac. longitudinal
E_y [GPa]	8.8	0.2	2.3 %	7.7	0.3	3.9 %	Trac. transversal
G_{xy} [GPa]	4.6	0.1	2.2 %	4.2	0.1	2.4 %	Cort. en el plano
ν_{xy}	0.354	0.013	3.7 %	0.369	0.012	3.3 %	Trac. longitudinal
ν_{yz}	0.40	-	-	0.50	-	-	Tomado de la lit. ¹
G_{yz} [GPa]	3.1	-	-	2.5	-	-	Calc. a partir de ν_{yz}
σ_x^u [MPa]	1743.9	94.5	5.4 %	2290.5	151.6	6.6 %	Trac. longitudinal
σ_y^u [MPa]	28.27	2.24	7.9 %	41.43	3.18	7.7 %	Trac. transversal
τ_{xy}^u [MPa]	86.97	0.84	1.0 %	69.40	0.49	0.7 %	Cort. en el plano
ϵ_x^u [$\mu\epsilon$]	13383	634	4.7 %	15462	999	6.5 %	Trac. longitudinal
ϵ_y^u [$\mu\epsilon$]	3306	300	9.1 %	5419	445	8.2 %	Trac. transversal
γ_{xy}^u [$\mu\epsilon$]	50000	-	-	50000	-	-	Cort. en el plano

Tabla 3.13: Valores promedios de las propiedades de los adherentes AS4/8552 y T800S/M21.

¹El valor de ν_{yz} para el material AS4/8552 se ha obtenido del trabajo de McGowan and Ambur (1998). Y el valor de ν_{yz} para el material T800S/M21 se ha obtenido del trabajo de Ilyas et al. (2009).

3.5.8. Procedimientos para determinar la tenacidad a la fractura para la deslaminación en modo I de los adherentes

En este apartado se describe el procedimiento para determinar el valor de la tenacidad a la fractura en modo I (G_{IC}) de los laminados de carbono. Se ha realizado una campaña de ensayos de doble viga en voladizo (DCB) según la norma ISO 15024.

3.5.8.1. Utillajes

Para sujetar la probeta a la máquina de ensayo se han utilizado los utillajes propuestos en la norma de ensayo AITM 1-0053, ver figura 3.37. Los utillajes se han fijado a la probeta con adhesivo de cianocrilato de la marca comercial *Loctite 496*.

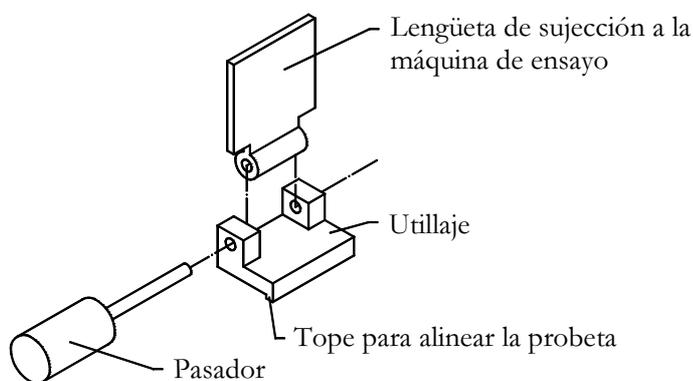


Figura 3.37: Utillajes de sujeción mecánica para fijar la probeta a la máquina de ensayo.

3.5.8.2. Preparación de las probetas para su ensayo

Antes de realizar el ensayo experimental se han pintado los laterales de la probeta con una fina capa de pintura blanca, para poder observar con exactitud la posición del frente de grieta durante el ensayo. Previamente se han protegido las caras superior e inferior de la probeta con cinta de carroceros.

3.5.8.3. Marcas realizadas en los laterales de la probeta

Las divisiones en los laterales de la probeta para medir la posición del frente de grieta se han marcado a las distancias recomendadas por la norma de ensayo ISO 15024. Las marcas verticales se han pintado con lápiz de punta fina.

En el caso de las probetas de T800S/M21, los resultados mostraron una marcada curva de la R (un valor creciente de G_{IC} en función de la longitud de grieta) que no ha alcanzado un valor estacionario hasta longitudes de grieta de 100-110 mm (figura 3.38).

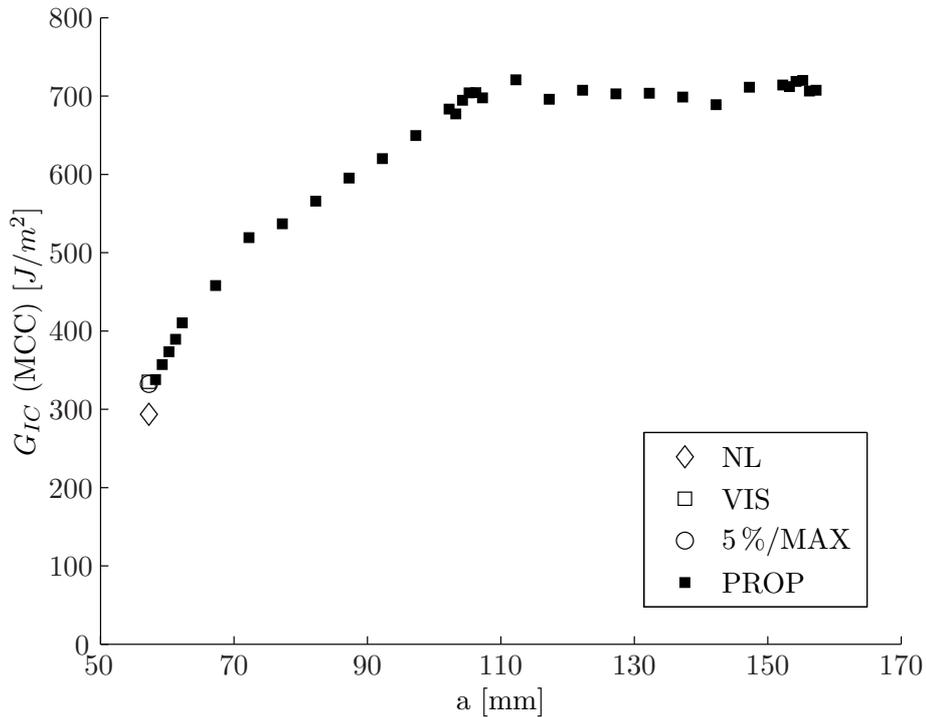


Figura 3.38: Representación de los datos de G_{IC} en función de a de la probeta T1/07/08, el valor de G_{IC} se estabiliza para valores de $a > 100mm$.

Para poder obtener datos de G_{IC} en esta región estable, se ha marcado una longitud de probeta mayor que la propuesta por la norma ISO 15024. Los primeros 50 mm se han marcado según las indicaciones de la norma, desde 50 mm a 95 mm se han hecho marcas verticales cada 5 mm, y desde 95 mm hasta 100 mm se han hecho marcas cada mm, ver figura 3.39.

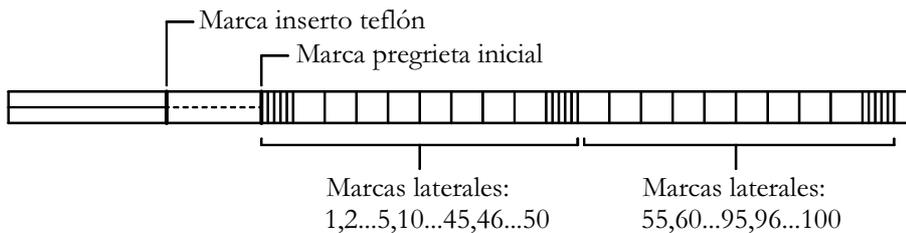


Figura 3.39: Marcate lateral de las probetas interlaminares de T800S/M21.

3.5.8.4. Ensayo de preagrietamiento y propagación

El preagrietamiento y la propagación de la grieta se han realizado según el procedimiento de ensayo descrito en la norma de ensayo ISO 15024. La velocidad de apertura de los brazos de la probeta ha sido de 5 mm/min. Una vez realizada la apertura de grieta se ha procedido a retornar a la posición de inicio con una velocidad de 25 mm/min.

Antes de realizar la operación de retorno se ha marcado con un rotulador de trazo fino el nuevo frente de grieta, en cada lateral de la probeta. A partir de las marcas realizadas se ha com-

probado la desviación lateral del frente de grieta. Para que el resultado del ensayo pueda ser considerado válido según los criterios de la norma, la desviación no debe superar los 2mm, indicando un avance de grieta constante en el ancho de la probeta. Las mediciones realizadas en todos los ensayos efectuados han cumplido con el margen de desviación indicado. En caso contrario se hubiera repetido el ensayo de preagrietamiento o se hubiera realizado otro ensayo de propagación con una probeta nueva.

3.5.8.5. Tratamiento de los datos experimentales, métodos de reducción de datos

El tratamiento de los datos experimentales se ha realizado según la norma de ensayos ISO 15024. La norma propone 2 métodos para determinar G_{IC} a partir de los datos de desplazamiento vertical de los brazos de la probeta (δ_y), fuerza en los brazos (P) y longitud de grieta (a): la teoría de vigas modificada (MBT) y la calibración experimental de la flexibilidad modificada (MCC).

Debido al diseño de los utillajes utilizados, se han considerado los dos parámetros correctores F y N propuestos por la norma ISO 15024 para corregir la rotación de los brazos de la probeta y la rigidez adicional causada por los utillajes.

3.5.9. Datos del ensayo

Del ensayo experimental se han determinado los valores de G_{IC} de iniciación y de propagación. La norma de ensayos ISO 15024 propone 4 métodos para determinar los valores de iniciación: a partir de la observación visual (VIS), a partir de la pérdida de linealidad (NL), la variación del 5 % de la flexibilidad (5 %) o el valor máximo (MAX) de la curva $P(\delta_y)$. De los resultados 5 % y MAX se elige el que presenta una δ_y menor.

Para determinar el punto de pérdida de linealidad y el incremento del 5 % de la flexibilidad, se ha calculado la pendiente inicial de la curva $P(\delta_y)$ tomando un rango de puntos, y realizando un ajuste mediante una recta de regresión lineal. A partir de la pendiente de la recta se ha calculado tanto el incremento del 5 % de la flexibilidad como el punto en que la curva ha empezado a perder la linealidad. Para dar completa objetividad a su determinación, el cálculo del punto de pérdida de linealidad (NL) se ha realizado a partir de la desviación estándar de la recta de ajuste lineal. Se ha considerado que la recta ha perdido la linealidad cuando en 3 puntos consecutivos se ha superado 2 veces el valor de la desviación estándar, calculada en la zona donde se ha ajustado la recta de regresión, ver figura 3.40.

3.5.10. Resultados de los ensayos DCB

La tabla 3.14 muestra las probetas ensayadas, las cuales forman parte de la campaña CARAC.6. Se han analizado un total de 5 probetas de cada adherente. Los ensayos experimentales se han realizado dentro de la campaña CARAC.6.

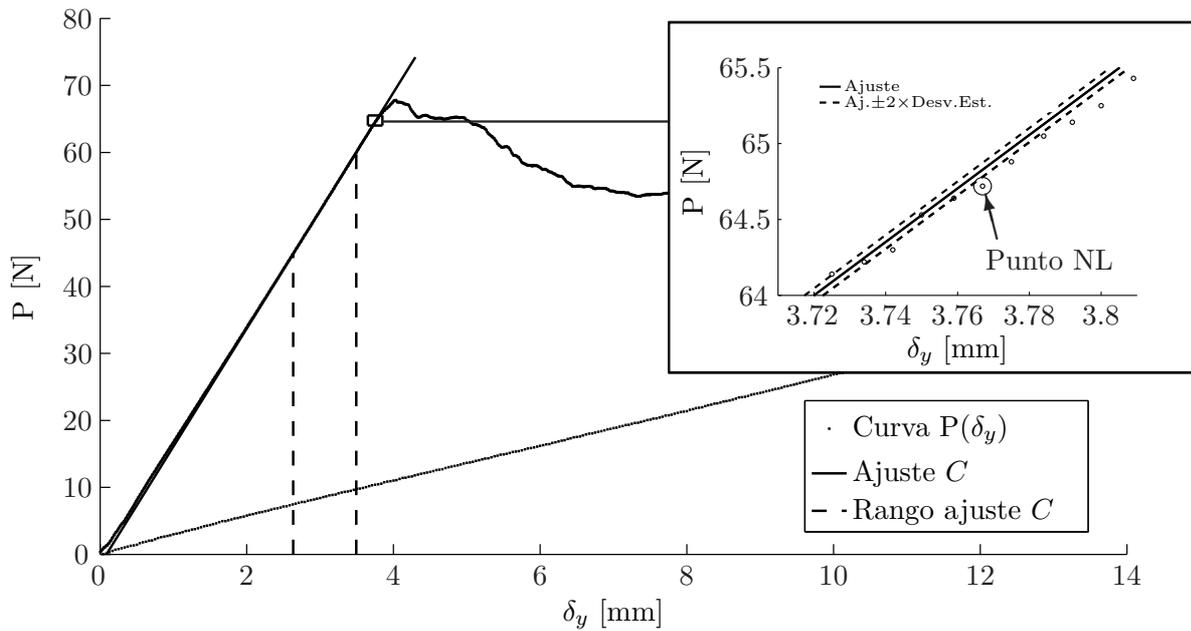


Figura 3.40: Curva del ensayo experimental de sujeción del utillaje a la probeta.

Campaña/Lote	CARAC_6/01	CARAC_6/01
Material	AS4/8552	T800S/M21
Probetas	A1/04/03	T1/04/03
	A1/05/06	T1/05/04
	A1/06/05	T1/06/10
	A1/06/10	T1/07/01
	A1/07/05	T1/07/08

Tabla 3.14: Listado de probetas para los ensayos de fractura interlaminar.

Los valores promedio de G_{IC} (iniciación y propagación) de los adherentes, se muestran en la tabla 3.15. Los resultados de cada probeta, así como la información de los ensayos, se incluyen en el Volumen II.

G_{IC} [J/m^2]		NL	VIS	5%/MAX	PROP ¹
AS4/8552	Promedio	232.4	253.7	249.1	283.9
	CBT Desv. Est.	14.2	13.3	16.1	12.2
	Coef. Var.	6.12 %	5.23 %	6.47 %	4.29 %
	Promedio	232.5	249.2	247.8	283.9
	MCC Desv. Est.	13.0	13.0	14.8	12.0
	Coef. Var.	5.61 %	5.22 %	5.99 %	4.23 %
T800S/M21	Promedio	270.8	323.0	314.8	675.9
	CBT Desv. Est.	31.7	23.5	27.0	48.1
	Coef. Var.	11.7 %	7.27 %	8.57 %	7.12 %
	Promedio	272.1	317.9	311.4	667.0
	MCC Desv. Est.	30.4	23.0	24.7	49.4
	Coef. Var.	11.2 %	7.24 %	7.93 %	7.40 %

Tabla 3.15: Valores de G_{IC} de iniciación y propagación de los adherentes AS4/8552 y T800S/M21.¹Valor promedio de G_{IC} de los 5 últimos datos de propagación.

Capítulo 4

Análisis y propuestas de mejora del ensayo DCB

4.1. Introducción

En este capítulo se realiza un análisis del ensayo de doble viga en voladizo (*double cantilever beam test*, DCB) como herramienta para evaluar la calidad de las uniones adhesivas entre adherentes de composite. El ensayo DCB es el que más habitualmente se utiliza porque permite el análisis de uniones con dos adherentes rígidos.

La empresa Airbus España utiliza este ensayo para evaluar la calidad de las uniones adhesivas en sus componentes estructurales, realizando los ensayos según el estándar AITM 1-0053. Su interés, y detonante de este trabajo, es conseguir modificar el procedimiento de ensayo para que sea más rápido, reproducible y menos costoso que el que está utilizando actualmente.

Como propuesta de mejora, se ha diseñado un nuevo utillaje de introducción de carga que permite reducir el tiempo de ensayo (en especial el tiempo de preparación y de colocación de la probeta en la máquina de ensayo). La solución presentada es un utillaje de agarre mecánico en los laterales de la probeta que se ha denominado *Side Clamped Beam*, SCB. Por otra parte, se ha definido una nueva metodología de tratamiento de los datos experimentales para obtener los valores de G_{IC} en presencia de una propagación a saltos (*stick-slip*) del frente de grieta, muy frecuente en el ensayo de uniones adhesivas.

Para validar el diseño de los utillajes se ha realizado una campaña experimental de ensayos de deslaminación, en la cual se han comparado los utillajes diseñados y los propuestos por la norma AITM 1-0053 que utiliza actualmente Airbus España.

Y finalmente, en la última parte de este capítulo, se describe la metodología experimental para analizar los métodos de tratamiento de datos del ensayo DCB con propagación de grieta a saltos (con *stick-slip*). A partir de la metodología experimental que se ha desarrollado en este capítulo se han llevado a cabo unas campañas experimentales (en el capítulo 8), cuyos resultados se han

comparado con los que se han obtenido a partir del método de ensayo alternativo que se describe en los capítulos 5-7.

4.2. El ensayo DCB para uniones adhesivas

El ensayo DCB se utiliza en la industria aeronáutica como ensayo de pelado para caracterizar la calidad de una unión adhesiva entre 2 adherentes de composite. Su principal virtud frente a otros ensayos alternativos es que permite analizar uniones adhesivas entre dos adherentes rígidos, pudiéndose evaluar el comportamiento de uniones fabricadas mediante procesos de encolado secundario o coencolado¹, utilizados de forma habitual en la industria aeronáutica.

En un principio, el ensayo DCB fue concebido para ensayos de deslaminación (ISO 15024 y ASTM D5528-01(2007)e3). Sin embargo, la norma americana ASTM D5528-01(2007)e3 también contempla su aplicación a la caracterización de uniones adhesivas. Recientemente se ha definido una norma específica de ensayo de pelado para uniones adhesivas también de tipo DCB: el estándar ISO 25217. Tal y como se ha comentado en la revisión del estado del arte del capítulo 2, este estándar se basa en la norma británica BS 7991 y en el protocolo desarrollado por Blackman and Kinloch (2001). Los métodos que se utilizan para determinar la tenacidad a la fractura en modo I del adhesivo son similares a los que se proponen en las normas para ensayos de deslaminación (ISO 15024 o ASTM D5528-01(2007)e3), y no se tiene en cuenta la contribución de la rigidez del adhesivo en el cálculo de la flexibilidad de los brazos de la probeta (C).

Por otra parte, las compañías aeronáuticas utilizan sus propios estándares de ensayo. El procedimiento de ensayo, tal y como está descrito en las normas, es difícil de aplicar en un entorno industrial, porque exige medir la longitud de grieta durante el ensayo. En particular, el fabricante Airbus ha creado su propio estándar AITM 1-0053.

4.2.1. Preparación de la probeta y duración del ensayo

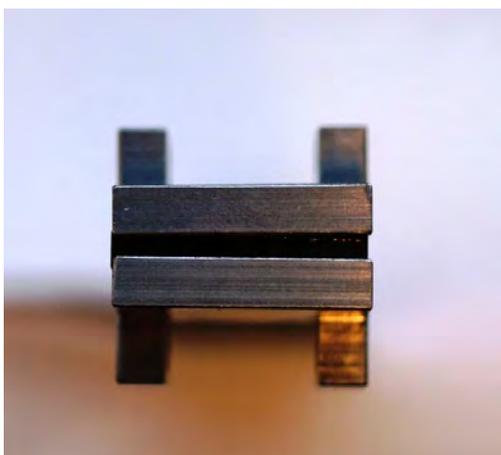
Uno de los aspectos que más tiempo, complejidad y coste introduce en el ensayo de doble viga en voladizo es la preparación de la probeta.

Durante la preparación, una de las tareas más sensibles al tiempo de ejecución es la unión de los utillajes de introducción de carga a la probeta. Las normas existentes proponen pegarlos con un adhesivo. Para llevar a cabo este proceso se realizan las siguientes operaciones: en primer lugar se preparan las superficies de las probetas puliendo la zona de unión, a continuación se aplica el adhesivo y finalmente se une el utillaje a la probeta. Para un curado completo de la mayor parte de los adhesivos se debe esperar un mínimo de 24 horas. Por otra parte, una vez terminado el ensayo, para poder reutilizar el utillaje, éste se debe separar de la probeta y eliminar los restos de

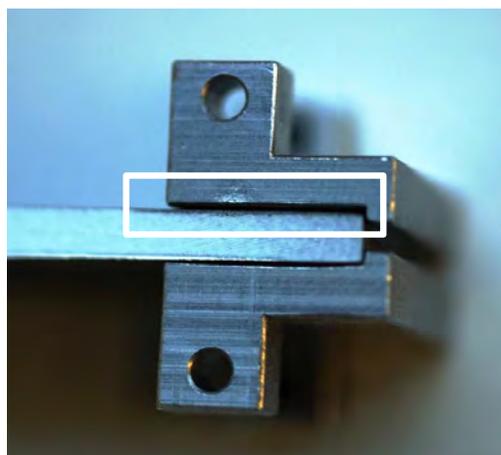
¹Coencolado: proceso de fabricación de una unión adhesiva en el cual primero se cura uno de los adherentes, y sobre el adherente curado, se realiza un segundo ciclo de curado del adhesivo y del otro adherente.

adhesivo que han quedado adheridos. Esta tarea se realiza mediante una inmersión en un medio que disuelve el adhesivo de los utillajes, proceso que conlleva una duración de otras 24 horas. En definitiva, hay que esperar más de dos días para poder realizar otro ensayo con los mismos utillajes. Si se utiliza este método es conveniente tener tantos utillajes como ensayos vayan a realizarse o, programar la secuencia temporal de las campañas de ensayo teniendo en cuenta el tiempo de preparación. En cualquier caso, el pegado de los utillajes es un paso laborioso y sensible a la destreza del operario.

Así mismo, la colocación de los utillajes depende de la calidad superficial de las probetas. Durante la campaña de ensayos experimentales para determinar G_{IC} de los adherentes, campaña CARAC_6 (ver capítulo 3), se detectaron los siguientes defectos en algunas de las probetas: falta de paralelismo entre la cara superior e inferior, e irregularidades en la zona de unión. Estos defectos causaron una mala unión entre el utillaje y la probeta, y por consiguiente, tuvieron que excluirse los correspondientes resultados experimentales.



(a) Pérdida del paralelismo de los ejes de rotación en los utillajes.



(b) Variación del espesor de la probeta en uno de los extremos. Zona de no adherencia entre el utillaje y la probeta.

Figura 4.1: Defectos en la unión de los utillajes causados por las irregularidades superficiales de las probetas.

La falta de paralelismo de las caras de las probetas, en algunos casos provocó una desalineación de los utillajes una vez adheridos a la probeta, ver figura 4.1(a), dificultando la colocación del pasador en la máquina de ensayo. Debido a esta desalineación, las fuerzas de apertura de los brazos de la probeta introdujeron momentos indeseados, por lo que se tuvieron errores en el cálculo de G_{IC} . Otras probetas presentaban irregularidades superficiales y el utillaje quedó mal adherido a su superficie, ver figura 4.1(b). Durante el ensayo experimental, el utillaje se separó de la probeta con la consiguiente interrupción del ensayo experimental.

La posibilidad de que los utillajes unidos a la probeta mediante adhesivos se despeguen durante el ensayo es todavía mayor en ensayos a temperaturas extremas o en ambientes húmedos.

4.3. Diseño de un utillaje de sujeción mecánica de la probeta

4.3.1. Motivación y precedentes

Las normas para ensayos de fractura interlaminar en modo I proponen dos alternativas para fijar las probetas a la máquina de ensayo: bloques o bisagras, ver figura 4.2. En ambas propuestas el utillaje se une a la probeta mediante un adhesivo.

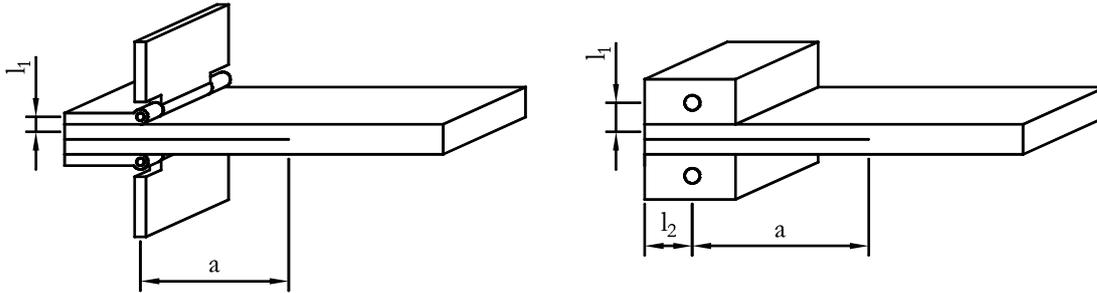


Figura 4.2: Utillajes propuestos por las normas de ensayo ISO 15024 y ASTM D5528-01(2007)e3.

En base a las directrices propuestas por estas normas cada usuario puede diseñar sus propios utillajes, como lo hace por ejemplo Airbus en su norma AITM 1-0053. El diseño de este utillaje consiste en una bisagra que se adhiere a la probeta mediante un adhesivo, ver la figura 3.37 del capítulo 3.

Los bloques y bisagras son utillajes conceptualmente simples y fáciles de utilizar. Sin embargo, la calidad de la unión entre el utillaje (aplicador de carga) y la probeta depende en gran parte de la habilidad del técnico que la realiza. Durante el proceso de unión, pueden producirse desalineaciones o uniones adhesivas débiles entre la probeta y el aplicador de carga, que conlleven fallos prematuros de la unión (principalmente en ensayos a fatiga o a temperaturas elevadas).

Mediante métodos de sujeción mecánica de la probeta pueden evitarse los inconvenientes que presenta la unión adhesiva entre la probeta y el aplicador de carga. Así mismo, los efectos no lineales asociados a las distancias l_1 y l_2 de la figura 4.2 introducen errores en los métodos de reducción de datos de los ensayos experimentales (Blanco et al., 2008). Aunque se puedan compensar los efectos de la no linealidad mediante unos parámetros correctores F y N (ASTM D5528-01(2007)e3), en los ensayos a fatiga es importante minimizar la distancia entre el punto de aplicación de la carga y el plano medio de los brazos de la probeta (distancia l_1), para controlar con precisión los valores de G_{max} y G_{min} aplicados.

Como precedentes al utillaje que se presenta en este trabajo, Brandt (1998) diseñó un utillaje de sujeción mecánica que solucionaba los problemas de desalineación y las no linealidades. El utillaje diseñado por Brandt tiene forma de pinza, con un orificio en uno de sus extremos para introducir la probeta, de manera que se obtiene una buena alineación entre el aplicador de la carga y la probeta. El ajuste a la probeta se realiza con unos tornillos de apriete, ver esquema de la figura 4.3. La aplicación de la carga se realiza en el plano medio de los brazos de la probeta,

minimizando los efectos que introducen no linealidades en la probeta ($l_1 = 0$). Sin embargo, el utillaje requiere que se modifique la geometría de la probeta, puesto que se debe mecanizar una entalla en la zona del inserto para poder introducir el utillaje, ver figura 4.3. El mecanizado de la entalla es un proceso complicado de realizar, especialmente en probetas de poco espesor, porque resulta difícil conseguir un mecanizado limpio y centrado en relación a la posición del inserto.

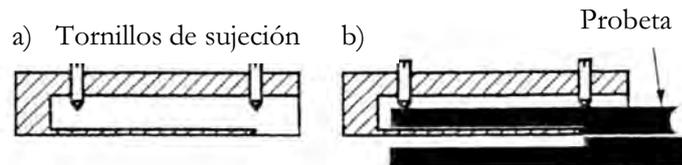


Figura 4.3: Esquema del diseño del aplicador de carga de Brandt (1998): a) esquema sin probeta; b) mecanismo de sujeción con la probeta.

En el trabajo de Blanco et al. (2008) se propuso una mejora del sistema de sujeción del utillaje de Brandt. El acoplamiento entre el utillaje y la probeta se realiza con dos piezas (fundas), que amordazan la probeta mediante unas uniones roscadas, ver figura 4.4. La ventaja que presenta este utillaje respecto al diseño de Brandt es que resulta más barato de fabricar, y se puede utilizar el mismo tipo de utillaje para diferentes espesores de probeta, mientras que el diseño propuesto por Brandt solamente puede utilizarse para probetas del mismo espesor que el del orificio de los utillajes. Sin embargo, los utillajes presentan el mismo inconveniente que los de Brandt, la necesidad de mecanizar la zona del inserto para poder introducir un aplicador de carga en cada brazo de la probeta.

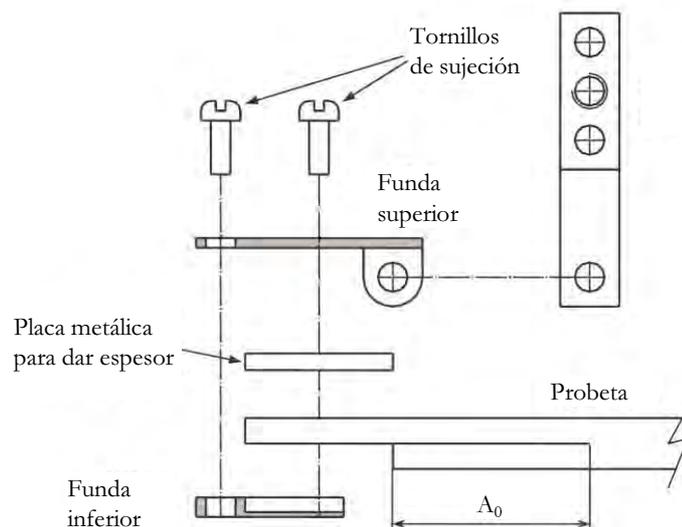


Figura 4.4: Esquema del diseño del aplicador de carga de Blanco (2005).

Posteriormente, en el trabajo de Vicens et al. (2006) se propuso una segunda modificación del utillaje inicialmente desarrollado por Brandt. En este utillaje se reduce el espesor de las fundas que se introducen en la probeta para evitar mecanizar la zona del inserto. Se utilizan plaquetas de 0.3 mm de espesor de acero (las versiones anteriores fueron fabricadas con aluminio), ver

figura 4.5. Sin embargo, aunque el diseño de los utillajes es simple el montaje no lo es. La unión entre las plaquetas y la pieza superior se realiza con 6 tornillos M2, resultando especialmente difícil su colocación y centrado de la probeta.

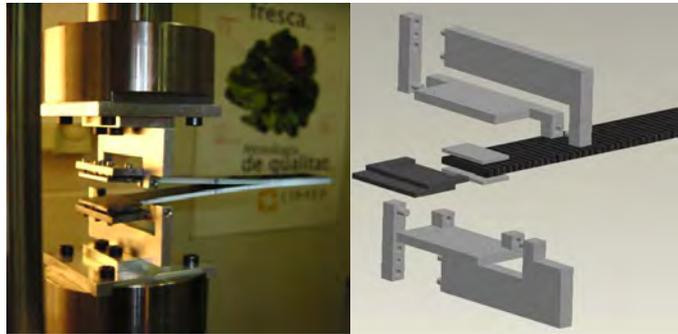


Figura 4.5: Utillajes de sujeción mecánica desarrollados por Vicens et al. (2006).

En el trabajo de Vicens et al. (2006) se compararon los resultados obtenidos con otro utillaje, desarrollado por el Área de Materiales Compuestos del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA), consistente en un sistema de sujeción del aplicador de carga de forma puntual en los laterales de la probeta. El utillaje, mucho más simple en diseño y mucho más rápido de fijar a la probeta que los anteriores, representa una notable mejora por su sencillez y facilidad de uso. Sin embargo, el sistema de sujeción puede provocar pequeñas delaminaciones en los laterales de la probeta, en función de la fuerza de apriete aplicada, que afectan a los resultados del ensayo, ver figura 4.6.

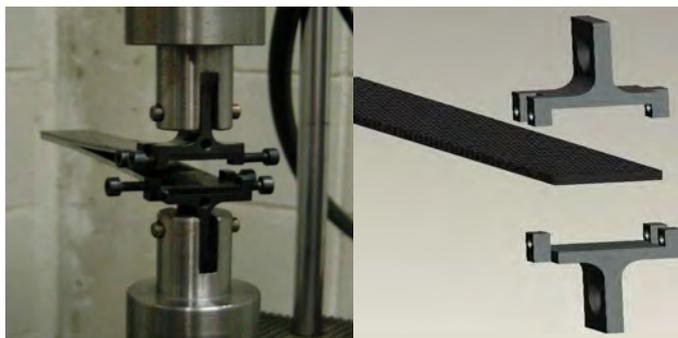


Figura 4.6: Utillajes de sujeción mecánica desarrollados por el INTA (Vicens et al., 2006).

4.3.2. Especificaciones

A continuación se indican las principales especificaciones que deben cumplir los utillajes mecánicos de sujeción lateral:

- El montaje de los utillajes, tanto a la probeta como a la máquina de ensayo, debe ser sencillo y rápido. Al menos tan rápido como los utillajes que utiliza Airbus en su norma de ensayo (AITM 1-0053).

- La alineación entre el utillaje y la probeta debe realizarse de forma automática.
- El acoplamiento entre el utillaje y la probeta debe realizarse sin ningún tipo de unión adhesiva.
- Los utillajes deben poder utilizarse con las uniones adhesivas que se fabrican según el procedimiento descrito en el estándar AITM 1-0053, con longitudes de inserto similares o ligeramente superiores.
- Durante el ensayo experimental, los utillajes no deben provocar ningún tipo de deslaminación o daño en la probeta que pueda afectar a los resultados experimentales del ensayo.
- Si bien deben minimizarse l_1 y l_2 , los utillajes se utilizarán en ensayos de deslaminación/pelado estáticos, y por consiguiente no es necesario que el punto de aplicación coincida exactamente con el plano medio de los adherentes de la probeta. Puede realizarse una corrección de las rotaciones a partir de los parámetros F y N.

4.3.3. Descripción del diseño

El diseño propuesto en este trabajo es un utillaje tipo bloque que se fija a la probeta mecánicamente por los laterales (figura 4.7). La sujeción del utillaje a la probeta se realiza con una pinza en forma de cola de milano, ver figura 4.7(c) o detalle de la figura 4.10. El utillaje se compone de un bloque que se une a la probeta por sus laterales y un adaptador para fijarlo a la máquina de ensayo. El adaptador y el bloque se unen por un pasador que permite la rotación entre las dos piezas.

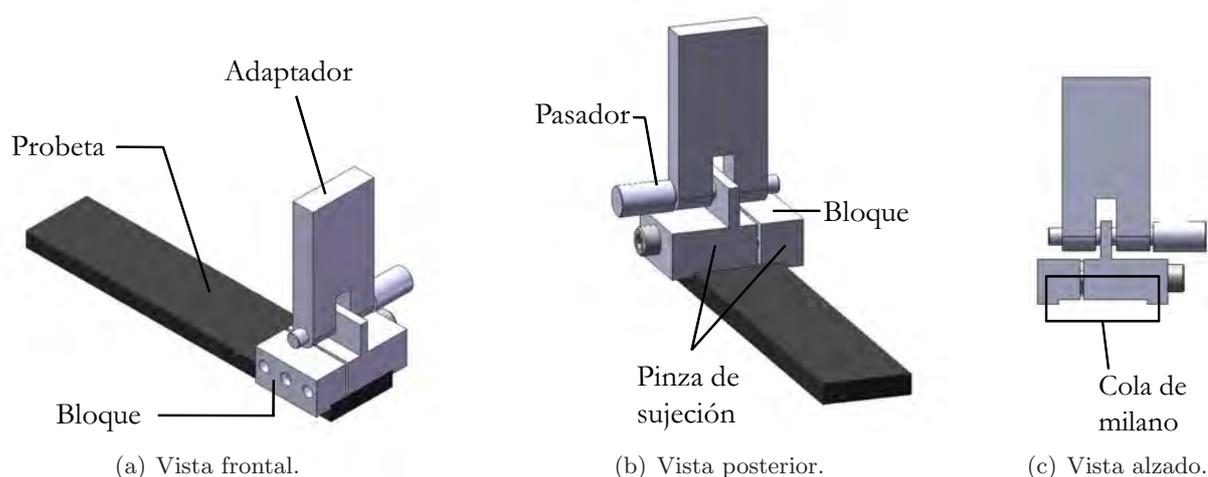


Figura 4.7: Esquema del utillaje *Side Clamped Beam*, SCB.

El bloque a su vez, está formado por dos piezas móviles que realizan la función de una pinza. El mecanismo de guía de las piezas se realiza con dos pasadores de 4x18 mm y un cilindro interno, solidarios a uno de los componentes, ver figura 4.8. El utillaje se une a la probeta por la presión que ejerce la pinza en los laterales de la misma. El movimiento de la pinza se realiza con un tornillo allen. Y la fuerza de sujeción se controla mediante el par de apriete aplicado al tornillo.

El par de apriete se aplica con un destornillador dinamométrico.

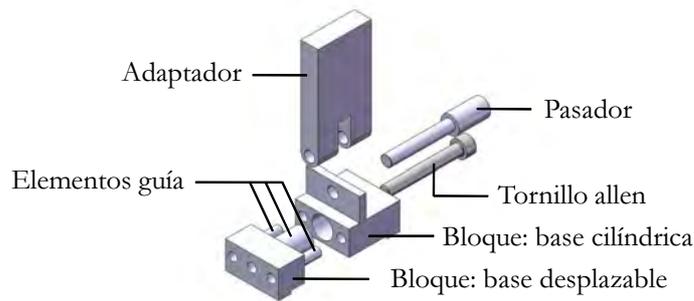


Figura 4.8: Despiece del utillaje SCB.

El utillaje se puede acoplar con facilidad a cualquier máquina de tracción universal, puesto que el adaptador se puede unir a la máquina con las garras de tracción. Para realizar el ensayo se utilizan dos utillajes de introducción de carga, uno para cada brazo de la probeta. En la figura 4.9 se presenta el conjunto utillajes/probeta montados en la máquina de ensayo.



Figura 4.9: Ejemplo del montaje de los utillajes y la probeta en la máquina de ensayo.

Para diseñar la geometría de la pinza de sujeción del utillaje se han considerado dos parámetros: el ángulo de incidencia (α_1) y el grosor de agarre (l_4), ver figura 4.10. El grosor de agarre l_4 se define en función del espesor de la probeta ($2h$) que se quiere analizar, el utillaje se ha diseñado con $l_4 = 1.3\text{mm}$. En relación al ángulo de incidencia (α_1), cuanto más se reduce su valor, mayor es la fuerza de sujeción entre el utillaje y la probeta pero, al mismo tiempo, mayor es la probabilidad de que se produzcan delaminaciones entre las capas del laminado. Por consiguiente, debe escogerse un ángulo de incidencia suficientemente grande para que no se produzcan las delaminaciones, pero que garantice que pueda sujetarse firmemente la probeta durante el ensayo experimental. Se ha escogido $\alpha_1 = 80^\circ$ porque es un ángulo estándar en el mecanizado de

geometrías con forma de cola de milano, y se ha comprobado que la fuerza de sujeción que se consigue es suficiente para separar los brazos de la probeta.

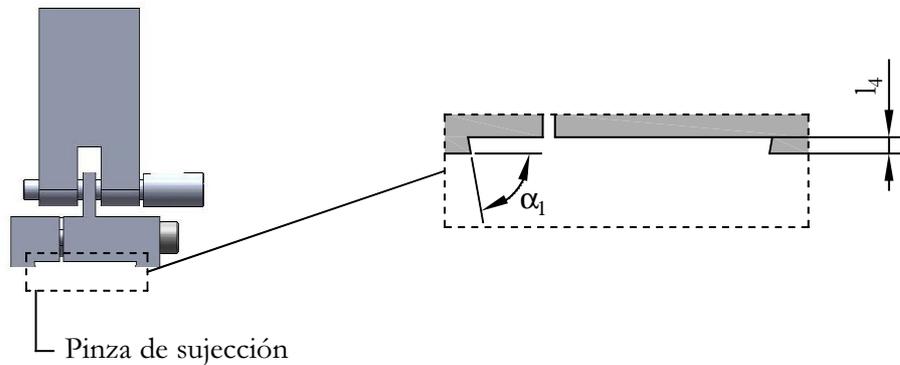


Figura 4.10: Ángulo de incidencia y altura de la línea del mecanismo de sujeción del utillaje a la probeta.

4.3.4. Dominio de uso del utillaje SCB

Para definir el dominio de uso del utillaje se han analizado dos parámetros: la fuerza de sujeción máxima del utillaje, y la geometría de la probeta con la que se puede utilizar el utillaje.

4.3.4.1. Carga máxima

La carga máxima que es capaz de admitir el utillaje sin que se separe de la probeta depende del par de apriete, al aumentar el par de apriete se incrementa la fuerza de sujeción a la probeta. Sin embargo, un par de apriete demasiado elevado puede provocar pandeo local en la zona de agarre (ver figura 4.11), e incluso, en laminados unidireccionales de material composite, la rotura transversal del laminado, ver figura 4.12.

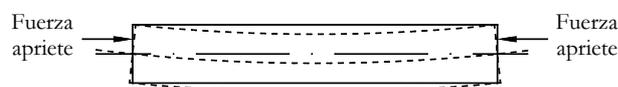


Figura 4.11: Esquema del pandeo producido en uno de los brazos de la probeta por la fuerza de apriete descentrada.

El pandeo se produce por la compresión lateral en los extremos de la probeta y la flexión causada por la componente vertical de la fuerza de apriete, debida al ángulo de inclinación del utillaje y porque la fuerza de apriete no se aplica centrada en cada brazo de la probeta, ver figura 4.11. Cuando ocurre, este fenómeno es visible antes de colocar el utillaje en la máquina de ensayo, y sus efectos se incrementan durante el ensayo experimental debido a la fuerza vertical (P) que se realiza durante el ensayo.

Si se aumenta el par de apriete, se produce una rotura de la matriz en el plano transversal de la probeta, ver figura 4.12. Este efecto ocurre por el colapso del material debido al pandeo.

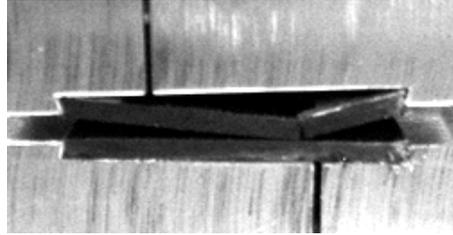


Figura 4.12: Vista frontal del utillaje y la probeta. Rotura transversal de la probeta.

Después de realizar distintas pruebas, se ha concluido que para los adherentes utilizados en este estudio, un par de apriete entre 150 y 180 Ncm no daña en ningún caso la probeta y permite fuerzas de carga suficientes.

Para determinar la fuerza de sujeción máxima del utillaje se ha realizado un análisis de tracción en probetas sin pregrieta inicial, ver el esquema del ensayo en la figura 4.13. Se han utilizado probetas de $2h \approx 3mm$ de espesor y de AS4/8552 y T800S/M21. Se ha realizado un ensayo de tracción controlado por desplazamiento a una velocidad de apertura de los brazos de la probeta de 2 mm/min, hasta provocar la separación del utillaje de la probeta (fallo de sujeción). En la figura 4.14 se indican los resultados de las curvas de fuerza-desplazamiento ($P(\delta_y)$) del ensayo experimental, aplicando los pares de apriete de 150 y 180 Ncm para los dos materiales.

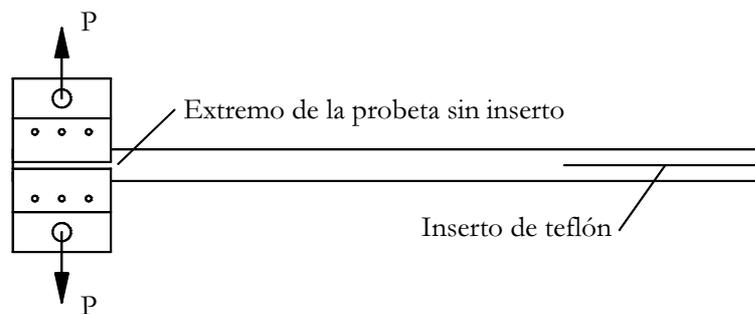


Figura 4.13: Esquema del ensayo experimental utilizado para determinar la fuerza de sujeción de los utillajes SCB.

Las curvas de fuerza-desplazamiento de la figura 4.14 tienen una respuesta lineal para un valor de fuerza entre 0 a 300 N. A partir de $P > 300\text{ N}$ la curva fuerza desplazamiento empieza a desviarse del comportamiento lineal, indicando que la sujeción empieza a ceder de algún modo. La figura 4.14 no está corregida para la flexibilidad del sistema, es decir, los desplazamientos que se han registrado (0.05 mm a 300 N) corresponden a la flexibilidad del utillaje de introducción de carga, el juego entre utillaje y pasador, el sistema de sujeción entre las garras y el adaptador y la máquina universal de ensayos a tracción.

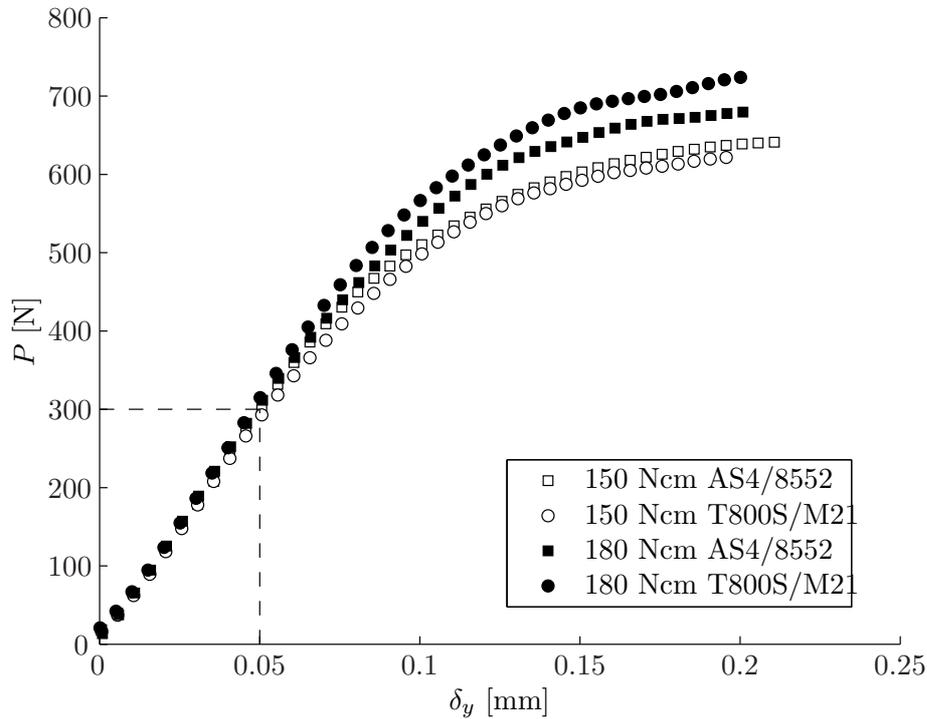


Figura 4.14: Curva del ensayo experimental de sujeción del utillaje a la probeta.

En los ensayos realizados con valores de fuerza de apertura inferiores a 300 N, no se han observado delaminaciones en la probeta inducidos por el utillaje. En la figura 4.15 se muestran las marcas que deja el utillaje en los laterales de la probeta con un par de apriete de 150 Ncm. En la imagen no se observa que haya habido ningún tipo de desplazamiento relativo entre el utillaje y la probeta.

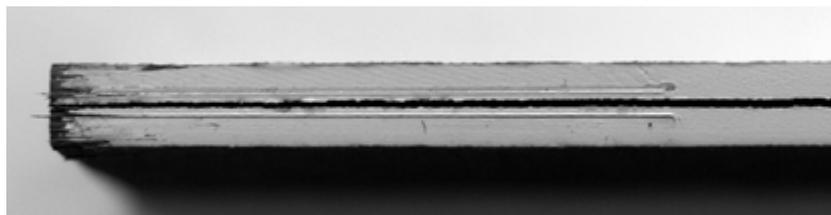


Figura 4.15: Marcas que dejan los utillajes en los laterales de la probeta.

4.3.4.2. Geometría de la probeta

Tal y como se ha comentado anteriormente, el aplicador de carga se une en los laterales de la probeta mediante dos bloques que actúan como una pinza. Por consiguiente, los parámetros geométricos de la probeta que afectan al uso del utillaje son su espesor ($2h$) y ancho (B).

En la sección 4.3.3 se ha comentado que el grosor de agarre (l_4) se define en función del espesor de la probeta ($2h$). La relación que se ha considerado entre l_4 y el espesor de uno de los brazos de la probeta es $l_4 \geq h - 0.1 \text{ mm}$, ver figura 4.16. De manera que se deja un margen mínimo

de 0.1 mm entre el punto de aplicación y el extremo de uno de los brazos de la probeta. El utillaje se ha diseñado con $l_4 = 1.3 \text{ mm}$, y por consiguiente puede utilizarse con probetas de espesor $2h \geq 2.8 \text{ mm}$. El espesor de probeta ($2h$) máximo que admite el utillaje depende de las propiedades de los adherentes y de la longitud del inserto. El cálculo del espesor máximo, para las configuraciones de unión adhesiva que se han utilizado en este trabajo, se describe en la sección 4.3.5.

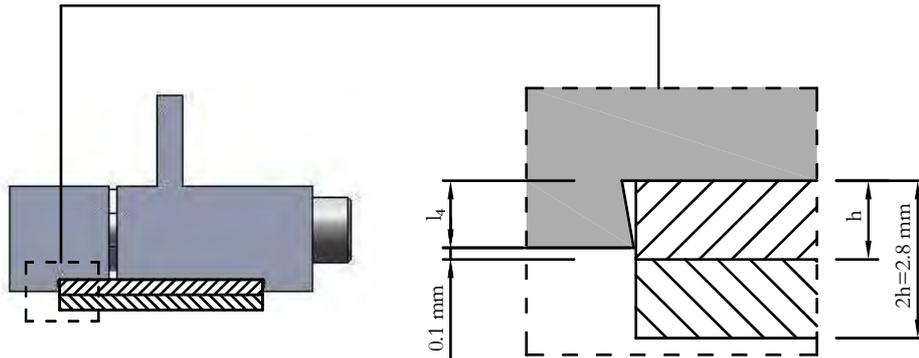


Figura 4.16: Detalle de la sujeción del utillaje para una probeta de espesor $2h = 2.8 \text{ mm}$ con $l_4 = 1.3 \text{ mm}$.

Para utilizar el utillaje en probetas de menor espesor ($2h < 2.8 \text{ mm}$), es recomendable diseñar otro utillaje con valores de l_4 inferiores, adaptados al espesor de la probeta. Una alternativa para reducir el valor de l_4 consiste en insertar plaquetas calibradas entre el utillaje y la probeta. Sin embargo, no es muy recomendable por el tiempo que se pierde en alinear las plaquetas a la probeta.

En relación al ancho de la probeta, el utillaje se ha diseñado para probetas con $B = 25 \text{ mm}$, y el diseño del mecanismo de sujeción permite unas tolerancias de B muy pequeñas. La articulación entre el adaptador y la pinza de sujeción (ver figura 4.7) está solidaria a uno de los dos bloques de la pinza por lo que si se utiliza el utillaje con probetas de un espesor diferente a 25 mm el punto de aplicación de la carga queda descentrado respecto del plano medio de la probeta, y la introducción de la carga no se realiza de forma correcta.

4.3.5. Dimensionamiento del ensayo con utillajes SCB

Una vez estimada la fuerza de sujeción máxima de los utillajes en 300 N, se debe comprobar si esta fuerza de sujeción es suficiente para poder realizar los ensayos de deslaminación/pelado en modo I. A partir del valor de la fuerza de sujeción máxima se puede estimar la longitud del inserto de teflón mínimo (A_0), que debería tener la unión adhesiva para permitir el uso del utillaje SCB, en función de la tenacidad a la fractura estimada de la unión, las dimensiones de los adherentes y sus propiedades elásticas (ver figura 4.17).

Se puede realizar una estimación de la distancia entre el punto de aplicación de la fuerza y el frente de grieta (a_0) a partir de la ecuación 4.1, basada en la teoría de vigas simple.

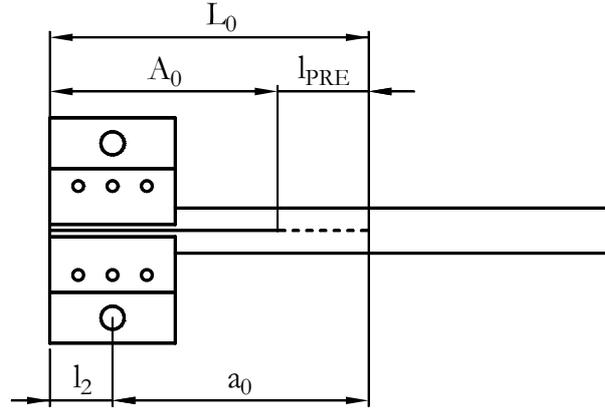


Figura 4.17: Relación entre a_0 y la longitud del inserto de teflón en función de las dimensiones del utillaje.

$$P_{max} = \frac{B}{a_0} \sqrt{\frac{G_{IC} E_x h^3}{12}} \quad (4.1)$$

Siendo P_{max} la fuerza de agarre máxima ($P_{max} = 300 \text{ N}$), B la amplitud de la probeta, a_0 la longitud de la pregrieta inicial, G_{IC} la tenacidad a la fractura en modo I estimada para la unión, E_x el módulo de Young en la dirección de las fibras del composite y h la mitad del espesor de la probeta.

Representando la ecuación 4.1 en función de a_0 , se obtiene la expresión 4.2.

$$a_0 = \frac{B}{P_{max}} \sqrt{\frac{G_{IC} E_x h^3}{12}} \quad (4.2)$$

Para calcular la longitud del inserto de teflón (A_0) deben tenerse en cuenta las dimensiones del utillaje:

$$A_0 = a_0 + \frac{l_3}{2} = a_0 + l_2 \quad (4.3)$$

Siendo l_3 la longitud del utillaje. Substituyendo 4.2 en 4.3, A_0 se expresa como:

$$A_0 = a_0 + l_2 = \frac{B}{P_{max}} \sqrt{\frac{G_{IC} E_x h^3}{12}} + l_2 \quad (4.4)$$

A partir de los valores de las propiedades elásticas de los materiales, de la geometría de las probetas y de las dimensiones del utillaje se han calculado las longitudes de inserto requeridas (A_0) para que el utillaje funcione correctamente. Los resultados se han representado en función de la tenacidad a la fractura (G_{IC}). En la tabla 4.1 se indican las propiedades de los materiales y de las probetas analizadas, y las propiedades del utillaje. Se han considerado dos espesores de probeta: 3 y 5 mm. Se ha tomado $P_{max} = 300 \text{ N}$

	AS4/8552	T800S/M21
E_{11} [GPa]	120.9	134.7
B [mm]	25.0	25.0
$2h$ [mm]	3.0 y 5.0	3.0 y 5.0
P_{max} [N]	300.0	300.0
l_2 [mm]	12.5	

Tabla 4.1: Propiedades de las probetas y el utillaje para determinar A_0 en función de G_{IC} .

En la figura 4.18 se representan los valores de la longitud del inserto de teflón mínimo, en función de la tenacidad a la fractura en modo I.

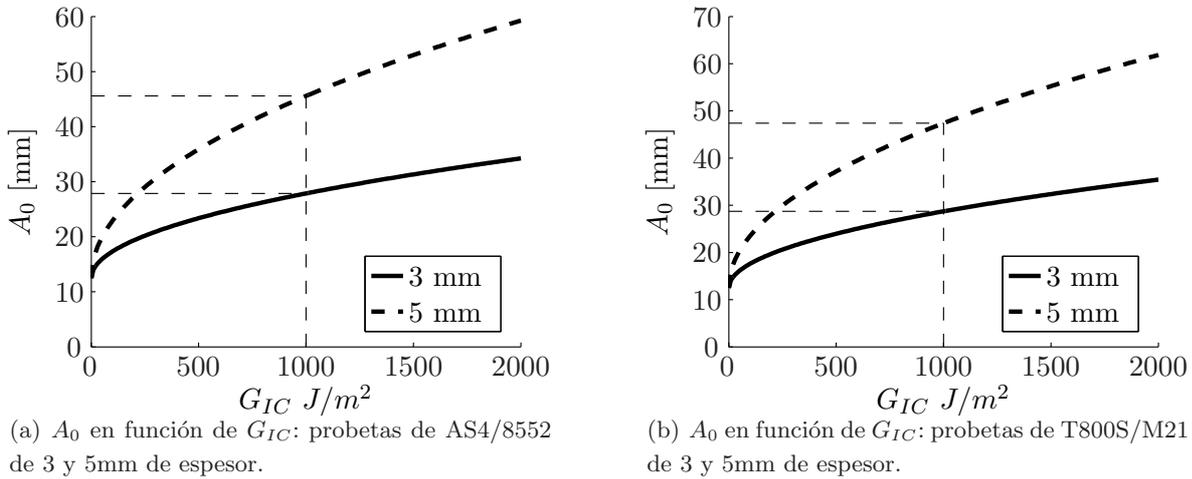


Figura 4.18: Longitud del inserto de teflón en función de G_{IC} . $P_{max} = 300$ N.

La longitud del inserto de teflón de la probeta debe ser igual o superior al que se calcula a partir de la ecuación 4.4, para que no se supere la fuerza máxima de agarre: $P_{max} \leq 300$ N.

Los adhesivos que se han utilizado en este trabajo presentan valores de $G_{IC} \approx 1000$ J/m^2 . Para $G_{IC} = 1000$ J/m^2 se obtiene un valor de $A_0 \leq 50.0$ mm para los dos adhesivos y $2h = 5$ mm (el caso más restrictivo). Las uniones adhesivas que se han fabricado para este trabajo tienen una longitud del inserto de teflón $A_0 = 60$ mm, ver capítulo 3, margen suficiente para poder utilizar el utillaje SCB, como ha sido comprobado a lo largo de los trabajos experimentales ejecutados en este estudio.

La G_{IC} de los adhesivos que se han utilizado en este trabajo es una de las más altas que se pueden encontrar actualmente en uniones adhesivas entre materiales composites y, se ha comprobado que para estos valores el utillaje funciona correctamente.

Por otra parte, a partir de la ecuación 4.4 puede estimarse el espesor máximo de probeta que puede sujetarse con la fijación SCB, sin superar el valor de P_{max} , y para una longitud de inserto determinada (A_0):

$$h = \sqrt[3]{\frac{12}{E_x G_{IC}} \left[\frac{P_{max}}{B} (A_0 - l_2) \right]^2} \quad (4.5)$$

En la figura 4.19 se representan los valores del espesor de la probeta ($2h$) en función de la tenacidad a la fractura en modo I, para distintos valores de A_0 (60, 70 y 85 mm).

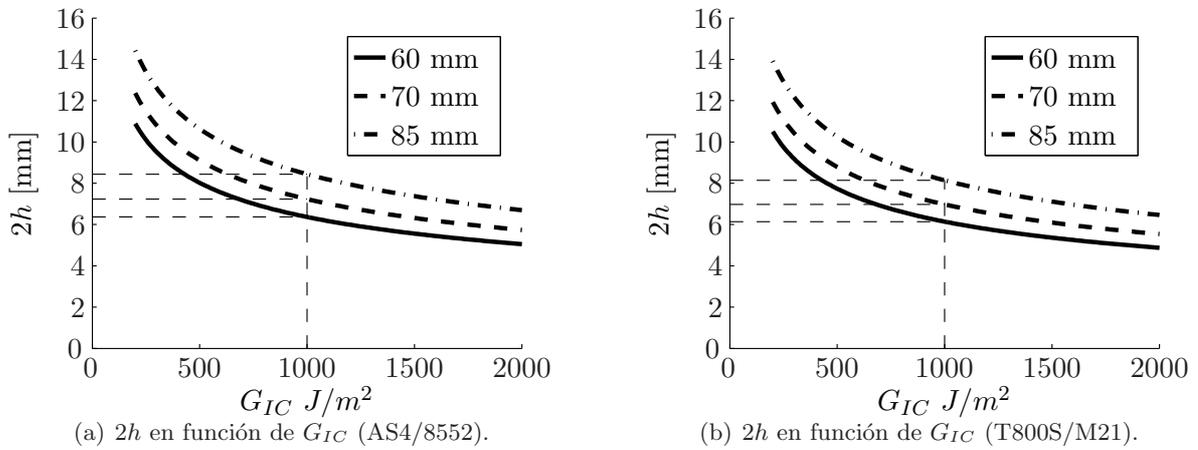


Figura 4.19: Espesor máximo de probeta que puede analizarse en función de G_{IC} para distintos valores de $A_0 = 60, 70$ y 80 mm. $P_{max} = 300$ N.

A partir de los resultados obtenidos, se concluye que con una pregrieta inicial de $A_0 = 60$ mm pueden analizarse probetas con un espesor máximo de $2h = 6$ mm, en uniones adhesivas con $G_{IC} \approx 1000$ J/m². Para analizar probetas de mayor espesor, éstas deben tener una longitud del inserto de teflón superior a $A_0 = 60$ mm. Dada la facilidad de uso de este dispositivo de introducción de carga en comparación con los tradicionales, parece ventajoso aumentar ligeramente la longitud de inserto en los casos que se requiera.

4.3.6. Campaña de validación del nuevo utillaje

Se ha realizado una campaña de ensayos de fractura interlaminar en modo I para validar el nuevo utillaje SCB. El proceso de validación ha consistido en comprobar que los utillajes SCB no introducen diferencias en los resultados de G_{IC} , respecto a los que se utilizan en la norma AITM 1-0053. Se han comparado los resultados obtenidos con el nuevo utillaje de sujeción lateral (figura 4.7) y los obtenidos con el utillaje tipo bisagra, definido en la norma AITM 1-0053 y diseñado según las recomendaciones del estándar ISO 15024 (figura 3.37). El utillaje tipo bisagra se ha fijado a la probeta mediante un adhesivo.

Se han llevado a cabo dos campañas experimentales: la campaña CARAC_6 y la campaña DCB_SCB_vs_STD, en las cuales se han realizado ensayos de deslaminación en modo I. En la campaña CARAC_6 se han realizado ensayos de deslaminación con los utillajes diseñados en la norma AITM 1-0053, cuyos resultados también se han utilizado para caracterizar la tenacidad a la fractura de los adherentes de la unión adhesiva (ver sección 3.5.8 del capítulo 3). Por otra parte, en la campaña DCB_SCB_vs_STD se han realizado ensayos de deslaminación con los utillajes SCB. Para validar los utillajes SCB, se han comparado los resultados de los lotes de probetas de la campaña DCB_SCB_vs_STD con los resultados de los lotes de la campaña CARAC_6. En cada campaña se han analizado 2 lotes de probeta (un lote para cada tipo de adherente AS4/8552 y T800S/M21). En total se han llevado a cabo 20 ensayos experimentales: 5 probetas \times 2 materiales (lotes) \times 2 utillajes (campañas de ensayo). La tabla 4.2 muestra las probetas ensayadas, ordenadas por lotes de probetas y por campañas de ensayo.

Campaña	CARAC_6		DCB_SCB_vs_STD	
	01	02	03	04
Lote				
Material	AS4/8552	T800S/M21	AS4/8552	T800S/M21
	A1/04/03	T1/04/03	A1/04/08	T1/04/08
	A1/04/10	T1/05/04	A1/05/04	T1/05/09
Probetas	A1/05/09	T1/06/03	A1/06/03	T1/06/08
	A1/06/05	T1/06/10	A1/06/08	T1/07/04
	A1/06/10	T1/07/08	A1/07/04	T1/07/10

Tabla 4.2: Campañas de ensayos de deslaminación con los utillajes propuestos por la norma de ensayo ISO 15024 y los nuevos utillajes de agarre mecánico lateral, SCB.

Los ensayos experimentales se han realizado según la norma de ensayos ISO 15024. Se ha utilizado G_{IC} como parámetro de validación, éste se ha calculado a partir de los de los métodos de reducción de datos propuestos por la norma ISO 15024: la teoría de vigas modificada (MBT) y la calibración de la flexibilidad modificada (MCC). Se han comparado los resultados de G_{IC} de iniciación en los puntos: NL, VIS y 5%/MAX.

El valor de G_{IC} de propagación se ha calculado a partir del promedio de los 5 últimos datos de la curva de G_{IC} en función de la longitud de grieta (a), curva R.

En la figuras 4.20 y 4.21 se presentan los resultados de las campañas de ensayo CARAC_6 y DCB_SCB_vs_STD. Los resultados individuales de cada probeta y de los lotes de probetas se detallan en el Volumen II.

Los puntos que aparecen en las figuras 4.20 y 4.21 son los resultados del valor promedio de las 5 probetas del lote y las barras la desviación estándar. De los resultados de los lotes de probetas se observa que, para todos los métodos de reducción de datos y para todos dos materiales, los

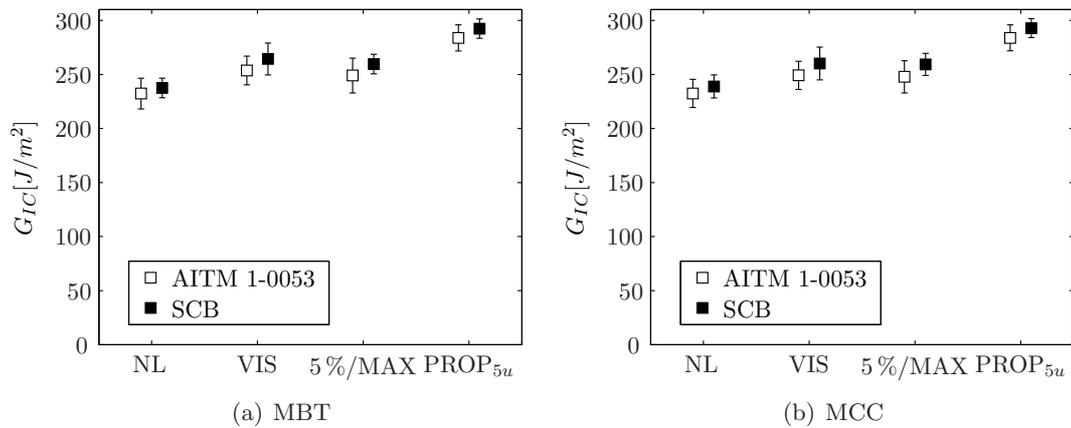


Figura 4.20: Comparación de los resultados de G_{IC} para los distintos utillajes. Métodos de reducción de datos MBT y MCC según ISO 15024. Probetas de AS4/8552.

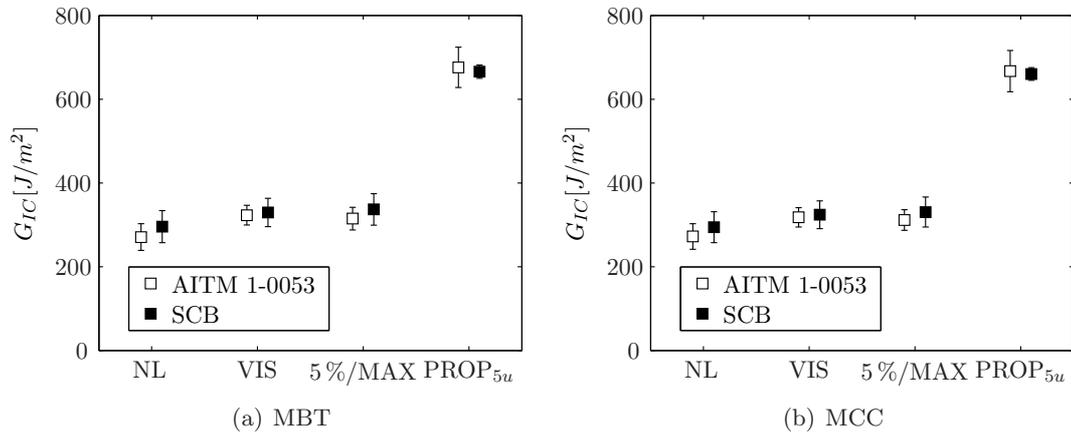


Figura 4.21: Comparación de los resultados de G_{IC} para los distintos utillajes. Métodos de reducción de datos MBT y MCC según ISO 15024. Probetas de T800S/M21.

valores promedios se encuentran dentro del rango de la desviación estándar. En la tabla 4.3 se indica el error absoluto y el error relativo que hay entre los valores de G_{IC} de los ensayos realizados con los dos utillajes. El error absoluto se ha obtenido de la diferencia de los valores de G_{IC} para los dos utillajes, y el error relativo se ha calculado a partir del cociente entre el error absoluto y el valor de G_{IC} , obtenido con los utillajes de la norma AITM 1-0053. El error relativo que se ha obtenido en las probetas de AS4/8552 en todos los casos es inferior al 5%, y en las probetas de T800S/M21 es inferior al 10% en los puntos de iniciación y inferior al 2% en los de propagación. En las probetas de T800S/M21 los puntos de pérdida de no linealidad (NL) son los que presentan un error relativo superior al resto. Sin embargo, la determinación del punto de no linealidad (NL) es un método que contiene cierta subjetividad asociada a la elección del rango lineal de la pendiente inicial de la curva $P(\delta_y)$. Por otra parte, en las probetas de T800S/M21 el punto NL es el que presenta los valores de G_{IC} inferiores, siendo más susceptible a los efectos de la dispersión de los resultados entre las probetas.

AS4/8552					
Método	Puntos	G_{IC} (AITM 1-0053) [J/m^2]	G_{IC} (SCB) [J/m^2]	Err. abs. [J/m^2]	Err. rel. [%]
CBT	NL	232.4	237.5	5.1	2.19
	VIS	253.7	264.4	10.7	4.22
	5%/MAX	249.1	259.7	10.6	4.26
	PROP _{5u}	283.9	292.4	8.5	2.99
MCC	NL	232.5	239	6.5	2.80
	VIS	249.2	260.2	11	4.41
	5%/MAX	247.8	259.3	11.5	4.64
	PROP _{5u}	283.9	293	9.1	3.21
T800S/M21					
Método	Puntos	G_{IC} (AITM 1-0053) [J/m^2]	G_{IC} (SCB) [J/m^2]	Err. abs. [J/m^2]	Err. rel. [%]
CBT	NL	270.8	295.7	24.9	9.19
	VIS	323	329.5	6.5	2.01
	5%/MAX	314.8	336.8	22	6.99
	PROP _{5u}	675.9	665.5	10.4	1.54
MCC	NL	272.1	294.2	22.1	8.12
	VIS	317.9	324	6.1	1.92
	5%/MAX	311.4	330.5	19.1	6.13
	PROP _{5u}	667	660.1	6.9	1.03

Tabla 4.3: Valores promedio de G_{IC} y errores absoluto y relativo de los ensayos de deslaminación con los utillajes SCB y los de la norma AITM 1-0053.

Finalmente, en la figura 4.21, se observa que las probetas de T800S/M21 presentan un salto importante del valor de G_{IC} entre los puntos de iniciación y de propagación (G_{IC} pasa de $300 J/m^2$ a $600 J/m^2$). Esto se debe a que la curva R (crecimiento progresivo de G_{IC} en función de la longitud de grieta) para este tipo de probetas, tarda mucho en estabilizarse tal y como se indica en la figura 3.38 del capítulo 3.

En función de los resultados obtenidos, puede confirmarse que el utillaje SCB no genera diferencias significativas en los valores de G_{IC} respecto a un utillaje de tipo estándar (con una unión adhesiva entre el utillaje y la probeta), como el que se propone en la norma AITM 1-0053. El comportamiento del utillaje SCB ha sido el esperado, puesto que se ha demostrado previamente que el sistema de sujeción es válido para el rango de fuerzas de apertura de los brazos de la probeta.

4.4. Análisis de resultados del ensayo DCB de uniones adhesivas

4.4.1. Propagación de la grieta a saltos o efecto *stick-slip*

Tal y como se ha comentado en la revisión del estado del arte, la propagación de la grieta a saltos (de aquí en adelante efecto *stick-slip*) se presenta frecuentemente en los ensayos DCB con

uniones adhesivas. En cada salto se pueden distinguir con claridad dos etapas: una primera etapa en la cual el frente de grieta prácticamente no avanza o lo hace muy lentamente, denominada de paro de grieta o *arrest*, y una segunda etapa de crecimiento abrupto de la grieta (a una velocidad del frente de grieta muy elevada).

La presencia del efecto *stick-slip* en un ensayo DCB tiene repercusiones en el cálculo de la posición del frente de grieta (ISO 25217). Los resultados de la longitud de grieta que se obtienen del ensayo experimental se utilizan posteriormente en el cálculo de la tenacidad a la fractura en modo I del adhesivo. Por consiguiente, el efecto *stick-slip* también influye en el cálculo de G_{IC} de las uniones adhesivas.

En prácticamente todas las uniones adhesivas que se han analizado en este trabajo se ha obtenido una propagación de grieta a saltos (*stick-slip*), de manera que, en la segunda parte de este capítulo se presenta una metodología de tratamiento de los datos experimentales para obtener los valores de G_{IC} del adhesivo en presencia de *stick-slip*. Para determinar G_{IC} se han utilizado los métodos de reducción de datos propuestos en las normas de ensayo ISO 15024 y ISO 25217: teoría de vigas modificada (MBT), calibración experimental de la flexibilidad (ECM) y calibración de la flexibilidad modificada (MCC).

4.4.2. Descripción del efecto *stick-slip*

En la figura 4.22 se presentan los resultados de las curvas fuerza-desplazamiento de dos ensayos de deslaminación en modo I. En la figura 4.22(a) se representan los resultados de la curva $P(\delta_y)$ de un ensayo experimental con propagación de grieta continua, y en la figura 4.22(b) se muestran los resultados de otra curva $P(\delta_y)$ para un ensayo con propagación de grieta a saltos (*stick-slip*).

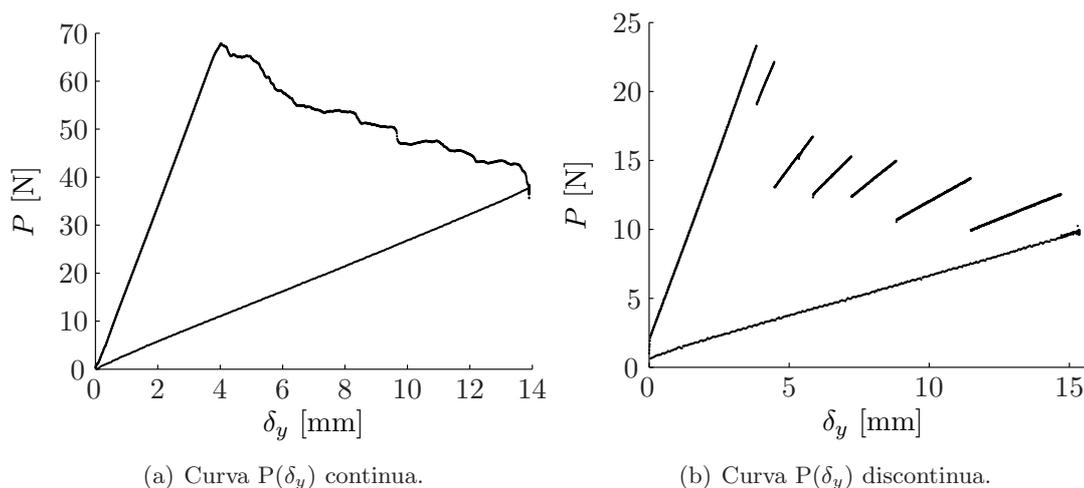


Figura 4.22: Curvas fuerza-desplazamiento de un ensayo DCB continua o discontinua.

Para explicar este efecto, en la figura 4.23 se representan, a modo de ejemplo, los resultados de las curvas fuerza-desplazamiento ($P(\delta_y)$), longitud de grieta-desplazamiento ($a(\delta_y)$) y la imagen de la superficie fracturada de una de las uniones adhesivas que se han analizado. Los resultados

se han obtenido de un ensayo DCB en el cual la grieta ha propagado a saltos (*stick-slip*). Para representar los datos con mayor claridad se ha reducido el número de puntos experimentales de las curvas $P(\delta_y)$ y $a(\delta_y)$, y se han eliminado los datos del cierre de los brazos de la probeta (de la fase de descarga).

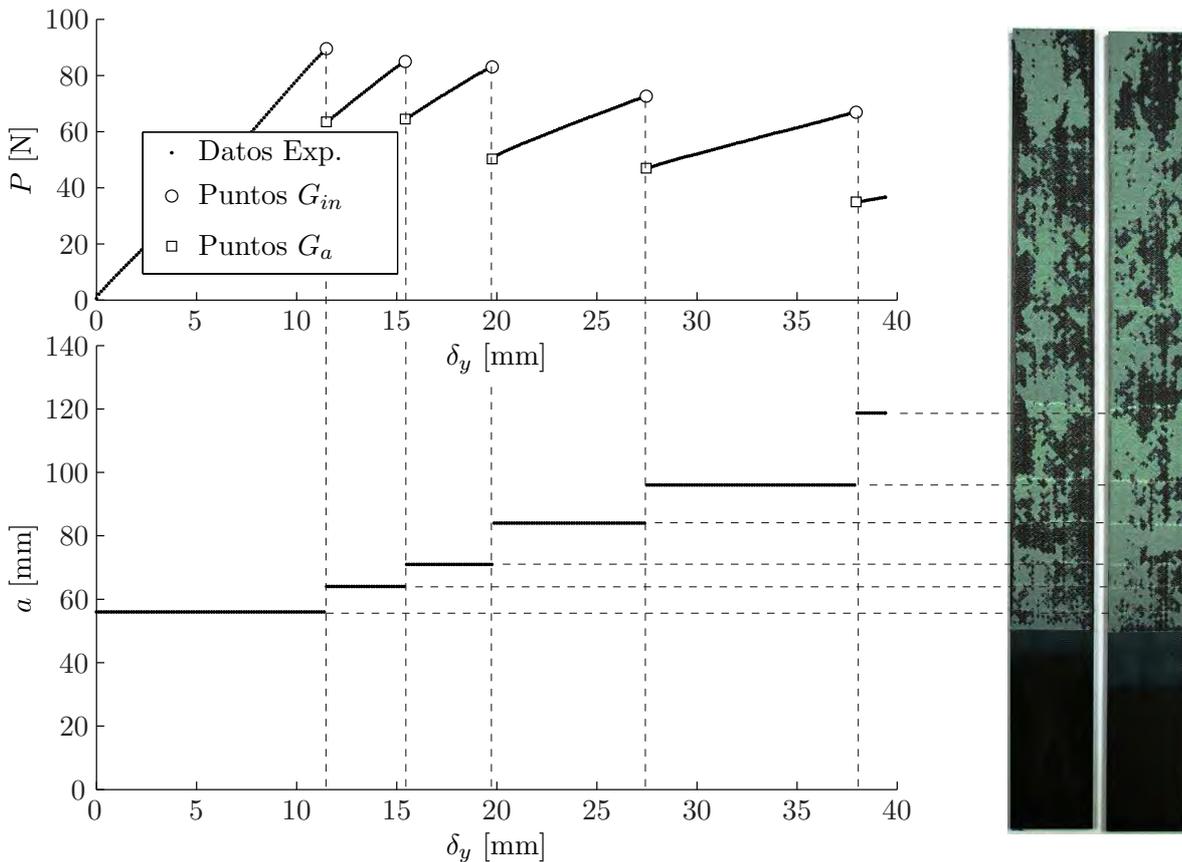


Figura 4.23: Representación del efecto *stick-slip* en el ensayo experimental DCB de la probeta T1/F1/07/06.

En la figura 4.23 se representan los valores de P y a en función de la misma escala de desplazamiento δ_y . También se ha escalado la imagen de la superficie fracturada de la probeta, para hacer coincidir el rango de propagación de la grieta con los valores de a de la gráfica $a(\delta_y)$.

Cada salto de la curva $a(\delta_y)$ produce un decremento instantáneo de la fuerza de apertura de los brazos de la probeta en la curva $P(\delta_y)$ porque al incrementar la longitud de grieta la distancia entre el punto de aplicación de la carga y el frente de grieta aumenta y, por consiguiente, la flexibilidad de los brazos de la probeta. De manera que se necesita menos fuerza para mantener el mismo nivel de desplazamiento, δ_y .

En la superficie fracturada de la probeta se observan unas franjas blancas transversales separadas a una cierta distancia entre si. La amplitud de las franjas es más pequeña que la distancia que hay entre ellas. En la curva $a(\delta_y)$ la posición de las franjas coincide con la zona de creci-

miento lento de grieta (o fase *stick*), mientras que la distancia entre ellas es igual a la longitud del salto que se produce durante la fase de crecimiento rápido de a (o fase *slip*). La amplitud de las franjas de crecimiento lento de grieta es mucho más pequeña que la de las regiones en las cuales se produce el salto de a , porque entre saltos de a la propagación de grieta es casi nula.

En la fase de crecimiento lento del frente de grieta, la fuerza aumenta proporcionalmente en función del desplazamiento de los brazos de la probeta. Se ha observado, a partir del estudio de las superficies fracturadas (ver el análisis fractográfico del capítulo 8), que durante la fase de crecimiento lento de a el adhesivo plastifica en la zona del frente de grieta. Las franjas blancas que se observan en la superficie fracturada son las zonas en que el adhesivo ha plastificado. Por otra parte, en las zonas de crecimiento rápido de a se observa un proceso de rotura frágil en las superficies fracturadas.

A partir de P , δ_y y a se puede calcular la energía disponible para la fractura en cada instante de tiempo (G). El valor de G para el cual se produce una propagación rápida del frente de grieta se denomina G_{in} (iniciación de grieta).

Por otra parte, durante esta fase, en los brazos de la probeta se va acumulando una energía elástica que se libera al producirse el salto, transformándose en energía cinética. Esta energía es la que causa el avance a velocidad elevada (salto o *slip*) del frente de grieta. Una vez se ha liberado toda esta energía, el frente de grieta se detiene y vuelve a repetirse el ciclo. Si se determina G justo después del salto, se obtiene un valor de la energía disponible para la fractura de detención (*arrest*) del frente de grieta (G_a), que depende de la energía elástica acumulada antes de que se produzca el salto.

Así pues, a partir de los datos de las curvas $P(\delta_y)$ y $a(\delta_y)$ se pueden identificar dos valores de la energía disponible para la fractura, un valor de iniciación (G_{in}) y un valor de detención del crecimiento de grieta (G_a). El valor de G_{in} se obtiene a partir de los puntos máximos de la curva fuerza desplazamiento y el valor de G_a a partir de los puntos mínimos, ver figura 4.24 donde se superponen las curvas de G constante a la curva $P(\delta_y)$.

Para determinar el valor de la tenacidad a la fractura en modo I del adhesivo en presencia de *stick-slip* se utilizará el valor de G_{in} , puesto que se considera como un valor intrínseco de la unión. No es así para G_a , los puntos en los cuales se produce la detención del frente de grieta (y en los cuales se calcula G_a) dependen de las propiedades elásticas de los adherentes, mientras que G_{in} no.

En cada salto del frente de grieta la distancia entre las franjas aumenta, ver superficie fracturada de la probeta en la figura 4.23. Puede obtenerse una relación aproximada entre la distancia de las franjas en función del desplazamiento, si se considera la hipótesis que G_{in} y G_a obtenidos a partir de los puntos de iniciación y paro del crecimiento de grieta se mantienen constantes durante la fase de propagación. Según esta hipótesis G_{in} y G_a pueden expresarse en función de a , δ_y y las propiedades de la probeta:

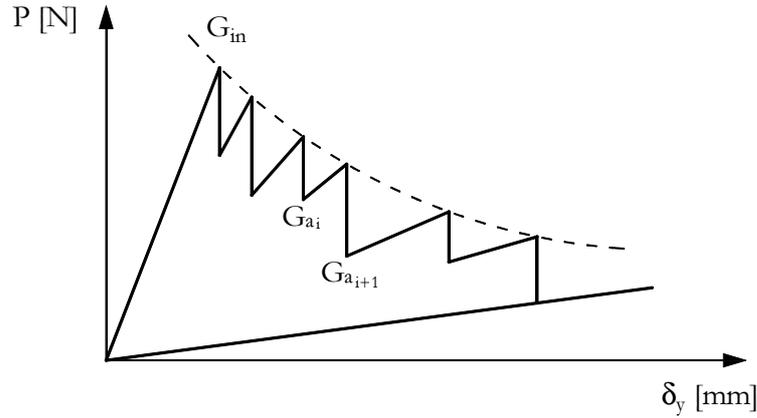


Figura 4.24: Esquema de la curva $P(\delta_y)$ de un ensayo DCB con *stick-slip*. Superposición de la curva de G_{in} constante y puntos de paro de crecimiento de grieta G_a .

$$G_{in} = \frac{9\delta_y^2 E_x I_z}{4B a_i^4} \quad (4.6)$$

$$G_a = \frac{9\delta_y^2 E_x I_z}{4B a_j^4} \quad (4.7)$$

Siendo δ_y la apertura de los brazos de la probeta, E_x el módulo de Young de los adherentes en la dirección de las fibras, B el ancho de probeta, a_i la longitud de la grieta antes de producirse el salto, a_j la longitud de grieta justo después de producirse el salto (ver figura 4.25) y I_z la inercia de uno de los adherentes. $I_z = Bh^3/12$, dónde h el espesor de uno de los adherentes.

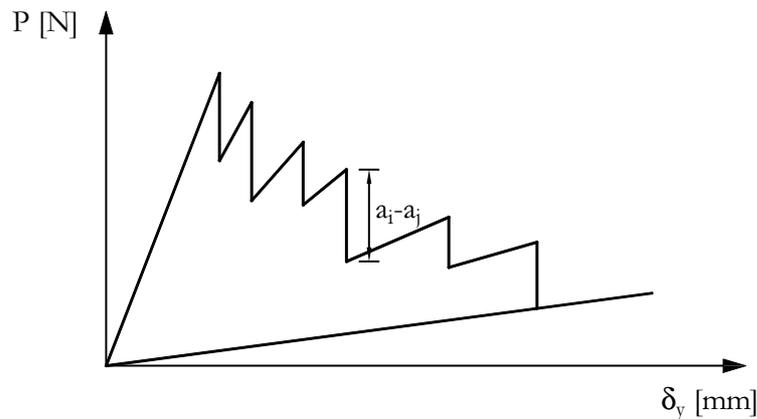


Figura 4.25: Esquema de la curva $P(\delta_y)$ de un ensayo DCB con *stick-slip*. Variación de P debido al incremento de longitud de grieta de a_i a a_j .

Representando las variables a_i y a_{i+1} de las ecuaciones 4.6 y 4.7 en función del resto de parámetros se obtienen las siguientes expresiones:

$$a_i = \sqrt[4]{\frac{9\delta_y^2 E_x I_z}{4BG_{in}}} \quad (4.8)$$

$$a_j = \sqrt[4]{\frac{9\delta_y^2 E_x I_z}{4BG_a}} \quad (4.9)$$

El salto del frente de grieta (Δa) corresponde a la diferencia entre ($a_j - a_i$), y es proporcional a $\sqrt{\delta_y}$:

$$\Delta a = a_j - a_i = \delta_y^{\frac{1}{2}} \left[\sqrt[4]{\frac{9E_x I_z}{4BG_a}} - \sqrt[4]{\frac{9E_x I_z}{4BG_{in}}} \right] \quad (4.10)$$

Por consiguiente, si δ_y aumenta también lo hace el valor de Δa , siendo cada vez mayor el salto del frente de grieta que se produce.

4.4.3. Reducción de datos de un ensayo DCB con propagación de grieta a saltos

Para tratar los datos experimentales de la curva fuerza-desplazamiento en presencia de *stick-slip* se presentan dos alternativas. El primer método consiste en determinar G_{IC} a partir de la energía disipada durante la propagación, conocido como método del área (contemplado en el estándar AITM 1-0053). El segundo método consiste en seleccionar los puntos máximos de la curva fuerza desplazamiento y aplicar los métodos de reducción de datos propuestos en la norma ISO 15024, para determinar G_{IC} en los puntos de iniciación del crecimiento de la grieta $G_{in} = G_{IC}$. Tal y como se ha comentado en la sección anterior, no se han tenido en cuenta los puntos en los cuales se produce la detención de la grieta y en los cuales se obtiene G_a , porque dependen de las propiedades elásticas de los adherentes y de la energía potencial acumulada en los brazos de la probeta que se disipa al producirse el salto.

4.4.3.1. Método del área

El método del área, contemplado en la norma AITM 1-0053, consiste en determinar la tenacidad a la fractura del adhesivo (G_{IC}) a partir de la energía disipada durante la propagación (U_{dis}). El valor de la energía disipada se obtiene a partir de los datos de la curva $P(\delta_y)$ mediante la siguiente expresión:

$$G_{IC} = \frac{U_{dis}}{(a_f - a_0)B} = \frac{\left(\int_{\delta_{y0}}^{\delta_{yf}} P(\delta_y) \right) - U_{ef}}{(a_f - a_0)B} \quad (4.11)$$

Siendo δ_{y_0} y δ_{y_f} los valores de desplazamiento inicial y final de los brazos de la probeta respectivamente, a_0 y a_f son los valores de longitud de grieta medidos en δ_{y_0} y δ_{y_f} respectivamente, B el ancho de la probeta y U_{ef} la energía elástica final de los brazos de la probeta.

A partir del método del área se obtiene un único valor de G_{IC} promedio para toda la curva fuerza-desplazamiento. Para aplicar este método se necesitan los valores de la longitud de grieta en los puntos inicial y final de la propagación. Durante el ensayo no es necesario controlar la posición del frente de grieta. Industrialmente es un método ventajoso por su sencillez de aplicación. Fácilmente puede implementarse un algoritmo que realice directamente el cálculo de G_{IC} , a partir de los datos del ensayo y de las propiedades de la probeta.

4.4.3.2. Determinación de G_{IC} a partir de los puntos de iniciación del crecimiento rápido del frente de grieta (G_{in})

A partir de los puntos de iniciación del crecimiento rápido del frente de grieta (G_{in}) se obtiene el valor de la tenacidad a la fractura en modo I del adhesivo (G_{IC}). El inicio de la propagación de la propagación de la grieta (a saltos) se produce cuando $G = G_{in}$. El valor de G_{in} se obtiene a partir de los puntos máximos de la curva fuerza-desplazamiento del ensayo. Generalmente se dispone de un número reducido de puntos, debido a las discontinuidades de la curva, ver figura 4.26. Pero puede obtenerse igualmente una representación de G_{in} en función de a (curva de la R o curva de resistencia), del mismo modo que se hace en los ensayos de fractura interlaminar (ISO 15024) o de pelado con propagación de grieta continua (ISO 25217), pero con menos puntos.

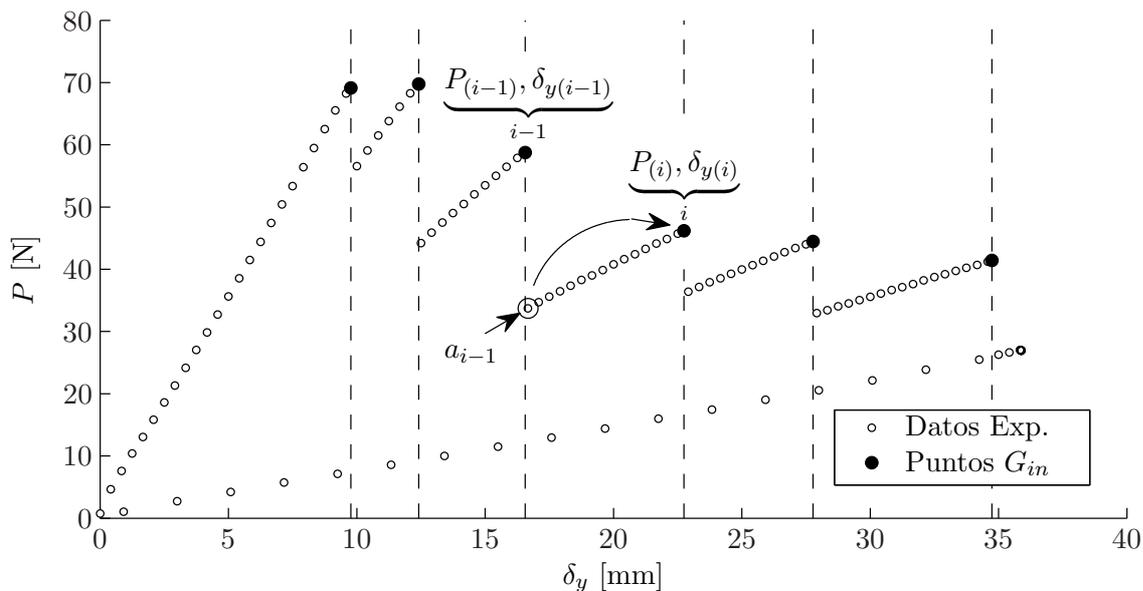


Figura 4.26: Determinación de los valores de P , δ_y y a de un ensayo DCB, puntos para obtener G_{in} . Probeta T1/E1/07/06. Se ha reducido el número de puntos experimentales para visualizar más claramente los cuales se determinan P , δ_y y a .

En los tramos de crecimiento lento del frente de grieta (bandas blancas de la superficie fracturada

de la figura 4.24), para calcular G_{in} puede suponerse que la longitud de grieta no se incrementa apreciablemente en el periodo de tiempo desde que se produce el salto de grieta hasta que se produce el siguiente. Mediante métodos ópticos puede determinarse el valor de a en la zona de crecimiento lento, una vez se ha producido el salto, y considerar esta longitud de grieta como la del siguiente punto máximo de la curva $P(\delta_y)$, ver figura 4.26, porque en la mayor parte del tiempo del ensayo el frente de grieta está parado. De esta manera, para cada punto máximo de la curva fuerza-desplazamiento se consideran los valores de P y δ_y en el instante i (punto de iniciación del siguiente salto de a) y el valor de a en el instante $i - 1$ (justo después de producirse el salto anterior de a).

A partir de los valores de P_i , δ_{yi} y a_{i-1} se calcula el valor de la tenacidad a la fractura en modo I del adhesivo a partir de los métodos de reducción de datos propuestos por las normas de ensayos a deslaminación (ISO 15024): CBT o MCC, o los métodos propuestos por la norma de ensayos de pelado de uniones adhesivas (ISO 25217): CBT o ECM.

4.5. Cambios en la metodología experimental de los ensayos DCB de uniones adhesivas con *stick-slip*

El objetivo final del desarrollo de los métodos de reducción de datos para ensayos DCB con propagación a saltos del frente de grieta (*stick-slip*) es proponer su implementación en la metodología experimental del ensayo. Las modificaciones realizadas en los métodos de reducción de datos conllevan una serie de cambios en los procesos de preparación y realización del ensayo experimental DCB. En el capítulo 8 se presentan los resultados de G_{IC} de las campañas experimentales que se han llevado a cabo aplicando la metodología experimental que se describe a continuación.

4.5.1. Preparación de las probetas

Para poder hacer el seguimiento visual del frente de grieta se han pintado los laterales de la probeta de color blanco, del mismo modo que en los ensayos de fractura interlaminar del capítulo 3, pero se ha modificado el marcaje lateral de la probeta. En el ensayo de preagrietamiento no se han realizado marcas en los laterales de la probeta a $A_0 + 3 \text{ mm}$ y $A_0 + 5 \text{ mm}$ según el procedimiento de la norma ISO 15024. Si el avance de grieta es discontinuo no se puede controlar la nueva posición del frente de grieta, por lo que el marcaje lateral no es útil. El ensayo de preagrietamiento se ha finalizado una vez el frente de grieta ha rebasado una distancia superior a $A_0 + 3 \text{ mm}$.

Para realizar el ensayo de propagación de la grieta se ha marcado el lateral de la probeta según el esquema de la figura 4.27.

Se han realizado marcas verticales cada mm para conocer la posición del frente de grieta después

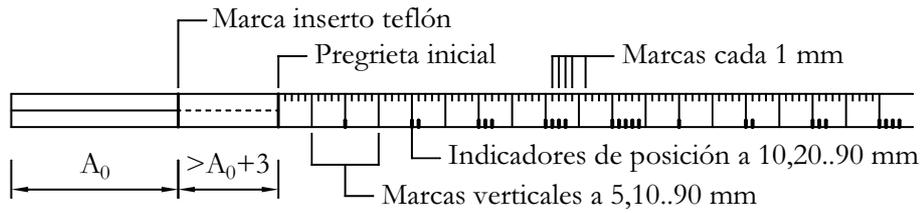


Figura 4.27: Marcaje lateral de las uniones adhesivas para ensayos DCB de propagación de grieta con *stick-slip*. Unidades en mm.

de cada salto. En los ensayos DCB con propagación de grieta continua se determinan los valores de P y δ_y en los que la grieta alcanza una de las marcas realizadas en los laterales de la probeta. Si la propagación de grieta se produce a saltos no se puede predecir con exactitud cuando se produce la detención del frente de grieta, y se debe determinar la posición del frente de grieta una vez se ha producido el salto.

Para determinar la posición del frente de grieta se ha utilizado un visor óptico con una magnificación de imagen de $10\times$, y con un campo de visión de 10 a 15 mm de la longitud de la probeta. Los saltos de grieta que se han producido durante el ensayo han sido, en muchas ocasiones, superiores al rango de visión del visor. Para identificar con mayor facilidad la posición del nuevo frente de grieta, sin perderse entre las marcas laterales, se han realizado unas marcas de posicionamiento cada 10 mm con un rotulador permanente en la parte inferior del lateral de la probeta, ver figura 4.27.

4.5.2. Realización del ensayo experimental

El ensayo experimental se ha realizado en dos etapas: preagrietamiento y propagación. Debido a la propagación discontinua del frente de grieta no se ha podido controlar con exactitud la posición final de a , y en muchos casos, el valor de a ha sido superior a las longitudes indicadas en la norma de ensayos ISO 15024: $A_0 + 5 \text{ mm}$ para los ensayos de preagrietamiento y $a_0 + 50 \text{ mm}$ para los ensayos de propagación.

En algunos ensayos de propagación, después de un salto de a , el frente de grieta se ha parado justo antes de la marca $a_0 + 50 \text{ mm}$. Para determinar los valores de fuerza y desplazamiento asociados con esta longitud de grieta se ha realizado otro salto del frente de grieta. Al producirse este nuevo salto, el frente de grieta se ha propagado hasta una distancia muy superior a los $a_0 + 50 \text{ mm}$. Por ejemplo, en la figura 4.28 del ensayo experimental de la probeta T1/E1/07/06, para obtener los valores de P_6 y δ_{y6} asociados a la longitud de grieta $a_5 = 49 \text{ mm}$, ha sido necesario propagar la grieta hasta $a_6 = 67 \text{ mm}$.

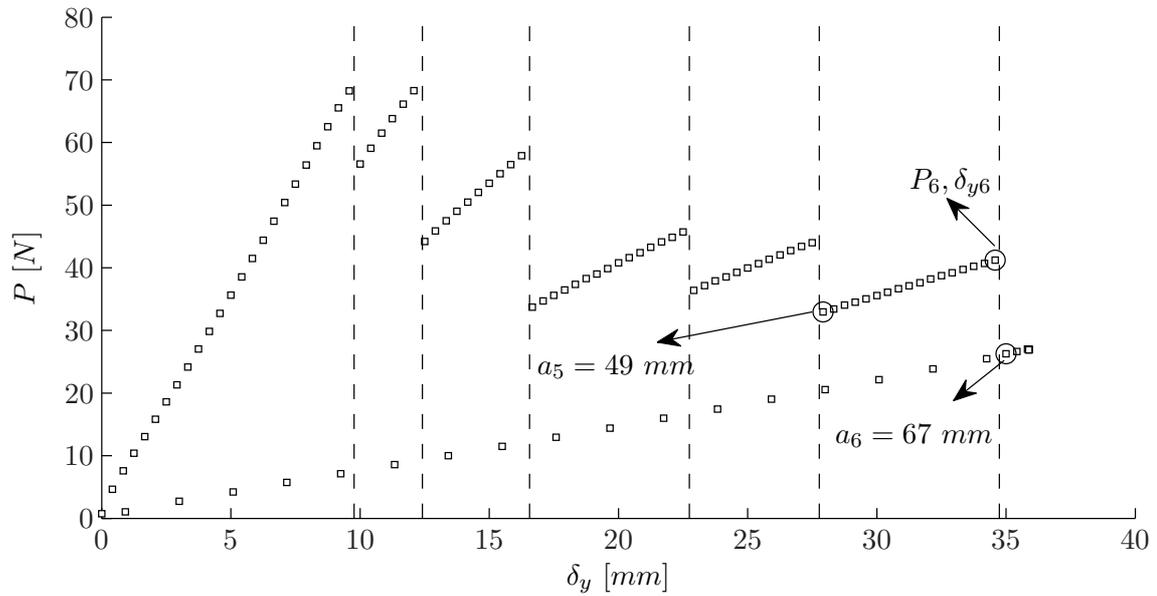


Figura 4.28: Propagación a saltos del frente de grieta de la probeta T1/E1/07/06. Determinación de a_f .

4.5.3. Tratamiento de los datos experimentales

Para calcular la tenacidad a la fractura en modo I de la unión (G_{IC} , tomada como G_{in}) se han utilizado 4 métodos de reducción de datos propuestos en las normas de ensayo ISO 15024, ISO 25217 y AITM 1-0053. El método de la teoría de vigas corregida (*Corrected Beam Theory*, CBT), el método de la calibración experimental de la flexibilidad (*Experimental Compliance Method*, ECM), el método de la calibración de la flexibilidad modificada (*Modified Compliance Calibration*, MCC) y el método del área. Los datos de la fuerza, desplazamiento y longitud de grieta se han obtenido de la metodología descrita en el apartado 4.4.3. Para el método del área, solamente se han utilizado los valores de a_0 y a_f marcados en los laterales de la probeta durante el ensayo experimental.

Capítulo 5

Ensayo alternativo de propagación de grieta por avance forzado de cuña (WDT)

5.1. Introducción

En este capítulo se propone un ensayo alternativo al DCB para caracterizar la calidad de las uniones adhesivas entre materiales composites: el ensayo de propagación de grieta por avance forzado de cuña (*wedge driven test*, WDT).

En primer lugar se describen las características del ensayo. A continuación se presenta una metodología de tratamiento de los datos experimentales para obtener la tenacidad a la fractura en modo I. Y finalmente, se analizan las hipótesis en las cuales se fundamenta el método de reducción de datos.

5.2. Descripción del ensayo alternativo

El ensayo alternativo al DCB que se presenta en este capítulo es un ensayo de fractura en modo I, en el cual la propagación de la grieta se realiza mediante el avance de una cuña a velocidad constante por el plano del adhesivo, ver figura 5.1, el ensayo se denomina WDT (*Wedge Driven Test*).

Para este tipo de ensayo, se utiliza el mismo tipo de probeta que se emplea en los ensayos de doble viga en voladizo (DCB). La probeta consiste en dos adherentes de composite unidos por una lámina de adhesivo con una pregrieta inicial en uno de sus extremos.

La cuña es una pieza metálica de sección rectangular con un ancho superior al de la probeta, y que está mecanizada en la punta para darle un acabado cilíndrico. El espesor del utillaje se ha definido en base a un estudio paramétrico que se ha realizado en los siguientes apartados de este mismo capítulo. El movimiento de la cuña se controla por desplazamiento a velocidad constante.

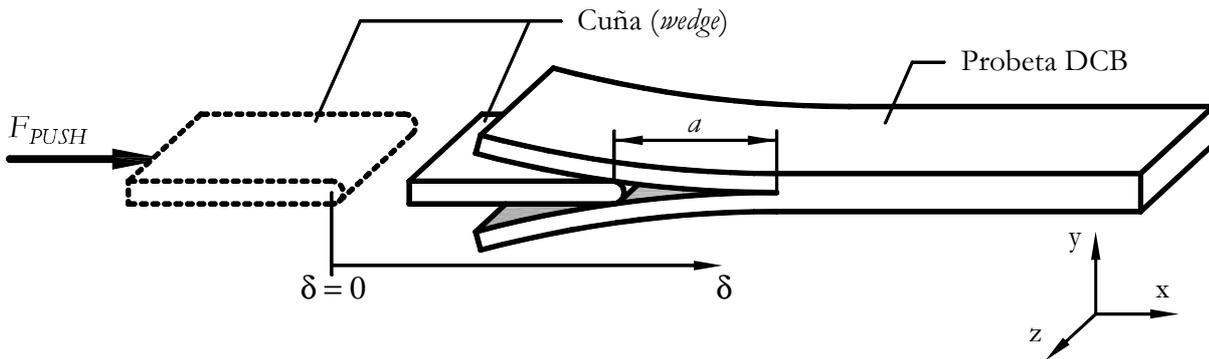


Figura 5.1: Esquema del ensayo de apertura de grieta WDT.

La probeta se mantiene sujeta durante el ensayo experimental. Como resultado del ensayo se obtiene la energía disponible para la fractura en modo I del adhesivo (G_{IC}).

El ensayo experimental se realiza en una máquina universal. La máquina debe tener un recorrido del pistón suficiente para poder realizar el desplazamiento de la cuña por la probeta. El ensayo consiste en llevar a cabo los pasos que se indican en la figura 5.2. Inicialmente se introduce la cuña en la probeta (figuras 5.2(a) - 5.2(d)) y posteriormente se realiza el ensayo experimental (figuras 5.2(e) y 5.2(f)).

Antes de realizar el ensayo experimental, se fija la probeta a la máquina de ensayo por el extremo que no tiene la pregrieta, la probeta debe permanecer fijada por los utillajes durante todo el ensayo. En el otro extremo de la probeta se alinea la cuña con el frente de grieta (figura 5.2(a)). En primer lugar, se abren los brazos de la probeta (figura 5.2(b)) y se introduce la cuña en el interior (figura 5.2(c)). Una vez dentro, se cierran los brazos de la probeta (figura 5.2(d)). La realización del ensayo experimental consiste en provocar el avance de la cuña hacia el extremo de la probeta empotrado. Como consecuencia del avance se abren los brazos de la probeta y se propaga la grieta (figura 5.2(e)). Finalmente, se realiza el retroceso de la cuña hasta su posición inicial (figura 5.2(f)).

5.2.1. Curva teórica de resultados

Como resultado del ensayo experimental se obtienen los datos del desplazamiento de la cuña (δ) y de la fuerza de empuje necesaria para realizar el desplazamiento (F_{PUSH}). Los datos pueden representarse en una curva de F_{PUSH} en función de δ . Para un ensayo, la curva teórica $F_{PUSH}(\delta)$ se representa en la figura 5.3(a). A partir de esta curva pueden calcularse los valores de G y a en función de δ como se verá más adelante, y también representar las curvas de $G(\delta)$ y $a(\delta)$, ver figuras 5.3(b) y 5.3(c) respectivamente. Las curvas presentan 3 fases: introducción, propagación y retroceso.

En la fase de introducción, la cuña, que previamente ha entrado en la probeta, se desplaza hacia el frente de grieta. A medida que se acerca a su posición, el valor de F_{PUSH} aumenta porque, al

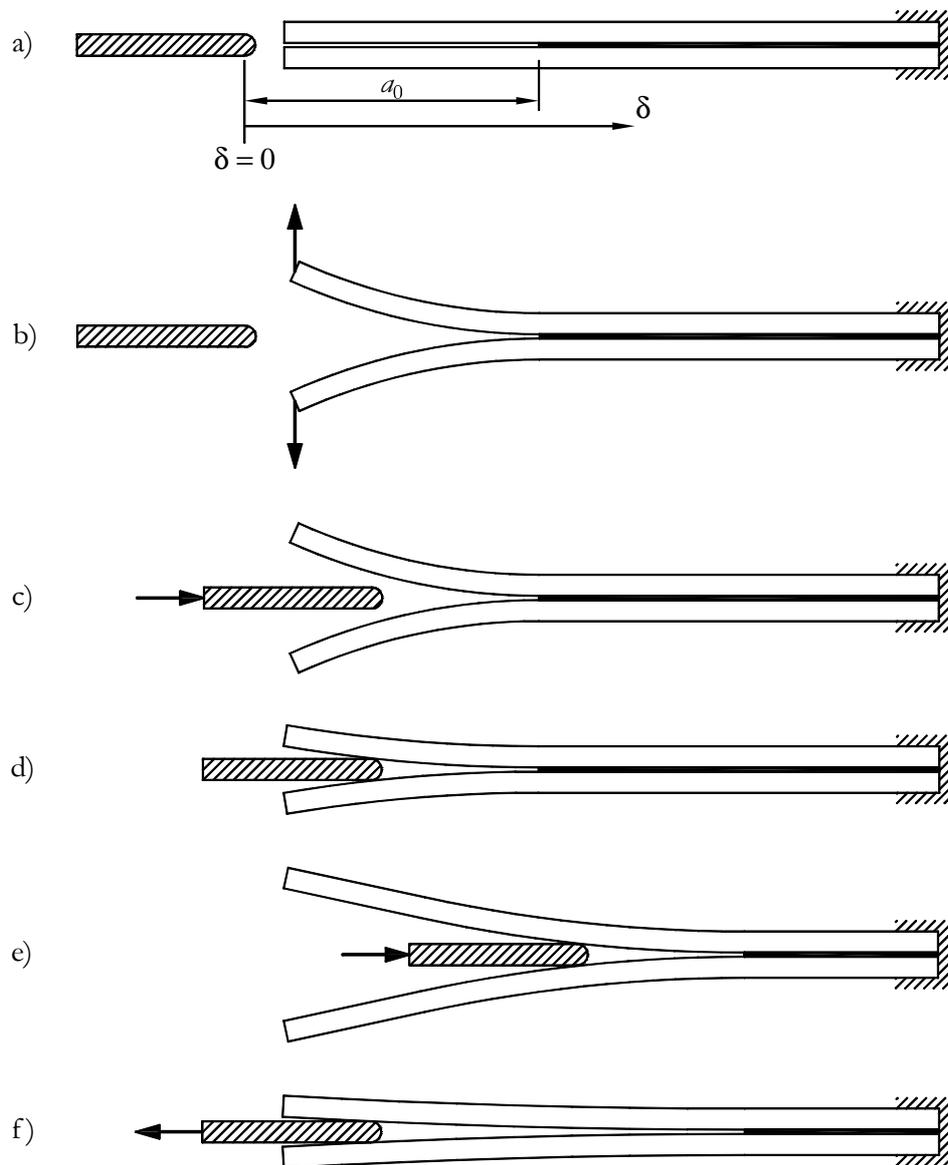


Figura 5.2: Secuencia del ensayo WDT.

disminuir la longitud de los brazos de la probeta, se incrementa su rigidez. El valor de F_{PUSH} sigue aumentando hasta que se produce la propagación de la grieta por fallo en la unión adhesiva. En esta fase, el valor de a disminuye de forma lineal porque la cuña se aproxima al frente de grieta a velocidad constante. Y el valor de G , que depende de F_{PUSH} y de a , aumenta en introducir la cuña hasta que $G = G_{IC}$, momento en que se propaga la grieta. Durante la fase de propagación, el frente de grieta y la cuña se desplazan a la misma velocidad. Su distancia se mantiene constante, y por consiguiente, los valores de F_{PUSH} , a y G se mantienen estacionarios ($G = G_{IC}$). En la tercera y última fase se realiza el retroceso de la cuña. Al cambiar el sentido del movimiento de la cuña el valor de F_{PUSH} cambia de signo. Ésto se debe al efecto de la fricción entre cuña y probeta, porque la fuerza de fricción se opone al movimiento de la cuña. La cuña se aleja del frente de grieta y por consiguiente aumenta a . El valor de G disminuye

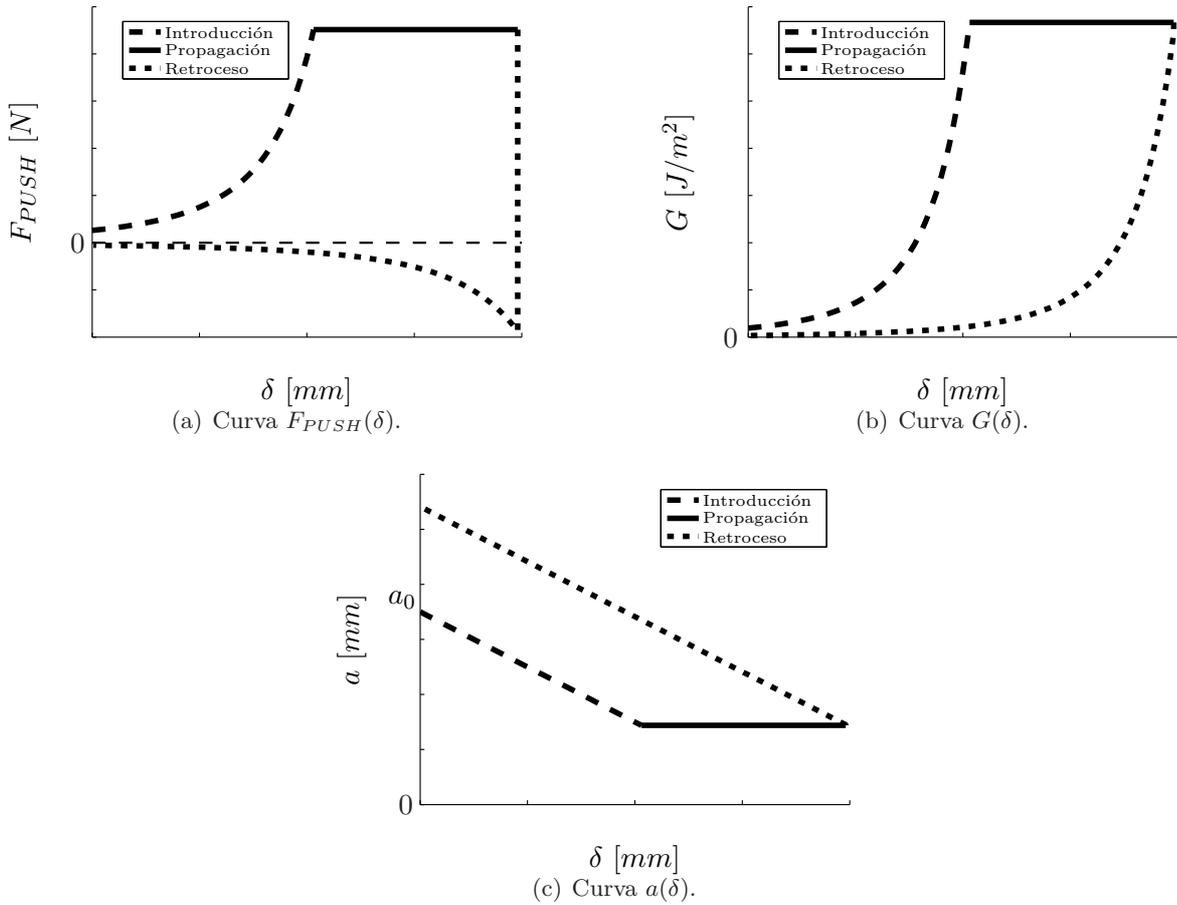


Figura 5.3: Representación de las curvas F_{PUSH} , G y a en función de δ de un ensayo WDT teórico.

porque, tal y como se verá mas adelante, tiene una dependencia proporcional con F_{PUSH} e inversamente proporcional con a . A la fuerza para realizar el movimiento de la cuña durante la fase de retroceso se la denomina F_{PULL} .

En la figura 5.3(a) también se observa como los valores de la fuerza en el instante en que $\delta = 0$ son distintos a cero por el movimiento de la cuña.

5.2.2. Obtención de G_{IC} a partir de los resultados del ensayo WDT

A partir de la mecánica de la fractura lineal y elástica, en los ensayos de fractura en modo I de probetas DCB puede obtenerse un valor de la energía disponible para la fractura en modo I (G_I) en función de la fuerza de apertura de los brazos de la probeta (P), del desplazamiento de los brazos (δ_y) y la distancia entre el punto de aplicación de la carga y el frente de grieta (a). En un ensayo WDT el parámetro más fácil de determinar es δ_y porque depende directamente de la geometría de la cuña, y su posición respecto el frente de grieta. Por consiguiente, para calcular G hay que obtener de algún modo uno de los otros dos parámetros: a o P .

El ensayo WDT no proporciona datos de P o a . Los datos que se obtienen del ensayo experimental son de la máquina del ensayo: el desplazamiento de la cuña (δ), y la fuerza necesaria para realizar el avance a velocidad constante (F_{PUSH}), ver figura 5.3(a). Por otra parte, si hay contacto entre la cuña y la probeta hay una fricción entre las superficies que se representa con el coeficiente μ .

Para determinar a o P hay varias alternativas. Un método para obtener a es medir directamente la distancia entre el frente de grieta y el punto de contacto entre cuña y probeta. Otro método es calcular a en función de F_{PUSH} , δ_y y μ a partir de una expresión analítica (Williams (1998)). En los trabajos publicados hasta la fecha para este tipo de ensayo (Glessner et al. (1989), Sener et al. (2002), Pardoen et al. (2005), Adams et al. (2009)) se ha descartado la medición de a , por la complejidad que presenta en cuanto al montaje experimental (debe determinarse al mismo tiempo la posición del frente de grieta y la posición del punto de contacto entre la cuña y la probeta). En relación al parámetro P , al igual que a , puede calcularse P en función de F_{PUSH} , δ_y y μ (Williams (1998)). De manera que se puede afirmar que G depende directamente de δ_y , a o P . Y que a su vez, a y P dependen de F_{PUSH} , δ_y y μ .

En las curvas de resultados del ensayo experimental que se incluyen en la figura 5.3, se observa que en la fase de propagación del ensayo, la fuerza F_{PUSH} , a y G se encuentran en un estado estacionario en el cual $G = G_{IC}$. Los trabajos previos que se han realizado con el WDT han utilizado los datos de este rango de la curva, y proponen varios métodos alternativos para determinar a (necesario en el cálculo de G_{IC}). El principal inconveniente que se presenta en todas ellas es como cuantificar o evitar el efecto del coeficiente de fricción (μ) en los resultados.

Por ejemplo, en el trabajo de Glessner et al. (1989) se utiliza una cuña con dos filas de rodamientos (ver figura 2.9) para eliminar la fricción entre la propia cuña y la probeta. Con este sistema se puede obtener una relación directa entre G y F_{PUSH} , sin embargo el diseño del utilaje resulta complejo en cuanto a su fabricación. En otros trabajos como el de Pardoen et al. (2005) se determina a a partir de la deformación plástica de los brazos de la probeta una vez finalizado el ensayo experimental. Este tipo de ensayo experimental es útil para uniones adhesivas con adherentes metálicos, los adherentes de composite no tienen deformación plástica y, por consiguiente, no puede aplicarse este método en las probetas de este trabajo. Otra alternativa es la que se propone en el trabajo de Sener et al. (2002), en el cual se determina a a partir de los datos de la deformación de los brazos de la probeta en otro punto que no es el de contacto entre la cuña y la probeta. Sin embargo, para poder realizar estas mediciones se deben incluir dos relojes comparadores en el montaje experimental, por lo que resulta complejo preparar y realizar el ensayo. Finalmente, hay otros trabajos en los cuales, para desprestigiar el efecto de la fricción, se propone realizar un ensayo de impacto de la cuña sobre la probeta (Blackman et al. (2000)), a estos ensayos se los denomina IWP (*Impact Wedge-Peel test*).

En base a las aportaciones realizadas en los trabajos anteriores, se pretende determinar G_{IC} sin tener que medir a mediante los datos experimentales del ensayo, realizando un montaje experimental lo más sencillo posible, para que pueda ser utilizado a nivel industrial en grandes

campanas de ensayo. El método que se ha desarrollado utiliza los datos experimentales de toda la curva de ensayos. Si bien es cierto que la fase de propagación es de gran interés, porque el valor de G se corresponde con G_{IC} , los datos que se obtienen de esta fase no son útiles si no se ha calculado previamente el valor del coeficiente de fricción μ .

En la figura 5.3 se ha dividido el ensayo experimental en 3 fases, introducción, propagación y descarga. Puede observarse que las fases de introducción y descarga tienen la particularidad que el frente de grieta no avanza, y que por tanto, la longitud de grieta en cada punto depende del desplazamiento de la cuña (δ), y de la fricción entre la cuña y la probeta. Por consiguiente, en estas fases se puede representar a en función de δ . Si se realiza esta substitución de variables en una expresión que relacione a en función de F_{PUSH} , δ_y y μ , se obtiene una nueva expresión en la cual se relacionan las variables F_{PUSH} , δ_y , μ y δ . Conocidos F_{PUSH} y δ a partir de los datos experimentales, y las dimensiones de la probeta (para calcular δ_y), se puede determinar μ .

En realidad el proceso no es directo, porque para poner a en función de δ se debe haber determinado previamente la posición de la cuña respecto al frente de grieta (variable a_0 de la figura 5.2). Como este valor resulta difícil de medir con precisión, se debe realizar un ajuste de la curva experimental del ensayo en el tramo de introducción para determinar los parámetros a_0 y μ . Una vez conocido μ puede calcularse $G = G_{IC}$ a partir de los datos de $F_{PUSH}(\delta)$ del tramo de propagación.

5.3. Descripción analítica del ensayo

Tal y como se ha comentado en el anterior apartado, en este trabajo se propone un nuevo método experimental para obtener la tenacidad a la fractura directamente de los datos de la curva $F_{PUSH}(\delta)$ del ensayo WDT sin tener que medir a , puesto que la medición de a incrementa el tiempo de ejecución del ensayo y la complejidad del montaje experimental.

El proceso que se ha seguido es el siguiente: en primer lugar se ha representado una curva $F_{PUSH}(\delta)$ a partir de los datos experimentales, a continuación se ha determinado el valor del coeficiente de fricción (μ) mediante un ajuste de los datos de la curva $F_{PUSH}(\delta)$ de la fase de introducción. Una vez obtenido el coeficiente de fricción, se ha calculado G_{IC} a partir de los datos de la fase de propagación. Las expresiones para realizar el ajuste de μ y calcular G_{IC} se incluyen en los siguientes subapartados.

5.3.1. Fase de introducción y descarga

En la fase de introducción y descarga se realiza un ajuste del coeficiente de fricción a partir de los datos de F_{PUSH} y δ del ensayo experimental.

Se presentan dos alternativas para realizar el ajuste de μ , un método desarrollado a partir del

punto de contacto exacto entre la cuña y la probeta, y otro método en el cual se ha realizado una simplificación en relación a la posición del mismo punto de contacto. Ambas formulaciones se basan en la teoría de vigas simple de Euler-Bernoulli.

5.3.1.1. Método de cálculo a partir del punto de contacto exacto entre la cuña y la probeta

Si se considera que la punta de la cuña tiene forma cilíndrica, en la figura 5.4 se muestra el punto de contacto exacto entre la probeta y la cuña.

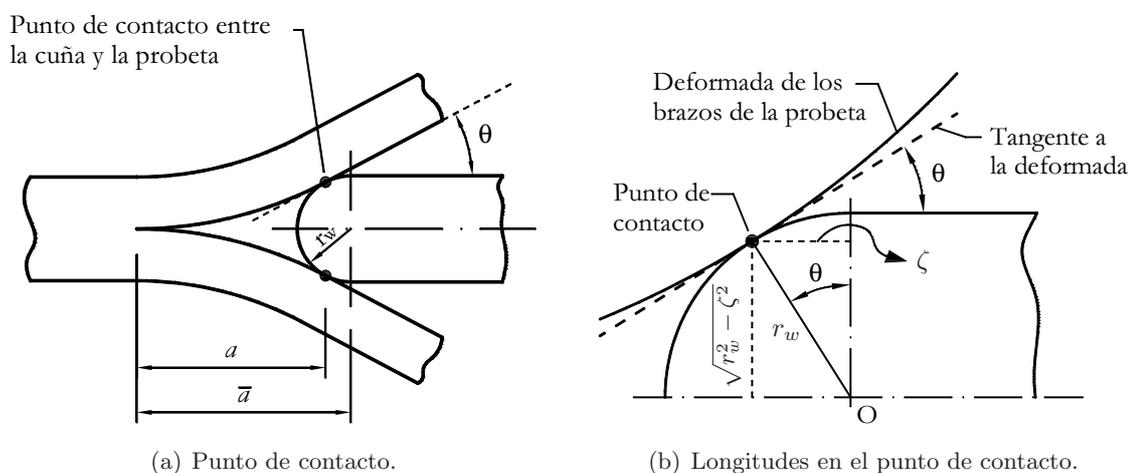


Figura 5.4: Punto de contacto entre la cuña y la probeta, y posición del punto de contacto respecto al centro de la cuña.

En la figura 5.4(a) se han definido una serie de parámetros que se utilizarán posteriormente en la formulación analítica. El parámetro a es la distancia entre el punto de contacto y el frente de grieta, \bar{a} es la distancia entre el centro del radio de curvatura de la cuña y el frente de grieta, θ es el ángulo de inclinación de los brazos de la probeta en el punto de contacto y r_w el radio de curvatura de la punta de la cuña.

Por otra parte, en la figura 5.4(b) se observa que el punto de contacto entre la cuña y la probeta se encuentra desplazado una distancia horizontal ζ y una distancia vertical $\sqrt{r_w^2 - \zeta^2}$ respecto al centro de curvatura de la punta de la cuña (punto O de la figura 5.4(b)). Así pues la relación entre a y \bar{a} es:

$$\bar{a} = a + \zeta \quad (5.1)$$

Determinación del ángulo de contacto entre la cuña y la probeta

En la figura 5.5(a) se muestra la representación esquemática del contacto entre cuña y probeta. Al introducir la cuña, esta causa una fuerza P en el punto de contacto, y cada brazo de la probeta se separa una distancia $\delta_y/2 = \sqrt{r_w^2 - \zeta^2}$ respecto su posición inicial, ver figura 5.4(b).

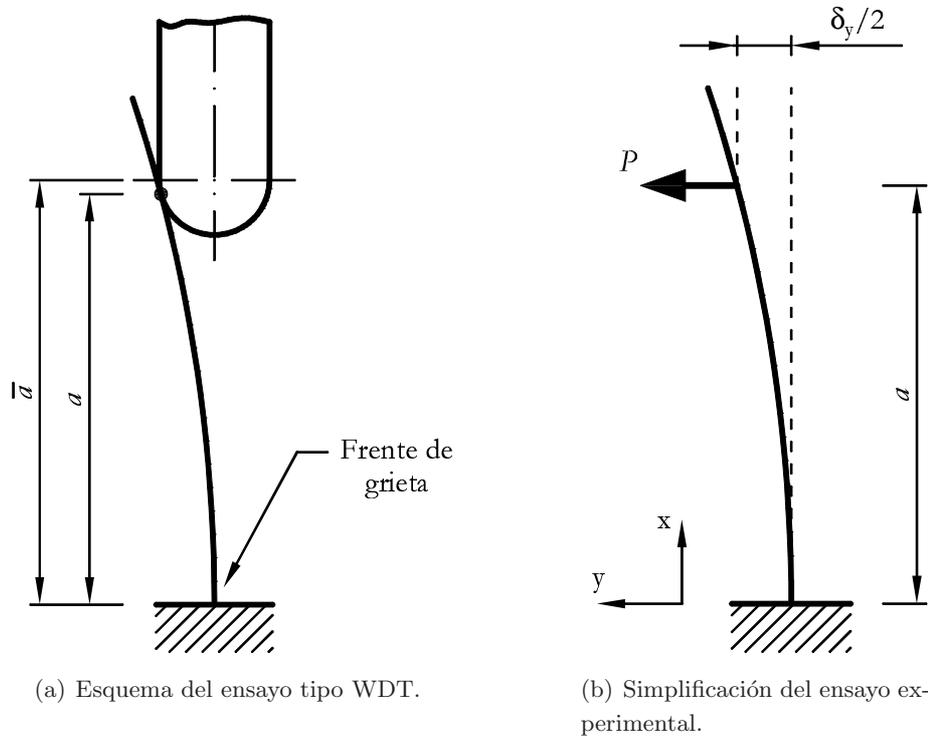


Figura 5.5: Representación esquemática del ensayo WDT para analizar las fuerzas que intervienen.

La deformada de los brazos de la probeta puede representarse con la ecuación de la deformación elástica de una viga en voladizo, ver figura 5.5. Los brazos de la probeta actúan como una viga empotrada en uno de sus extremos (el frente de grieta), y en el otro extremo se aplica una fuerza P , que deriva de la fuerza de contacto entre la cuña y la probeta (componente en la dirección y de la fuerza de contacto).

Siendo a la distancia entre el empotramiento y el punto de aplicación de la carga, se obtiene la ecuación de la deformada de la viga para cualquier punto situado a una distancia x desde el empotramiento, entre 0 y a , a partir de la expresión:

$$y = \frac{P}{6E_x I_z} \left[(a-x)^3 + 3a^2x - a^3 \right] \quad (5.2)$$

Donde I_z es la inercia del brazo de la probeta respecto el eje z y E_x el módulo de Young del material en la dirección de las fibras.

El valor de la deformada de uno de los brazos de la probeta en el punto de contacto entre cuña y probeta ($x = a$) es:

$$y|_{x=\bar{a}} = \frac{Pa^3}{3E_x I_z} \quad (5.3)$$

Puede substituirse $a = \bar{a} - \zeta$ en la ecuación la ecuación 5.3, y teniendo en cuenta que la apertura de los brazos de la probeta es $\sqrt{r_w^2 - \zeta^2}$ se obtiene la siguiente expresión:

$$y|_{x=a} = y|_{x=\bar{a}-\zeta} = \sqrt{r_w^2 - \zeta^2} = \frac{P(\bar{a} - \zeta)^3}{3E_x I_z} \quad (5.4)$$

Si se representa la ecuación 5.4 en función de P :

$$P = \frac{3E_x I_z \sqrt{r_w^2 - \zeta^2}}{(\bar{a} - \zeta)^3} \quad (5.5)$$

Por otra parte, derivando la ecuación 5.2 se obtiene la tangente a la ecuación de la deformada para cualquier punto x :

$$y' = \frac{dy}{dx} = -\frac{P}{2E_x I_z} [(a - x)^2 - a^2] \quad (5.6)$$

En $x = a$ el pendiente de la recta tangente ($\tan \theta$) es:

$$\tan \theta = \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=a} = \frac{Pa^2}{2E_x I_z} \quad (5.7)$$

Substituyendo $a = \bar{a} - \zeta$ y la ecuación 5.5 en 5.7 se obtiene la siguiente expresión:

$$\tan \theta = \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=\bar{a}-\zeta} = \frac{3\sqrt{r_w^2 - \zeta^2}}{2(\bar{a} - \zeta)} \quad (5.8)$$

El ángulo θ también puede obtenerse a partir de la siguiente relación geométrica (ver figura 5.4(b)):

$$\tan \theta = \frac{\zeta}{\sqrt{r_w^2 - \zeta^2}} \quad (5.9)$$

Igualando las expresiones 5.8 y 5.9 se obtiene el valor de ζ :

$$\frac{3\sqrt{r_w^2 - \zeta^2}}{2(\bar{a} - \zeta)} = \frac{\zeta}{\sqrt{r_w^2 - \zeta^2}} \quad (5.10)$$

$$\zeta = \sqrt{\bar{a}^2 + 3r_w^2} - \bar{a} \quad (5.11)$$

En el caso que $r_w \ll \bar{a}$, el parámetro $\zeta \ll \bar{a}$, y ζ de la ecuación 5.11 puede aproximarse a:

$$\zeta = \frac{3r_w^2}{2\bar{a}} \quad (5.12)$$

Fuerzas que intervienen en la cuña durante su avance

En la figura 5.6 se representan las fuerzas externas que actúan sobre la cuña durante su avance hacia el frente de grieta. En el punto de contacto con la probeta hay aplicadas dos fuerzas normales (F_N), causadas por el contacto de los brazos de la probeta, y dos fuerzas de fricción (F_F) que se oponen al movimiento de la cuña. En el otro extremo de la cuña se aplica una fuerza F_{PUSH} de empuje.

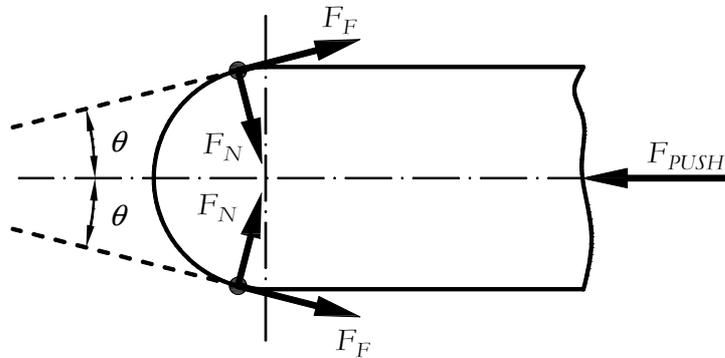


Figura 5.6: Fuerzas que actúan sobre la cuña durante su avance.

La relación entre F_N y F_F puede expresarse como:

$$F_F = F_N \cdot \mu \quad (5.13)$$

Siendo μ el coeficiente de fricción entre la cuña y la probeta.

Cada uno de los vectores de fuerza normal y tangencial puede descomponerse en una componente vertical y horizontal. La suma vectorial de las fuerzas F_N y F_F da como resultado una fuerza de contacto total, F_C , ver figura 5.7.

La componente vertical de la fuerza de contacto F_{Cy} es igual a la fuerza de apertura de los brazos de la probeta que realiza la cuña.

$$P = F_{Cy} \quad (5.14)$$

Siendo F_{Cy} :

$$F_{Cy} = F_{Ny} - F_{Fy} = F_N \cdot \cos \theta - F_N \cdot \mu \cdot \sin \theta \quad (5.15)$$

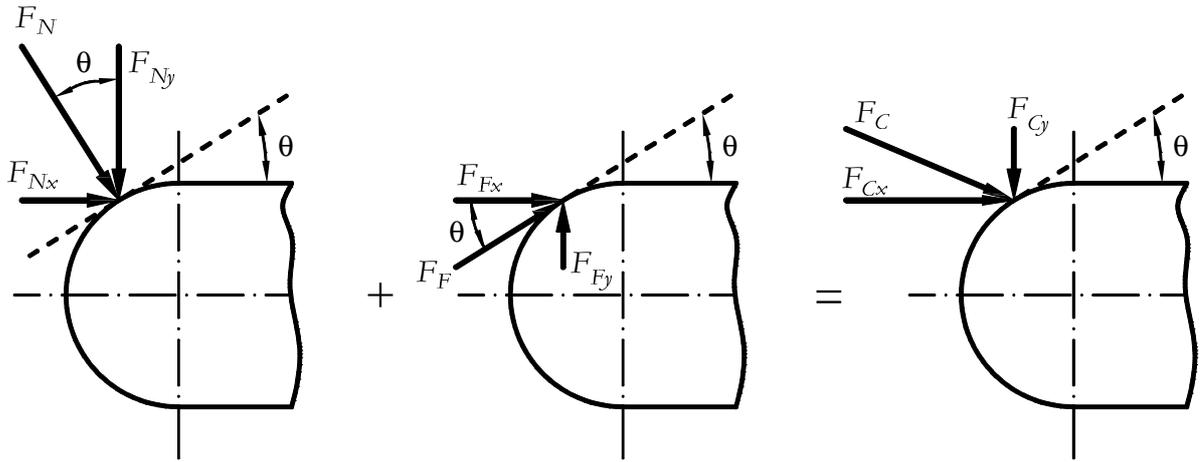


Figura 5.7: Descomposición de las fuerzas de contacto que actúan sobre la cuña durante su avance.

A partir de las ecuaciones 5.14 y 5.15 se relaciona P con la fuerza normal de contacto F_N :

$$P = F_N \cdot (\cos \theta - \mu \cdot \sin \theta) \quad (5.16)$$

Para que haya equilibrio de fuerzas horizontales, la suma de las componentes horizontales de la fuerza de contacto total (F_{Cx}) debe ser igual a la fuerza de empuje de la cuña (F_{PUSH}).

$$F_{PUSH} = 2 \cdot F_{Cx} \quad (5.17)$$

Siendo F_{Cx} :

$$F_{Cx} = F_{Nx} + F_{Fx} = F_N \cdot \sin \theta + F_N \cdot \mu \cdot \cos \theta \quad (5.18)$$

Puede obtenerse una relación entre F_{PUSH} y F_N a partir de las ecuaciones 5.17 y 5.18.

$$F_{PUSH} = 2 \cdot F_N \cdot (\sin \theta + \mu \cdot \cos \theta) \quad (5.19)$$

Finalmente, igualando las ecuaciones 5.16 y 5.19 se obtiene una relación entre la fuerza de empuje de la cuña (F_{PUSH}) y la fuerza de apertura de los brazos de la probeta (P):

$$F_{PUSH} = 2P \cdot \frac{\sin \theta + \mu \cos \theta}{\cos \theta - \mu \sin \theta} \quad (5.20)$$

Poniendo la ecuación 5.20 en función de $\tan \theta$:

$$F_{PUSH} = 2P \cdot \frac{\mu + \tan \theta}{1 - \mu \tan \theta} \quad (5.21)$$

Y substituyendo 5.8 en 5.20 se obtiene la siguiente expresión en función de ζ y \bar{a} :

$$F_{PUSH} = \frac{Bh^3 E_x \sqrt{r_w^2 - \zeta^2} \left(\mu + \frac{3\sqrt{r_w^2 - \zeta^2}}{2(\bar{a} - \zeta)} \right)}{2(\bar{a} - \zeta)^3 \left(1 - \frac{3\mu\sqrt{r_w^2 - \zeta^2}}{2(\bar{a} - \zeta)} \right)} \quad (5.22)$$

Finalmente puede expresarse F_{PUSH} solamente en función de \bar{a} substituyendo la expresión 5.11 en 5.22:

$$F_{PUSH} = \frac{Bh^3 E_x \sqrt{r_w^2 - \left(\sqrt{\bar{a}^2 + 3r_w^2} - \bar{a} \right)^2} \left(\mu + \frac{3\sqrt{r_w^2 - \left(\sqrt{\bar{a}^2 + 3r_w^2} - \bar{a} \right)^2}}{2\left(2\bar{a} - \sqrt{\bar{a}^2 + 3r_w^2} \right)} \right)}{2\left(2\bar{a} - \sqrt{\bar{a}^2 + 3r_w^2} \right)^3 \left(1 - \frac{3\mu\sqrt{r_w^2 - \left(\sqrt{\bar{a}^2 + 3r_w^2} - \bar{a} \right)^2}}{2\left(2\bar{a} - \sqrt{\bar{a}^2 + 3r_w^2} \right)} \right)} \quad (5.23)$$

Fuerzas que intervienen en la cuña durante su retroceso

Del mismo modo que se ha representado F_{PUSH} en función de \bar{a} para el avance de la cuña, puede obtenerse una expresión equivalente de la fuerza necesaria para hacer retroceder la cuña (F_{PULL}). En este caso, el sentido de la fuerza para mover la cuña y el de la fuerza de fricción es el opuesto, ver figura 5.8.

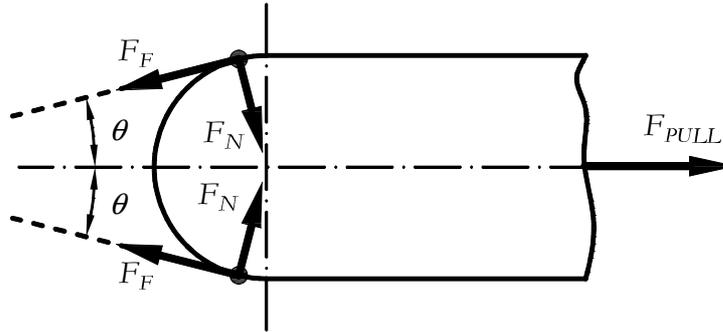


Figura 5.8: Fuerzas que actúan sobre la cuña durante su retroceso.

Al variar el sentido de la fuerza de fricción entre la cuña y la probeta se produce un cambio en la dirección de la fuerza de contacto F_C , ver la descomposición de las fuerzas en la figura 5.9.

La fuerza de apertura de los brazos de la probeta sigue siendo igual a la componente vertical de la fuerza de contacto, ver ecuación 5.14. Y se representa mediante la siguiente expresión:

$$P = F_{C_y} = F_{N_y} + F_{F_y} = F_N (\cos \theta + \mu \sin \theta) \quad (5.24)$$

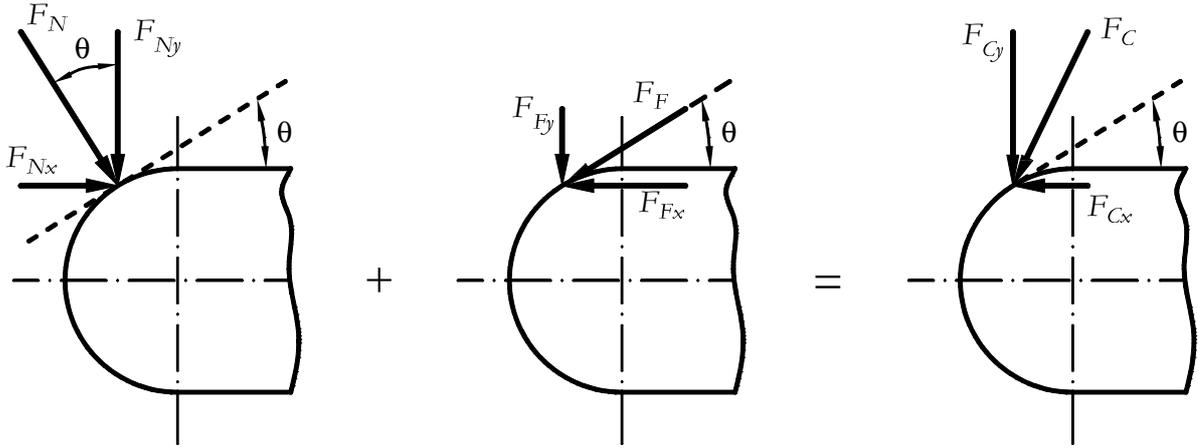


Figura 5.9: Descomposición de las fuerzas de contacto que actúan sobre la cuña durante su retroceso.

El valor de F_{PULL} se determina a partir de la siguiente expresión:

$$F_{PULL} = -2 \cdot F_{Cx} = -2 \cdot (F_{Fx} - F_{Nx}) = -2 \cdot F_N (\mu \cos \theta - \sin \theta) \quad (5.25)$$

Sacando F_N como factor común de las ecuaciones 5.24 y 5.25 e igualando los términos se obtiene la expresión que relaciona F_{PULL} con P .

$$F_{PULL} = -2P \cdot \frac{\mu \cos \theta - \sin \theta}{\cos \theta + \mu \sin \theta} \quad (5.26)$$

Del mismo modo que para F_{PUSH} , puede expresarse la ecuación 5.26 en función de $\tan \theta$:

$$F_{PULL} = -2P \cdot \frac{\mu - \tan \theta}{1 + \mu \tan \theta} \quad (5.27)$$

Observase que la fuerza F_{PULL} es negativa porque va en sentido contrario a F_{PUSH} (en el ensayo WDT la fuerza F_{PUSH} se considera positiva), y que los términos de la fricción han cambiando su signo. De igual modo que para F_{PUSH} pueden obtenerse las expresiones de F_{PULL} en función de ζ y de \bar{a} .

Obtención de una expresión de F_{PUSH} en función de δ

En la ecuación 5.23 se ha obtenido una relación entre F_{PUSH} y \bar{a} . Siendo \bar{a} la distancia entre el frente de grieta y el centro de curvatura de la punta de la cuña. A partir de la expresión 5.28 puede relacionarse \bar{a} en función del desplazamiento δ de la cuña:

$$\bar{a} = a_0 - \delta \quad (5.28)$$

Siendo a_0 la distancia entre la cuña y el frente de grieta en el instante de tiempo inicial del ensayo. Sustituyendo 5.28 en 5.23 se obtiene una ecuación que relaciona F_{PUSH} con el desplazamiento de la cuña:

$$F_{PUSH} = \frac{Bh^3 E_x \delta_{wy} \left(\mu + \frac{3\delta_{wy}}{2(2(a_0 - \delta) - \sqrt{(a_0 - \delta)^2 + 3r_w^2})} \right)}{2 \left(2(a_0 - \delta) - \sqrt{(a_0 - \delta)^2 + 3r_w^2} \right)^3 \left(1 - \frac{3\mu\delta_{wy}}{2(2(a_0 - \delta) - \sqrt{(a_0 - \delta)^2 + 3r_w^2})} \right)} \quad (5.29)$$

Siendo δ_{wy} la separación vertical (dirección y) que produce la cuña en uno de los brazos de la probeta:

$$\delta_{wy} = \sqrt{r_w^2 - \left(\sqrt{(a_0 - \delta)^2 + 3r_w^2} - (a_0 - \delta) \right)^2} \quad (5.30)$$

Para representar F_{PUSH} en función de δ ha sido necesario previamente expresar F_{PUSH} en función de \bar{a} y no de a . a depende del punto de contacto entre la cuña y la probeta, y éste varía su posición en la cuña a medida que avanza hacia el frente de grieta. En cambio el punto a partir del cual se obtiene \bar{a} pertenece al centro de curvatura de la propia cuña, y por tanto está directamente relacionado con su desplazamiento (δ).

En la ecuación 5.29 F_{PUSH} y δ son los datos de fuerza y desplazamiento almacenados por la máquina durante el ensayo experimental, E_x es el módulo de Young de los adherentes en la dirección de las fibras, B el ancho de la probeta, h el espesor de uno de los adherentes de la probeta y r_w el radio de curvatura de la punta de la cuña. A partir de la ecuación 5.29 no es posible determinar de forma directa μ porque también hay otro parámetro que se desconoce, a_0 . Para obtener los valores de μ y a_0 se supone que la superficie por donde pasa la cuña tiene una rugosidad constante, y se realiza un ajuste por el método de los mínimos cuadrados de los datos experimentales de la curva F_{PUSH} durante la fase de introducción. Como resultado del ajuste se obtienen a_0 y μ .

5.3.1.2. Formulación simplificada para determinar el punto de contacto entre cuña y probeta.

Si las deformaciones que experimentan los brazos de la probeta son pequeñas pueden obtenerse unas expresiones simplificadas de las ecuaciones 5.23 y 5.29, asumiendo la hipótesis que el punto de contacto entre la cuña y la probeta se mantiene constante, independientemente del desplazamiento de la cuña, y que está situado en los puntos A y B de la figura 5.10.

Determinación del ángulo de contacto θ

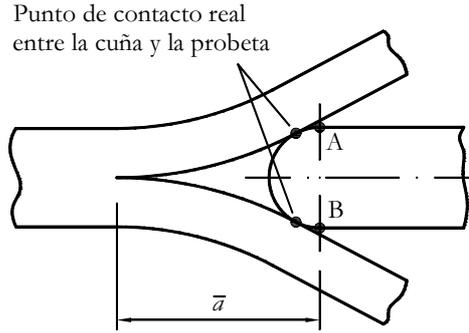


Figura 5.10: Posición de los puntos de contacto A y B de la formulación simplificada.

Los puntos A y B de la figura 5.10 se encuentran a la misma distancia del frente de grieta, en la dirección del eje x , que el centro de curvatura de la punta de la cuña. Por consiguiente en la formulación simplificada $a = \bar{a}$. De esta manera, las ecuaciones que dependen de a o \bar{a} , en este apartado se han dejado en función de a .

El valor de la deformada en uno de los brazos de la probeta en el punto de contacto ($x = a$) se ha expresado con la ecuación 5.3. Teniendo en cuenta la simplificación representada en la figura 5.10, en el punto de contacto $\delta_y = r_w$:

$$y|_{x=a} = r_w \quad (5.31)$$

Substituyendo 5.31 en 5.3 se obtiene la expresión:

$$P = \frac{3E_x I_z r_w}{a^3} \quad (5.32)$$

La pendiente de la recta tangente de la deformada de los brazos de la probeta en el punto de contacto se ha expresado en la ecuación 5.7. Substituyendo 5.32 en 5.7 se obtiene:

$$\tan \theta = \left. \frac{dy}{dx} \right|_{x=a} = \frac{3}{2} \frac{r_w}{a} \quad (5.33)$$

Fuerzas que intervienen en la cuña durante su avance

Para determinar la relación entre F_{PUSH} y P puede considerarse el mismo desarrollo teórico que se ha utilizado en la formulación exacta, en el cuál la relación entre las dos variables se ha representado en función del ángulo θ en la ecuación 5.21. En este caso, el valor de θ es diferente al de la formulación del punto de contacto exacto, porque las coordenadas del punto de contacto se han modificado. A partir de la expresión 5.33 para el ángulo θ , y substituyendo 5.32 y 5.33 en 5.21 se obtiene:

$$F_{PUSH} = \frac{E_x B h^3 r_w \cdot \left(\frac{3r_w}{2a} + \mu \right)}{2a^3 \left(1 - \frac{3r_w}{2a} \mu \right)} \quad (5.34)$$

Fuerzas que intervienen en la cuña durante su retroceso

Al utilizar un desarrollo teórico similar para calcular las fuerzas F_{PUSH} y F_{PULL} , la ecuación 5.27 que se ha obtenido para expresar F_{PULL} en función de P y θ en la formulación basada en el punto de contacto exacto, también es válida para el método simplificado.

Obtención de una expresión de F_{PUSH} en función de δ

Considerando $a = \bar{a}$ la ecuación 5.28 que relaciona la longitud de grieta y el desplazamiento de la cuña se expresa como:

$$a = a_0 - \delta \quad (5.35)$$

Substituyendo 5.35 en 5.34 se obtiene la expresión simplificada de F_{PUSH} en función de δ :

$$F_{PUSH} = \frac{E_x B h^3 r_w \cdot \left(\frac{3r_w}{2(a_0 - \delta)} + \mu \right)}{2(a_0 - \delta)^3 \left(1 - \frac{3r_w}{2(a_0 - \delta)} \mu \right)} \quad (5.36)$$

De igual modo que sucede con la formulación desarrollada en el apartado 5.3.1.1, para determinar μ y a_0 debe realizarse un ajuste de los datos de la curva $F_{PUSH}(\delta)$ de la fase de introducción.

5.3.1.3. Comparación entre los resultados de las dos formulaciones

Para determinar el grado de aproximación de las formulaciones desarrolladas en los apartados 5.3.1.1 y 5.3.1.2, se han comparado los resultados de las curvas de la fuerza de empuje de la cuña en función de la longitud de grieta.

Expresiones adimensionales de las 2 formulaciones

La fuerza F_{PUSH} depende de las dimensiones de la cuña (r_w), de las dimensiones (B y h) y las propiedades elásticas (E_x) de la probeta, de la fuerza de fricción (μ), y de la longitud entre el centro del radio de curvatura de la cuña y el frente de grieta (\bar{a}). En la formulación simplificada

$$a = \bar{a}.$$

Se ha realizado un estudio paramétrico de las curvas $F_{PUSH}(\bar{a})$. Se han modificado las ecuaciones 5.23 y 5.34 para obtener unas nuevas expresiones adimensionales, en función de variables reducidas, que agrupen la dependencia de varios parámetros.

Modificando la ecuación 5.23 de la formulación desarrollada en el apartado 5.3.1.1 se ha obtenido la siguiente expresión:

$$\hat{F}_e = \frac{\sqrt{1 - \hat{\zeta}^2}}{(\hat{a} - \hat{\zeta})^3} \cdot \frac{\mu + \frac{3\sqrt{1 - \hat{\zeta}^2}}{2(\hat{a} - \hat{\zeta})}}{1 - \mu \frac{3\sqrt{1 - \hat{\zeta}^2}}{2(\hat{a} - \hat{\zeta})}} \quad (5.37)$$

Siendo:

$$\hat{F}_e = F \cdot \frac{2r_w^2}{Bh^3 E_x}, \quad \hat{a} = \frac{\bar{a}}{r_w}, \quad \hat{\zeta} = \frac{\zeta}{r_w} \quad (5.38)$$

El subíndice e indica que la variable corresponde a la formulación que considera el punto de contacto exacto entre cuña y probeta. El parámetro $\hat{\zeta}$ también se puede expresar en función de \hat{a} :

$$\hat{\zeta} = -\hat{a} + \sqrt{\hat{a}^2 + 3} \quad (5.39)$$

Por otra parte, modificando la ecuación 5.34 de la formulación simplificada se obtiene la siguiente expresión:

$$\hat{F}_s = \frac{1}{\hat{a}^3} \cdot \frac{\mu + \frac{3}{2\hat{a}}}{1 - \mu \frac{3}{2\hat{a}}} \quad (5.40)$$

Siendo:

$$\hat{F}_s = F \cdot \frac{2r_w^2}{Bh^3 E_x}, \quad \hat{a} = \frac{a}{r_w} \quad (5.41)$$

El subíndice s indica que la variable corresponde a la formulación simplificada.

Comparación de los resultados de las dos formulaciones

Para determinar el grado de aproximación entre las dos formulaciones se han representado las curvas de \hat{F} en función de \hat{a} . Se han tenido en cuenta 2 coeficientes de fricción: $\mu = 0.1$ y $\mu = 0.3$.

En la figura 5.11 se muestra la comparación de las curvas $\hat{F}(\hat{a})$ para las dos formulaciones y el error relativo cometido entre ellas.

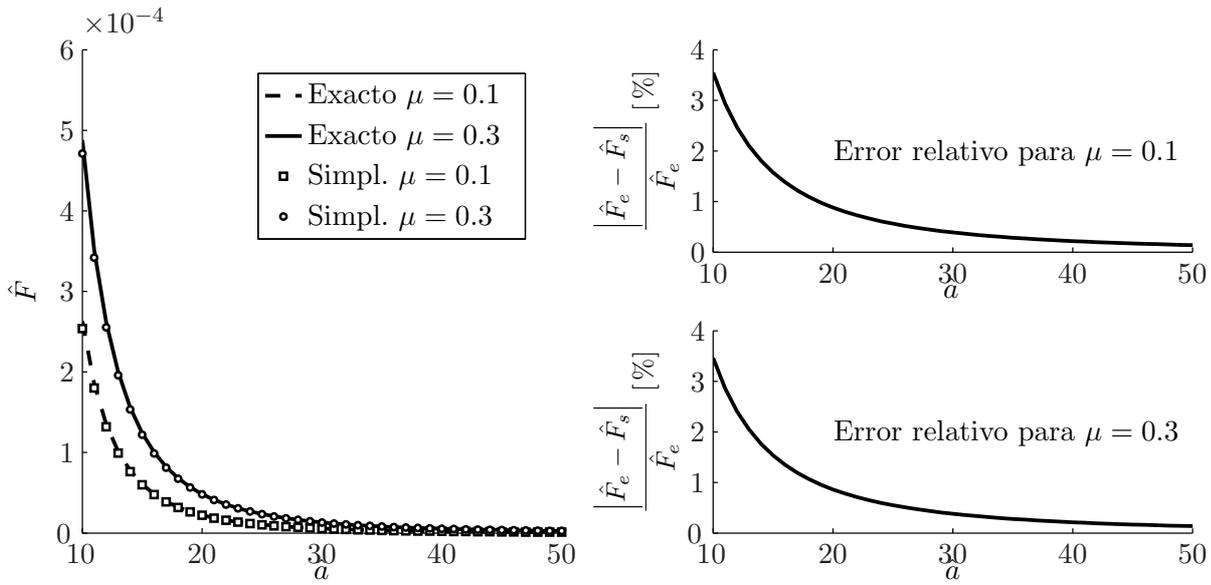


Figura 5.11: Curvas de $\hat{F}(\hat{a})$ y curvas de error de las formulaciones exacta y simplificada del WDT con dos coeficientes de fricción: $\mu = 0.1$ y $\mu = 0.3$.

A partir de los resultados de la figura 5.11 se observa que a medida que \hat{a} se incrementa, el error relativo entre las dos formulaciones disminuye. Esto significa que el error que se comete al utilizar la formulación simplificada depende del ratio a/r_w . Si se utiliza una cuña con un $r_w = 1.5 \text{ mm}$, y si $a \leq 30 \text{ mm}$, el error cometido entre las dos formulaciones es inferior al 1%. Y por consiguiente para calcular μ puede utilizarse directamente la formulación simplificada.

5.3.1.4. Evaluación de las limitaciones de la hipótesis de partida

La formulación simplificada que se ha desarrollado para representar la relación entre F_{PUSH} y δ (ecuación 5.36) se basa en la teoría de vigas de Euler-Bernoulli, fundamentada en las siguientes hipótesis:

- Se realiza un análisis bidimensional con hipótesis de tensión plana.
- El comportamiento de los brazos de la probeta es lineal y elástico.
- En el cálculo de la deformada, se consideran los brazos de la probeta como vigas en voladizo con el encastamiento en el frente de grieta.

En los siguientes subapartados, se analiza la validez de las hipótesis a partir de las cuales se fundamenta la formulación analítica. Para conocer hasta que punto, la formulación analítica es

capaz de reproducir el comportamiento del ensayo experimental de propagación de grieta por avance forzado de cuña (WDT).

Hipótesis de tensión plana

La mayoría de las simulaciones numéricas que se han llevado a cabo para reproducir el comportamiento de los ensayos experimentales como el de tipo cuña, o el ensayo de doble viga en voladizo, se realizan en dos dimensiones, de esta manera se reduce el tiempo de cálculo.

Se simula el lateral de la probeta¹, y se extrapolan los resultados en la tercera dimensión (el ancho de la probeta) considerando la hipótesis de deformación plana. En las simulaciones se utiliza el criterio de deformación plana, porque el ancho de las probetas es varias veces mayor que su espesor $B \gg 2h$. Con este criterio se obtiene una buena correlación entre los resultados experimentales y las simulaciones numéricas. Por otra parte, las formulaciones analíticas basadas en la teoría de vigas consideran la hipótesis de tensión plana.

Puede obtenerse una relación entre las dos hipótesis mediante la variación de las propiedades elásticas de los materiales. A partir de la relación entre el tensor de tensiones y el tensor de deformaciones se obtiene una relación entre los módulos de Young de los criterios de tensión y deformación plana.

Para el módulo de Young longitudinal:

$$\bar{E}_x = \frac{E_x}{(1 - \nu_{xz}\nu_{zx})} \quad (5.42)$$

Y para el módulo de Young transversal:

$$\bar{E}_y = \frac{E_y}{(1 - \nu_{yz}\nu_{zy})} \quad (5.43)$$

Las variables \bar{E}_x y \bar{E}_y son los módulos de Young en la dirección de las fibras (x) y perpendicular (y), según el criterio de deformación plana. E_x y E_y son los módulos de Young en las direcciones x e y respectivamente según el criterio de tensión plana. Y las variables ν_{xz} y ν_{yz} son los coeficientes de Poisson en los planos xy e yz respectivamente. Los coeficientes de Poisson ν_{zx} y ν_{zy} se calculan con las siguientes expresiones:

$$\nu_{zx} = \nu_{xz} \frac{E_z}{E_x}, \quad \nu_{zy} = \nu_{yz} \quad (5.44)$$

A partir de las propiedades de los adherentes de la tabla 3.13, que se obtuvieron en los ensayos de caracterización, en la tabla 5.1 se indican las diferencias entre los módulos de Young según

¹El plano que se malla es el $x - y$ de las figura 5.1.

las hipótesis de tensión y deformación plana.

Adherente	Tensión Plana	Deformación Plana	Error ($\frac{\bar{E}_i - E_i}{E_i}$)
AS4/8552	$E_x = 120.9 \text{ GPa}$	$\bar{E}_x = 122.0 \text{ GPa}$	0.9 %
	$E_y = 8.8 \text{ GPa}$	$\bar{E}_y = 10.5 \text{ GPa}$	19.0 %
T800S/M21	$E_x = 134.7 \text{ GPa}$	$\bar{E}_x = 135.8 \text{ GPa}$	0.8 %
	$E_y = 7.7 \text{ GPa}$	$\bar{E}_y = 10.3 \text{ GPa}$	33.3 %

Tabla 5.1: Módulos de Young según las hipótesis de tensión y deformación plana.

Para materiales ortotrópicos transversalmente isotrópicos en que $E_x \gg E_y = E_z$, como es el caso de los laminados unidireccionales de fibra de carbono y resina epoxy, las diferencias entre los módulos de Young en la dirección de las fibras son inferiores al 1 %. Las diferencias entre los módulos de Young en la dirección transversal son relevantes, de un 19 % para el adherente AS4/8552 y de un 33 % para el T800S/M21.

Ensayo virtual para validar las hipótesis de la formulación analítica

Para estudiar la validez del resto de las hipótesis sobre las cuales se fundamenta el método analítico, se han realizado una serie de simulaciones de la flexión de los brazos de la probeta con elementos finitos.

Considerando como validos los resultados de las simulaciones numéricas, éstos se han comparado con los que se han obtenido del método analítico para comprobar su validez.

Se ha simulado una probeta de composite de fibra de carbono de $L = 250 \text{ mm}$ de longitud \times $B = 25 \text{ mm}$ de ancho \times $2h = 3 \text{ mm}$ de espesor, con una pregrieta inicial de 135 mm de longitud en uno de sus extremos. Se ha llevado a cabo un análisis en dos dimensiones utilizando elementos sólidos con hipótesis de deformación plana, ver figura 5.12.

Se ha definido la probeta de un solo material, un laminado de fibra de carbono con fibras unidireccionales orientadas a 0° . Las propiedades del material se indican en la tabla 5.2.

$E_x = 120.9 \text{ GPa}$	$\nu_{xy} = 0.354$	$G_{xy} = 4.6 \text{ GPa}$
$E_y = 8.8 \text{ GPa}$	$\nu_{xz} = 0.354$	$G_{xz} = 4.6 \text{ GPa}$
$E_z = 8.8 \text{ GPa}$	$\nu_{yz} = 0.400$	$G_{yz} = 3.1 \text{ GPa}$

Tabla 5.2: Propiedades elásticas del material.

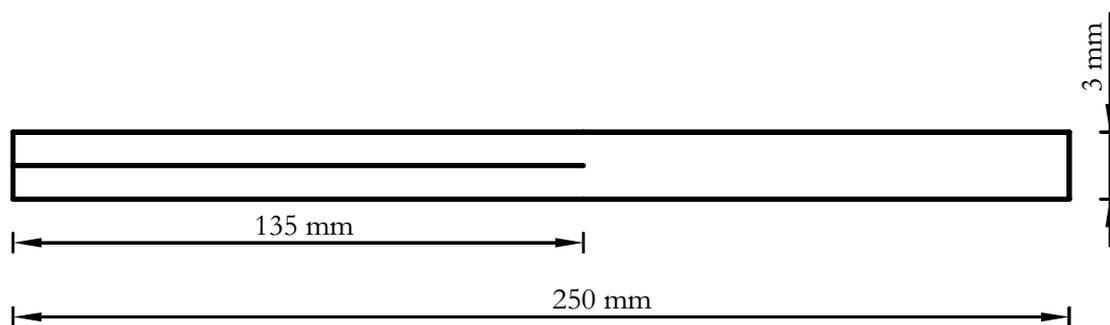


Figura 5.12: Dimensiones de la probeta analizada.

Para reducir los tiempos de cálculo, la introducción de la cuña en la probeta se ha simulado con la apertura de los brazos de la probeta una separación δ_y . Esta apertura se ha realizado a una distancia a desde el frente de grieta, ver figura 5.13.

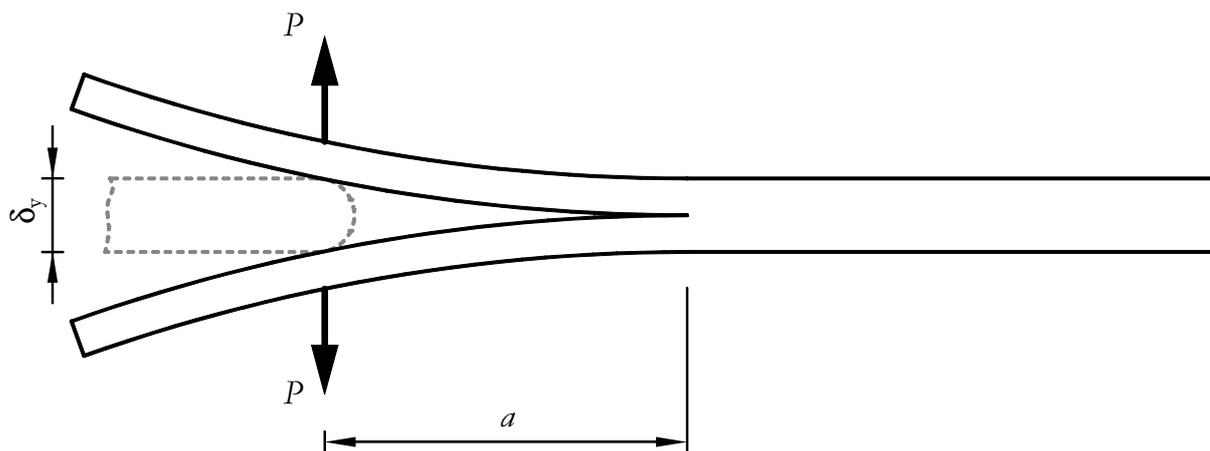


Figura 5.13: Simplificación de la apertura de los brazos de la probeta.

Se han simulado varias longitudes de grieta (a), modificando el punto de aplicación de la carga en la probeta.

Análisis de la respuesta lineal de la apertura de los brazos de la probeta

El análisis del comportamiento lineal/no lineal que experimentan los brazos de la probeta, al deformarse por la introducción de una cuña, se ha realizado a partir de simulaciones numéricas por elementos finitos.

Se ha utilizado el modelo presentado en el apartado anterior con dos hipótesis de deformación de los brazos de la probeta: un comportamiento lineal y otro no lineal, considerando grandes desplazamientos. Se ha simulado cada hipótesis con dos longitudes de grieta: $a_0 = 20 \text{ mm}$ y $a_0 = 50 \text{ mm}$, imponiendo un desplazamiento en cada brazo de la probeta de $\delta_y/2 = 15 \text{ mm}$.

De los resultados de las simulaciones, se han obtenido las curvas de fuerza (P) y desplazamiento ($\delta_y/2$) de cada brazo en el punto de aplicación de la carga. Y a partir de estos datos se ha calculado la flexibilidad de cada brazo de la probeta ($C = \delta_y/2P$).

En la figura 5.14 se representan los valores del ratio C_i/C_L para las longitudes de grieta ($a = 20 \text{ mm}$ y 50 mm), siendo $C_i = C_L$ la flexibilidad del brazo de la probeta obtenido del análisis lineal y $C_i = C_{NL}$ la flexibilidad obtenida del análisis no lineal, en función del desplazamiento de uno de los brazos de la probeta ($\delta_y/2$).

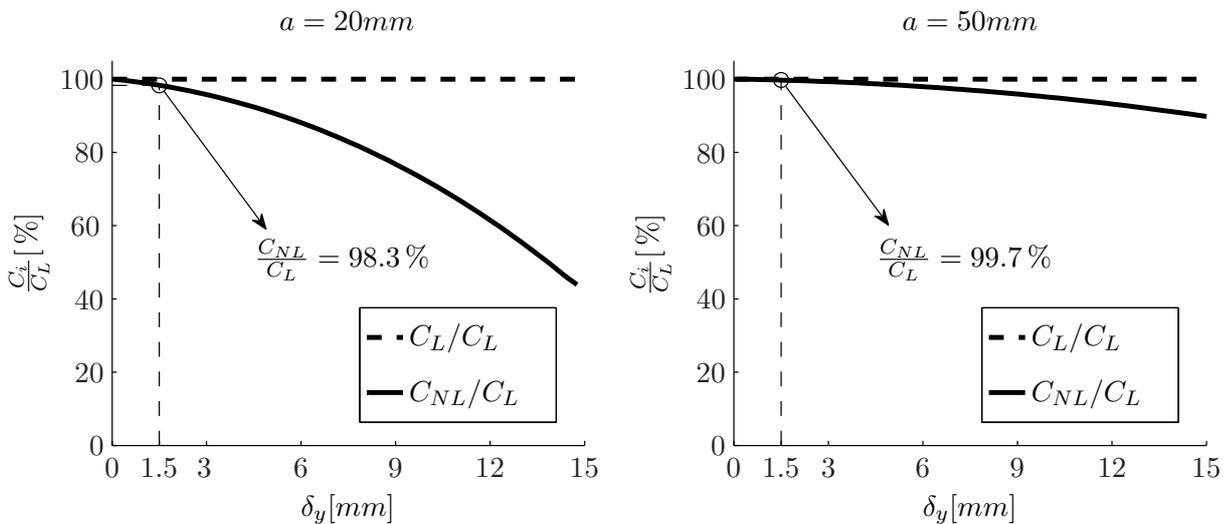


Figura 5.14: Ratio de la flexibilidad entre las simulaciones lineal y no lineal.

En la figura 5.14 se observa que el error cometido entre el comportamiento lineal y el no lineal se incrementa al aumentar el desplazamiento de los brazos de la probeta. El error cometido es superior para valores de longitud de grieta más pequeños.

Considerando una cuña con un radio de curvatura en su punta de $r_w = 1.5 \text{ mm}$ el error cometido entre ambas simulaciones es inferior al 2% en el caso más desfavorable (que es con la longitud de grieta más corta, $a = 20 \text{ mm}$). Por consiguiente, no se ha considerado necesario introducir el efecto de las no linealidades en la formulación analítica, puesto que para un radio de curvatura de la punta de la cuña suficientemente pequeño su efecto es prácticamente despreciable.

5.3.2. Corrección de la flexibilidad

Tal y como se ha comentado en el capítulo 2, los modelos analíticos basados en la teoría de vigas consideran los brazos de la probeta como 2 vigas en voladizo encastadas en la zona del frente de grieta (ver figura 5.15). Según esta hipótesis, la rotación de los brazos de la probeta en el frente de grieta es cero, sin embargo el adhesivo y el adherente no tienen una rigidez infinita y en realidad si que hay una pequeña rotación.

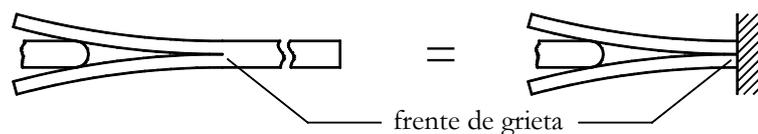


Figura 5.15: Simplificación realizada en la formulación analítica del WDT.

Un método para calcular con mayor exactitud la rotación de los brazos de la probeta, es a partir de modelos analíticos basados en la fundación elástica. En los cuales, la parte no fracturada de la probeta se substituye por una cama de muelles que simulan la rigidez de los materiales. Hay dos tipos de fundación elástica: la de Winkler, que considera solamente la rigidez transversal de los materiales, y la de Pasternak, que tiene en cuenta tanto la rigidez transversal como la rotacional. En el capítulo 2 se presentan 4 modelos de fundación elástica para analizar la deformación de los brazos de la probeta: 3 modelos están basados en la fundación de Winkler (Ozdil and Carlsson, 1999, Penado, 1993, Olsson, 1992) y uno esta basado en la de Pasternak (Williams, 1989). Los modelos proponen una solución analítica para determinar la flexibilidad en función de la longitud de grieta. A partir del valor de la flexibilidad puede calcularse la energía disponible para la fractura.

De forma similar al trabajo realizado por Olsson (2007), en este apartado se presenta una comparación de los 4 tipos de fundación elástica, para ver la que se ajusta mejor a los resultados reales de la deformación de los brazos de la probeta, según la configuración del ensayo WDT que se propone en este trabajo. Las propiedades elásticas de la probeta se han detallado en la tabla 5.2, se ha considerado una probeta con $B = 25 \text{ mm}$ y $h = 1.5 \text{ mm}$, y una cuña con $r_w = 1.5 \text{ mm}$. Los resultados se han comparado con el valor de la deformada de los brazos de la probeta obtenido a partir del modelo de elementos finitos, descrito anteriormente.

Los resultados de la comparación entre los valores de la flexibilidad del modelo numérico, la teoría de vigas simple (según las hipótesis de Euler-Bernoulli) y las 4 fundaciones elásticas se indican en la tabla 5.3. Se ha realizado la comparación con distintos valores de longitud de grieta, y se ha utilizado la misma (δ_y) en todos los casos.

A partir de los datos de la tabla 5.3, se observa que el error cometido entre la simulación numérica y las formulaciones analíticas se incrementa a medida que disminuye el parámetro $2a/\delta_y$. Los resultados obtenidos con la teoría de vigas de Euler-Bernoulli son los que presentan el mayor porcentaje de error, llegando a valores superiores al 30% en el ratio de $2a/\delta_y$ más pequeño. Utilizando cualquiera de las fundaciones elásticas que se proponen se reduce significativamente el error cometido, siendo la de Williams (1989), la que presenta un porcentaje de error menor, inferior al 1% en todos los casos.

Por consiguiente, debe incluirse la corrección de la rotación del frente de grieta en la formulación. Se propone incluir la corrección propuesta en el trabajo de Williams (1989), que es la que presenta el error menor.

Para incorporar esta corrección al modelo desarrollado, solamente es necesario realizar un pe-

	a [mm]	20	50	100	135
	$\delta_y/2$ [mm]	7.5	7.5	7.5	7.5
	$2a/\delta_y$ [mm]	2.67	6.67	13.33	18.00
	C_{MEF} [mm/N]	$9.21 \cdot 10^{-3}$	$1.15 \cdot 10^{-1}$	$8.52 \cdot 10^{-1}$	2.05
C [mm/N]	Euler-Bernoulli	$6.27 \cdot 10^{-3}$	$9.80 \cdot 10^{-2}$	$7.84 \cdot 10^{-1}$	1.930
	Ozdil and Carlsson (1999)	$8.18 \cdot 10^{-3}$	$1.09 \cdot 10^{-1}$	$8.28 \cdot 10^{-1}$	2.010
	Penado (1993)	$8.53 \cdot 10^{-3}$	$1.10 \cdot 10^{-1}$	$8.30 \cdot 10^{-1}$	2.012
	Olsson (1992)	$9.24 \cdot 10^{-3}$	$1.16 \cdot 10^{-1}$	$8.57 \cdot 10^{-1}$	2.061
	Williams (1989)	$9.23 \cdot 10^{-3}$	$1.15 \cdot 10^{-1}$	$8.51 \cdot 10^{-1}$	2.050
Error [%]	Euler-Bernoulli	31.86	14.84	7.93	6.01
	Ozdil and Carlsson (1999)	11.17	5.06	2.74	2.11
	Penado (1993)	7.40	4.31	2.53	1.99
	Olsson (1992)	-0.54	-1.12	-0.62	-0.44
	Williams (1989)	-0.26	0.02	0.13	0.16

Tabla 5.3: Comparación de los resultados de C de las distintas alternativas.

queño cambio en la formulación, puesto que Williams compensa la rotación en el frente de grieta con un incremento de la longitud de esta. Por consiguiente, en vez de considerar la longitud de la grieta real (a) en la formulación, se considerará una longitud de grieta corregida a_C :

$$a_C = a + \chi h \quad (5.45)$$

Siendo χ el parámetro corrector de la longitud de grieta (ver ecuación 2.17 del capítulo 2), y h el espesor de uno de los adherentes de la probeta (no se tiene en cuenta el efecto de la rigidez de la lámina del adhesivo). De manera que la expresión de F_{PUSH} en función de a_C se representa:

$$F_{PUSH} = \frac{E_x B h^3 r_w \cdot \left(\frac{3r_w}{2a_C} + \mu \right)}{2a_C^3 \left(1 - \frac{3r_w}{2a_C} \mu \right)} \quad (5.46)$$

5.3.3. Fase de propagación

Al realizar el ajuste de la curva $F_{PUSH}(\delta)$ en la fase de introducción mediante la ecuación 5.36 se obtiene μ . Conocido μ puede representarse F_{PUSH} en función de a_C o viceversa a partir de la ecuación 5.46, siendo a_C la longitud de grieta corregida definida en la ecuación 5.45.

La determinación de F_{PUSH} en función de a_C se realiza de forma directa, a partir de la expresión 5.46. Sin embargo, si se desea determinar a_C en función de F_{PUSH} deben resolverse las raíces

del siguiente polinomio:

$$(4F_{PUSH}) \cdot a_C^4 - (6r_w \mu F_{PUSH}) \cdot a_C^3 - (2E_x B h^3 r_w \mu) \cdot a_C - 3E_x B h^3 r_w^2 = 0 \quad (5.47)$$

Resolviendo numéricamente la ecuación 5.47 se obtienen 4 raíces de a_C , de las cuales solamente una es la correcta. En la configuración del ensayo WDT que se ha llevado a cabo en este trabajo ($B = 25 \text{ mm}$, $r_w = 1.5 \text{ mm}$, $\mu = 0 \div 0.5$ y $E_x = 125 \text{ GPa}$) se obtienen 2 soluciones reales (una positiva y otra negativa) y dos soluciones complejas. La solución válida para la configuración del ensayo es el valor de a_C real y positivo.

Los resultados que se obtienen del ensayo experimental son la fuerza necesaria para hacer avanzar la cuña (F_{PUSH}) y el desplazamiento (δ). Sin embargo, tal y como se verá más adelante, a_C es un parámetro que debe conocerse para calcular G_{IC} . El valor de a_C puede obtenerse resolviendo el polinomio 5.47 tanto para la fase de introducción de la cuña como para la fase de propagación. En la fase de propagación (ver figura 5.3(a)), el valor de F_{PUSH} se mantiene constante y por consiguiente también lo es a_C . En esta fase, el valor de la energía disponible para la fractura que se obtiene a partir de a_C es igual a G_{IC} . A continuación se presentan una serie de métodos alternativos para determinar la tenacidad a la fractura.

5.3.3.1. Determinación de G_{IC} a partir de la fuerza de apertura de los brazos de la probeta y su desplazamiento

La primera alternativa que se presenta para obtener G_{IC} se basa en considerar el ensayo WDT en la fase de propagación como un ensayo de doble viga en voladizo (DCB), con una apertura de los brazos de la probeta igual a $2r_w$, y con una fuerza de apertura de los brazos igual a la componente vertical (en dirección y) de la fuerza de contacto entre cuña y probeta, ver figura 5.16.

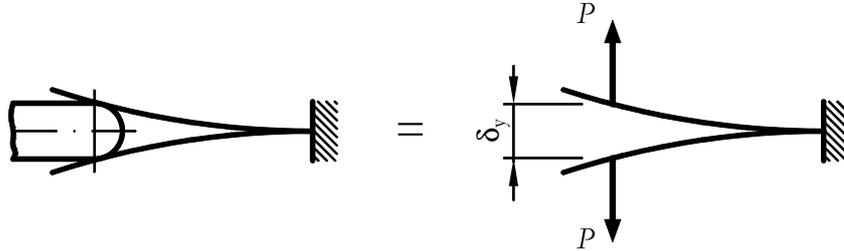


Figura 5.16: Equivalencia del ensayo WDT al de una viga en voladizo.

De esta manera, puede obtenerse la energía disponible para la fractura (G_{IC}) en función de P , δ_y y a_C :

$$G_{IC} = \frac{3P\delta_y}{2Ba_C} \quad (5.48)$$

En el ensayo WDT, el desplazamiento de los brazos de la probeta $\delta_y = 2r_w$ y P se representa en función de la longitud de grieta a partir de la expresión:

$$P = \frac{r_w B h^3}{4a_C^3} \quad (5.49)$$

De manera que se obtiene la siguiente ecuación de la G_{IC} en función de a_C :

$$G_{IC} = \frac{3 E_x h^3 r_w^2}{4 a_C^4} \quad (5.50)$$

De esta manera, en cada punto del rango de propagación de la curva $F_{PUSH}(\delta)$ se obtiene un valor de a_C y otro de G_{IC} .

5.3.3.2. Cálculo de G_{IC} a partir del balance energético

En esta segunda alternativa se realiza un balance entre la energía aportada al sistema y la energía disipada por fricción, durante la fase de propagación del ensayo.

Al igual que en la primera alternativa, se utiliza la expresión 5.47 para obtener a_C . Y a partir de a_C se calcula la fuerza necesaria para abrir los brazos de la probeta mediante la ecuación 5.49.

Una vez determinado P , se calcula la componente horizontal de la fuerza de fricción entre la cuña y la probeta (F_{Fx}):

$$F_{Fx} = \frac{P\mu}{\cos \theta} \quad (5.51)$$

Siendo θ el ángulo girado por los brazos de la probeta en el punto de contacto con la cuña, $\tan \theta = 3r_w/2a_C$. Y finalmente, la tenacidad a la fractura en modo I del adhesivo (G_{IC}) se calcula a partir del método del área:

$$G_{IC} = \frac{U_{tot}}{(\delta_f - \delta_0) B} \quad (5.52)$$

Siendo U_{tot} la energía necesaria para propagar la grieta y el producto $(\delta_f - \delta_0) B$ la superficie que se ha creado durante la propagación. En el ensayo de doble viga en voladizo, la superficie se expresaba como $(a_f - a_0) B$, siendo $a_f - a_0$ la longitud de grieta propagada. En el ensayo WDT la superficie creada es igual al desplazamiento de la cuña en el tramo de propagación $(\delta_f - \delta_0)$, si se considera que la distancia entre la cuña y el frente de grieta se mantiene constante.

La energía total necesaria para propagar la grieta (U_{tot}) se descompone en:

$$U_{tot} = U_{ext} - U_{def} - U_{dis} \quad (5.53)$$

U_{ext} es la energía externa aportada al sistema debida al trabajo de la fuerza de empuje de la cuña (F_{PUSH}), U_{def} la energía de deformación de los brazos de la probeta y U_{dis} la energía disipada. Asumiendo un comportamiento lineal y elástico de los brazos de la probeta, $U_{def} = 0$. U_{dis} es la energía disipada por la componente horizontal de la fricción entre la cuña y la probeta:

$$U_{dis} = 2 \int_{\delta_0}^{\delta_f} F_{Fx} d\delta \quad (5.54)$$

De esta manera, se expresa G_{IC} en función de la fuerza de empuje de la cuña y la fuerza de fricción:

$$G_{IC} = \frac{U_{ext} - U_{dis}}{(\delta_f - \delta_0) B} = \frac{\int_{\delta_0}^{\delta_f} F_{PUSH} d\delta - 2 \int_{\delta_0}^{\delta_f} F_{Fx} d\delta}{(\delta_f - \delta_0) B} \quad (5.55)$$

Los valores de U_{ext} y U_{dis} pueden calcularse integrando numéricamente punto a punto los valores de F_{PUSH} y F_{Fx} , en función del desplazamiento de la cuña.

5.3.3.3. Determinación de G_{IC} punto a punto a partir del balance energético

Con este método se obtiene un valor de G_{IC} en cada punto de la curva de propagación. La solución presentada se fundamenta en la formulación desarrollada por Williams (1998) para un ensayo similar, consistente en despegar una lámina flexible de una superficie con la introducción de una cuña. A partir del balance energético de Irwin (Anderson, 1995) se obtiene una expresión de la energía disponible para la fractura (G):

$$G = \frac{dU_{ext}}{Bd\delta} - \frac{dU_{def}}{Bd\delta} - \frac{dU_{dis}}{Bd\delta} \quad (5.56)$$

Siendo U_{ext} la energía externa aportada al sistema por el trabajo de la fuerza F_{PUSH} , U_{def} la energía de deformación de los brazos de la probeta y U_{dis} la energía disipada. Asumiendo, como en el caso anterior, un comportamiento lineal y elástico de los brazos de la probeta ($U_{def} = 0$). U_{dis} es la energía disipada por la componente horizontal de la fricción entre la cuña y la probeta, y su derivada en función de δ es:

$$\frac{dU_{dis}}{Bd\delta} = \frac{2F_{Fx}}{B} = \frac{2\mu P}{B \cos \theta} \quad (5.57)$$

P puede expresarse en función de F_{PUSH} en la ecuación 5.19. De esta manera la energía disponible para la fractura es:

$$G = \frac{F_{PUSH}}{B} - \frac{\mu F_{PUSH}}{B \cos \theta (\sin \theta + \mu \cos \theta)} \quad (5.58)$$

Representando la ecuación 5.58 en función de $\tan \theta$ se obtiene:

$$G = \frac{F_{PUSH}}{B} \tan \theta \left(\frac{1 + \mu \tan \theta}{\mu + \tan \theta} \right) \quad (5.59)$$

Siendo en el tramo de propagación, $G = G_{IC}$.

5.3.4. Cálculo directo de G_{IC}

El método que se propone en este apartado permite determinar el valor de G_{IC} sin tener que ajustar previamente el coeficiente de fricción.

La metodología se basa en las siguientes hipótesis: el coeficiente de fricción debe ser inferior a la unidad ($\mu < 1$), el coeficiente de fricción debe experimentar poca variación con el paso de la cuña y la longitud de grieta debe mantenerse constante durante toda la propagación. Como última condición, el ángulo de inclinación de los brazos de la probeta (θ) debe ser suficientemente pequeño para que se cumpla que:

$$(1 - \mu \tan \theta) \approx 1 \quad (5.60)$$

En la ecuación 5.56 se ha obtenido una expresión de la energía disponible para la fractura en función del balance energético del sistema. Considerando que los adherentes se deforman elásticamente ($U_{def} = 0$), se obtiene la expresión:

$$G = \frac{dU_{ext}}{Bd\delta} - \frac{dU_{dis}}{Bd\delta} \quad (5.61)$$

Donde dU_{ext} es el trabajo de la fuerza externa aplicada y dU_{dis} es el trabajo de disipación de energía realizado por las fuerzas de fricción. Si el ángulo θ es suficientemente pequeño $F_{Fx} \approx F_F$.

$$dU_{ext} = F_{PUSH} \cdot d\delta \quad (5.62)$$

$$dU_{dis} = 2F_{Fx} \cdot d\delta \approx 2F_F \cdot d\delta \quad (5.63)$$

En el apartado 5.3.1.1 de este capítulo se han determinado las expresiones de la fuerza para realizar el avance (F_{PUSH}) y el retroceso de la cuña (F_{PULL}), en función del desplazamiento de la propia cuña y los parámetros del ensayo. El valor de F_{PUSH} se ha determinado a partir de la expresión 5.21, y el valor de F_{PULL} a partir de la ecuación 5.27. Considerando un ángulo suficientemente pequeño, de manera que se cumpla la condición 5.60, se obtienen las siguientes expresiones simplificadas de F_{PUSH} y F_{PULL} :

$$F_{PUSH} = 2P \cdot \frac{\mu + \tan \theta}{1 - \mu \tan \theta} \approx 2P \cdot (\mu + \tan \theta) \quad (5.64)$$

$$F_{PULL} = -2P \cdot \frac{\mu - \tan \theta}{1 + \mu \tan \theta} \approx -2P \cdot (\mu - \tan \theta) \quad (5.65)$$

Restando 5.65 de 5.64 se obtiene un valor del coeficiente de fricción aproximado en función de F_{PUSH} y F_{PULL} :

$$F_{PUSH} - F_{PULL} = 4P\mu \quad (5.66)$$

Expresando la ecuación 5.66 en función de la fuerza de fricción (F_F):

$$2F_F = 2P\mu = \frac{(F_{PUSH} - F_{PULL})}{2} \quad (5.67)$$

La fuerza de fricción entre la cuña y la probeta vale $2F_{F_x}$ porque la cuña está en contacto con ambos brazos de la probeta. Substituyendo las ecuaciones 5.62 y 5.63 en 5.61, se obtiene el valor de G en función de las fuerzas que se aplican sobre la cuña, durante su avance (F_{PUSH}) y su retroceso (F_{PULL}):

$$G = \frac{F_{PUSH}}{B} - \frac{F_{PUSH} + F_{PULL}}{2B} = \frac{F_{PUSH} + F_{PULL}}{2B} \quad (5.68)$$

Para obtener $G = G_{IC}$ deben determinarse los valores de F_{PUSH} y F_{PULL} del rango de propagación de la curva del ensayo. F_{PUSH} y F_{PULL} dependen del ángulo de inclinación de los brazos de la probeta, que a su vez depende de la longitud de grieta. Por consiguiente, la ecuación 5.68 es válida en aquellos puntos de F_{PUSH} y F_{PULL} que tengan la misma longitud de grieta. El parámetro F_{PUSH} que se considera para el cálculo de G_{IC} es el valor promedio de la fuerza de empuje de los puntos del rango de propagación. Y el valor de F_{PULL} se ha obtenido de la fuerza del primer punto de la fase de retroceso de la cuña, la longitud de grieta en este punto es igual a la del rango de propagación.

5.4. Métodos de reducción de datos

Una vez obtenidas las ecuaciones analíticas que gobiernan el comportamiento del ensayo, en este apartado se presentan los métodos de reducción de datos que se han utilizado para determinar G_{IC} .

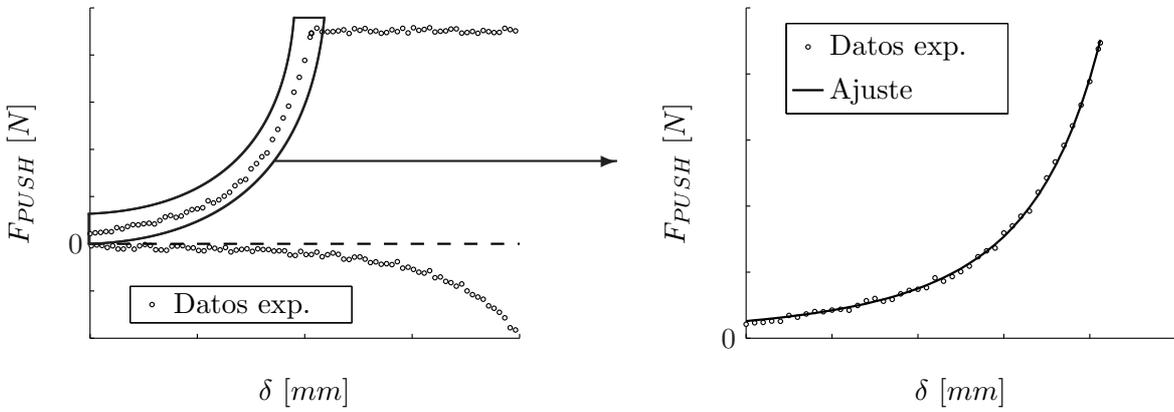
En el ensayo WDT, para determinar G_{IC} previamente se debe realizar un ajuste del coeficiente de fricción (μ). En primer lugar se presenta el método de ajuste del coeficiente de fricción, y a continuación los métodos de cálculo de la tenacidad a la fractura en modo I de la unión adhesiva

(G_{IC}). Los métodos que se detallan en los siguientes subapartados son los que se han incluido en las hojas de ensayo de cada probeta, en el Volumen II de este trabajo.

5.4.1. Determinación del coeficiente de fricción (μ)

Para determinar el valor del coeficiente de fricción (μ) se ha utilizado el método basado en el equilibrio de las fuerzas aplicadas sobre la cuña, que se fundamenta en la formulación simplificada desarrollada en el apartado 5.3.1.2.

El método consiste en realizar un ajuste de los datos experimentales de la curva ($F_{PUSH}(\delta)$) pertenecientes a la fase de introducción, ver figura 5.17.



(a) Curva $F_{PUSH}(\delta)$ del ensayo WDT.

(b) Curva $F_{PUSH}(\delta)$ en la fase de introducción.

Figura 5.17: Ajuste de la fase de introducción de la curva $F_{PUSH}(\delta)$ experimental para obtener μ .

El ajuste se realiza a partir de la siguiente expresión, obtenida a partir de la formulación simplificada:

$$F_{PUSH} = \frac{E_x B h^3 r_w}{2(a_{0C} - \delta)^3} \cdot \frac{\mu + \frac{3r_w}{2(a_{0C} - \delta)}}{1 - \mu \cdot \frac{3r_w}{2(a_{0C} - \delta)}} \quad (5.69)$$

La ecuación 5.69 depende del módulo de Young de los brazos de la probeta (E_x), del ancho (B) de la probeta, del espesor de cada uno de los brazos de la probeta (h) y del radio de curvatura de la punta de la cuña (r_w).

En la ecuación 5.69, μ y a_{0C} son los parámetros de ajuste de la curva. μ es el coeficiente de fricción entre la cuña y la probeta. a_{0C} es la distancia corregida entre la cuña y el frente de grieta en el instante de tiempo inicial del ensayo. La relación entre la distancia corregida y la distancia real se expresa como:

$$a_{0C} = a_0 + \chi h \quad (5.70)$$

Siendo χ el parámetro corrector de las rotaciones en la zona del frente de grieta, definido en el trabajo de Williams (1998).

Una vez realizado el ajuste de μ y a_{0C} , se ha analizado su bondad a partir del cálculo del error relativo entre los datos experimentales y la curva de ajuste (ver figura 5.18).

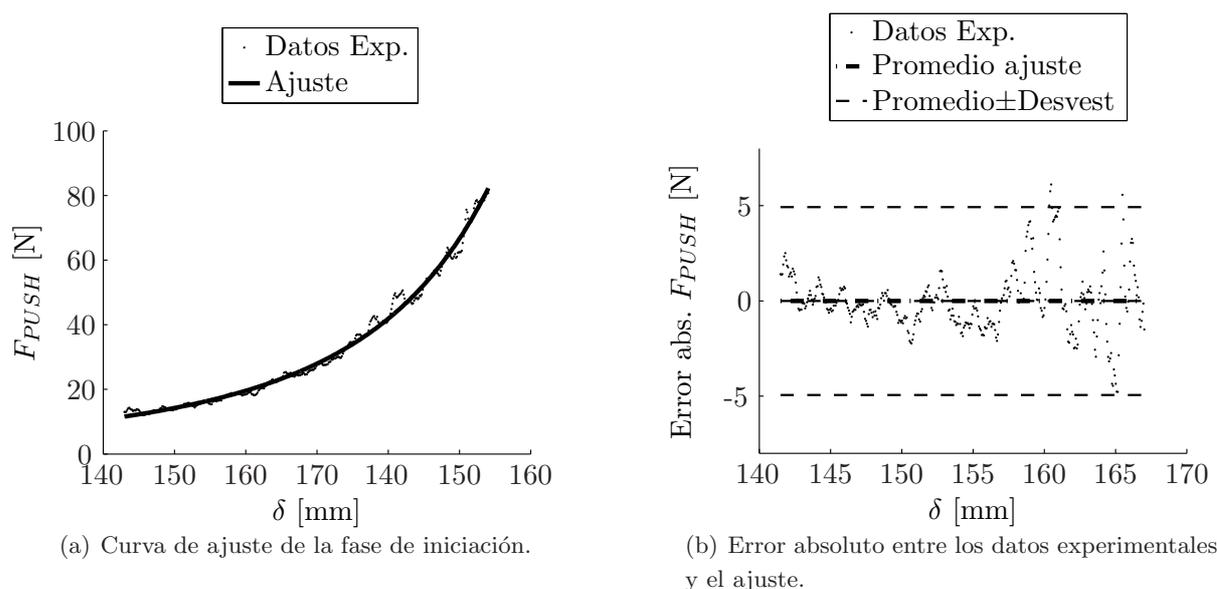


Figura 5.18: Curva de ajuste y curva de error (error absoluto entre los datos experimentales y el ajuste) de la fase de iniciación del ensayo WDT, probeta A1/F1/04/10.

En la curva de error se ha representado 3 franjas horizontales: la franja central corresponde al valor promedio de la curva de error. Si se tiene un buen ajuste este valor debe ser cercano a 0, indicando que la curva pasa por el centro de la curva de tendencia de los puntos experimentales. Las franjas laterales indican la desviación estándar de los puntos de error. Cuanto más cercanas a cero menor es la dispersión de los puntos experimentales en relación al ajuste realizado.

5.4.2. Métodos de cálculo de G_{IC}

Conocido μ se han utilizado dos alternativas para calcular G_{IC} : un método punto a punto y el cálculo de G_{IC} basado en el método del área.

5.4.2.1. Método de cálculo de G_{IC} punto a punto

A partir de este método se obtiene un valor de G_{IC} en cada punto de la fase de propagación de la curva $F_{PUSH}(\delta)$. La solución se basa en la formulación que se ha descrito en el apartado 5.3.3.3, y que previamente fue desarrollado en el trabajo de Williams (1998), para un ensayo de

características similares al WDT.

En el trabajo de Williams se desarrolla una expresión que relaciona G en función de F_{PUSH} , μ y el ángulo θ , y que se corresponde con la ecuación 5.59. La variable θ a su vez, depende de la longitud de grieta (ver ecuación 5.33 para la formulación simplificada). Por lo que puede obtenerse la siguiente expresión de G en función de F_{PUSH} , μ y a :

$$G = \frac{F_{PUSH}}{B} \frac{3r_w}{2a_C} \left(\frac{1 + \mu \frac{3r_w}{2a_C}}{\mu + \frac{3r_w}{2a_C}} \right) \quad (5.71)$$

Siendo a_C la longitud de grieta corregida ($a_C = a + \chi h$). El valor de a_C puede calcularse en función de F_{PUSH} mediante el polinomio representado en la ecuación 5.47, siendo a_C la raíz real y positiva del polinomio. Para cada valor de F_{PUSH} se obtiene un valor de a_C . Y mediante la ecuación 5.71, para cada valor de a_C se obtiene un valor de G . Si se utilizan los valores de F_{PUSH} de la fase de propagación de la curva $F_{PUSH}(\delta)$ se obtiene como resultado $G = G_{IC}$.

En la figura 5.19 se muestran los resultados de a_C y G_{IC} punto a punto de la fase de propagación de la curva $F_{PUSH}(\delta)$.

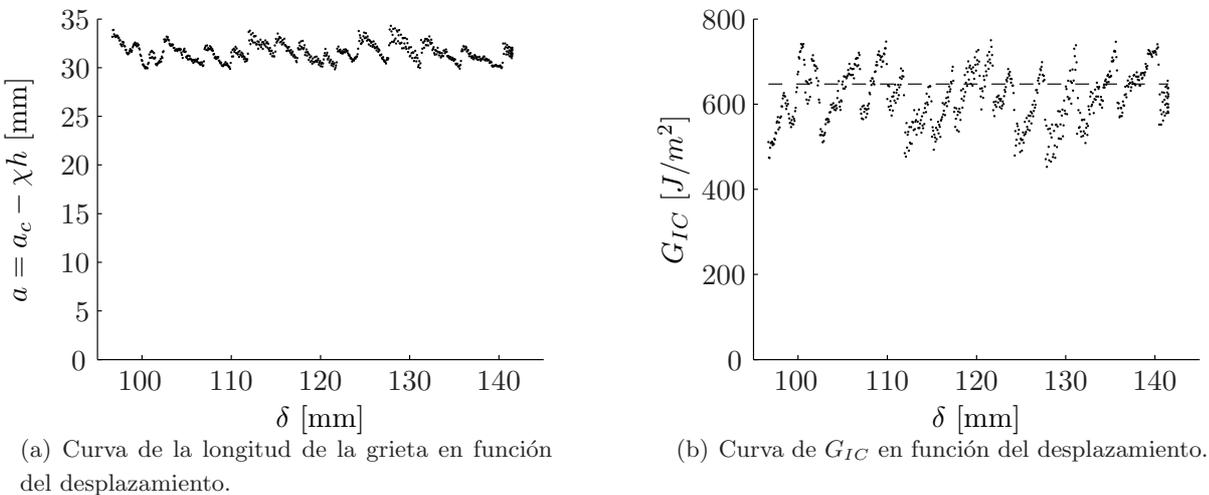


Figura 5.19: Curvas de $a(\delta)$ y $G_{IC}(\delta)$ en la fase de propagación del ensayo WDT, probeta T1/E1/02/06.

La línea a trazos de la figura 5.19(b) indica el valor promedio de G_{IC} de todos los puntos de la fase de propagación.

5.4.2.2. Cálculo de G_{IC} a partir del método del área

A partir de este método se obtiene un único valor de G_{IC} para toda la fase de propagación. El método se basa en la formulación que se ha desarrollado en el apartado 5.3.3.2, en la cual se realiza un balance energético, obteniendo G_{IC} a partir de la energía aportada al sistema (U_{ext})

y la energía disipada por las fuerzas de fricción entre la cuña y la probeta (U_{dis}).

Como resultado del balance energético se obtiene la siguiente expresión para G_{IC} :

$$G_{IC} = \frac{\int_{\delta_0}^{\delta_f} F_{PUSH} d\delta - 2 \int_{\delta_0}^{\delta_f} F_{Fx} d\delta}{(\delta_f - \delta_0) B} \quad (5.72)$$

Siendo δ_0 y δ_f los valores de desplazamiento de la cuña en el punto inicial y final de la fase de propagación del ensayo.

F_{Fx} puede representarse en función de la longitud de grieta en cada instante de tiempo:

$$F_{Fx} = \frac{E_x r_w B h^3 \mu}{4a_c^3 \cdot \cos\left(\arctan\left(\frac{3r_w}{2a_c}\right)\right)} \quad (5.73)$$

Y a su vez a_c se obtiene en función de F_{PUSH} también en cada instante de tiempo, solucionando las raíces del polinomio de la ecuación 5.47.

De esta manera pueden representarse las curvas $F_{PUSH}(\delta)$ y $F_{Fx}(\delta)$ del ensayo experimental. Integrando ambas curvas en la fase de propagación se obtiene G_{IC} , ver figura 5.20.

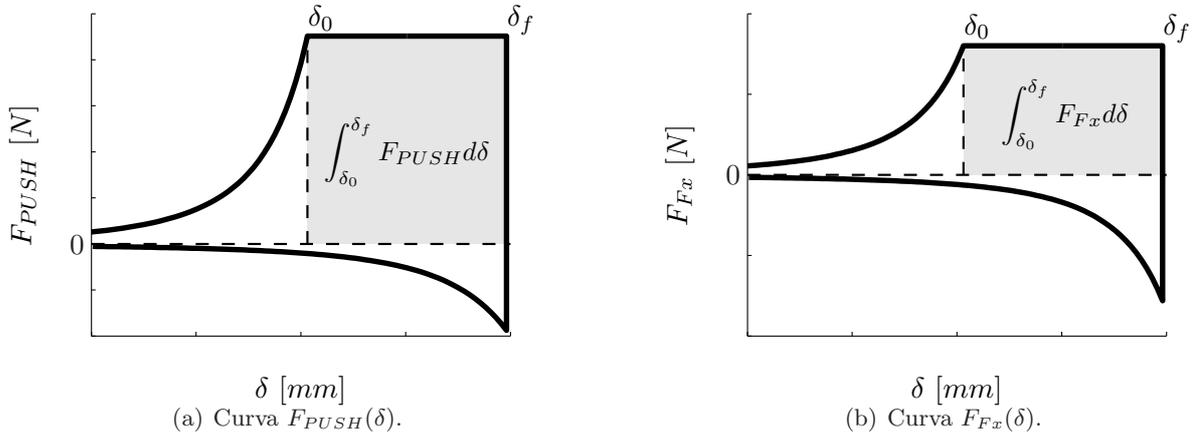


Figura 5.20: Determinación de U_{ext} y U_{dis} a partir de las curvas de $F_{PUSH}(\delta)$ y $F_{Fx}(\delta)$ en la fase de propagación del ensayo WDT.

5.4.2.3. Método de cálculo directo de G_{IC}

El último método que se propone permite determinar el valor de G_{IC} sin tener que obtener previamente el coeficiente de fricción. La formulación se ha desarrollado en el apartado 5.3.4.

La energía disponible para la fractura se obtiene a partir de los datos de F_{PUSH} y F_{PULL} del ensayo experimental y del ancho de la probeta:

$$G = \frac{F_{PUSH} + F_{PULL}}{2B} \quad (5.74)$$

Para que la ecuación 5.74 se válida, los valores de F_{PUSH} y F_{PULL} se deben obtener en puntos que tengan la misma longitud de grieta. Para calcular $G = G_{IC}$ se ha utilizado el valor promedio de F_{PUSH} en la fase de propagación, y el valor de F_{PULL} de los cinco primeros puntos de la fase de retroceso de la cuña. En estos puntos el valor de la longitud de grieta es aproximadamente el mismo para ambas fuerzas F_{PUSH} y F_{PULL} .

Capítulo 6

Ensayo alternativo WDT: análisis numérico

6.1. Introducción

Para validar la formulación analítica que se ha presentado en el capítulo 5, se ha realizado un ensayo virtual con elementos finitos.

Se ha simulado una unión adhesiva a la cual se le ha realizado un ensayo de propagación de grieta por avance forzado de cuña (ensayo WDT). Para llevar a cabo el ensayo virtual se han introducido una serie de propiedades en el modelo numérico, como el coeficiente de fricción entre la cuña y la probeta (μ_{MEF}) o la tenacidad a la fractura de la unión adhesiva (G_{ICMEF}). Y como resultado de la simulación se ha obtenido la curva $F_{PUSH}(\delta)$.

A partir de los resultados obtenidos del ensayo virtual, curva $F_{PUSH}(\delta)$, se han utilizado los métodos de reducción de datos descritos en el capítulo 5 para obtener nuevamente el coeficiente de fricción entre la cuña y la probeta (μ), y la tenacidad a la fractura de la unión adhesiva (G_{IC}). Estos resultados se han comparado con los que previamente se habían introducido en el modelo numérico: μ_{MEF} y G_{ICMEF} .

6.2. Descripción del modelo numérico

La simulación por elementos finitos se ha llevado a cabo con el software *ABAQUS 6.7.1*. Se ha realizado un análisis en dos dimensiones considerando la hipótesis de deformación plana.

Para realizar las simulaciones, se ha considerado una probeta con las mismas dimensiones que las que se han ensayado experimentalmente: 250 mm de longitud \times 25 mm de ancho \times 3 mm de espesor. En uno de los extremos de la probeta se ha creado una pregrieta inicial de 100 mm de longitud.

La cuña también se ha definido con las mismas dimensiones que la que se ha utilizado en los ensayos experimentales: con un radio de curvatura de $r_w = 1.425 \text{ mm}$ y un ancho de 25 mm.

Los adherentes de composite se han simulado con propiedades ortotrópicas, como un laminado con una secuencia de apilamiento $[0_8/ad/0_8]$, siendo ad la capa de adhesivo. El espesor y las propiedades elásticas de la lámina de adhesivo no se han tenido en cuenta en el análisis. El proceso de fractura se ha simulado con elementos cohesivos basados en la formulación desarrollada en los trabajos de Turon et al. (2004, 2006). Se ha realizado un análisis no lineal, considerando grandes desplazamientos de los brazos de la probeta.

6.2.1. Tipos de elementos

Cada lámina de los adherentes de composite se ha simulado con una fila de elementos. Para definir las 16 capas que configuran el laminado de la probeta (de 3 mm de espesor) se han utilizado 16 filas de elementos. El análisis se ha realizado con el elemento CPE_4 , que es un sólido de 4 nodos con funciones de forma bilineales, y admite la hipótesis de deformación plana. La cuña se ha definido también con el mismo tipo de elemento.

La capa de adhesivo (ad en la secuencia de apilamiento) se ha definido mediante un elemento de usuario de 4 nodos, en el cual se ha implementado la formulación cohesiva definida en el trabajo de Turon et al. (2006). Esta formulación se presenta en el siguiente apartado.

6.2.2. Formulación de los elementos cohesivos

El modelo de zona cohesiva que se ha utilizado para realizar las simulaciones fue desarrollado en los trabajos de Turon et al. (2004, 2006). El modelo permite simular en 2 y 3 dimensiones el proceso de fractura de un componente. En este apartado se realiza una descripción del modelo, poniendo especial atención en la cinemática y la formulación constitutiva.

6.2.2.1. Problema de contorno y ecuaciones cinemáticas

Para simular el proceso de fractura de una pieza con una grieta inicial Γ_c , se considera que la grieta forma parte de una discontinuidad del material Γ_d , que divide el dominio de la pieza Ω en dos partes Ω_+ y Ω_- , ver figura 6.1.

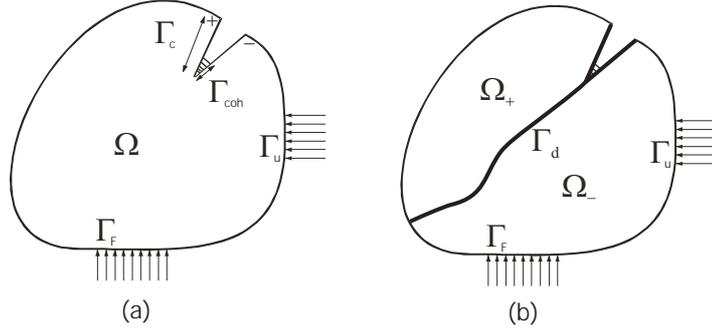


Figura 6.1: Dominio de la pieza Ω en la cual hay una discontinuidad Γ_d (Turon et al., 2007).

La diferencia del desplazamiento a lo largo de la discontinuidad ($\llbracket u_i \rrbracket$) se obtiene en función de los desplazamientos de los puntos situados en las caras superior e inferior de la propia discontinuidad:

$$\llbracket u_i \rrbracket = u_i^+ - u_i^- \quad (6.1)$$

Siendo u_i^\pm los desplazamientos respecto a un eje de coordenadas Cartesiano fijo (eje de coordenadas global) de las caras superior e inferior. Mediante una formulación corrotacional, se expresan las componentes de los saltos de desplazamiento en relación a la configuración deformada, en función del campo de desplazamientos definido respecto el eje de coordenadas global. El desplazamiento de la configuración deformada (movimiento del cuerpo rígido) respecto de la configuración de referencia (\bar{x}_i), se escribe como:

$$\bar{x}_i = X_i + \frac{1}{2} (u_i^+ + u_i^-) \quad (6.2)$$

Siendo X_i las coordenadas de posición de los puntos de la configuración de referencia.

Las componentes del tensor de los saltos de desplazamiento en el sistema de coordenadas local en la configuración deformada (Δ_m) se expresan en función del campo de desplazamientos, en relación a las coordenadas globales, mediante un tensor de rotación Θ_{mi} :

$$\Delta_m = \Theta_{mi} \llbracket u_i \rrbracket \quad (6.3)$$

6.2.2.2. Formulación constitutiva

Para representar el comportamiento del material de la discontinuidad se utiliza una matriz constitutiva (D_{ji}) que relaciona las tracciones de la zona cohesiva τ_j , en función de los saltos de desplazamiento en el sistema de coordenadas local Δ_i :

$$\tau_j = D_{ji} \Delta_i \quad (6.4)$$

La determinación de la energía disipada se realiza mediante una ley cohesiva bilineal, (ver las leyes para los modos de fractura puros I y II de la figura 6.2). El área bajo la curva $\tau(\Delta_i)$ es igual al valor de la tenacidad a la fractura (G_C). El modelo permite el análisis del proceso de fractura en modo mixto I-II, utilizando un criterio de interacción entre las componentes de la energía disponible para la fractura.

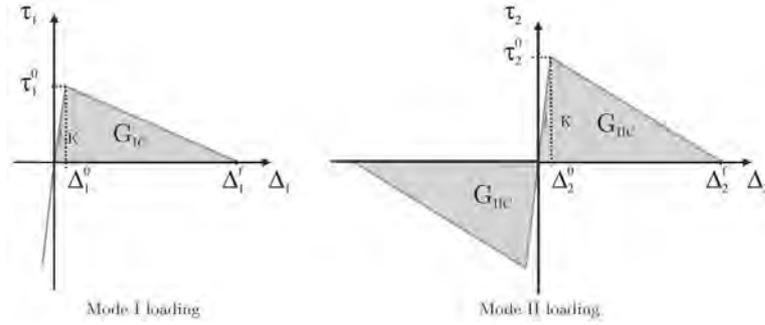


Figura 6.2: Leyes constitutivas bilineales para los modos de fractura I y II (Turón et al., 2007).

El modelo constitutivo de daño que se ha utilizado, se ha formulado en el contexto de la mecánica del daño. La energía libre por unidad de superficie vale:

$$\psi(\Delta, \mathbf{d}) = (1 - \mathbf{d}) \psi^0(\Delta_i) - \mathbf{d} \psi^0(\delta_{3i} \langle -\Delta_3 \rangle) \quad (6.5)$$

Siendo ψ^0 la energía libre del material virgen, δ_{ij} la delta de Kronecker, \mathbf{d} una variable de daño escalar y $\langle \cdot \rangle$ el operador de MacAuley definido como $\langle x \rangle = \frac{1}{2}(x + |x|)$.

La ecuación constitutiva ($\tau(\Delta_i)$) se obtiene diferenciando la energía libre en función del salto de desplazamiento Δ_i :

$$\tau_i = \frac{\partial \psi}{\partial \Delta_i} = (1 - \mathbf{d}) D_{ij}^0 \Delta_j - \mathbf{d} D_{ij}^0 \delta_{3j} \langle -\Delta_3 \rangle \quad (6.6)$$

Para determinar los saltos de desplazamiento se utiliza una norma de desplazamiento λ definida como:

$$\lambda = \sqrt{\langle \Delta_1 \rangle^2 + \langle \Delta_2 \rangle^2} \quad (6.7)$$

Siendo Δ_1 el salto de desplazamiento en modo I (en la dirección normal a la propagación de la grieta), y Δ_2 el salto de desplazamiento en modo II. La función de carga y descarga es:

$$\bar{F}(\lambda^t, r^t) := G(\lambda^t) - G(r^t) \leq 0 \quad \forall t \geq 0 \quad (6.8)$$

Dónde $G(\cdot)$ es una función escalar monotónica, que va desde 0 hasta 1, y que gobierna la evolución de la degradación, y r^t es el umbral de degradación en el instante de tiempo t .

$$r^t = \max \left\{ r^0, \max_s \lambda^s \right\}, \quad 0 \leq s \leq t \quad (6.9)$$

La ley de evolución de la variable de daño y el umbral de degradación se definen a partir de la siguiente expresión:

$$\dot{d} = \dot{\mu} \frac{\partial \bar{F}(\lambda, r)}{\partial \lambda} = \dot{\mu} \frac{\partial G(\lambda)}{\partial \lambda}; \quad \dot{r} = \dot{\mu} \quad (6.10)$$

Siendo $\dot{\mu}$ un parámetro de degradación consistente para definir las condiciones de degradación, según las relaciones de Kuhn-Tucker:

$$\dot{\mu} \geq 0; \quad \bar{F}(\lambda^t, r^t) \leq 0; \quad \dot{\mu} \bar{F}(\lambda^t, r^t) = 0 \quad (6.11)$$

Esta formulación se ha implementado en el software *Abaqus* mediante una subrutina de elementos de usuario. Los detalles completos de la formulación, así como los criterios para su correcta utilización, se pueden consultar en los trabajos de Turon et al. (2006, 2007).

6.2.3. Materiales

Se ha simulado una probeta formada por dos adherentes de material composite unidos por una lámina de adhesivo, con una secuencia de apilamiento de $[0_8/ad/0_8]$, siendo *ad* la capa de adhesivo. Se ha definido cada adherente como un laminado formado por capas unidireccionales de composite de fibra de carbono y resina epoxy. Las propiedades elásticas de cada capa se muestran en la tabla 6.1. Cada capa se ha definido como un material ortotrópico.

$E_x = 120.9 \text{ GPa}$	$\nu_{xy} = 0.354$	$G_{xy} = 4.6 \text{ GPa}$
$E_y = 8.8 \text{ GPa}$	$\nu_{xz} = 0.354$	$G_{xz} = 4.6 \text{ GPa}$
$E_z = 8.8 \text{ GPa}$	$\nu_{yz} = 0.400$	$G_{yz} = 3.1 \text{ GPa}$

Tabla 6.1: Propiedades elásticas de las capas que constituyen los adherentes.

La cuña se ha definido de aluminio y se le han asignado las propiedades de un material isotrópico: $E_w = 70 \text{ GPa}$, $\nu_w = 0.3$.

En el modelo de elementos finitos no se han incluido las propiedades elásticas de la lámina de adhesivo. Sin embargo, para simular la propagación de la grieta, sí que se han tenido en cuenta sus propiedades a la fractura. Estas propiedades se han representado con las leyes bilineales constitutivas definidas en el trabajo de Turon et al. (2007), ver figura 6.2. Para definir estas

leyes se han utilizado los siguientes parámetros: la tenacidad a la fractura en los modos I y II (G_{IC} y G_{IIC}), las tensiones a tracción y cortante máximas de la zona cohesiva (τ_1^0 y τ_2^0) y la rigidez inicial o factor de penalización (*penalty stiffness*: K).

Se han llevado a cabo simulaciones numéricas con 3 valores de G_{IC} : $250 J/m^2$, $650 J/m^2$ y $1100 J/m^2$ y tres valores de τ_1^0 : $37.0 MPa$, $74 MPa$ y $92.5 MPa$. Se ha utilizado los mismos valores de G_{IIC} y τ_2 en todas las simulaciones ($G_{IIC} = 3800 J/m^2$ y $\tau_2^0 = 70 MPa$). El ensayo WDT es un ensayo de pelado en modo I, y por consiguiente las propiedades a la fractura en modo II tienen muy poca influencia en los resultados que se obtienen del ensayo virtual. También se ha utilizado el mismo factor de penalización en todas las simulaciones ($K = 10^6 MPa$).

6.2.4. Definición de la malla

Se ha mallado la sección lateral de la probeta (plano xy de la figura 5.1). Para realizar el mallado, la probeta se ha subdividido en 3 zonas, ver figura 6.3(b):

- De 0 a 35 mm: se ha definido un mallado progresivo de 100 elementos, con longitudes desde 1.12 mm hasta 0.05 mm.
- De 35 a 150 mm: se ha definido un mallado regular con 2300 elementos de 0.05 mm de longitud. En esta zona se ha realizado la propagación de la grieta, por lo que el mallado debía ser regular y con un tamaño de elemento lo más pequeño posible (Turón et al., 2007).
- De 150 hasta 250 mm: se ha definido otro mallado progresivo de 60 elementos, con longitudes desde 0.05 mm hasta 8.20 mm.

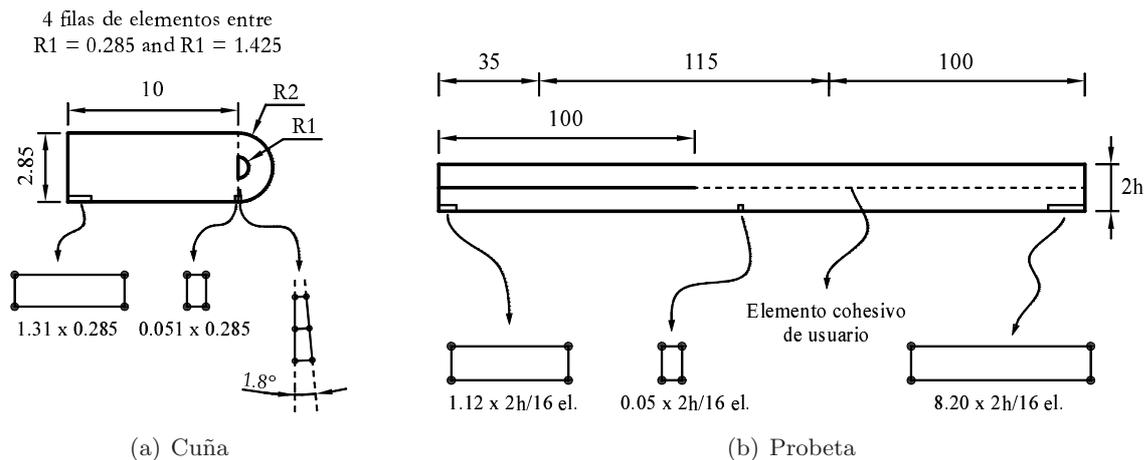


Figura 6.3: Definición del mallado de la cuña y la probeta. Unidades en mm (el. = elementos).

Entre los dos adherentes se ha creado una fila de 2300 elementos cohesivos, desde 100 mm hasta 250 mm, para conectar los elementos sólidos y simular la propagación de la grieta, ver figura 6.3(b).

El mallado de la cuña se ha realizado en 2 partes, ver figura 6.3(a): la parte posterior de la cuña se ha creado mediante un mallado progresivo de 10 filas de elementos, con longitudes desde 1.31 mm hasta 0.051 mm, y la punta de la cuña se ha creado con un mallado radial con 4 filas de elementos dispuestos cada 1.8° , el mallado de la punta de la cuña se ha definido con 4 filas de 100 elementos. En la figura 6.3(a) se indica la disposición de los elementos para realizar el mallado de la cuña.

6.2.5. Condiciones de contorno

Se ha fijado la probeta por el extremo que no tenía pregrieta inicial, restringiendo los desplazamientos en X e Y de los nodos. En el otro extremo, se ha aplicado un desplazamiento vertical (δ_y) a cada uno de los brazos de la probeta, para separarlos y poder introducir la cuña, ver figura 6.4.

En la cuña se ha impedido el desplazamiento vertical (en la dirección y), y durante el ensayo se ha controlado su avance, aplicando un desplazamiento en x en el centro de la punta, ver figura 6.4.

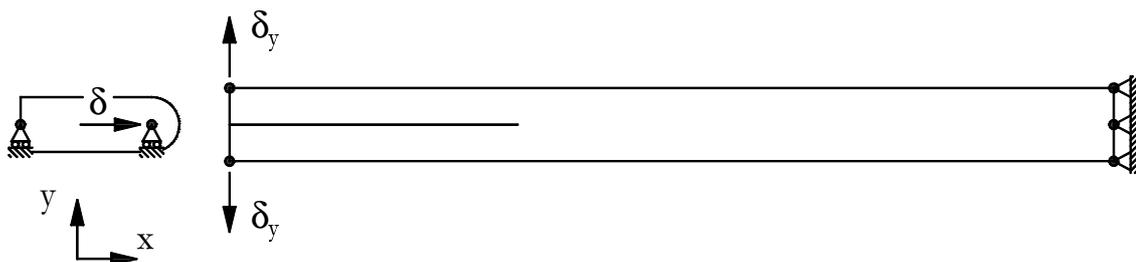


Figura 6.4: Condiciones de contorno aplicadas sobre la probeta.

Para que la cuña pueda separar los brazos de la probeta, se han definido hipótesis de contacto en ambos componentes del modelo. Se han creado superficies de contacto en la punta de la cuña y las caras interiores de la probeta. Se ha impuesto una condición de contacto de no interferencia, y se han realizado dos tipos de simulaciones: con y sin fricción (considerando $\mu = 0.3$ y $\mu = 0$ respectivamente).

6.2.6. Definición de la secuencia del ensayo virtual

Antes de realizar la simulación, se ha fijado la probeta por el extremo sin pregrieta y se ha situado la cuña fuera de la probeta, a una cierta distancia. Se han dejado 5mm entre el centro de curvatura de la punta de la cuña y el extremo de la probeta. La simulación se ha realizado en 5 pasos (o *steps*), ver figura 6.5:

- Paso 1: se han separado los brazos de la probeta una distancia $\delta_y = 10 \text{ mm}$.
- Paso 2: se ha desplazado la cuña 35 mm hacia el interior de la probeta. Durante esta etapa la cuña y la probeta no han entrado en contacto.

- Paso 3: se han eliminado las condiciones de desplazamiento de los brazos de la probeta impuestas en el paso 1. De manera que se han cerrado los brazos de la probeta hasta que han entrado en contacto con la cuña.
- Paso 4: se ha realizado el ensayo experimental controlando el desplazamiento de la cuña. Se ha desplazado la cuña un $\Delta\delta = 80 \text{ mm}$ desde la posición final del paso 2 ($\delta = 35 \text{ mm}$).
- Paso 5: se ha hecho retroceder la cuña desde $\delta = 115 \text{ mm}$ hasta $\delta = 35 \text{ mm}$.

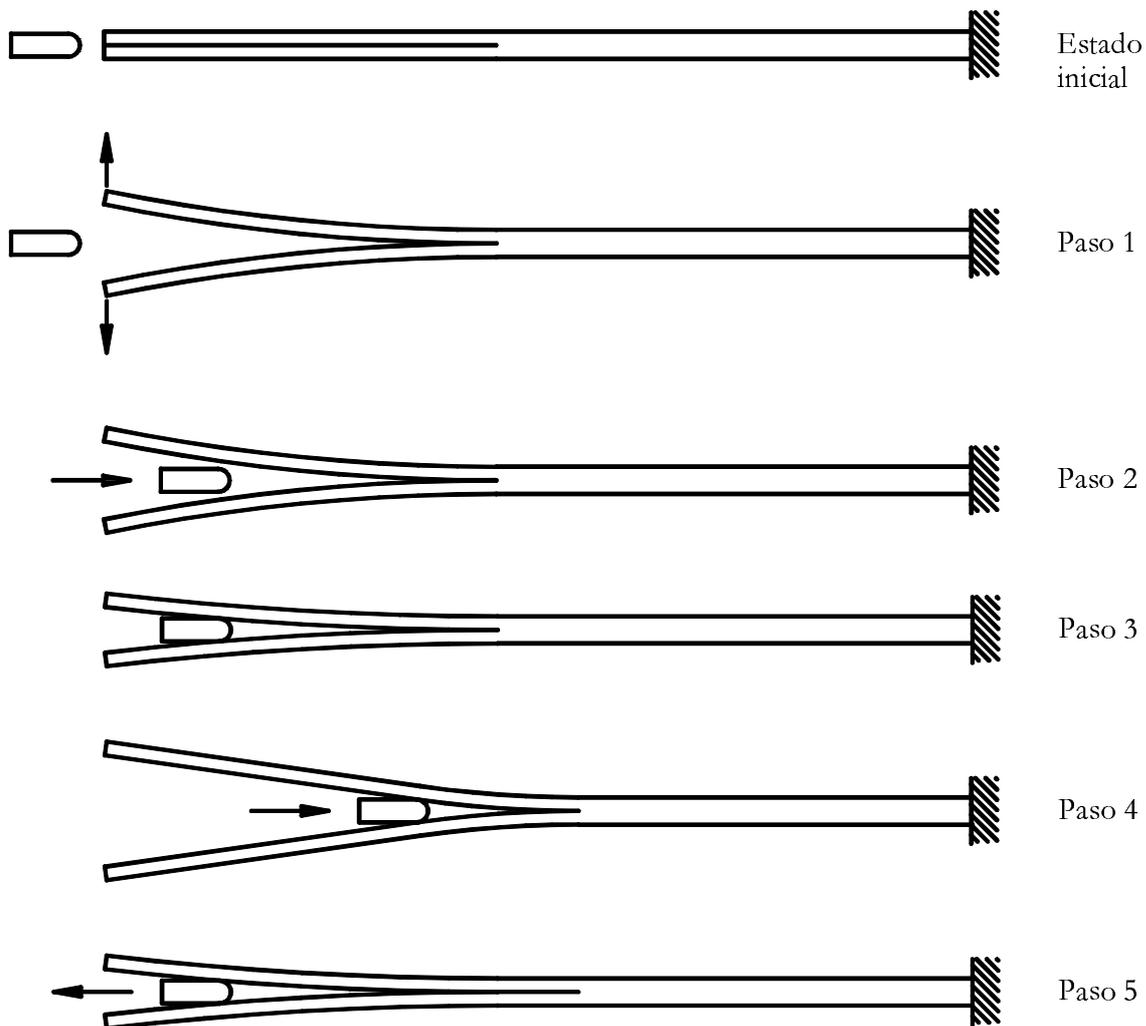


Figura 6.5: Secuencia de la simulación numérica.

6.2.7. Resultados de la simulación

Los resultados que se han obtenido son los valores de la fuerza de empuje (F_{PUSH}) y el desplazamiento horizontal de la cuña (δ). También se han registrado los valores de las fuerzas de contacto entre la cuña y la probeta en algunas de las simulaciones.

Por otra parte, a partir de la subrutina de usuario sobre la cuál se ha implementado la formulación cohesiva, se han obtenido los valores de la longitud del frente de grieta y la longitud de la zona cohesiva¹(l_{cz}). Estas longitudes se han calculado a partir del listado de elementos cohesivos parcialmente y totalmente dañados que ha proporcionado la misma subrutina.

6.3. Análisis de las fuerzas de contacto entre cuña y probeta

A partir de las fuerzas de contacto entre la cuña y la probeta, se ha analizado la influencia del coeficiente de fricción en los resultados. Se han comparado los resultados de dos simulaciones: una con fricción entre la cuña y la probeta ($\mu_{MEF} = 0.3$) y la otra sin fricción ($\mu_{MEF} = 0$). Ambas simulaciones se han definido con $G_{IC} = 1100 \text{ J/m}^2$ y $\tau_1^0 = 37 \text{ MPa}$.

En la figura 6.6 se muestran las curvas de la fuerza de empuje de la cuña en función del desplazamiento y en porcentaje de tiempo del análisis. El porcentaje de tiempo de análisis no se corresponde con el tiempo real que dura el ensayo, sino con los incrementos que se han realizado durante la simulación para llegar a la convergencia de la solución.

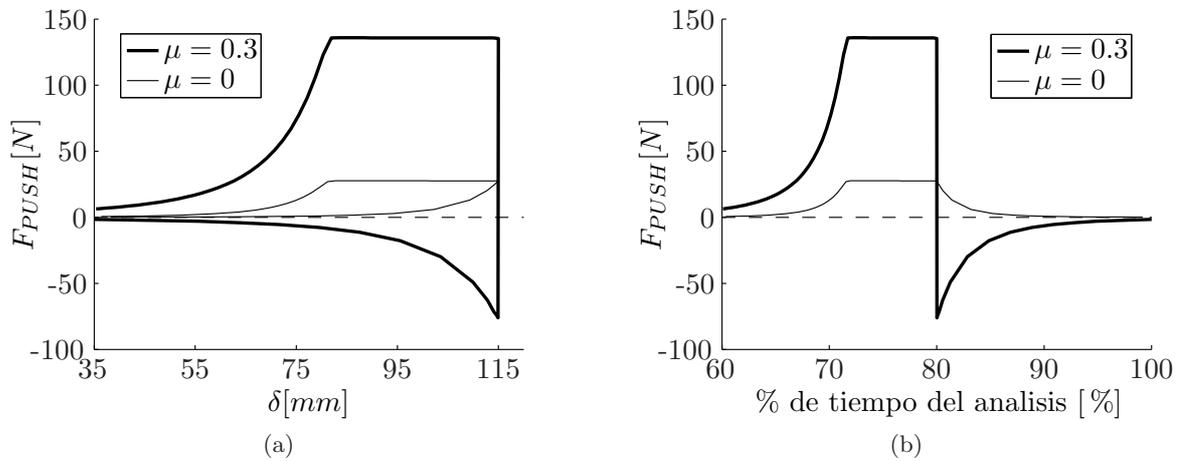


Figura 6.6: Resultados de la simulación con fricción entre cuña y probeta.

La respuesta de la simulación con $\mu_{MEF} = 0.3$ (curva $F_{PUSH}(\delta)$ de la figura 6.6(a)) es similar a la curva teórica del ensayo WDT que se ha presentado en los primeros apartados del capítulo anterior, ver figura 5.3(a). En cambio, la curva $F_{PUSH}(\delta)$ que se ha obtenido de la simulación sin fricción, y que se muestra en la misma figura 6.6(a), presenta ciertas diferencias. En primer lugar, los valores de F_{PUSH} son inferiores a los de la curva con fricción. Y en segundo lugar, los valores de F_{PUSH} que se obtienen en la fase de retroceso son positivos, esto se debe a que no existe ninguna fuerza de fricción que se oponga al movimiento de la cuña.

¹Longitud de la zona cohesiva: longitud de la zona del frente de grieta el la cual el material está parcialmente degradado, pero que puede asumir un cierto grado de carga.

Para analizar la diferencia entre los valores de F_{PUSH} de las dos simulaciones (con y sin fricción), en la figura 6.7 se muestran las componentes, en las direcciones x e y , de las fuerzas de contacto normal y de fricción de la simulación con $\mu_{MEF} = 0.3$. No se han utilizado los datos de la simulación con $\mu_{MEF} = 0$ porque obviamente la fuerza de fricción $F_F = 0$ N.

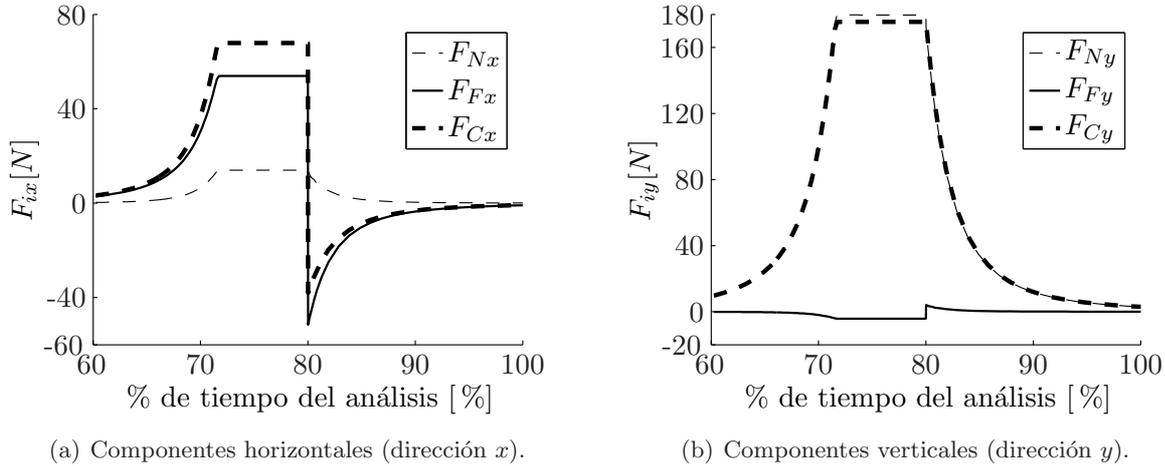


Figura 6.7: Componentes verticales y horizontales de las fuerzas de contacto y fricción entre cuña y probeta.

En la figura 6.7(a) se observa que de las dos componentes horizontales (F_{Nx} y F_{Fx}), la fuerza de fricción (F_{Fx}) es la que tiene un mayor peso en el cálculo de F_{Cx} . Es por esta razón que en la simulación con fricción el valor de F_{PUSH} es superior. Por otra parte, la componente F_{Nx} siempre es positiva mientras que F_{Fx} cambia de signo cuando la cuña retrocede. Como $|F_{Fx}| > |F_{Nx}|$, si hay fricción el valor de la fuerza de empuje en la fase de retroceso es negativo.

6.3.1. Análisis de los resultados numéricos

A partir de los resultados de la figura 6.7(a), se observa que la fuerza de fricción tiene un efecto importante en la componente horizontal de la fuerza (F_{Cx}) y, en cambio, tiene muy poco peso sobre la componente vertical de la fuerza (F_{Cy}), ver figura 6.7(b).

Si durante el ensayo experimental se pudiera obtener la fuerza de contacto vertical entre la cuña y la probeta (F_{Cy}) mediante un extensómetro, no sería necesario tener en cuenta la fuerza de fricción. Sin embargo, los resultados que se utilizan para determinar la energía disponible para la fractura son los de la curva $F_{PUSH}(\delta)$, que corresponde a los valores de la componente horizontal de la fuerza (F_{Cx}), donde el efecto de F_F si es importante.

6.4. Efecto de la longitud cohesiva en la reducción de datos

Al utilizar elementos cohesivos para simular la propagación de la grieta, a medida que la cuña se acerca al frente de grieta, hay una serie de elementos en el frente de grieta que empiezan a

degradarse sin que aún se haya iniciado la propagación. La zona que ocupan estos elementos se la llama zona cohesiva. Al degradarse, el elemento cohesivo pierde rigidez. Esta pérdida de rigidez en el frente de grieta tiene un efecto en la rotación de los brazos de la probeta. En este apartado se analiza el efecto que tiene estos elementos de la zona cohesiva en la determinación de μ y G_{IC} .

6.4.1. Definición de la zona cohesiva

Se define como zona cohesiva la región del frente de grieta en la cual los elementos están parcialmente degradados, pero que aún son capaces de asumir cierto grado de carga. Y la longitud de la zona cohesiva (l_{cz}) como la longitud que comprende los elementos cohesivos parcialmente degradados. En la formulación bilineal del elemento cohesivo que se ha presentado en el apartado 6.2.2.2, la degradación se traduce en una pérdida de rigidez del elemento. En la figura 6.8 se indica de forma esquemática el efecto de la degradación y su consiguiente pérdida de rigidez, de dos elementos pertenecientes a la zona cohesiva.

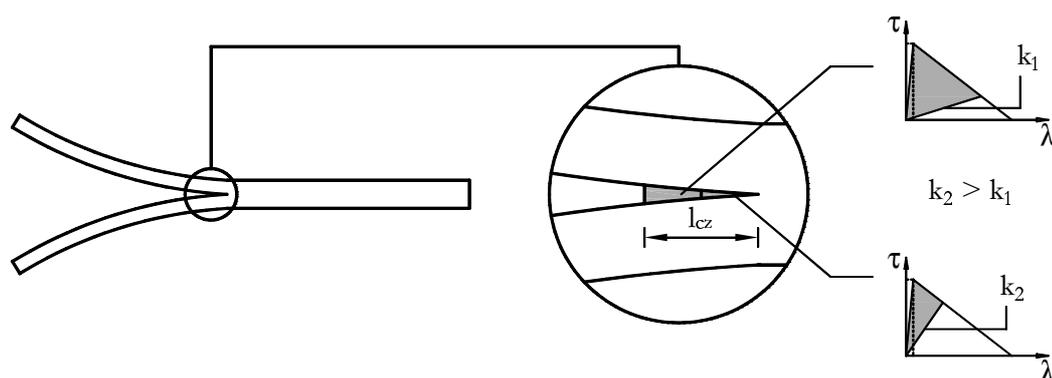


Figura 6.8: Esquema representativo de la pérdida de rigidez de los elementos de la zona cohesiva.

En el trabajo de Turon et al. (2008) se realizó una revisión de los distintos métodos para determinar de forma analítica la longitud de la zona cohesiva, en ensayos de fractura interlaminar en modo I para materiales composites. En estas expresiones se obtiene que la l_{cz} depende de la tenacidad a la fractura en modo I (G_{IC}), el módulo de Young transversal (E') y la tensión última de iniciación (τ_1^0). Para el mismo valor de E' , al aumentar G_{IC} aumenta la l_{cz} , la l_{cz} aumenta si disminuye τ_1^0 .

En la figura 6.9 se representa la evolución de la l_{cz} y F_{PUSH} en función del porcentaje de tiempo de un ensayo virtual. La simulación se ha realizado con $G_{IC} = 1100 J/m^2$ y $\tau_1^0 = 37 MPa$.

Inicialmente el valor de la $l_{cz} \neq 0$, porque al abrir los brazos de la probeta para introducir la cuña se han dañado algunos elementos cohesivos. El valor de la longitud de la zona cohesiva se incrementa a partir de un cierto valor de F_{PUSH} , y sigue aumentando hasta que se produce la propagación de la grieta. A partir de este momento se estabiliza y se mantiene constante, porque la zona cohesiva se desplaza a la misma velocidad que el frente de grieta.

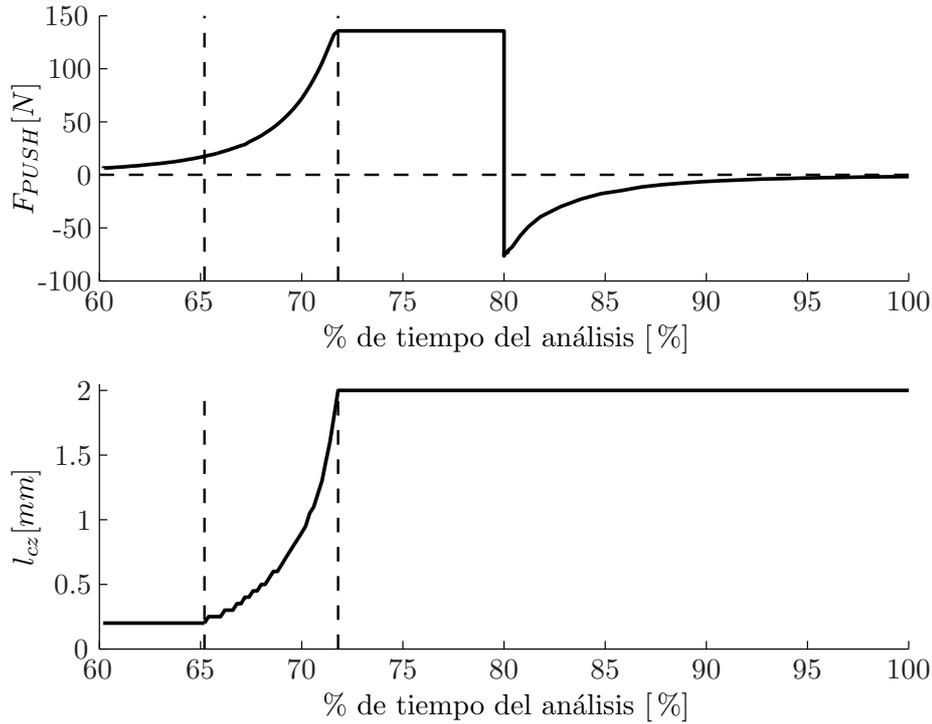


Figura 6.9: Evolución de la l_{cz} y F_{PUSH} en función del porcentaje de tiempo del análisis.

6.5. Influencia de la l_{cz} en el cálculo de μ y G_{IC}

Para analizar la influencia de la l_{cz} en la determinación de μ y G_{IC} , se ha llevado a cabo una campaña de ensayos virtuales variando los parámetros τ_1^0 y $G_{IC_{MEF}}$ en cada ensayo. Se han realizado 3 simulaciones con valores distintos de τ_1^0 : 37 MPa, 72 MPa y 92.5 MPa, manteniendo el mismo valor de $G_{IC_{MEF}} = 1100 \text{ J/m}^2$. Y se han realizado otras 3 simulaciones con valores distintos de $G_{IC_{MEF}}$: 1100 J/m², 600 J/m² y 250 J/m², manteniendo el mismo valor de $\tau_1^0 = 37 \text{ MPa}$. En todas las simulaciones se han utilizado las mismas propiedades elásticas de los adherentes definidas en la tabla 6.1, y las mismas propiedades de fractura en modo II de la unión adhesiva, ver las propiedades definidas en el apartado 6.2.3. En cada ensayo virtual se ha determinado la l_{cz} y los valores de μ y G_{IC} .

Los resultados de μ y G_{IC} que se han obtenido, se han comparado con los datos que previamente se introdujeron en la simulación numérica (μ_{MEF} y $G_{IC_{MEF}}$).

6.5.1. Resultados del ajuste de μ

A partir de los datos de la fase de introducción de la curva $F_{PUSH}(\delta)$, en cada ensayo virtual se ha realizado un ajuste del coeficiente de fricción. A partir de estos datos se ha obtenido el valor de G_{IC} .

El ajuste de μ se ha realizado con la ecuación analítica 5.69 definida en el apartado 5.4, del ajuste se han obtenido dos valores: a_0 y μ . Los resultados del ajuste y el error cometido respecto

los resultados numéricos se muestran en la figura 6.10.

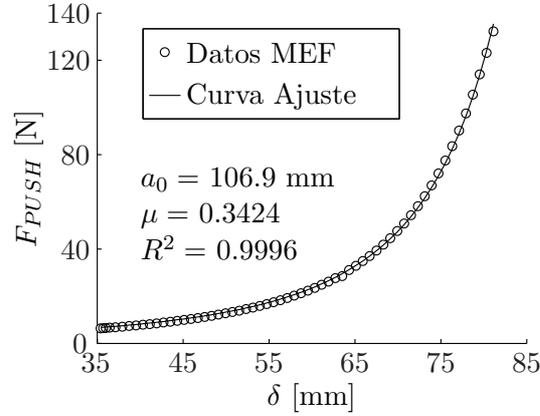


Figura 6.10: Resultados del ajuste de μ y a_0 del ensayo virtual con $G_{IC} = 1100$ J/m^2 y $\tau_1^3 = 37$ MPa .

A partir de los resultados de la figura 6.10 se observa que el ajuste de la curva tiene una $R^2 > 0.999$. Sin embargo, los parámetros que se obtienen son diferentes a los resultados esperados. Lo mismo ocurre en el resto de las simulaciones numéricas que se han realizado.

En la tabla 6.2 se listan los resultados que se han obtenido de la l_{cz} , μ y G_{IC} en todas las simulaciones que se han realizado.

Modelo numérico					Ajuste analítico			Error		
a_0 [mm]	G_{IC} [J/m^2]	τ_1^0 [MPa]	$2h$ [mm]	l_{cz} [mm]	μ	a_0 [mm]	G_{IC} [J/m^2]	μ [%]	a_0 [mm]	G_{IC} [%]
105	1100	37	3	2.00	0.342	106.91	951.0	14.1	1.91	13.5
105	1100	60	3	1.20	0.333	106.40	979.1	10.9	1.40	11.0
105	1100	92.5	3	0.65	0.311	105.59	1050.9	3.5	0.59	4.5
105	1100	37 ¹	3	0.20	0.297	105.15	1102.4	1.1	0.15	0.2
105	600	37	3	1.45	0.324	106.36	548.5	7.8	1.36	8.6
105	250	37	3	0.85	0.311	105.92	239.1	3.5	0.92	4.4

Tabla 6.2: Determinación de la l_{cz} , y ajuste de μ , a_0 y G_{IC} .

Los valores que aparecen en las columnas bajo la etiqueta de *Modelo numérico* son los parámetros que se han introducido en la simulación. Las columnas etiquetados con *Ajuste analítico* son los resultados que se han obtenido del ajuste de los datos de la simulación. Y por último, las columnas etiquetados con *Error* son los errores cometidos entre los datos que se han introducido en el modelo y los datos que se han obtenido del ajuste. De los parámetros μ y G_{IC} se ha calculado el error relativo, y en cambio para a_0 se ha calculado el error absoluto en mm . Los datos de la tabla 6.2 se han ordenado en función de G_{IC} y τ_1^0 . El ajuste de G_{IC} se ha realizado

¹Ensayo WDT con $\tau_1^0 = 37$ MPa , del cuál se ha realizado un ajuste de la curva $F_{PUSH}(\delta)$ en los primeros puntos de la fase de introducción, en los cuales la $l_{cz} \approx 0$.

según el método del área descrito en el apartado 5.4.2.2.

A partir de los resultados de la tabla 6.2, se observa que al disminuir G_{IC} también disminuye la l_{cz} , para un mismo valor de τ_1^0 . Y que al aumentar τ_1^0 la l_{cz} disminuye para un mismo valor de G_{IC} . De manera que se cumple la dependencia entre la l_{cz} , τ_1^0 y G_{IC} que se ha definido en el apartado 6.4.1.

Al mismo tiempo, el error cometido en el ajuste de μ , a_0 y G_{IC} está relacionado con la l_{cz} . Cuanto mayor es el valor de la l_{cz} , mayor es el error cometido en el ajuste de las variables. Si el valor de la l_{cz} es prácticamente igual a cero, tal y como ocurre con los datos de la cuarta fila de la tabla 6.2, el error cometido es inferior al 2%.

Debe comentarse que un pequeño error en el ajuste de a_0 tiene una gran repercusión en el cálculo de G_{IC} porque el valor de G_{IC} depende de a^4 , siendo $a = a_0 - \delta$.

6.6. Modificación del ensayo experimental en dos ciclos de avance y retroceso de la cuña

Tal y como puede observarse en la figura 6.9, en parte de la fase de introducción se produce una variación de la l_{cz} . Esta variación tiene un efecto sobre la rotación de los brazos de la probeta, y en los datos del tramo de la curva $F_{PUSH}(\delta)$ en la cual se realiza el ajuste de μ .

Para minimizar el error cometido en el ajuste de μ y G_{IC} se propone realizar el ensayo en dos ciclos de avance y retroceso de la cuña. Un primer ciclo hasta que se consigue estabilizar el crecimiento de la l_{cz} , y un segundo ciclo para realizar el ajuste de μ . En la figura 6.11 se representan las curvas de F_{PUSH} y la l_{cz} en función del porcentaje de tiempo del ensayo.

Tal y como se ha comentado anteriormente, la l_{cz} se estabiliza cuando la grieta empieza a propagarse y permanece constante durante el resto del ensayo experimental. De manera que si se realiza un segundo ciclo de avance y retroceso de la cuña, l_{cz} es constante durante el segundo ciclo de avance y retroceso. Y si la longitud de la zona cohesiva se mantiene constante también lo será el efecto de la rotación en el frente de grieta producido por los elementos que pertenecen a esta zona.

En la tabla 6.3 se listan los resultados de las anteriores simulaciones en las cuales se les ha realizado un segundo ciclo de avance y retroceso de la cuña.

El error que se ha cometido en el ajuste de μ y G_{IC} es inferior al 1% en todos los casos. De manera que ajustando μ en el segundo ciclo de avance y retroceso de la cuña se consigue minimizar el efecto de la l_{cz} . Por otra parte, en el ajuste de a_0 el error que se comete está relacionado con la l_{cz} y es siempre inferior a su valor. Esta diferencia se debe a que la formulación analítica que

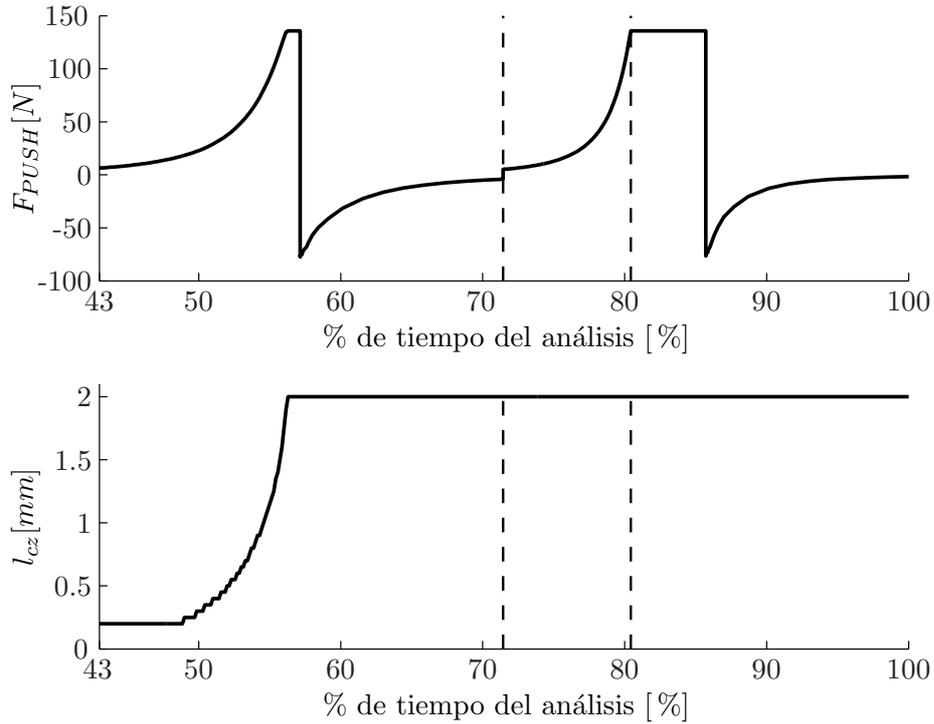


Figura 6.11: Evolución de la l_{cz} y F_{PUSH} en función del porcentaje de tiempo del análisis, realizando un segundo ciclo de avance y retroceso de la cuña.

Modelo numérico					Ajuste analítico			Error		
a_0 [mm]	G_{IC} [J/m ²]	τ_1^0 [MPa]	$2h$ [mm]	l_{cz} [mm]	μ	a_0 [mm]	G_{IC} [J/m ²]	μ [%]	a_0 [mm]	G_{IC} [%]
108.45	1100	37	3	2.00	0.300	109.84	1091.9	0.1	1.39	0.7
109.00	1100	60	3	1.20	0.300	109.84	1090.4	0.1	0.84	0.9
109.35	1100	92.5	3	0.65	0.300	109.85	1089.3	0.1	0.50	1.0
113.30	600	37	3	1.45	0.299	114.31	596.7	0.4	1.01	0.5
121.50	250	37	3	0.85	0.298	122.09	250.4	0.8	0.59	0.2

Tabla 6.3: Determinación de la l_{cz} , y ajuste de μ , a_0 y G_{IC} en el segundo ciclo de avance y retroceso de la cuña.

se ha desarrollado no tiene en cuenta la variación de rigidez en la zona cohesiva. Si esta rigidez se traduce en una disminución de la longitud de la grieta, entonces el error absoluto cometido entre $a_{0_{MEF}}$ y a_0 puede interpretarse como una longitud de zona cohesiva efectiva ($l_{cz_{EF}}$). Esta longitud de zona cohesiva efectiva que se determina en el ajuste analítico puede emplearse en futuros trabajos para determinar la l_{cz} real de una unión adhesiva. De manera que el ensayo WDT se postula como un excelente candidato para determinar otros parámetros además de G_{IC} , como es la longitud de la zona cohesiva l_{cz} .

Capítulo 7

Ensayo alternativo WDT: procedimiento experimental.

7.1. Introducción

En este capítulo se define el procedimiento para realizar el ensayo experimental WDT de propagación de grieta por avance forzado de cuña. Y también el proceso que se ha seguido para pasar del ensayo conceptual, definido en los capítulos 5 y 6, al ensayo experimental de caracterización.

En el capítulo se describen los siguientes aspectos del ensayo WDT: en primer lugar, se describen los utillajes empleados en el ensayo experimental, cuyo diseño permite abrir de los brazos de la probeta e introducir la cuña de forma automática, mientras se realiza el propio ensayo. En segundo lugar, se presenta un análisis de los resultados de las primeras pruebas experimentales que se efectuaron, y los cambios que deben introducirse en la metodología experimental para determinar los parámetros μ y G_{IC} . Finalmente, en los últimos apartados de este capítulo, se describe el procedimiento experimental que se ha llevado a cabo para determinar la calidad superficial de las uniones adhesivas.

7.2. Diseño de los utillajes

En este apartado se describen los utillajes que se han utilizado para realizar el ensayo WDT. Los planos para la fabricación de sus componentes se incluyen en el anexo A.

En la figura 7.1 se muestra una vista de conjunto del utillaje. Éste se compone de dos partes: la cuña y el mecanismo de apertura de los brazos de la probeta. Su diseño permite que la apertura de los brazos de la probeta, para introducir la cuña, se realice de forma automática, mientras la propia cuña avanza hacia el frente de grieta.

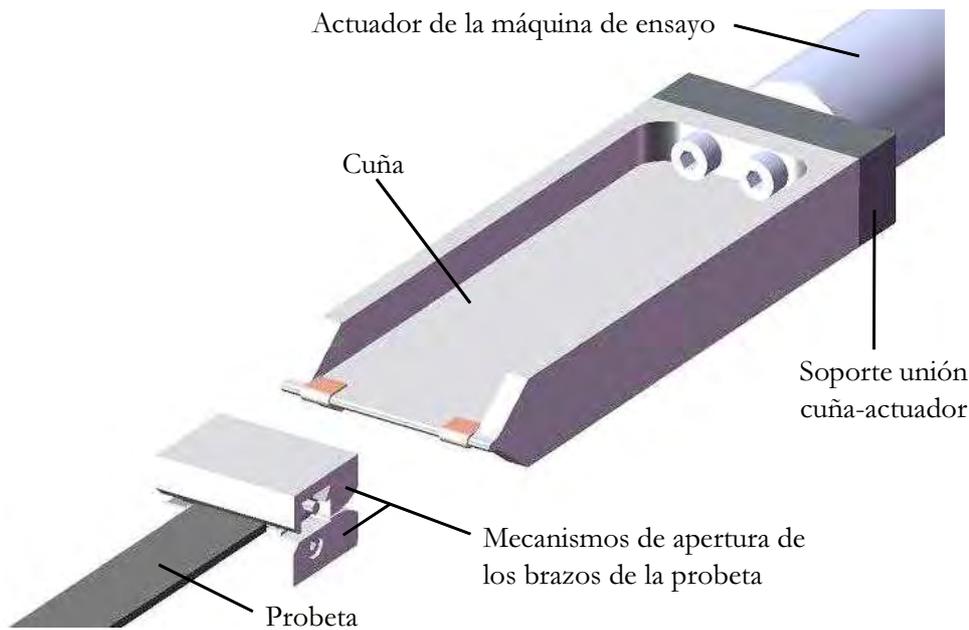


Figura 7.1: Esquema general de los utillajes para realizar el ensayo WDT.

7.2.1. La cuña

La cuña es la parte del utillaje que se introduce en la probeta, y que con su avance se produce la propagación de la grieta, ver despiece en la figura 7.2.

Su sección tiene la forma de un perfil en I, en el cuál las alas actúan como refuerzo para incrementar la rigidez del utillaje, y el alma es la parte que se introduce en la probeta. Se ha diseñado una cuña con un espesor del alma de 3 mm . La punta tiene una geometría cilíndrica para mejorar su penetración en la probeta, y en el otro extremo, la cuña se une a la máquina de ensayo con una pieza de acople. El acoplador se fija con 4 tornillos allen M8, y este a su vez se atornilla a máquina de ensayo con un allen M12. La utilización de un solo tornillo allen permite que el conjunto cuña-adaptador pueda girar libremente respecto el eje del actuador de la máquina de ensayo. De esta manera, al introducir la cuña en la probeta, ésta se alinea de forma automática con el frente de grieta.

Para forzar la apertura de los brazos de la probeta, se ha incrementado el espesor de los laterales del alma con dos clips de cobre inseridos a presión, ver figura 7.2. Los clips son flejes de cobre doblados con un espesor de 0.8 mm cada uno.

7.2.2. Mecanismo de apertura de los brazos de la probeta

Para abrir los brazos de la probeta de forma automática, se han utilizado dos utillajes que se fijan mecánicamente en los laterales de la probeta. Su mecanismo de sujeción es similar al del SCB (ver apartado 4.3). El esquema de uno de los mecanismos de apertura se muestra en la figura 7.3.

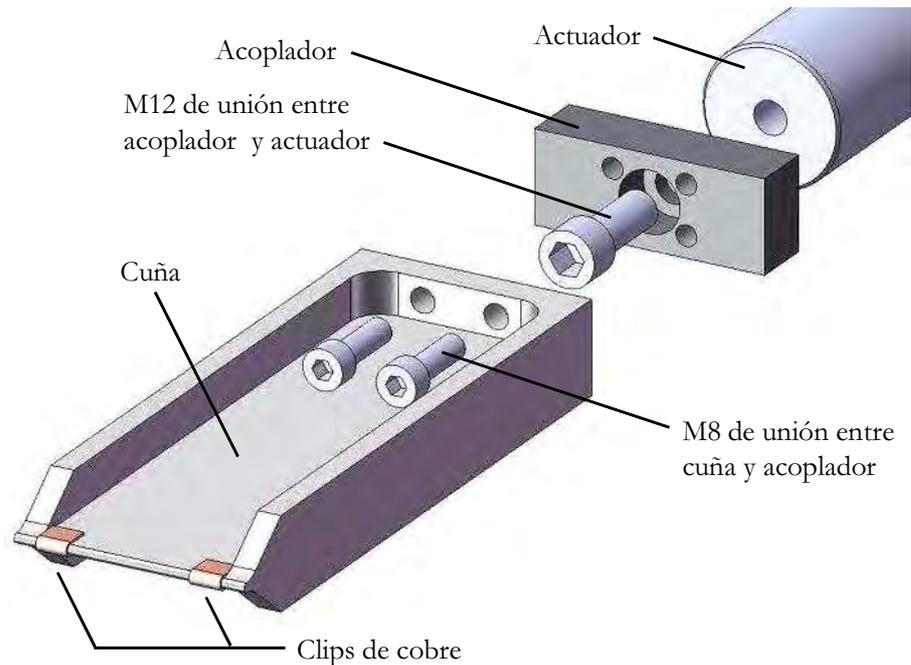
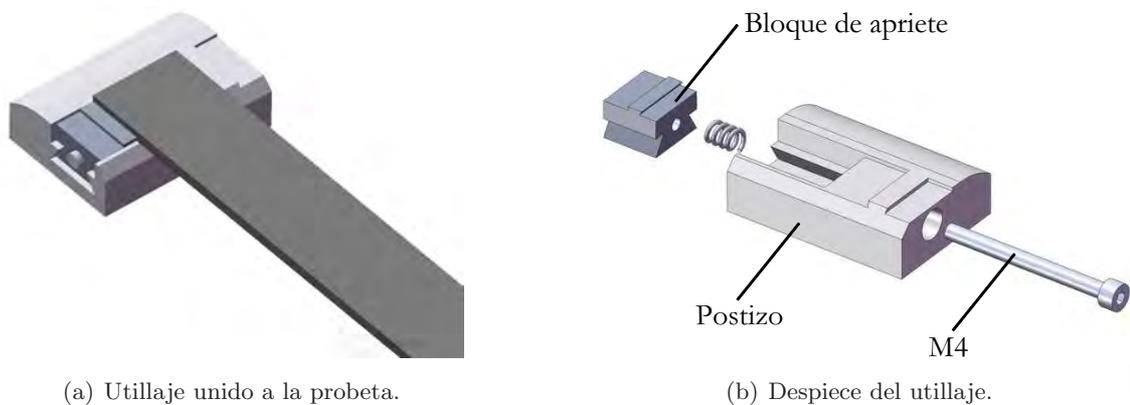


Figura 7.2: Despiece de la cuña.



(a) Utillaje unido a la probeta.

(b) Despiece del utillaje.

Figura 7.3: Esquema del mecanismo de apertura automática de la probeta.

Cada mecanismo de apertura se compone de dos bloques: un postizo y un bloque de apriete. Ambos actúan como una pinza haciendo presión en los laterales de la probeta. El desplazamiento del bloque de apriete se controla con un tornillo allen M4, ver la figura 7.3(b). En este mecanismo no es necesario controlar el par de apriete aplicado al tornillo allen, tal y como se hace en el utillaje SCB, porque se necesita una fuerza de agarre mucho menor. El mecanismo únicamente debe separar los brazos de la probeta a una distancia suficiente para poder introducir la cuña, la fuerza necesaria para conseguirlo es mucho menor que la que requiere un ensayo DCB. La pinza de agarre a la probeta se ha diseñado con un ángulo de incidencia $\alpha_1 = 60^\circ$ y un espesor de $l_4 = 1.1 \text{ mm}$, ver Figura 7.4.

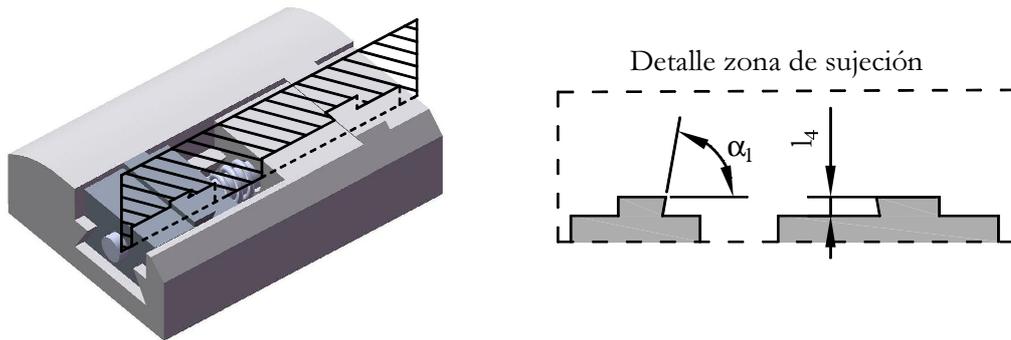


Figura 7.4: Parámetros de la pinza, del mecanismo de apertura de los brazos de la probeta.

7.2.3. Colocación de la probeta en la máquina de ensayo

La probeta se fija directamente a la máquina de ensayo por el extremo que no tiene pregrieta inicial. Como sistema de sujeción se pueden utilizar las pinzas para ensayos de tracción, ver figura 7.5.

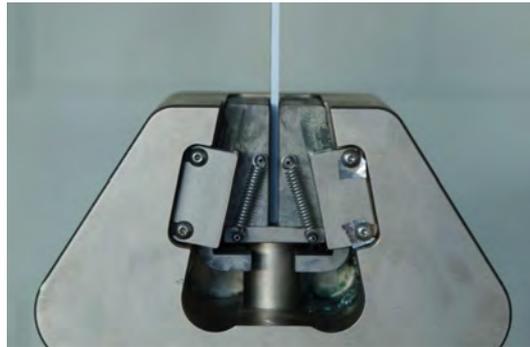


Figura 7.5: Mecanismo de sujeción de la probeta a la máquina de ensayo.

El montaje del utillaje y la probeta en la máquina de ensayo se indica en la figura 7.6, así como los detalles de la cuña y del mecanismo de apertura de los brazos de la probeta. El avance de la cuña se controla por desplazamiento, con el movimiento del pórtico superior de la máquina de ensayo. En este pórtico se ha montado una célula de carga (para medir la fuerza necesaria para realizar el avance de la cuña) y la propia cuña.

7.2.4. Proceso de apertura de los brazos de la probeta

Antes de realizar la propagación de la grieta, deben abrirse los brazos de la probeta para introducir la cuña. Tal y como se ha comentado anteriormente, la apertura de los brazos de la probeta se realiza con clips de cobre unidos a la cuña y a la geometría del mecanismo de apertura. En el diseño del utillaje se han definido dos superficies: la superficie de los laterales de la cuña, dónde se han colocado los clips, denominada superficie de apertura, y la parte central de la cuña, denominada superficie de ensayo. En la figura 7.7 se indican estas dos superficies.



Figura 7.6: Montaje experimental del ensayo de propagación de grieta por avance forzado de cuña (WDT).

En la superficie de apertura, los clips de cobre entran en contacto con el mecanismo de apertura provocando la separación de los brazos de la probeta y la introducción de la cuña. Y en la superficie de ensayo, la cuña entra en contacto con la probeta para realizar la propagación de la grieta. La secuencia de apertura de los brazos de la probeta se indica en la figura 7.8.

El ensayo empieza con la cuña situada a una cierta distancia de la probeta (figura 7.8(a)). Se realiza el avance de la cuña, y los clips de cobre entran en contacto con el utillaje (figura 7.8(b)). Debido a la geometría del utillaje, los brazos de la probeta se separan (figuras 7.8(c) y (d)). Durante este tiempo, los clips de cobre están en contacto con el utillaje hasta que la apertura de los brazos es suficiente para poder introducir la cuña (figura 7.8(d)). A partir de este punto, la distancia de separación de los brazos de la probeta se mantiene constante, hasta que finalmente,

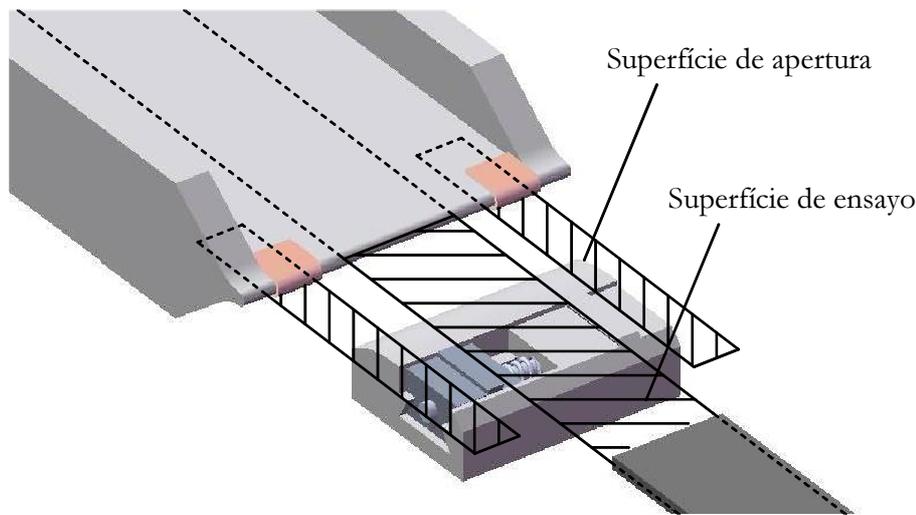


Figura 7.7: Planos de apertura de los brazos de la probeta y de ensayo.

la cuña entra en contacto con la probeta (figuras 7.8(e) y (f)).

7.3. Pruebas experimentales iniciales

Una vez fabricados los utillajes, se realizaron los primeros ensayos WDT, cuyos resultados se presentan a continuación. En este apartado se describen los problemas que se detectaron al intentar realizar los primeros ajustes del coeficiente de fricción para calcular G_{IC} .

7.3.1. Análisis de las curvas $F_{PUSH}(\delta)$ de las pruebas iniciales

En la figura 7.9 se representa la curva F_{PUSH} en función del desplazamiento de la cuña (δ) de uno de los primeros ensayos experimentales que se llevaron a cabo. En este ensayo se realizó un avance de la cuña hasta una distancia de 95 mm , y un retroceso de la cuña hasta su posición inicial. Los puntos son los datos obtenidos del ensayo experimental, y la línea discontinua la curva teórica que debería haberse obtenido a partir de las curvas teóricas del ensayo, que se han dibujado en el capítulo 5.

Comparando los resultados de las curvas de la figura 7.9, se observan diferencias significativas entre la respuesta teórica deseada y los resultados experimentales obtenidos, principalmente en las fases de introducción y propagación del ensayo. En la fase de introducción y en la primera mitad de la fase de propagación los valores experimentales de F_{PUSH} son inferiores a los teóricos. Esta diferencia se debe a que la cuña se desliza por una superficie con un coeficiente de fricción inferior al esperado. Durante el proceso de curado de la unión adhesiva parte del adhesivo fluyó hacia la zona del inserto cubriéndolo (sangrado del adhesivo), de manera que quedó una región con una superficie lisa y con poca rugosidad superficial.

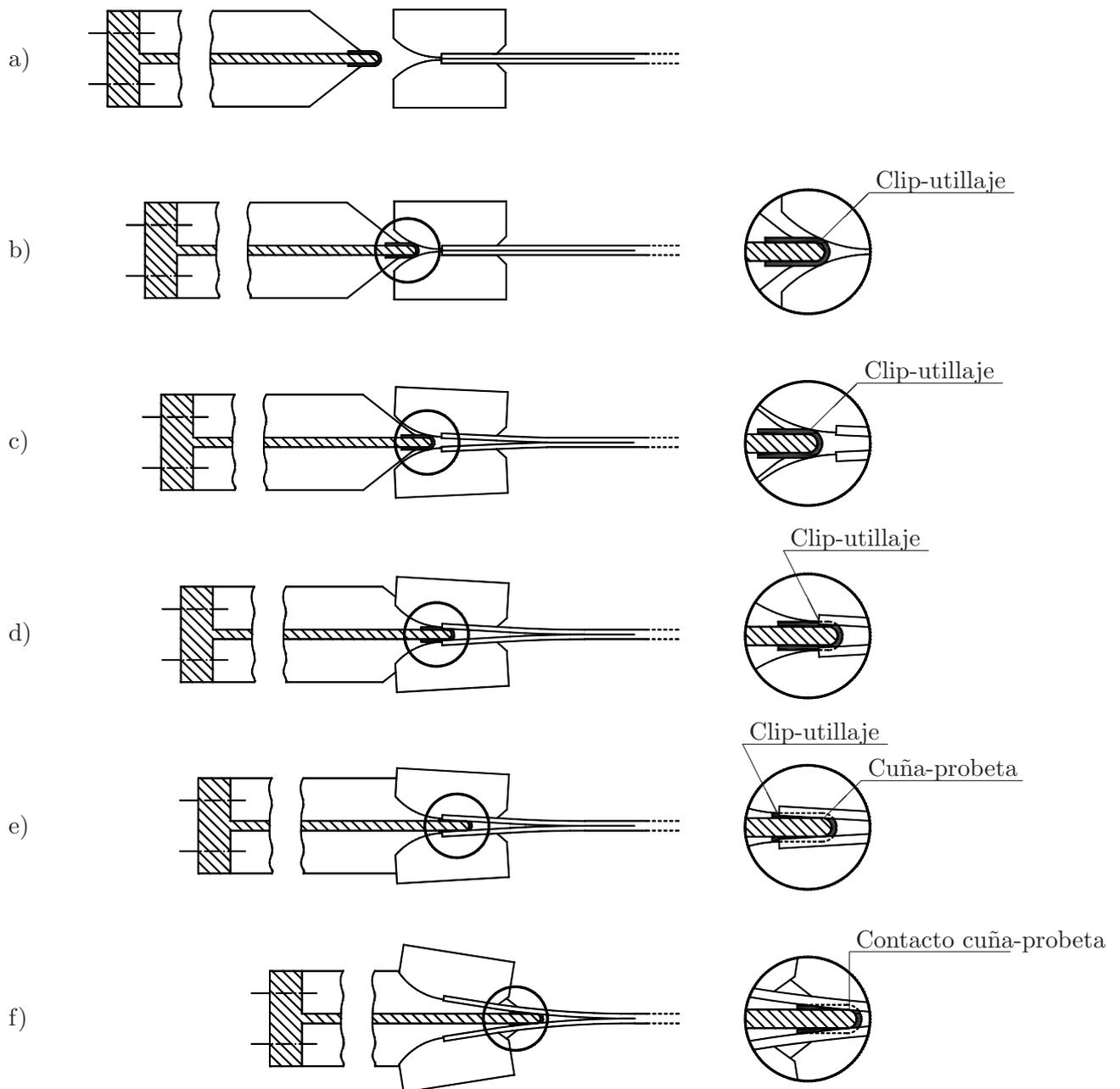


Figura 7.8: Secuencia de introducción de la cuña en la probeta, y los puntos los puntos de contacto entre los clips de la cuña y el utillaje de apertura o entre la cuña y la probeta.

El sangrado del adhesivo se observa en las figuras 7.10 y 7.11, dónde se muestran las superficies fracturadas de los adherentes de la unión adhesiva. En la figura 7.10 la zona del inserto es la superficie de color negro situada a la izquierda de la imagen. En la zona de propagación de la grieta aparece un estriado de color blanco que indica la presencia de *stick-slip*. En la imagen se ha indicado el desplazamiento realizado por la cuña durante el ensayo experimental. Las pruebas iniciales se realizaron con una máquina hidráulica, con un recorrido de pistón de 100 mm. Para tener una longitud de grieta propagada suficiente, antes de realizar el ensayo se introdujo la cuña

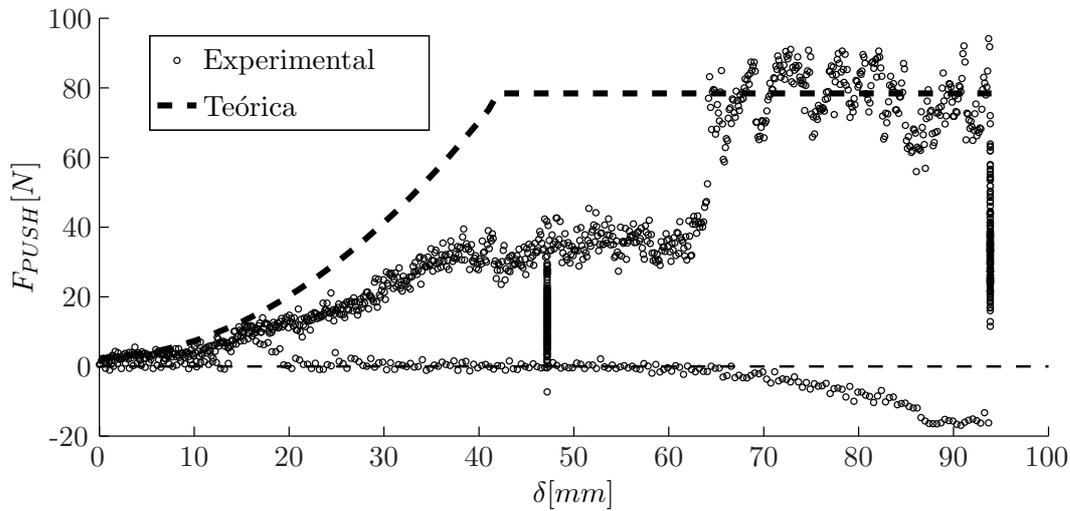


Figura 7.9: Curva $F_{PUSH}(\delta)$ de uno de los primeros ensayos WDT. Probeta A1/F1/03/06.

en el interior de la probeta. Y por consiguiente, en la figura 7.9, la cuña empieza a desplazarse en la zona del inserto de teflón.

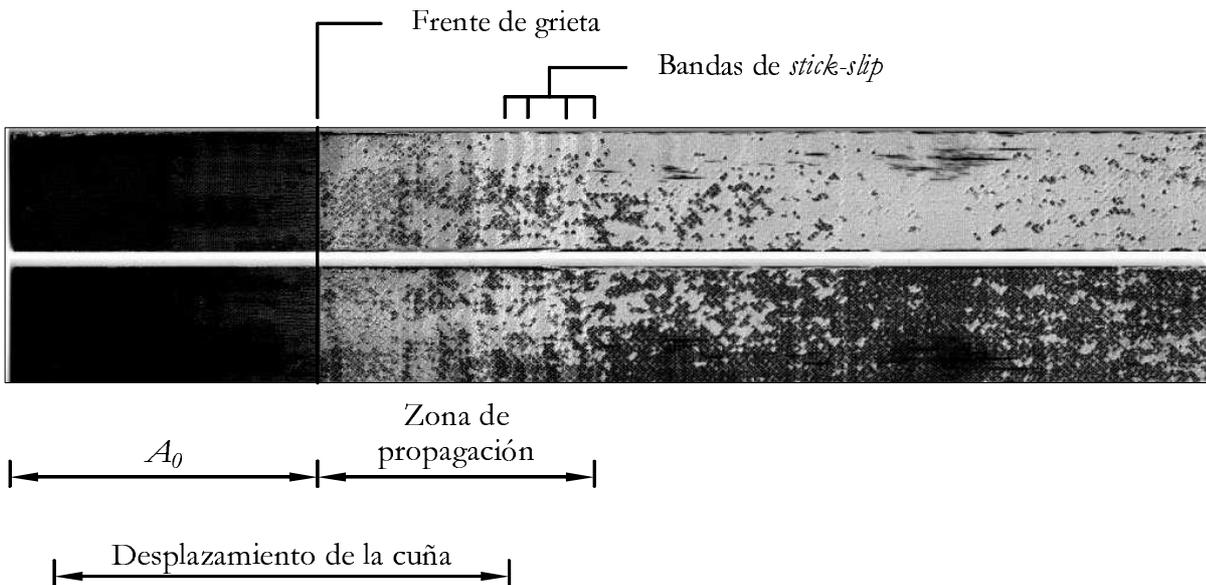


Figura 7.10: Superficie fracturada una vez finalizado el ensayo WDT. Probeta A1/F1/03/06.

En la figura 7.11 se representa el negativo de la imagen de las caras interiores de la misma probeta, para ver con más claridad la zona del inserto de teflón cubierta por el adhesivo, que fluyó durante el proceso de curado.

7.3.1.1. Análisis fractográfico de la superficies de la probeta

En este apartado se presentan los resultados del análisis fractográfico que se ha llevado a cabo en la superficie de la probeta, para complementar los resultados que se han obtenido de los primeros

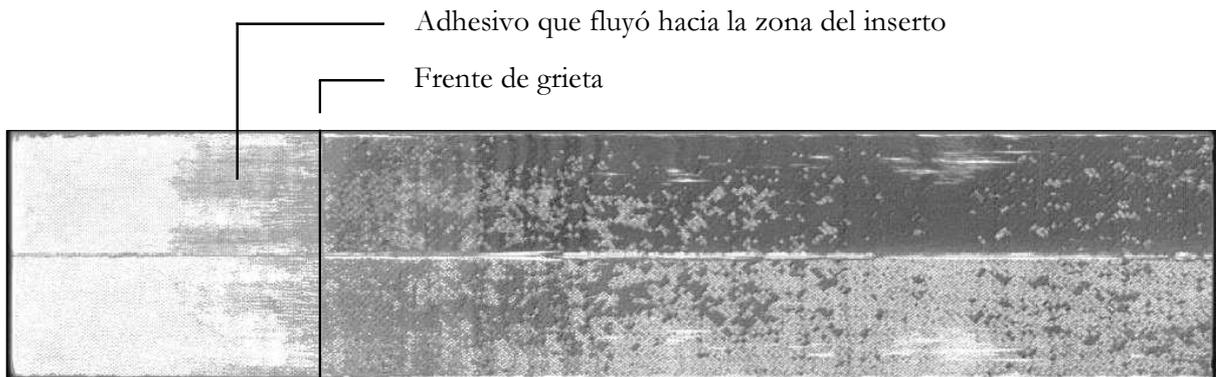


Figura 7.11: Imagen en negativo de la superficie fracturada de la probeta A1/F1/03/06.

ensayos experimentales. Para poder interpretar los resultados, se recomienda leer previamente el Anexo D, dónde se describen las características básicas de los distintos tipos de superficie que presenta la unión adhesiva.

El estudio que aquí se presenta se realiza en 2 partes: el análisis de la morfología superficial que se ha realizado con el microscopio electrónico de rastreo, y el análisis cuantitativo de la rugosidad superficial que se ha realizado con el microscopio confocal de disco giratorio.

El objetivo del estudio es corroborar de forma visual los resultados que se obtuvieron del ensayo experimental. En los cuáles se observa que, hay un descenso significativo de la fricción en la zona del inserto en la cuál el adhesivo fluyo, respecto el resto de las superficies.

En la probeta se han analizado 3 tipos de superficies: la zona del inserto de teflón, la superficie del inserto cubierta por adhesivo que sangró durante el curado, y la superficie creada por la propagación de grieta (ver figura 7.12). Las imágenes corresponden a una unión adhesiva con las mismas características que las que se analizaron en los primeros ensayos experimentales. La unión esta formada por el adherente T800S/M21 y el adhesivo FM300K, y se fabricó con una preparación superficial óptima.

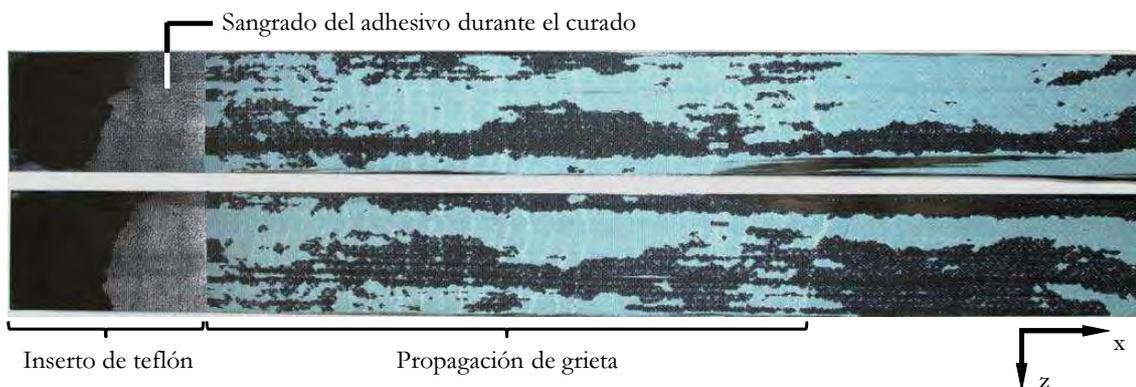
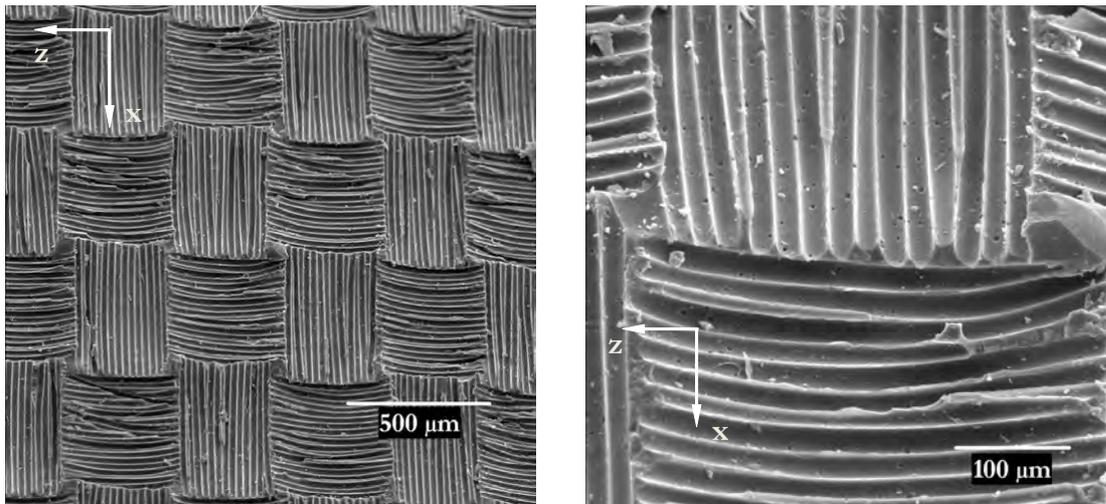


Figura 7.12: Regiones analizadas de la superficie fractura de la probeta.

Análisis de la morfología superficial

En la figura 7.13(a) se muestra una imagen de la zona del inserto sin adhesivo a 50 aumentos, y en la figura 7.13(b) una ampliación de la región central a 200 aumentos. Las marcas de la superficie son las huellas que deja el tejido pelable al arrancarse de la cara de los adherentes, ver Anexo D. La dirección x de las imágenes se corresponde con la dirección longitudinal de la probeta.



(a) Imagen a 50×.

(b) Ampliación a 200×.

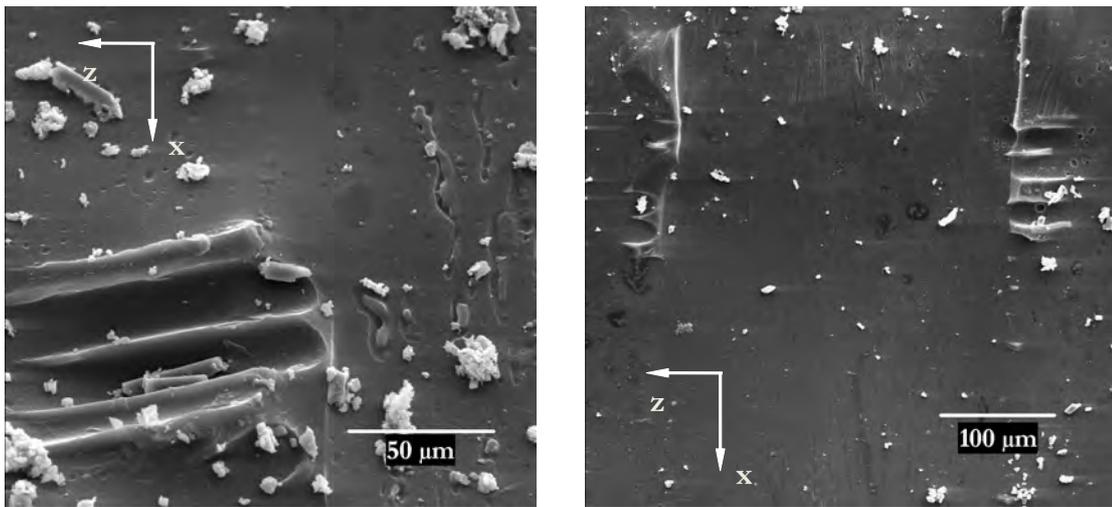
Figura 7.13: Imágenes de las marcas del tejido pelable en la zona del inserto de teflón. Imágenes en perspectiva.

En la figura 7.14 se muestran 2 imágenes de la zona del inserto, en las cuales el adhesivo fluyó durante el proceso de curado.

Durante el paso de la cuña por esta superficie, en los primeros ensayos experimentales, se han obtenido valores de F_{PUSH} inferiores a los esperados, esto indica que las superficies tienen un coeficiente de fricción inferior al esperado. En ambas imágenes de la figura 7.14 se observa que las marcas del pelable han quedado cubiertas por el adhesivo de manera que se ha obtenido una superficie lisa.

En algunas regiones como las de las figura 7.14(a) han quedado marcas del tejido pelable al descubierta. Sin embargo, gran parte de la superficie ha quedado completamente lisa. Las partículas blancas que están situadas sobre la superficie son fragmentos residuales del corte de las probetas, que no se han podido eliminar al limpiar la superficie.

Finalmente, en la figura 7.15 se muestra la imagen de la superficie fracturada de la zona del adhesivo una vez finalizada la propagación de la grieta. Parte del adhesivo ha quedado adherido a uno de los brazos de la probeta y el resto se ha arrancado, dejando al descubierto la superficie del adherente.



(a) Imagen a 500×.

(b) Imagen a 200×.

Figura 7.14: Imágenes del inserto de teflón dónde el adhesivo fluyó durante el proceso de curado.

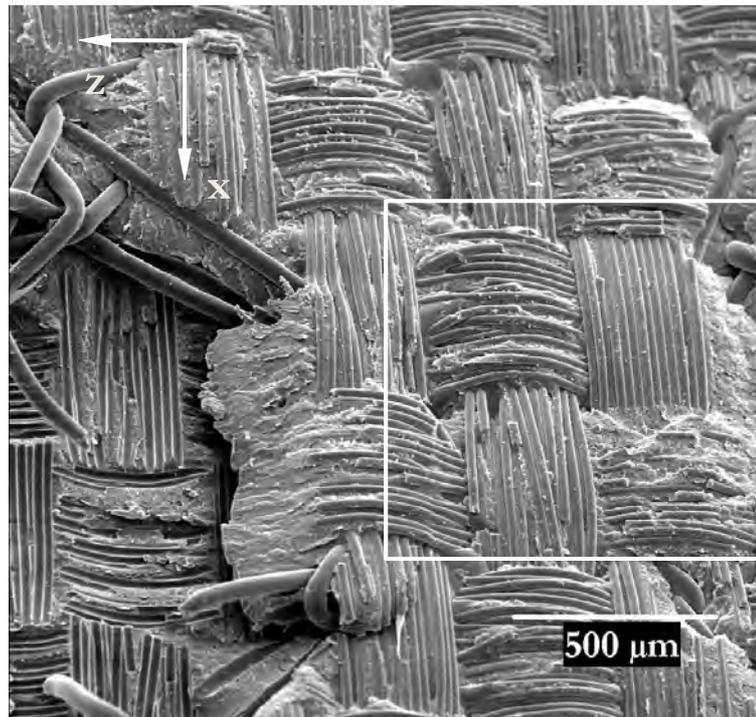


Figura 7.15: Imagen de la superficie fracturada de la unión en la zona sobre la cual no ha pasado la cuña.
Imagen en perspectiva obtenida con el MER, a 50 aumentos.

La rugosidad de la superficie del adhesivo que ha quedado adherido en la probeta tiene la forma de la marca que deja el adherente al arrancarse, ver Anexo D, cuya rugosidad es distinta a la de las otras dos regiones superficiales que se han analizado previamente.

Determinación cuantitativa de la rugosidad superficial

A partir de las imágenes obtenidas con el microscopio confocal, se ha comparado la rugosidad superficial de las distintas regiones de la probeta. La medición de la rugosidad superficial se ha realizado a partir de un parámetro cuantitativo: el exceso de área superficial.

Se define el exceso de área superficial como la relación entre la superficie proyectada (S_{pr}) y la superficie real (S_{re}), siendo este parámetro S_{pr}/S_{re} , ver imagen de la figura 7.16. Cuanto mayor es el valor del exceso de área superficial mayor es la rugosidad. En la tabla de la figura 7.16 se indican los resultados del exceso de área superficial de 3 puntos, cada uno perteneciente a una de las 3 regiones de la probeta que se han analizado anteriormente.

Zona	S_{re}/S_{pr} [%]
Inserto	4019.1
Inserto + Adhesivo	4.4
Propagación grieta	368.1

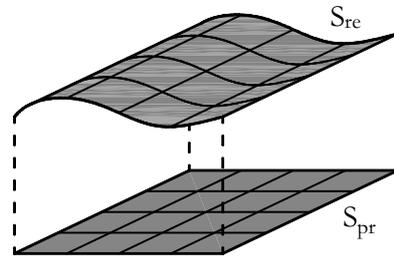


Figura 7.16: Exceso de área superficial. Resultados de las 3 superficies analizadas: inserto, inserto con adhesivo y zona de la propagación de grieta.

En la figura 7.17 se muestran las imágenes superficiales de las 3 regiones en las cuales se ha determinado el exceso de área superficial.

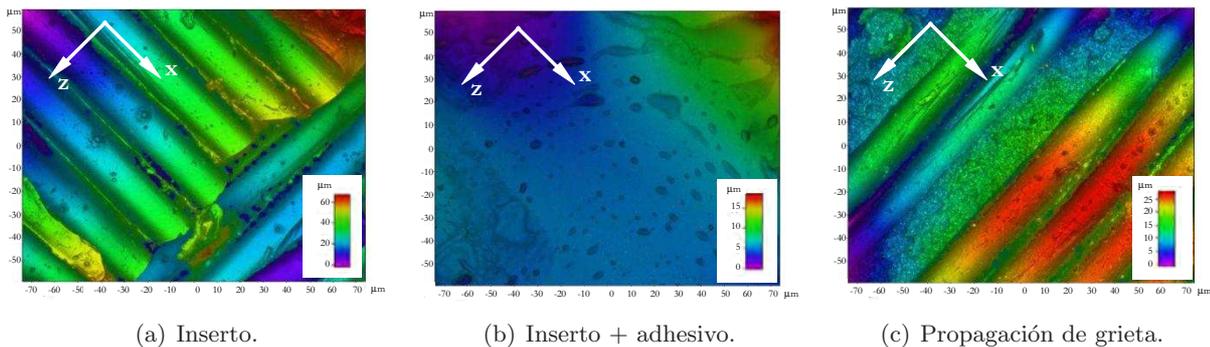


Figura 7.17: Superficies analizadas con el microscopio confocal para obtener S_{pr}/S_{re} .

La región del inserto de teflón que no tiene adhesivo es la que presenta unos valores de exceso de área superficial más elevados. En cambio en la zona del inserto sobre la cuál el adhesivo ha fluido, el valor del parámetro es del orden de 1000 veces menor, porque la superficie ha quedado completamente lisa una vez cubierta por el adhesivo, ver figura 7.17(b). En la zona de la probeta en la cual se ha producido la propagación de la grieta se ha obtenido un valor de exceso de área superficial 10 veces menor al de la zona del inserto. Ésto se debe a que en la superficie no se ha arrancado la totalidad del adhesivo, de manera que S_{re} ha disminuido.

Por otra parte, las regiones sobre las cuales se ha realizado el estudio son muy acotadas, y seguramente, la extrapolación de los resultados del exceso de área superficial a una superficie más extensa, hubiera provocado una aproximación de los valores entre las figuras 7.17(a) y 7.17(c). Sin embargo, los datos se han presentado permiten reproducir, suficientemente y a un nivel cuantitativo, los resultados de los análisis superficial y experimental.

7.3.2. Importancia en la determinación del coeficiente de fricción: métodos experimentales para obtener μ

Los resultados que se han obtenido de los ensayos experimentales preliminares muestran la dependencia de F_{PUSH} en función de la rugosidad superficial, y la existencia de 3 superficies con diferente rugosidad en la probeta: la zona del inserto de teflón, la parte del inserto cubierta por el adhesivo que fluyó durante el proceso de curado, y la superficie que ha sido fracturada.

Para calcular G_{IC} se utilizan los datos de la curva $F_{PUSH}(\delta)$ de la fase de propagación, en los cuales la cuña pasa por la superficie creada por la propia propagación. El coeficiente μ que se ajusta en la fase de introducción, tiene que ser el de una superficie con la misma rugosidad que la que se utiliza para obtener G_{IC} . Porque en la formulación que se ha desarrollado en el capítulo 5, y que se ha validado en el capítulo 6, se fundamenta en esta hipótesis, puesto que se utiliza el mismo valor de μ para hacer el ajuste y el cálculo de G_{IC} .

En la fase de introducción de la curva $F_{PUSH}(\delta)$ de la figura 7.9, la curva pasa por la superficie del inserto, y se ha observado, en el análisis fractográfico, que esta superficie tiene una rugosidad diferente a la de la zona fracturada, y por consiguiente una μ diferente. Debido a esta diferencia a partir de los datos de esta curva no puede calcularse G_{IC} .

Por otra parte, al realizar el ensayo virtual para validar los métodos de reducción de datos, se observo que para minimizar la dependencia de μ y G_{IC} en relación a la longitud de la zona cohesiva (l_{cz}), debían llevarse a cabo dos ciclos de avance y retroceso de la cuña: un primer ciclo hasta propagar la grieta y estabilizar el valor de l_{cz} , y un segundo ciclo para realizar el ajuste de μ . Por consiguiente, a partir de la formulación desarrollada se necesita realizar más de un ciclo de avance y retroceso de la cuña para determinar μ y G_{IC} .

Como alternativa, se propone llevar a cabo el ensayo experimental en 2 ciclos de avance y retroceso de la cuña. Realizar una propagación de la grieta en un primer ciclo, y ajustar el coeficiente de fricción en el segundo, de manera que, en la fase de introducción del segundo ciclo, la cuña pase por la superficie fracturada de la unión, ver el esquema del proceso en la figura 7.18.

Este método permite obtener un valor de μ sin tener que retirar la probeta de la máquina de ensayo. Sin embargo, la cuña ya ha pasado previamente 2 veces por la misma superficie cuando se realiza el ajuste de μ , pudiéndose haber producido una variación de su rugosidad superficial.

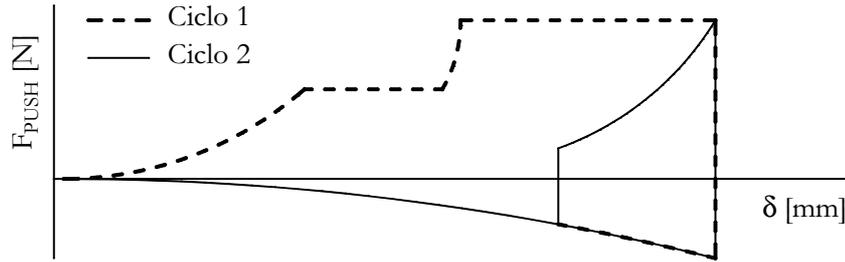


Figura 7.18: Esquema de la curva $F_{PUSH}(\delta)$ del ensayo experimental en 2 ciclos.

Para validar este método, en el siguiente apartado se ha realizado un análisis del efecto del paso de la cuña sobre la superficie de la probeta, y su efecto en la determinación de μ .

7.4. Análisis de la variación de la rugosidad superficial producida por el paso de la cuña

La variación de la rugosidad superficial producida por el paso de la cuña se ha analizado a partir de los resultados de la curva $F_{PUSH}(\delta)$ de los ensayos experimentales, y de la observación de la superficie fracturada de la unión, una vez finalizado el ensayo.

7.4.1. Resultados de los ensayos experimentales

Para estudiar la variación de la rugosidad superficial se ha llevado a cabo una campaña experimental de ensayos, en los cuales se ha realizado un primer ciclo de avance de la cuña para propagar la grieta y crear una superficie fracturada, y otros 5 ciclos de avance y retroceso de la cuña para analizar la variación de la rugosidad superficial de la zona fracturada que produce el paso de la cuña. En cada uno de los 5 ciclos, la cuña se ha desplazado por la zona en la cual previamente se había creado la superficie fracturada, sin volver propagar nuevamente el frente de grieta.

En la figura 7.19 se muestra la curva F_{PUSH} en función del tiempo de uno de los ensayos experimentales que se han llevado a cabo. En total se han realizado 5 ensayos experimentales, en los cuales se han analizado las probetas: A1/F1/07/01, A1/F1/07/02, A1/F1/07/03, A1/F1/07/04 y A1/F1/07/05.

Durante la fase de introducción de cada uno de los 5 ciclos se ha determinado el coeficiente de fricción. Los parámetros que se han utilizado para realizar el ajuste de μ para cada una de las probetas analizadas se indican en la tabla 7.1.

Los valores \bar{E}_x y \bar{E}_y son los módulos de Young en la dirección de las fibras y en la dirección transversal, según la hipótesis de deformación plana.

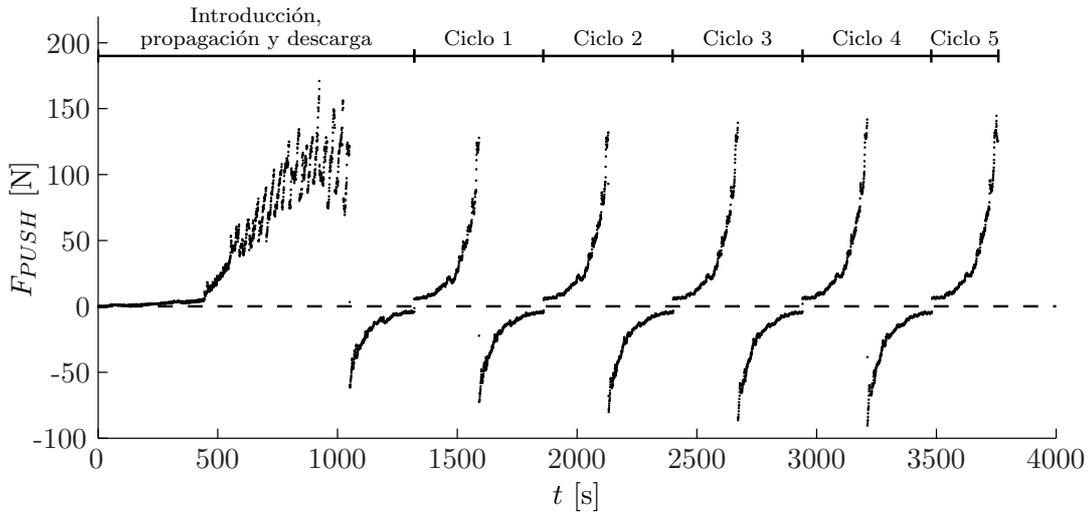


Figura 7.19: Curva de F_{PUSH} en función del tiempo del ensayo experimental. Curva de resultados de la probeta A1/F1/07/03.

Probeta	B [mm]	h [mm]	\bar{E}_x [GPa]	\bar{E}_y [GPa]	G_{xy} [GPa]	r_w [mm]
A1/F1/07/01	24.93	1.518	122.0	10.5	4.6	1.425
A1/F1/07/02	25.05	1.604	122.0	10.5	4.6	1.425
A1/F1/07/03	24.96	1.599	122.0	10.5	4.6	1.425
A1/F1/07/04	24.78	1.616	122.0	10.5	4.6	1.425
A1/F1/07/05	24.84	1.609	122.0	10.5	4.6	1.425

Tabla 7.1: Propiedades elásticas y dimensiones de las probetas, y dimensiones de la cuña necesarias para realizar el ajuste de μ .

Los resultados de los coeficientes de fricción que se han obtenido del ajuste en cada ciclo de carga y descarga se indican en la tabla 7.2. Los resultados se han ordenado por probeta y por ciclo de carga. En cada ciclo de carga se ha promediado el resultados del coeficiente de fricción de las 5 probetas.

A partir de los resultados obtenidos en la tabla 7.2 se observa que el coeficiente de fricción incrementa su valor en cada ciclo. Y por consiguiente, el paso de la cuña por la zona fracturada, produce un cambio en la rugosidad superficial.

7.4.2. Análisis fractográfico del efecto del paso de la cuña por la superficie fracturada

Para validar los resultados que se han obtenido a partir de los ensayos experimentales realizados se ha realizado un análisis de la superficie fracturada de las probetas. Los resultados que se presentan en este apartado son los de una probeta con las mismas características que las de la tabla 7.2, pero en la cuál se le ha realizado un ensayo experimental, consistente en un solo ciclo

Probeta	Coeficiente de fricción, μ				
	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4	Ciclo 5
A1/F1/07/01	0.171	0.184	0.199	0.218	0.231
A1/F1/07/02	0.201	0.210	0.215	0.223	0.226
A1/F1/07/03	0.174	0.182	0.192	0.204	0.209
A1/F1/07/04	0.174	0.179	0.196	0.202	0.214
A1/F1/07/05	0.165	0.173	0.180	0.187	0.192
Promedio	0.177	0.186	0.196	0.207	0.214
Desv. Est.	0.014	0.014	0.013	0.014	0.015

Tabla 7.2: Valores del μ de cada ciclo de carga.

de avance y retroceso de la cuña.

Se han analizado 2 zonas de la superficie fracturada, ver figura 7.20. La superficie fracturada de la unión por dónde ha pasado la cuña, y la superficie fracturada que queda entre el frente de grieta y el utillaje cuando la cuña ha finalizado su avance, y que no ha sido pisada por la cuña (superficie virgen). En cada una de estas zonas se han obtenido imágenes de la morfología superficial con un microscopio electrónico de rastreo (MER). También se han tomado imágenes de la rugosidad superficial con un microscopio confocal de disco giratorio.

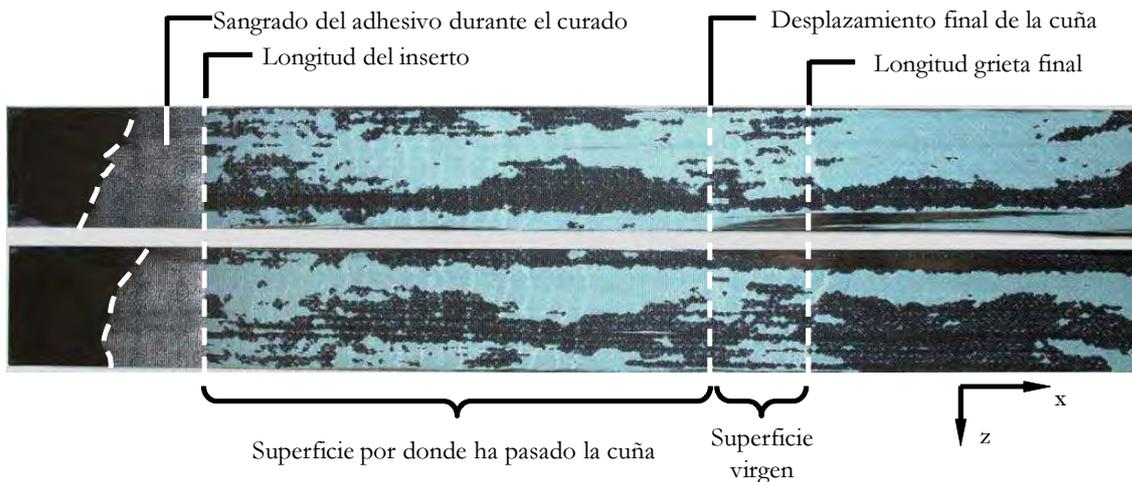


Figura 7.20: Regiones que se han analizado en la superficie fracturada.

Para poder interpretar los resultados, es recomendable que se lea previamente el Anexo D. Dónde se hace una introducción del análisis fractográfico que se ha realizado y se identifican los distintos materiales de la unión adhesiva.

7.4.2.1. Zona de propagación sobre la cual no ha pasado la cuña (superficie virgen)

En la figura 7.15 se muestra la imagen en perspectiva de uno de los puntos de la superficie fracturada de la unión que no ha sido pisada por la cuña, en la cuál se observa que ha habido un cambio de plano del frente de grieta durante su avance. A la izquierda de la imagen la capa de adhesivo se ha despegado quedado visible la superficie del adherente y a la derecha se observa la capa de adhesivo que ha quedado adherida al otro adherente.

En la figura 7.21, que se ha presentado en el anterior apartado, se ha mostrado una ampliación de la superficie del adhesivo en la cual son visibles las marcas que deja el adherente al producirse la fractura.

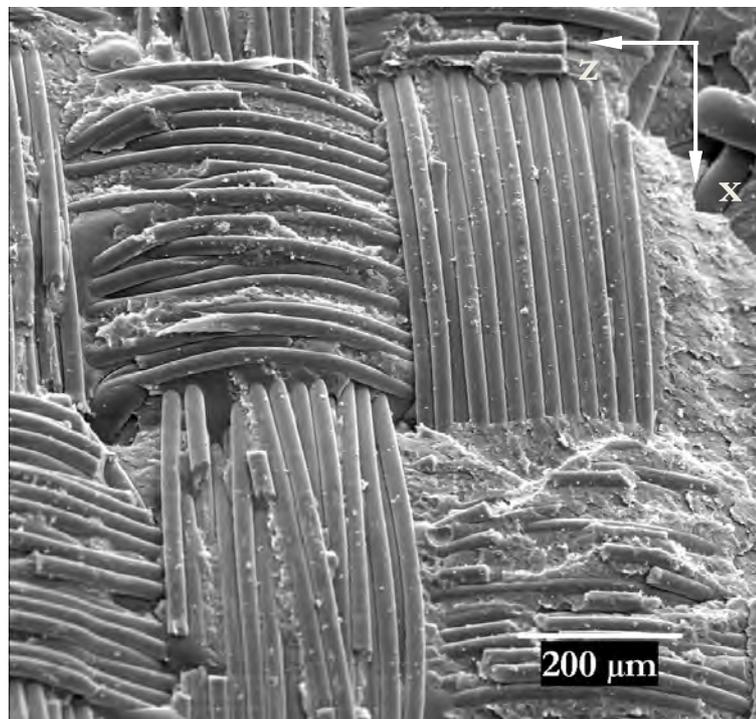


Figura 7.21: Ampliación de la superficie del adhesivo de la figura 7.21, a 100 aumentos.

7.4.2.2. Zona de propagación sobre la cual ha pasado la cuña

En la figura 7.22 se muestra la imagen de una región de la superficie fracturada por donde si ha pasado la cuña, en la cuál se observa el mismo tipo de rugosidad que la de la figura 7.21. Sin embargo, en la parte central de la imagen se observa como parte de la superficie del adhesivo ha quedado aplastada por el paso de la cuña.

En la figura 7.23 se muestra la región central de la figura 7.21 a 200× de la superficie del adhesivo que se ha deformado.

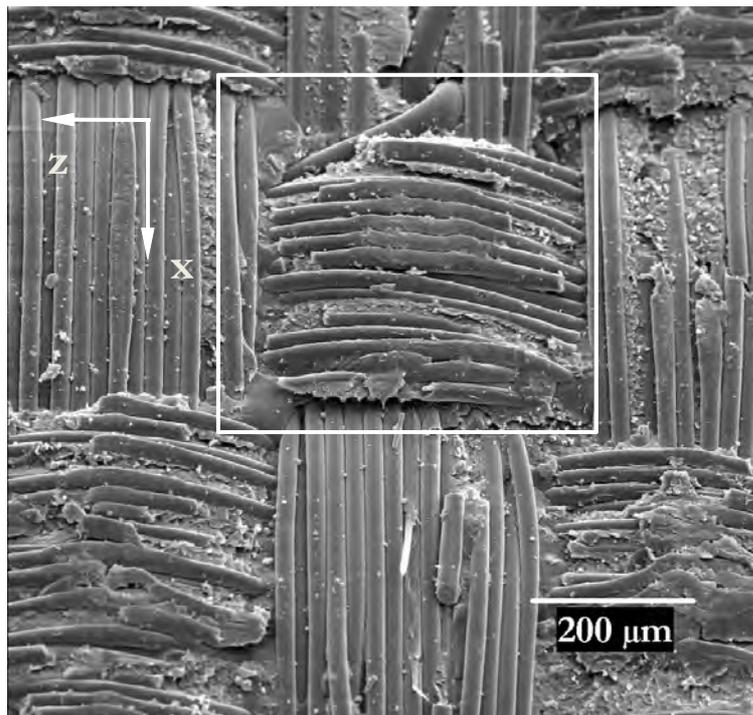


Figura 7.22: Imagen de la zona dañada por el paso de la cuña. Imagen obtenida con el MER, a 100 aumentos.

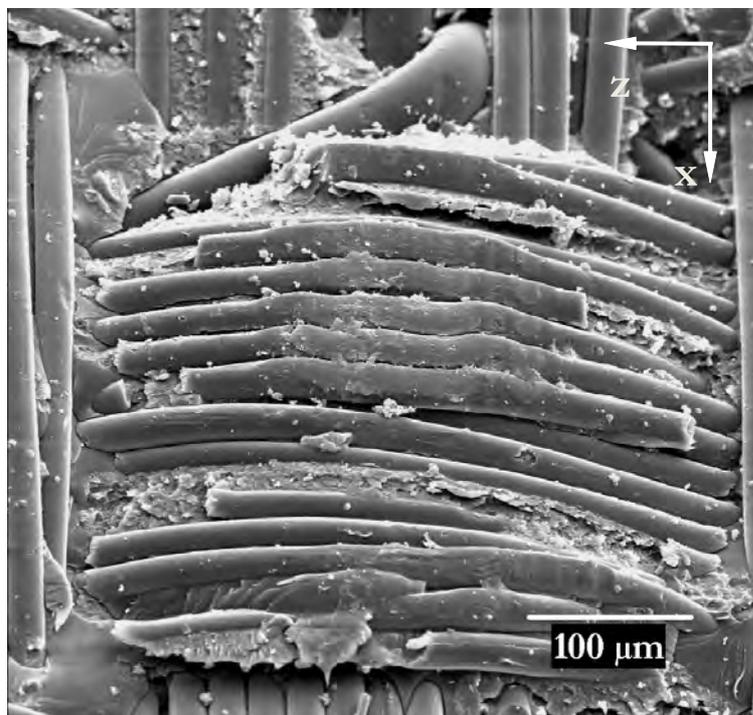


Figura 7.23: Ampliación de la superficie del adhesivo de la figura 7.22, a 200 aumentos.

En las figuras 7.24(a) y 7.24(b) se muestran otras dos regiones de la misma superficie obtenidas con el microscopio confocal: una imagen superficial y otra tridimensional. En las cuales se observa como ha cambiado la morfología superficial por el paso de la cuña. En estas imágenes se

observan las ondulaciones producidas por la huella que dejan los adherentes sobre la superficie del adhesivo. Sin embargo aparecen unas franjas verticales en la dirección de propagación x producidas por el desplazamiento de la cuña.

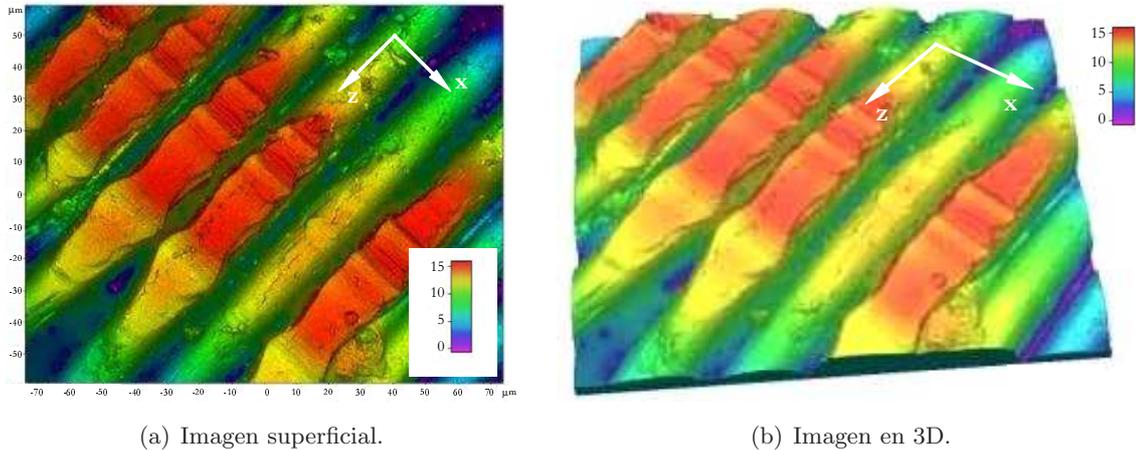


Figura 7.24: Imágenes obtenidas con el microscopio confocal de la superficie dañada de la probeta por el paso de la cuña. Unidades en μm .

7.4.3. Discusión de los resultados

Los resultados que se obtienen de los ensayos experimentales concuerdan con los del análisis fractográfico. En la zona fracturada de la probeta sobre la cual ha pasado la cuña se ha producido un aplastamiento de la superficie, y como consecuencia, ha habido un cambio en la morfología superficial y en el coeficiente de fricción μ . Al producirse el aplastamiento de la superficie del adhesivo, el área de contacto entre la cuña y la probeta se ha incrementado, y también lo ha hecho la superficie de fricción. Es por esta razón que μ ha ido aumentando en cada ciclo de avance y retroceso del ensayo experimental.

En base a estos resultados, se ha modificado nuevamente la metodología experimental para obtener una superficie fracturada sobre la cual no haya pasado la cuña, y así poder determinar un coeficiente de fricción válido.

7.5. Obtención de una superficie fracturada para determinar μ

Para realizar el ajuste del coeficiente de fricción sobre la superficie fracturada por donde no ha pasado la cuña, se ha realizado un ensayo en 3 etapas. El ensayo ha consistido en realizar un primer ciclo de propagación de la grieta, a continuación se han abierto manualmente los brazos de la probeta para crear una superficie virgen, y finalmente, se ha realizado un segundo ciclo del avance y retroceso de la cuña sobre la superficie virgen, y a partir de estos datos se ha ajustado el coeficiente de fricción μ .

Este método presenta el inconveniente que durante el ensayo experimental debe retirarse la probeta de la máquina de ensayo, para realizar la propagación manual del frente de grieta. Sin embargo, gracias a esta propagación, se obtiene una superficie con la misma rugosidad sobre la cual no ha pasado la cuña para poder determinar el coeficiente de fricción. A continuación se detallan cada una de las etapas del ensayo experimental.

Etapa 1: en esta etapa se realiza un ciclo de avance y retroceso de la cuña para propagar la grieta hasta una cierta longitud. Con los datos de la propagación se determina G_{IC} . En la figura 7.25 se representa un esquema de la secuencia de pasos de la etapa del ensayo y los datos de la curva $F_{PUSH}(\delta)$ que se obtienen.

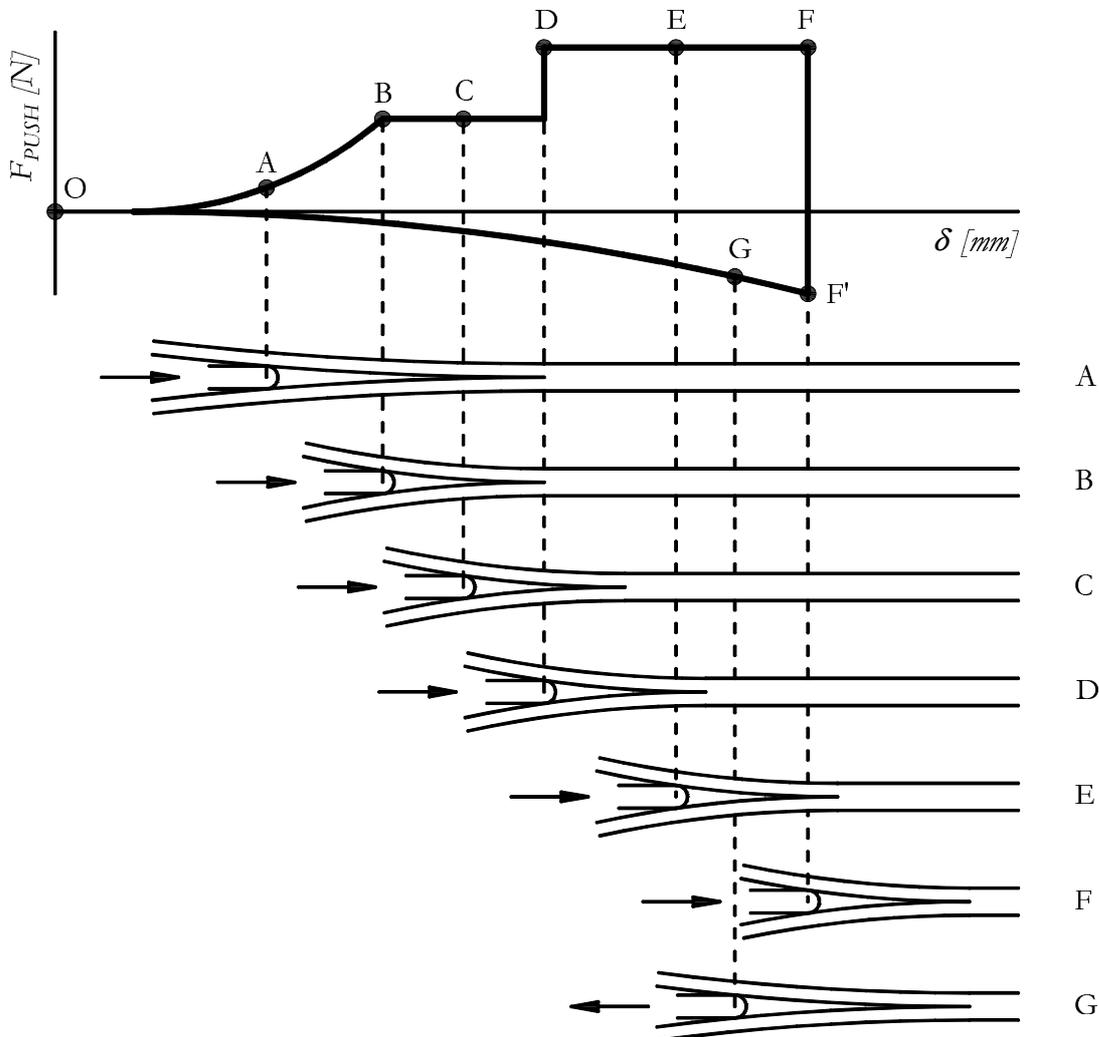


Figura 7.25: Etapa 1 del ensayo WDT: propagación de la grieta en el plano del adhesivo.

En esta etapa se realiza el mismo tipo de ensayo experimental que se ha llevado a cabo en las pruebas iniciales. La cuña avanza durante el segmento \overline{OF} y retrocede en $\overline{F'O}$. La propagación de la grieta se realiza en el segmento \overline{BF} . La parte de la curva $F_{PUSH}(\delta)$ que se utiliza para

determinar G_{IC} es el segmento \overline{DF} . En este segmento la cuña entra en contacto con la superficie fracturada creada previamente por el mismo avance de la cuña. Por otra parte, en el segmento \overline{OD} de la curva, la cuña se desplaza sobre la superficie del inserto de teflón, con un coeficiente de rugosidad diferente, los datos que se obtienen de F_{PUSH} y δ no son válidos para calcular G_{IC} .

Etapa 2: se abren manualmente los brazos de la probeta creando una nueva superficie fracturada. Como resultado se obtiene una superficie que no ha sido pisada por la cuña, sobre la cual, en la etapa 3, se determina el coeficiente de fricción.

Cuando la cuña está en la posición F de la figura 7.25, existe una superficie fracturada entre la cuña y el frente de grieta, de longitud $a_{wed} = a$ que no ha estado en contacto con la cuña, ver figura 7.26. Para poder ajustar el coeficiente de fricción sobre esta superficie, hay que propagar manualmente el frente de grieta, abriendo los brazos de la probeta otro incremento de longitud $a_{manual} = a = a_{wed}$, ver figura 7.26.

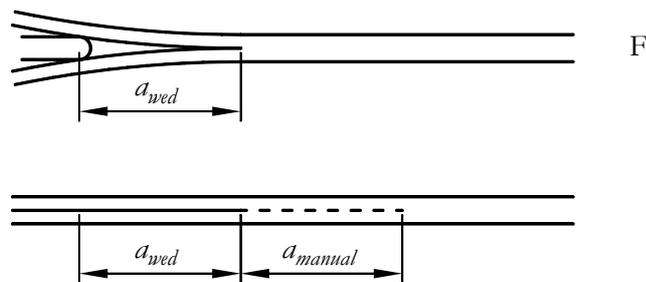


Figura 7.26: Etapa 2 del ensayo cuña: apertura manual de los brazos de la probeta.

Etapa 3: se realiza un segundo ciclo de avance y retroceso de la cuña para ajustar el coeficiente de fricción. En la figura 7.27 se muestra el esquema de los pasos del ensayo y la curva de resultados que se ha obtenido.

El coeficiente de fricción se determina en el segmento \overline{BC} de la figura 7.27. Este segmento corresponde a la superficie creada en la primera etapa de propagación, del longitud $a_{wed} = a$ que no ha estado en contacto con la cuña, y que posteriormente se ha creado con una propagación de forma manual.

En la tercera etapa, se ha desplazado la cuña hasta el punto D , realizando una pequeña propagación de la grieta (segmento \overline{CD}) para asegurar que el ajuste de μ se realice sobre todos los puntos del segmento \overline{BC} .

7.6. Metodología experimental

A partir del análisis que se ha realizado en los apartados anteriores, a continuación se presenta el procedimiento experimental del ensayo de propagación de grieta por avance forzado de cuña

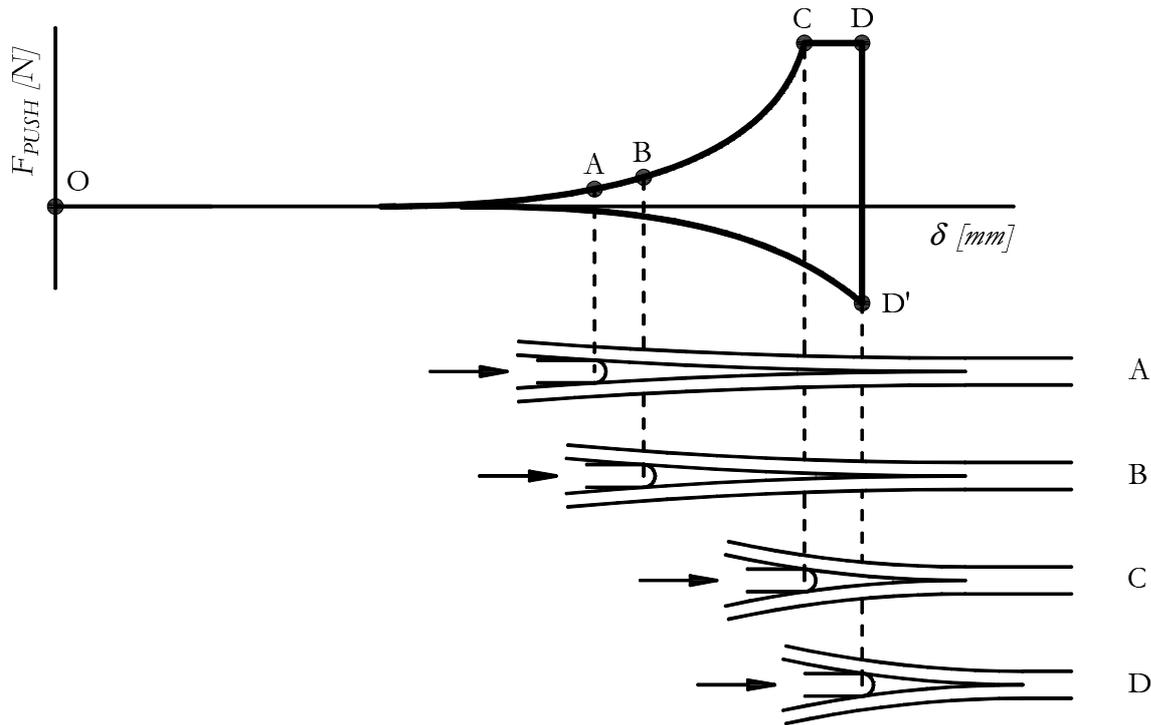


Figura 7.27: Etapa 3 del ensayo WDT: determinación del coeficiente de fricción.

(WDT). En este procedimiento se describe como hacer el cero de desplazamiento, como realizar el ensayo experimental.

7.6.1. Realización del cero de desplazamiento

Antes de empezar el ensayo se ha hecho un cero de desplazamiento de la cuña. Una vez montada la cuña en la máquina de ensayo, se ha desplazado la cuña hasta ponerla en contacto con las garras de sujeción de la máquina de ensayo, ver Figura 7.28(a). En esta posición se ha hecho un primer cero de desplazamiento de la cuña. A continuación, se ha separado la cuña de las garras una distancia vertical de 220 mm , y se ha realizado otro cero de desplazamiento en la nueva posición.

En esta posición, la cuña se encuentra a una distancia de unos 270 mm de la base de las garras. De manera que se tiene espacio suficiente para colocar una probeta de 250 mm de longitud, junto con el mecanismo de apertura de los brazos, ver Figura 7.28.

7.6.2. Realización del ensayo experimental

Tal y como se ha explicado anteriormente, para realizar el ensayo experimental se efectúan dos ciclos de avance y retroceso de la cuña: en el primer ciclo la cuña se desplaza una distancia d_1 y en el segundo una distancia d_2 , ver Figura 7.28. El valor de las distancias d_1 y d_2 varía en función de la longitud de grieta a entre la cuña y la probeta. El parámetro a depende de la longi-

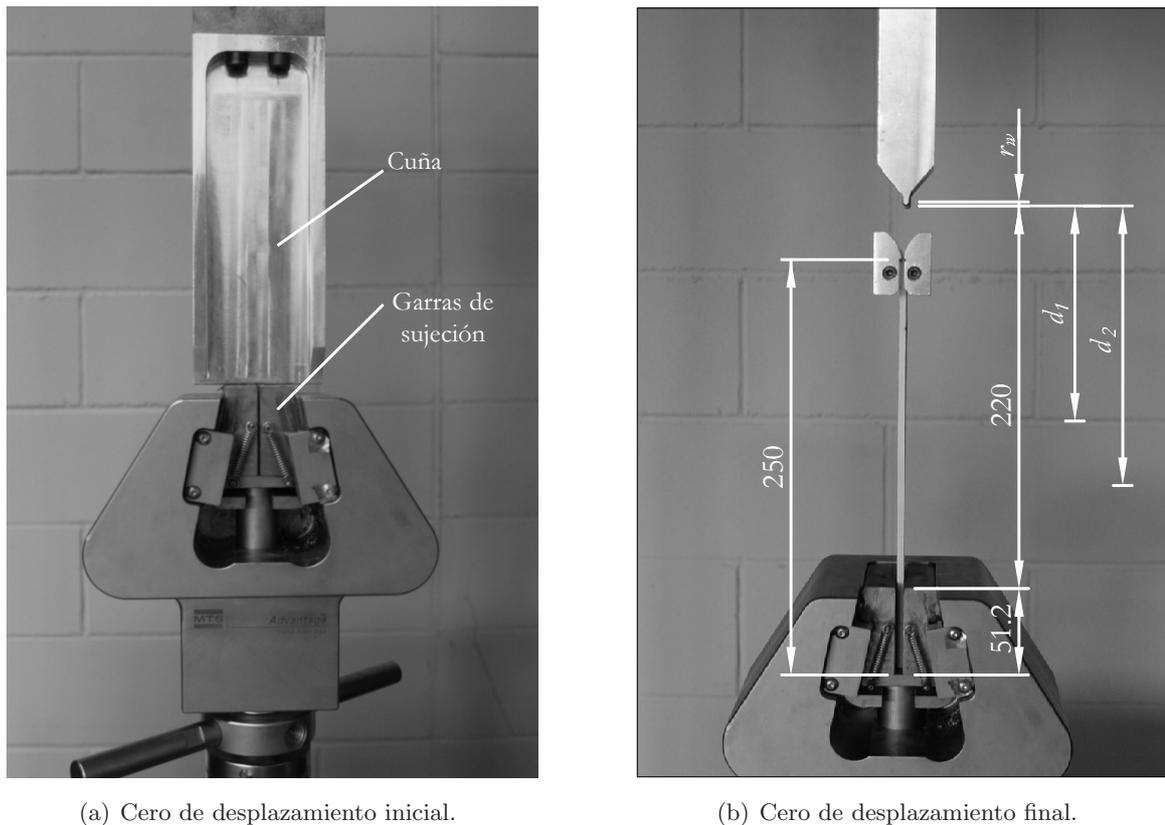


Figura 7.28: Posición del cero de desplazamiento de la cuña, distancia inicial entre la cuña y las garras de sujeción de la probeta. Unidades en mm.

tud de la probeta, la rugosidad superficial, las propiedades de los constituyentes y la dimensión de la cuña. Antes de realizar los ensayos experimentales del lote de probetas, es recomendable realizar una prueba preliminar con una probeta con las mismas características para determinar las distancias d_1 y d_2 .

En cada uno de los ciclos de desplazamiento se ha realizado una avance, parada y retroceso de la cuña, ver figura 7.30. El avance y el retroceso de la cuña se han realizado a 400 mm/min para reducir el tiempo de ensayo. Para tener información adicional de la longitud de la grieta durante cada parada se ha marcado la posición de la cuña y el frente de grieta, ver figura 7.29.

En total se han realizado 6 marcas en los laterales de la probeta, ver Figura 7.30.

La información relacionada con cada una de las marcas se indica a continuación:

- Marca 1 (color rojo): es la posición del frente de grieta inicial y se realiza antes de iniciar el ensayo experimental.
- Marca 2 (rojo): punto de contacto entre la cuña y la probeta en el instante en que la cuña se ha desplazado una distancia $\delta = \delta_1$, en la primera etapa del ensayo (punto F de la figura 7.25).

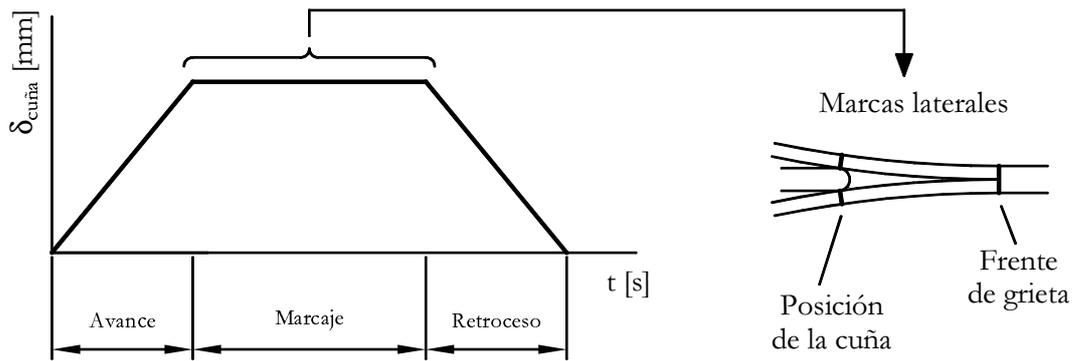


Figura 7.29: Etapa 3 del ensayo WDT: determinación del coeficiente de fricción.

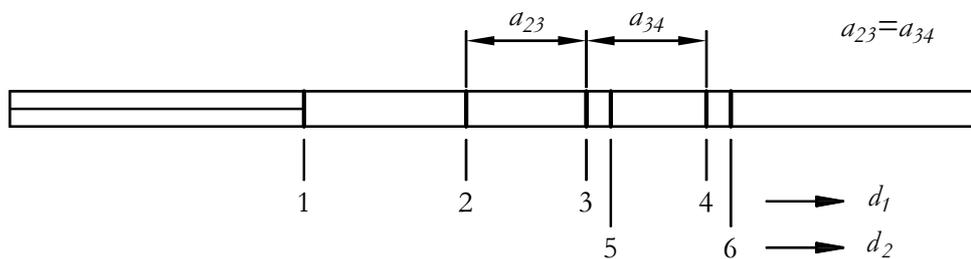


Figura 7.30: Etapa 3 del ensayo WDT: determinación del coeficiente de fricción.

- Marca 3 (rojo): posición del frente de grieta en el instante en que la cuña se encuentra sobre la marca 2. La distancia entre las marcas 2 y 3 ($a_{23} = a$).
- Marca 4 (rojo): posición del nuevo frente de grieta una vez realizada la apertura manual de la probeta. La posición del nuevo frente de grieta se encuentra a una distancia $a_{34} = a_{23}$ de la marca 3.
- Marca 5 (color azul): punto de contacto entre la cuña y la probeta, en el instante en que la cuña se ha desplazado una distancia $\delta = \delta_1$, en la tercera etapa del ensayo (punto D de la figura 7.27).
- Marca 6 (azul): posición del frente de grieta en el instante en que la cuña se encuentra sobre la marca 5. La distancia entre las marcas 5 y 6 (a_{56}) es igual a la longitud de grieta a .

Capítulo 8

Resultados experimentales

8.1. Introducción

Una vez definido el ensayo de propagación de grieta por avance forzado de cuña (WDT), se han llevado a cabo una serie de campañas experimentales para validar el nuevo método experimental. En este capítulo se analizan los resultados que se han obtenido.

A partir de estos resultados, se pretende evaluar la tenacidad a la fractura en modo I de las 4 configuraciones de unión adhesiva que se han producido, fruto de la combinación de los 2 adherentes (AS4/8552 y T800S/M21) y los 2 adhesivos (EA9596 y FM300K). Para validar que el procedimiento de fabricación de las uniones se ha realizado de forma correcta, se dispone de la información proporcionada por la empresa Airbus de una de las 4 configuraciones de unión adhesiva, la formada por el adherente T800S/M21 y el adhesivo FM300K. Según esta información, las uniones adhesivas con este tipo de configuración y con una preparación superficial óptima deberían tener la G_{IC} en un rango de valores entre $900 J/m^2$ y $1100 J/m^2$.

Por otra parte, se quiere comprobar que los valores de G_{IC} que se han obtenido con el WDT son comparables a los que se obtienen con el ensayo DCB, y que los resultados del ensayo WDT sean sensibles a la preparación superficial. Para realizar esta última comprobación se han preparado unos lotes de probetas siguiendo una metodología de producción deliberadamente errónea, y también se ha analizado el efecto de una temperatura de curado inadecuada (se ha simulado un descenso de temperatura de 180° a 160°).

Por consiguiente, en primer lugar se han analizado los resultados del ensayo de doble viga en voladizo de las uniones adhesivas preparadas según los 3 procedimientos de producción: preparación superficial óptima, preparación superficial deliberadamente errónea y curado del adhesivo a una temperatura inadecuada. Y seguidamente se han comparado estos resultados con los que se han obtenido del ensayo experimental WDT.

8.2. Campañas de ensayo

El trabajo experimental se ha organizado en 6 campañas de ensayo, 3 para los ensayos de doble viga en voladizo y 3 para los de propagación de grieta por avance forzado de cuña (WDT). Las campañas realizadas de cada tipo de ensayo se han dividido en función de la preparación superficial y de la temperatura del ciclo de curado del adhesivo. En cada campaña de ensayo se han analizado 4 lotes de probetas, 1 lote por cada combinación de material (ver tabla 8.1).

Ensayo	Campaña	Lote	Adherente	Adhesivo	Código resultados	T ^a curado unión	Preparación superficial
DCB	DCB_UA_UD_PS1_180	01	AS4/8552	EA9695	A1/E1-180-PS1	180 °C	Pelable preimpreg.
		02	AS4/8552	FM300K	A1/F1-180-PS1		
		03	T800S/M21	EA9695	T1/E1-180-PS1		
		04	T800S/M21	FM300K	T1/F1-180-PS1		
	DCB_UA_UD_PS1_160	01	AS4/8552	EA9695	A1/E1-160-PS1	160 °C	Pelable preimpreg.
		02	AS4/8552	FM300K	A1/F1-160-PS1		
		03	T800S/M21	EA9695	T1/E1-160-PS1		
		04	T800S/M21	FM300K	T1/F1-160-PS1		
	DCB_UA_UD_PS2_180	01	AS4/8552	EA9695	A1/E1-180-PS2	180 °C	Sin preparación
		02	AS4/8552	FM300K	A1/F1-180-PS2		
		03	T800S/M21	EA9695	T1/E1-180-PS2		
		04	T800S/M21	FM300K	T1/F1-180-PS2		
WDT	WED_UA_UD_PS1_180	01	AS4/8552	EA9695	A1/E1-180-PS1	180 °C	Pelable preimpreg.
		02	AS4/8552	FM300K	A1/F1-180-PS1		
		03	T800S/M21	EA9695	T1/E1-180-PS1		
		04	T800S/M21	FM300K	T1/F1-180-PS1		
	WED_UA_UD_PS1_160	01	AS4/8552	EA9695	A1/E1-160-PS1	160 °C	Pelable preimpreg.
		02	AS4/8552	FM300K	A1/F1-160-PS1		
		03	T800S/M21	EA9695	T1/E1-160-PS1		
		04	T800S/M21	FM300K	T1/F1-160-PS1		
	WED_UA_UD_PS2_180	01	AS4/8552	EA9695	A1/E1-180-PS2	180 °C	Sin preparación
		02	AS4/8552	FM300K	A1/F1-180-PS2		
		03	T800S/M21	EA9695	T1/E1-180-PS2		
		04	T800S/M21	FM300K	T1/F1-180-PS2		

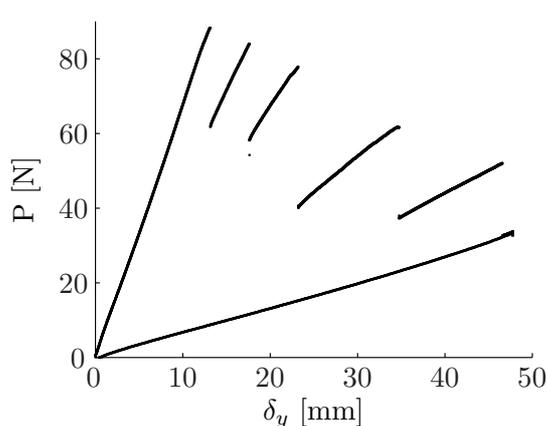
Tabla 8.1: Campañas de ensayos de las uniones adhesivas.

Las campañas de ensayo de la tabla 8.1 se han codificado indicando el tipo de ensayo (DCB: doble viga en voladizo o WED: ensayo de propagación de grieta por avance forzado de cuña), el tipo de probeta (UA: uniones adhesivas y UD: laminado unidireccional de los adherentes), la preparación superficial (PS1: con pelable preimpregnado o PS2: sin pelable) y la temperatura de curado de la unión (180 °C o 160 °C). Sin embargo, para presentar los resultados de los ensayos experimentales se ha utilizado un código de resultados indicado en la tabla 8.1.

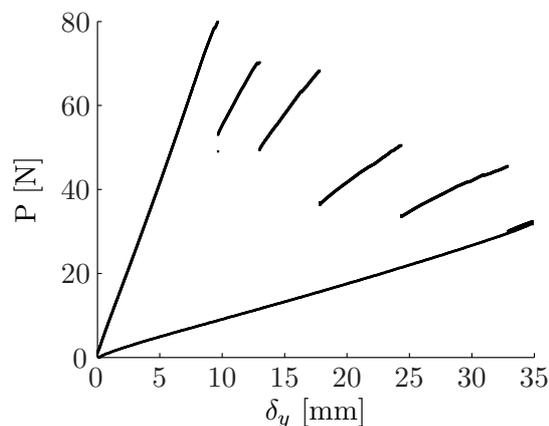
8.3. Resultados experimentales del ensayo DCB

Los resultados que se presentan se agrupan por lotes de probetas. De cada lote de probetas se han comparado los valores de G_{IC} del método de la teoría de vigas corregida (CBT de las normas de ensayo BS 7991, ISO 15024), y los resultados del método del área propuesto en la norma AITM 1-0053. De los valores del método CBT, se han comparado los puntos de iniciación NL y 5%/MAX, y el valor promedio de los 5 últimos valores de G_{IC} de la curva R de propagación (curva de G_{IC} en función de a). Los valores de G_{IC} se han obtenido utilizando metodología experimental que se describe en el capítulo 4.

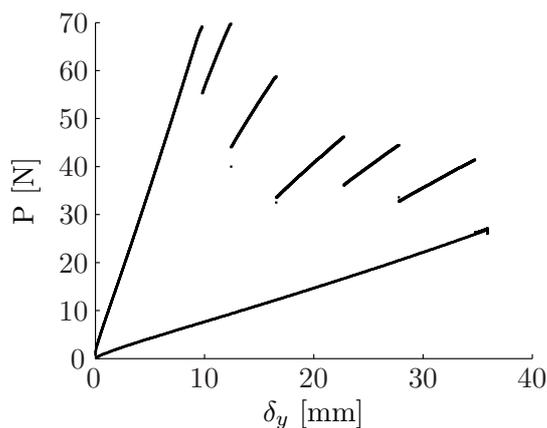
En las figuras 8.1, 8.2 y 8.3 se muestran las curvas representativas $P(\delta_y)$ de un ensayo para cada uno de los tipos de probetas que se han analizado en este trabajo, cuyos códigos se indican en la tabla 8.1.



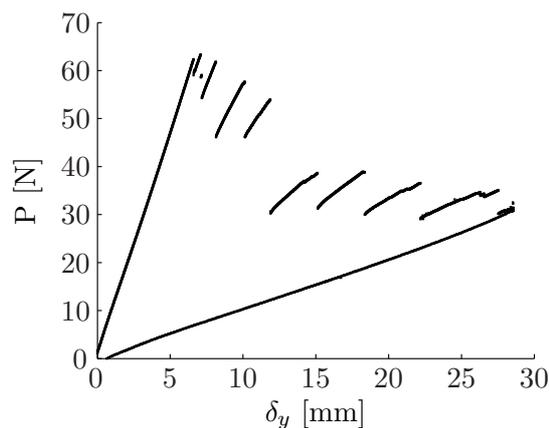
(a) Lote tipo T1/F1-180-PS1 (T1/F1/07/10).



(b) Lote tipo T1/F1-160-PS1 (T1/F1/03/10).



(c) Lote tipo T1/E1-180-PS1 (T1/E1/07/06).



(d) Lote tipo T1/E1-160-PS1 (T1/E1/02/02).

Figura 8.1: Curvas $P(\delta_y)$ de las probetas de T800S/M21 con la preparación superficial óptima.

En las figuras 8.1 y 8.2 se muestran los resultados de las probetas con los adherentes T800S/M21 y AS4/8552 respectivamente, que se han producido con una preparación superficial óptima (realizada con el tejido pelable preimpregnado). En cada figura se incluyen 4 curvas $P(\delta_y)$ que

pertenecen a cuatro configuraciones distintas en las cuales se ha modificado el adhesivo de la unión y/o la temperatura de curado.

Y en la figura 8.3 se muestran los resultados de la curva $P(\delta_y)$ las probetas con adherentes T800S/M21 y AS4/8552 con la preparación superficial inadecuada (realizada con el tejido desmoldeante en vez de hacerlo con el tejido pelable).

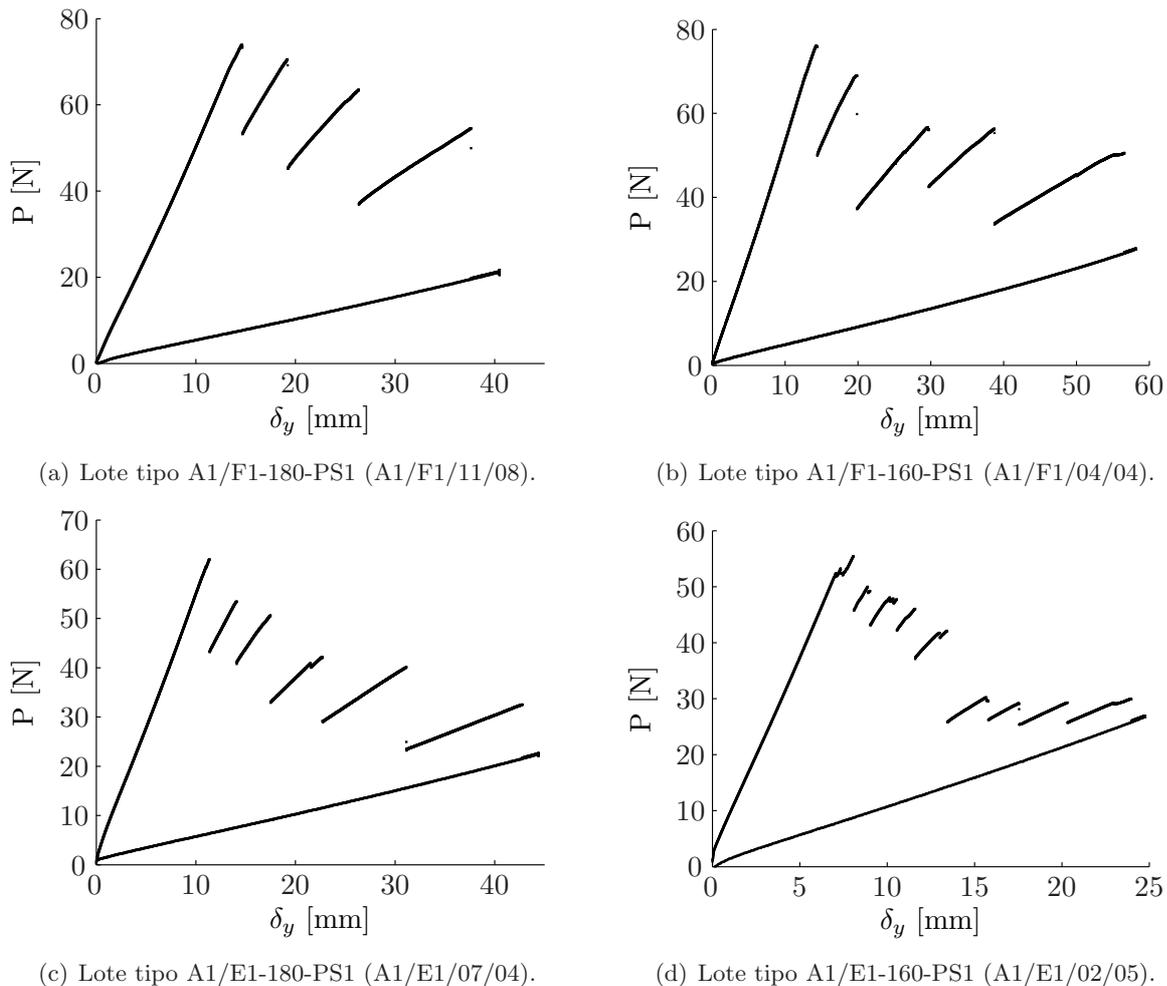


Figura 8.2: Curvas $P(\delta_y)$ de las probetas de AS4/8552 con la preparación superficial óptima.

A la vista de los resultados obtenidos, se observa que en todos los casos la curva $P(\delta_y)$ presenta *stick-slip* menos en las uniones adhesivas con mala preparación superficial y producidas con el adhesivo EA9596, en las cuales la propagación se produce durante su mayor parte en pequeños saltos, y de forma espontánea se produce un gran salto, como ocurre en la probeta T1/E1/08/08 de la figura 8.3(b) a $\delta_y = 12 \text{ mm}$.

De las probetas de T800S/M21 que se han producido con una preparación superficial óptima (figura 8.1), las que presentan los valores de P más elevados, para un mismo valor de δ_y , son las que se han producido con el adhesivo FM300K. Al calcular la tenacidad a la fractura de

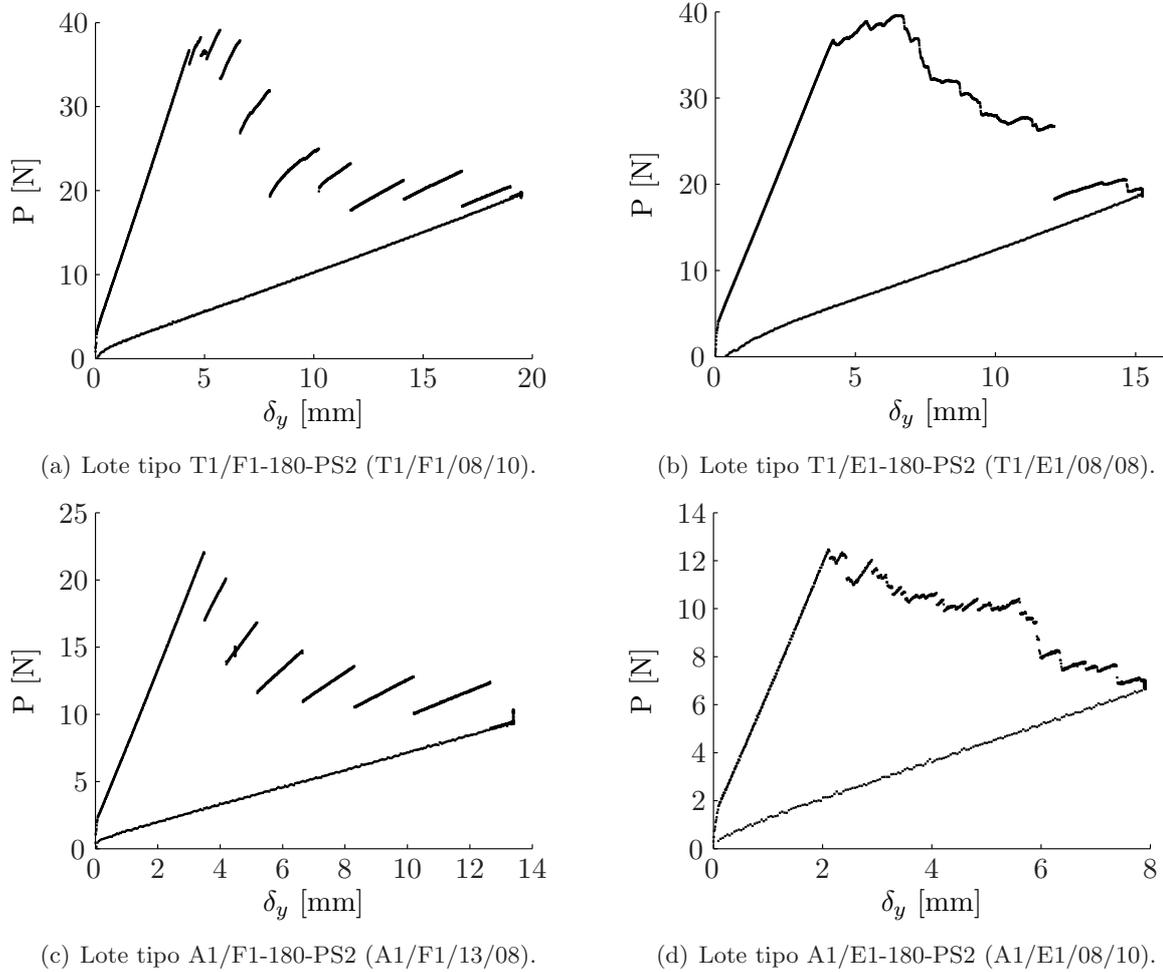


Figura 8.3: Curvas $P(\delta_y)$ de las probetas de T800S/M21 y AS4/8552 con la preparación superficial inadecuada.

este tipo de uniones adhesivas, éstas deberían presentar unos resultados de G_{IC} superiores al resto. Lo mismo sucede con las probetas de AS4/8552 que se han producido con una preparación superficial óptima.

El problema que presentan este tipo de probetas, es que durante el ensayo experimental se producen grandes saltos en la curva $P(\delta)$ de manera que se obtienen muy pocos puntos para realizar el cálculo de G_{IC} .

Por otra parte, para las probetas con preparación superficial óptima, en todos los casos excepto en las probetas del tipo A1/F1-160-PS1 (ver figura 8.2(b)) se ha obtenido un valor P inferior en las uniones curadas a 160° . Por consiguiente, las uniones curadas a 180° deberían presentar resultados de G_{IC} superiores, excepto en las probetas del tipo A1/F1-160-PS1.

En la Figura 8.4 se presentan los resultados de G_{IC} de cada uno de los lotes obtenidos con los métodos de reducción de datos antes citados. Se muestra el valor promedio y la desviación estándar de cada lote. Los resultados se han ordenado de la siguiente manera: 1) en función de

la preparación superficial (PS1 = con pelable y PS2 = sin preparación); 2) del tipo de adherente (A1 = AS4/8552 y T1 = T800S/M21); 3) del adhesivo (E1 = EA9596; F1=FM300K); y 4) la temperatura de curado (180° y 160°).

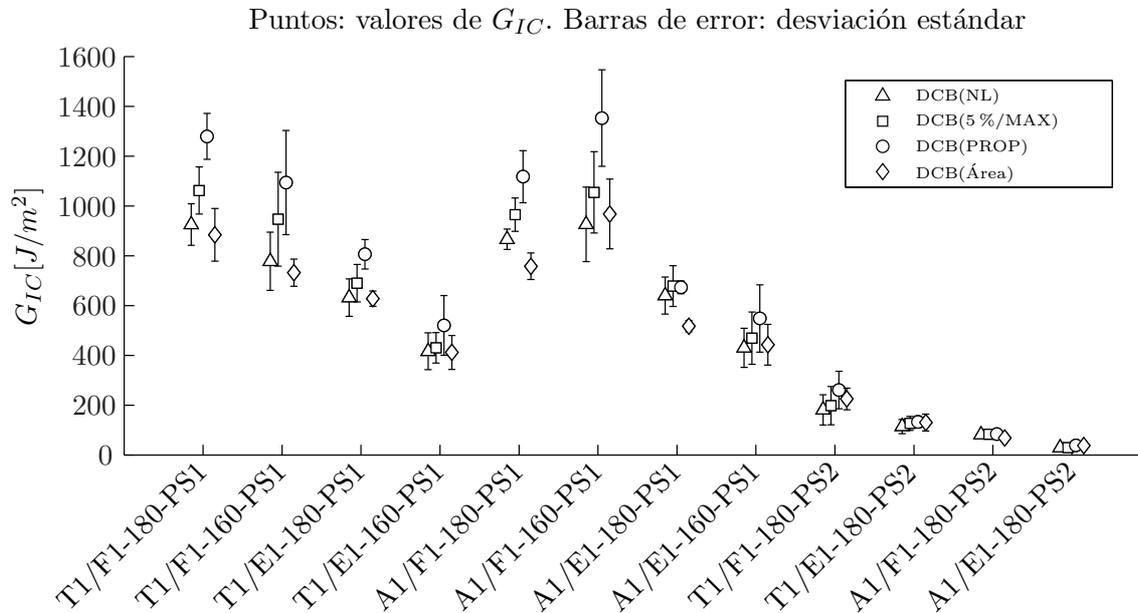


Figura 8.4: Resultados de G_{IC} de las uniones adhesivas.

En la figura 8.4, se observa que los lotes de probetas que se han analizado cubren el rango de valores de G_{IC} de 30 J/m^2 a 1350 J/m^2 . Y que los resultados que se han obtenido de las probetas con una preparación superficial adecuada y materiales T800S/M21 y FM300K tienen valores de G_{IC} similares a los referidos por Airbus.

Tal y como se ha comentado anteriormente, hay una diferencia significativa entre los valores de G_{IC} en función de la preparación superficial de las probetas. También se observa que el adhesivo FM300K proporciona valores de G_{IC} superiores a los del adhesivo EA9695 para cualquiera de los adherentes. Del análisis de los datos en función de la temperatura de curado, se observa que las uniones curadas a 180°C tienen una mayor tenacidad a la fractura que las curadas a 160°C . Excepto en las probetas del tipo A1/F1-160-PS1, en las cuales el valor de G_{IC} es superior.

En las figuras 8.5(a) y 8.5(b) se presentan los resultados de la variación de G_{IC} en función de la preparación superficial y de la temperatura de curado para las cuatro configuraciones de unión adhesiva (los 2 adherentes y los 2 adhesivos). Los datos se han representado en relación a la preparación superficial óptima (realizada con el pelable preimpregnado y con el curado del adhesivo a 180°).

A partir de los resultados se observa que las uniones adhesivas con la preparación superficial inadecuada presentan valores de G_{IC} muy inferiores a los de las uniones con la preparación superficial óptima, inferiores al 30%, en todos los casos, y tanto para los datos obtenidos de los

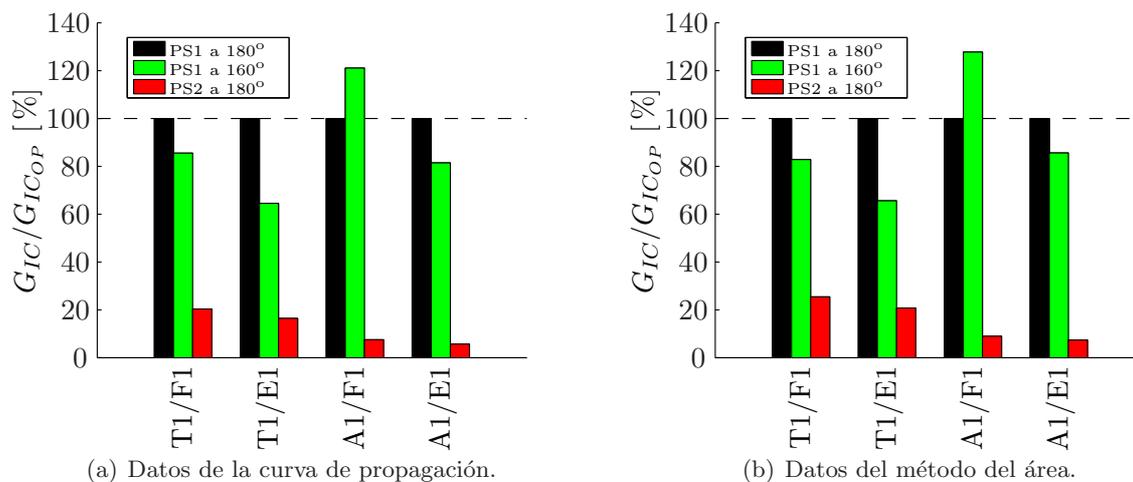


Figura 8.5: Variación de G_{IC} en función de la preparación superficial y de la temperatura de curado respecto a la preparación óptima (PS1 a 180°).

puntos de propagación de la grieta, como para los datos obtenidos con el método del área.

Los resultados de G_{IC} de las probetas curadas a 160° son ligeramente inferiores a las curadas a 180° en todos los casos, excepto en las uniones adhesivas con AS4/8552 y FM300K, en este caso los valores obtenidos son superiores un 20 %.

Por otra parte, en relación a los constituyentes de la unión, se observa que el adhesivo FM300K es menos sensible a la preparación superficial y a la temperatura de curado que el EA9596. En relación a los adherentes, el AS4/8552 es menos sensible a los efectos de la temperatura de curado que el T800S/M21, pero en cambio es más sensible a los efectos de una preparación superficial inadecuada.

Finalmente debe comentarse que tanto los resultados obtenidos de los puntos de propagación, como los obtenidos del método del área ofrecen valores similares en cuanto a la disminución/aumento de G_{IC} .

Del modo en que se presentan los datos de la figura 8.4, no se puede analizar la dispersión de los valores de G_{IC} de los lotes que tienen la tenacidad a la fractura más baja. Por consiguiente, los datos de cada lote de probetas se han normalizado en función de los valores de G_{IC} de propagación, del mismo lote, a partir de la relación ($G_{IC}/G_{IC}(PROP)$). Las barras de error representan el coeficiente de variación (C_v) de los resultados de cada método de reducción de datos ($\sigma(G_{IC})/\bar{G}_{IC}$, siendo $\sigma(G_{IC})$ la desviación estándar del lote y \bar{G}_{IC} el valor promedio). En la figura 8.6 se presentan los resultados de la tenacidad a la fractura normalizados.

A partir de los resultados de la figura 8.6 se observa que al disminuir G_{IC} aumenta el coeficiente de variación, C_v . Y que los valores de iniciación son inferiores a los de propagación. Esto se debe a la respuesta de la curva R de las probetas, la curva R se estabiliza una vez la grieta ha propa-

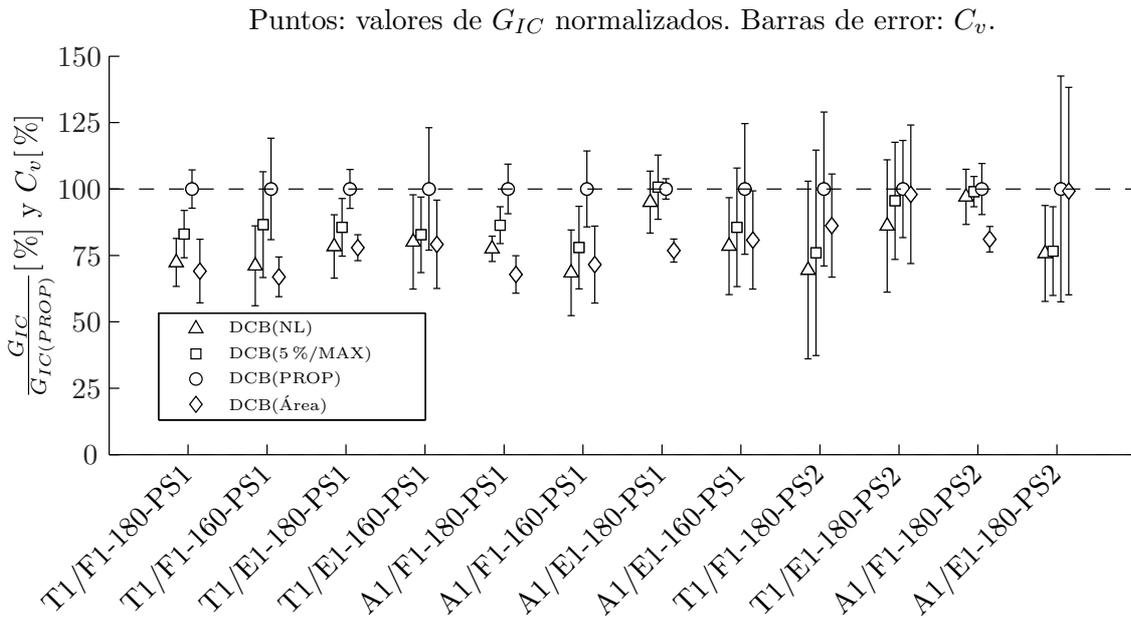


Figura 8.6: Resultados normalizados de G_{IC} de cada lote de probetas, en función de $G_{IC}(PROP)$.

gado una cierta distancia, del mismo modo que ocurre con los ensayos DCB de deslaminación.

Los resultados de G_{IC} obtenidos con el método del área son inferiores a los de propagación. Los valores de los puntos de propagación se obtienen de los máximos de la curva $P(\delta_y)$, sin embargo en el método del área se integra la curva fuerza-desplazamiento. Entre los dos métodos hay una parte del área que se omite, tal y como se representa en la figura 8.7.

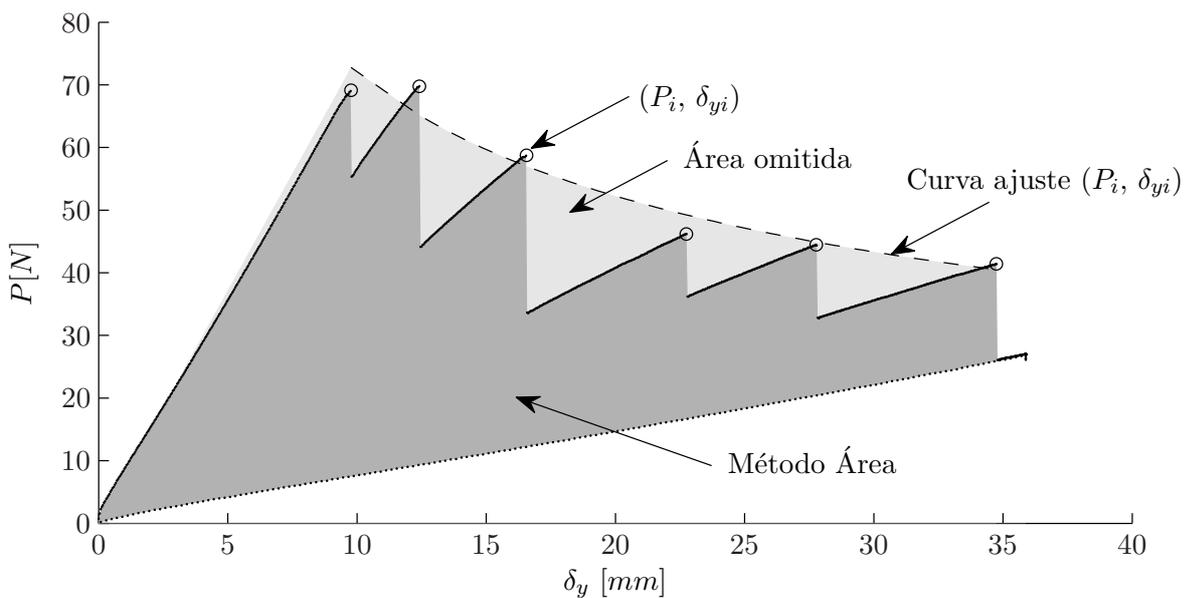


Figura 8.7: Efecto *stick-slip* en las curvas $P(\delta_y)$, $a(\delta_y)$ y en la superficie de la probeta.

8.3.1. Inspección fractográfica de una probeta con *stick-slip*

En este apartado se presentan las imágenes del análisis de la superficie fracturada de una de las uniones adhesivas, en la cuál, durante el ensayo experimental, la grieta se ha propagado a saltos. Se han analizado las zonas de crecimiento lento (bandas blancas) y zonas de crecimiento rápido del frente de grieta. En la figura 8.8 se muestra la superficie fracturada de la probeta que se ha analizado.

Tal y como se ha comentado en otros apartados en los cuales se ha realizado un análisis fractográfico de la morfología superficial, se recomienda haber leído previamente el Anexo D, dónde se describen los distintos elementos y las marcas de la superficie fracturada de la unión.

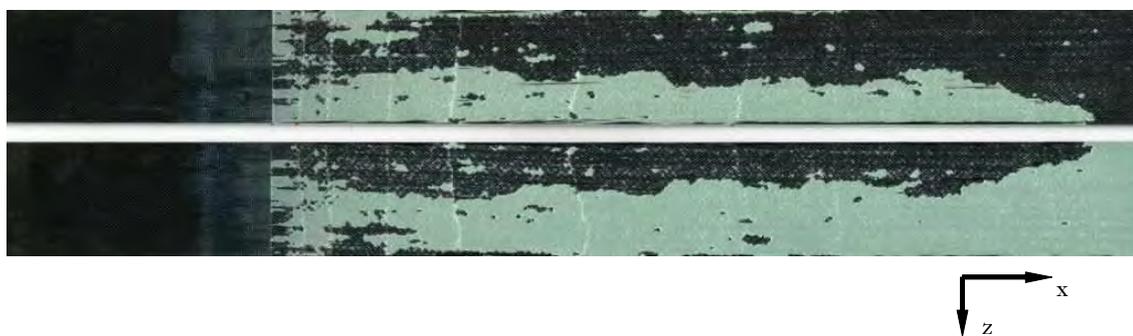


Figura 8.8: Superficie fracturada de la probeta T1/F1/05/06, sobre la cuál se ha realizado un análisis fractográfico de las zonas de crecimiento rápido (bandas blancas) y lento del frente de grieta.

En la imagen obtenida en la figura 8.8, se observa que han quedado restos de adhesivo en ambas caras de la superficie fracturada. La fractura no se ha producido en el plano medio del adhesivo, sino que en función de la región observada, ha quedado gran parte del adhesivo adherido en una de las caras del adherente, dejando visible en la otra cara la superficie del adherente.

Por otra parte, en la zona fracturada se observan unas bandas blancas que se corresponden con la región en la cual ha habido un crecimiento lento del frente de grieta. En esta región si que se observan restos de adhesivo en las dos caras de la superficie fracturada.

8.3.1.1. Zonas de crecimiento lento del frente de grieta

En la figura 8.9 se muestra una imagen a 10 aumentos de la superficie fracturada, en la cuál, se ha marcado la banda de crecimiento lento del frente de grieta en la parte central. Así mismo en las figuras 8.10(a) y 8.10(b) se muestran dos imágenes ampliadas de la región de crecimiento lento del frente de grieta de la figura 8.9, a 20 y 50 aumentos respectivamente.

En las tres imágenes se muestra una región de la superficie fracturada en la cuál el adhesivo ha quedado unido a la superficie del adherente, las ondulaciones que están presentes en la superficie corresponden a la marca que deja la superficie del adherente al arrancarse.

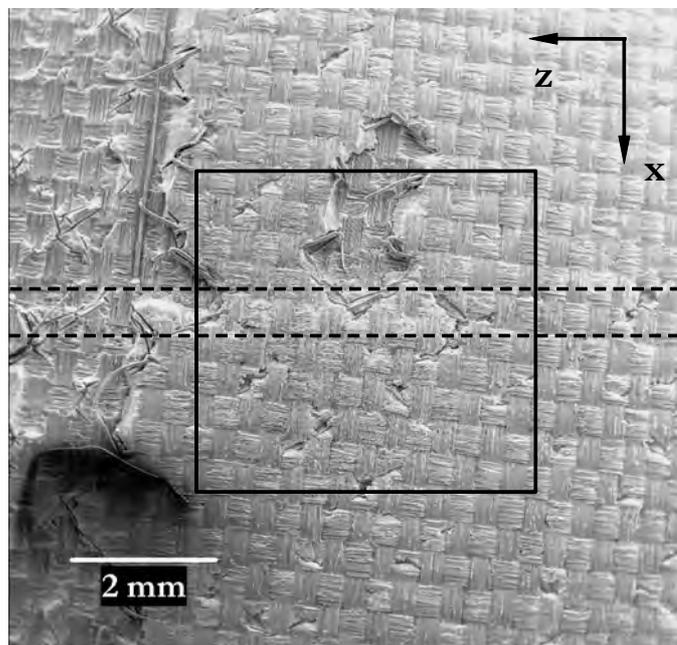
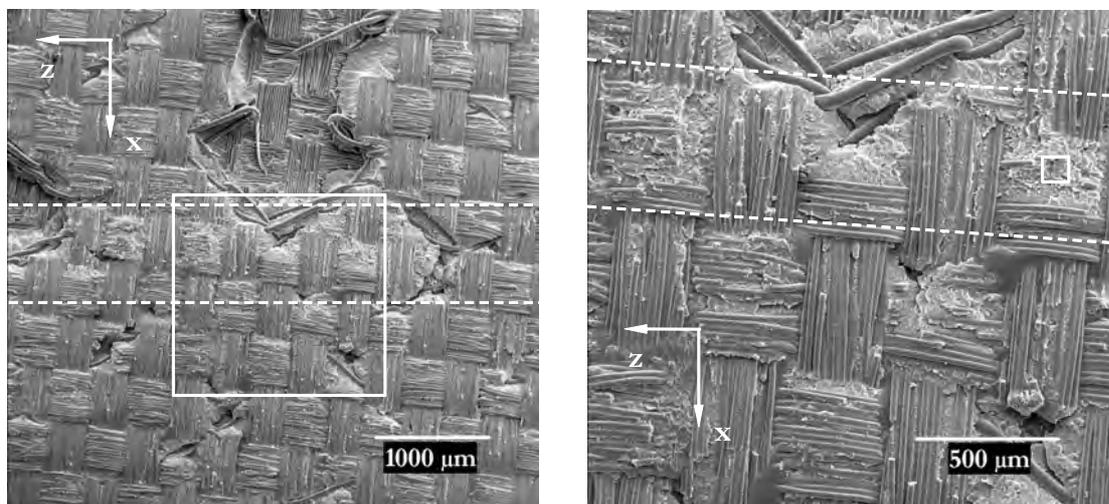


Figura 8.9: Imagen de la superficie fracturada de una de las probetas a $10\times$ en la cual se ha marcado la zona de crecimiento lento del frente de grieta.



(a) Ampliación a $20\times$.

(b) Ampliación a $50\times$.

Figura 8.10: Ampliaciones a $20\times$ y $50\times$ de la región de crecimiento lento del frente de grieta.

En las figuras 8.9 y 8.10(a), la zona de crecimiento lento del frente de grieta se corresponde con una banda de color más claro que el resto de la superficie, que cruza la probeta en la dirección perpendicular a la de la propagación de la grieta, el frente de grieta se propaga en la dirección x . En la ampliación a $50\times$ (ver figura 8.10(b)) se observa que esta marca se corresponde con una región de la superficie, en la cuál se ha arrancado una parte importante de adhesivo, de manera que las marcas de la rugosidad de los adherentes sobre la superficie del adhesivo son poco visibles.

En cambio, en la zona de crecimiento rápido del frente de grieta, en una zona alejada de la región de estudio, la huella del adherente es perfectamente visible. Siendo la zona de estudio la región comprendida entre las líneas a trazos que cruzan el eje x en las figuras 8.9, 8.10(a) y 8.10(b).

En la figura 8.11 se muestra una ampliación a $1000\times$ de un punto en el cual el adhesivo se ha fracturado y que pertenece a una banda de crecimiento lento del frente de grieta. En la imagen se observa como se ha arrancado el adhesivo. En la parte inferior de la imagen hay unas cavidades con forma elíptica, con un diámetros que oscilan entre $1.5\ \mu\text{m}$ y $3\ \mu\text{m}$. Estas cavidades son las que dejan las partículas de elastómero embebidas en la lámina de adhesivo para aumentar su tenacidad (Kim, 2007).

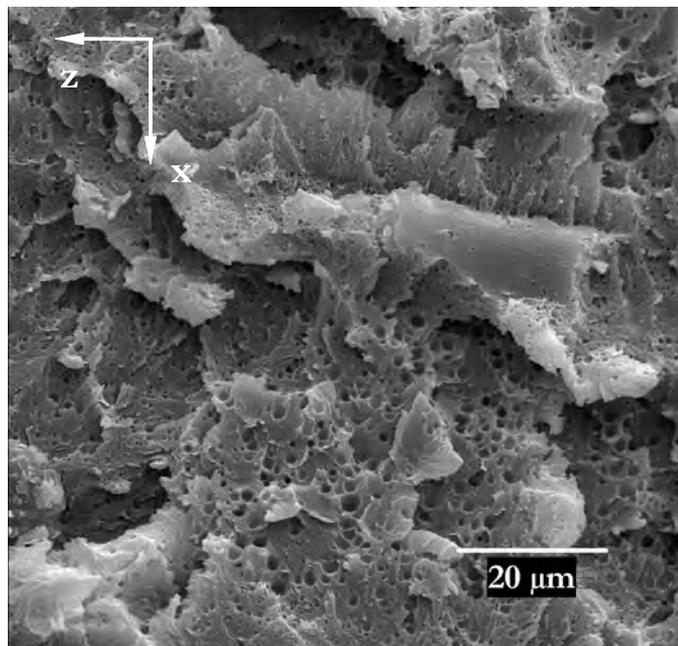


Figura 8.11: Ampliación a $1000\times$ de la región de crecimiento lento del frente de grieta.

En las figuras 8.12(a) y 8.12(b) se muestran las imágenes de otra región que forma parte de una de las bandas de crecimiento lento del frente de grieta. En las imágenes se observa la banda blanca formada por la superficie del adhesivo que se ha degradado.

En la figura 8.13 se muestra una imagen de la superficie fracturada del adhesivo en la región que limita la zona de crecimiento lento del frente de grieta (región superior) con la zona de crecimiento rápido (región inferior). En la zona de crecimiento lento se observan las mismas cavidades que las de la figura 8.11, sin embargo, en la zona de crecimiento rápido el diámetro de las cavidades es mucho más pequeño.

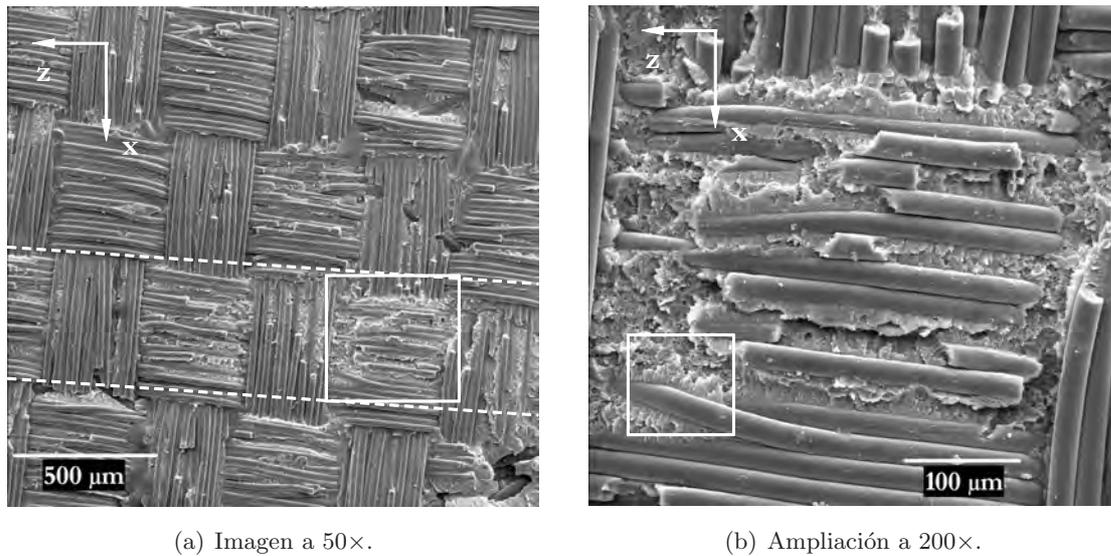


Figura 8.12: Imágenes de otra región de crecimiento lento del frente de grieta.

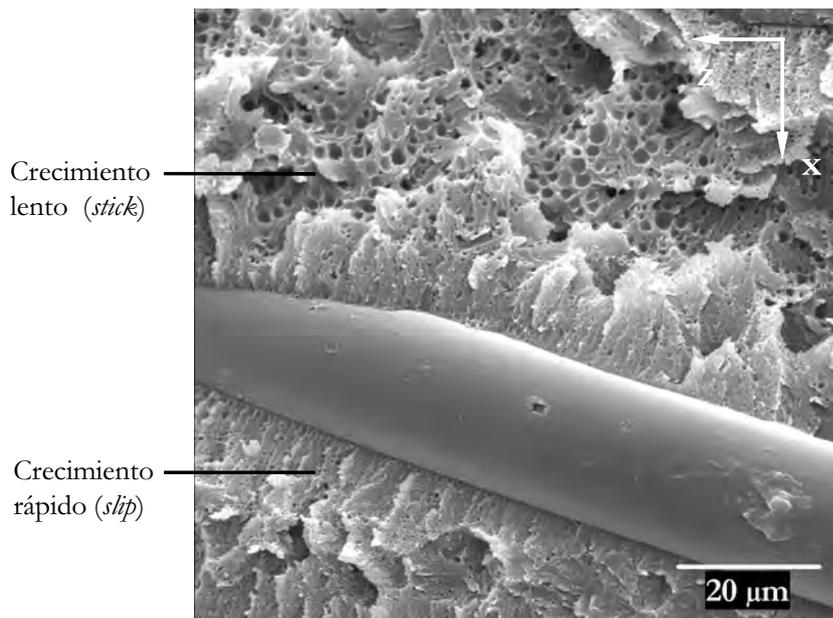


Figura 8.13: Ampliación a 1000× de una región con crecimiento lento y rápido del frente de grieta.

8.3.1.2. Zona de crecimiento rápido del frente de grieta

En la figura 8.14 se muestra la superficie fractura de la zona de crecimiento rápido del frente de grieta. Las imágenes 8.14(a) y 8.14(b) muestran la superficie de una de estas regiones a pocos aumentos, en la cuál se observa la huella que deja el adherente en el adhesivo.

En la figura 8.15 se muestra una ampliación a 1000× de la figura 8.14(b). Se han indicado dos regiones: una en la cuál se ha fracturado la lámina de adhesivo y otra en la cuál se ha producido una fractura del adherente. En la región en la cual el adhesivo ha fracturado se observan cavidades similares a las de las figuras 8.11 y 8.13, pero de un diámetro menor ($0.7 \mu m$ a $1.2 \mu m$).

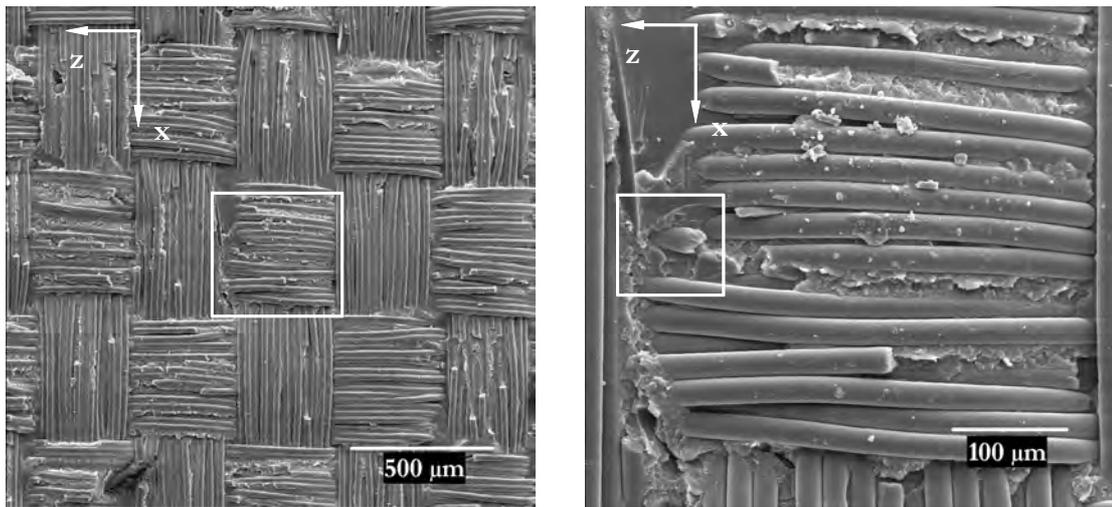
(a) Imagen a 50 \times .(b) Ampliación a 200 \times .

Figura 8.14: Imágenes de una región de crecimiento rápido del frente de grieta.

La superficie en la cuál se ha fracturado la resina es completamente lisa. Al producirse la fractura, la interfase entre el adherente y el adhesivo se ha separado, de manera que se han podido identificar claramente los dos componentes.

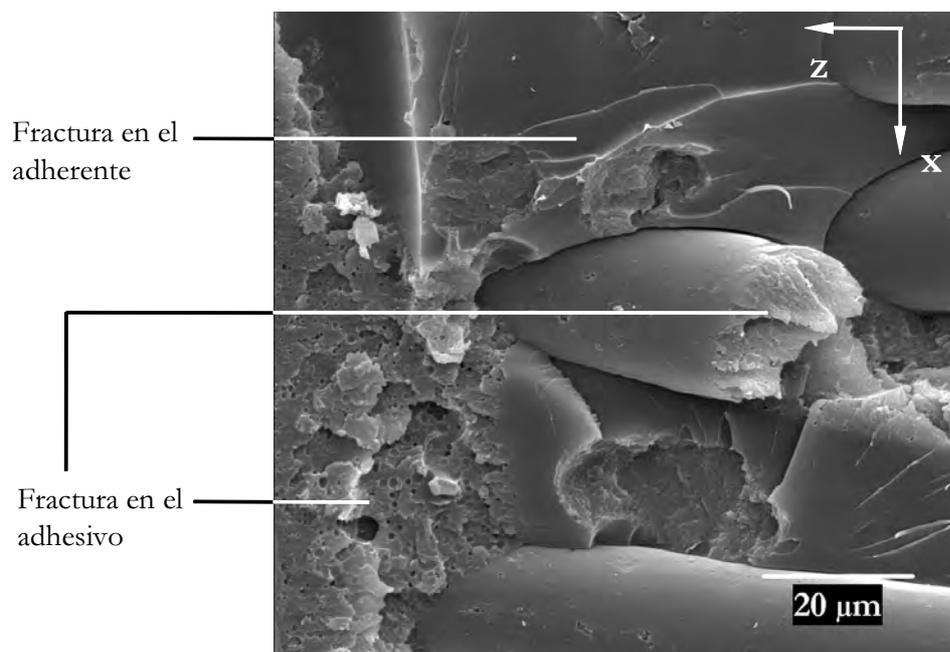


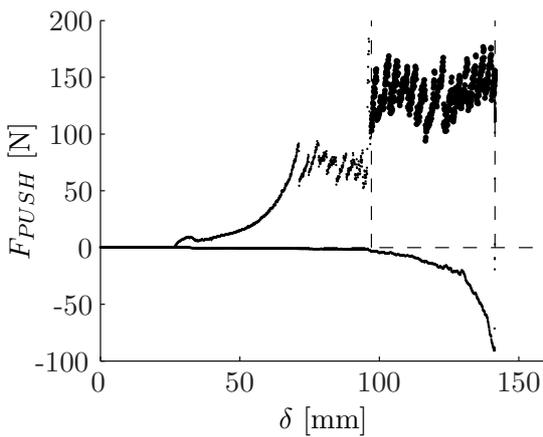
Figura 8.15: Imágenes obtenidas con el MER del punto C de la zona de crecimiento rápido del frente de grieta.

8.4. Resultados experimentales del ensayo WDT

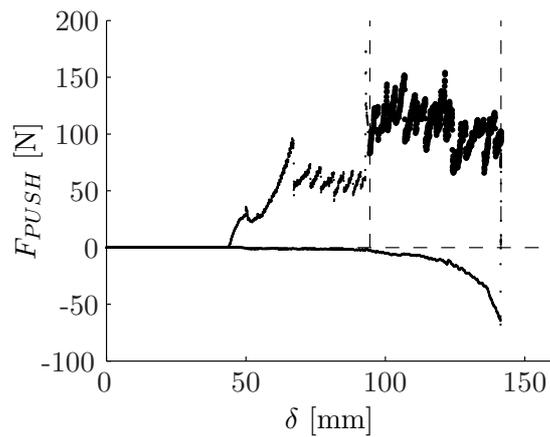
Del mismo modo que se ha hecho para el ensayo DCB, en las figuras 8.16, 8.17 y 8.18 se muestran los resultados de la curva $F_{PUSH}(\delta)$ de la fase de propagación del primer ciclo de avance y retroceso de la cuña, de un ensayo significativo de cada lote de probetas.

En las figuras 8.16 y 8.17 se muestran los resultados de las probetas con los adherentes T800S/M21 y AS4/8552 respectivamente, que se han producido con una preparación superficial óptima (realizada con el tejido pelable preimpregnado). En cada figura se incluyen 4 curvas $F_{PUSH}(\delta)$ que pertenecen a cuatro configuraciones distintas en las cuales se ha modificado el adhesivo de la unión y/o la temperatura de curado.

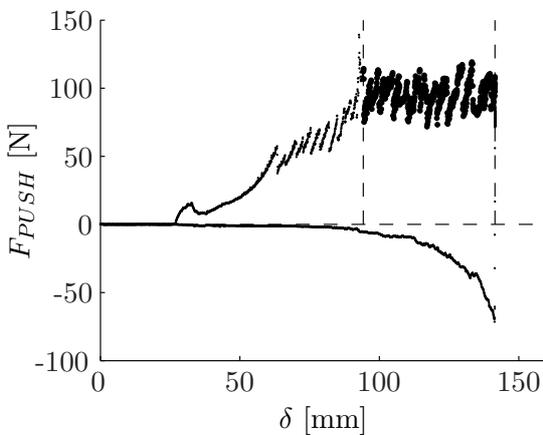
Y en la figura 8.18 se muestran los resultados de la curva $F_{PUSH}(\delta)$ las probetas con adherentes T800S/M21 y AS4/8552 con la preparación superficial inadecuada (realizada con el tejido desmoldeante en vez de hacerlo con el tejido pelable).



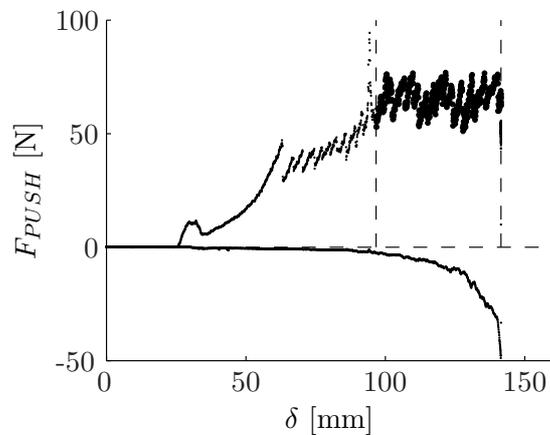
(a) Lote tipo T1/F1-180-PS1 (T1/F1/07/07).



(b) Lote tipo T1/F1-160-PS1 (T1/F1/05/01).

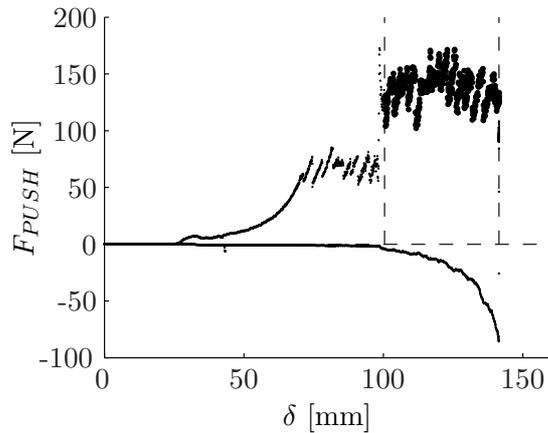


(c) Lote tipo T1/E1-180-PS1 (T1/E1/07/05).

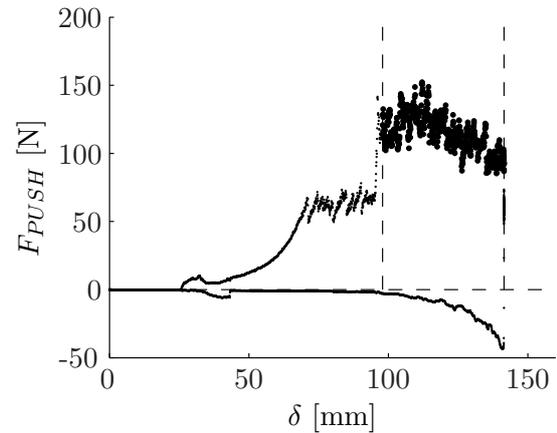


(d) Lote tipo T1/E1-160-PS1 (T1/E1/02/06).

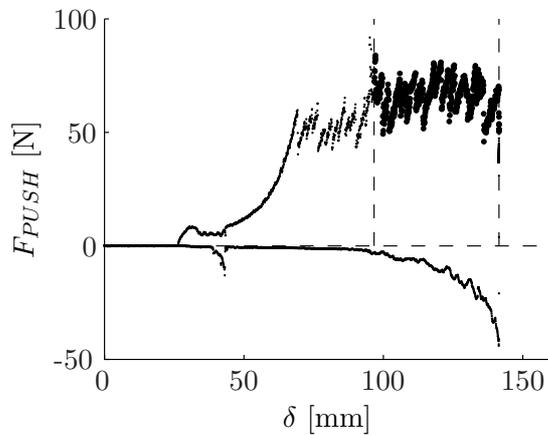
Figura 8.16: Curvas $F_{PUSH}(\delta)$ de las probetas de T800S/M21 con la preparación superficial óptima.



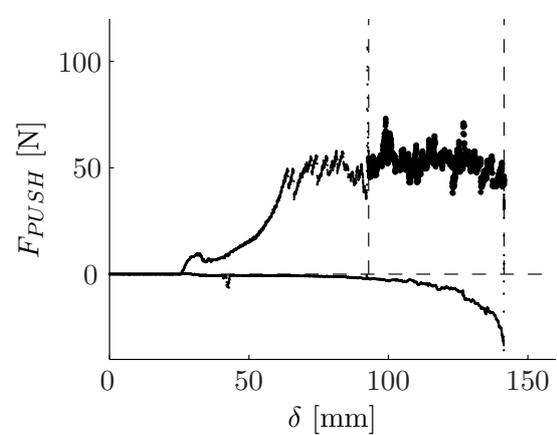
(a) Lote tipo A1/F1-180-PS1 (A1/F1/11/05).



(b) Lote tipo A1/F1-160-PS1 (A1/F1/04/10).



(c) Lote tipo A1/E1-180-PS1 (A1/E1/07/01).



(d) Lote tipo A1/E1-160-PS1 (A1/E1/02/07).

Figura 8.17: Curvas $F_{PUSH}(\delta)$ de las probetas de AS4/8552 con la preparación superficial óptima.

Los datos de las curvas del segundo ciclo de avance y retroceso de la cuña se incluyen en la ficha de resultados de cada probeta (ver Volumen II).

A partir de los resultados obtenidos se observa que, tal y como ha sucedido en los ensayos DCB, las probetas que se han producido con una preparación superficial óptima y con una temperatura de curado de 180°C presentan valores de F_{PUSH} más elevados en la fase de propagación, que el resto de las probetas con preparación superficial inadecuada o curadas a 160° . Excepto en las probetas del tipo A1/F1-160-PS1.

En relación al efecto *stick-slip*, al realizar el ensayo WDT se reduce su efecto en la zona de propagación. Sin embargo las curvas que se obtienen presentan oscilaciones del valor de F_{PUSH} , que son producidas por el avance a saltos del frente de grieta durante la etapa de propagación. En las probetas con mala preparación superficial, en las cuáles en el ensayo DCB se obtuvo una propagación continua, presentan una menor oscilación de F_{PUSH} que el resto.

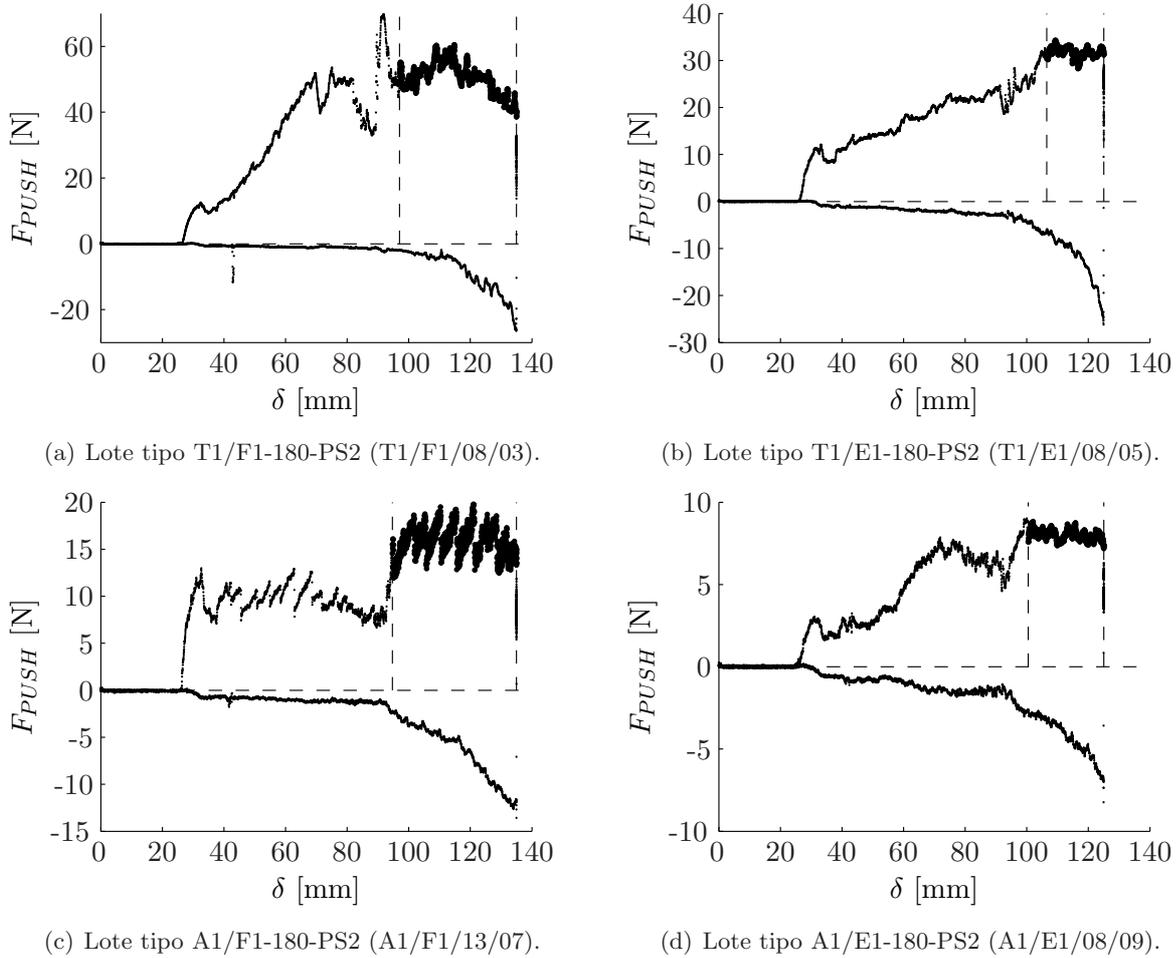


Figura 8.18: Curvas $F_{PUSH}(\delta)$ de las probetas de T800S/M21 y AS4/8552 con la preparación superficial inadecuada.

8.5. Comparación de los ensayos DCB y WDT

En este apartado se comparan los resultados del ensayo DCB y del ensayo de propagación de grieta por avance forzado de cuña (WDT). Se han comparado los resultados de los puntos de propagación según la teoría de vigas corregida (CBT) del ensayo DCB con los métodos del área y directo del ensayo WDT. Los resultados de los distintos métodos de reducción de datos, que se indican en la figura 8.19, se han ordenado del mismo modo que los de la figura 8.4.

En la figura 8.19 se observa que los resultados del ensayo WDT siguen la misma tendencia de los resultados del ensayo DCB, para los dos métodos de reducción de datos propuestos. Del mismo modo que se ha hecho con los ensayos de doble viga en voladizo, también se han comparado los resultados normalizados en función de los valores de la G_{IC} de propagación, para analizar el coeficiente de variación de las probetas con valores de G_{IC} inferiores, ver figura 8.20.

De la figura 8.20 se observa que los valores de G_{IC} que se obtienen con el ensayo WDT se encuentran dentro de los rangos de los métodos de reducción de datos del ensayo DCB. Sin

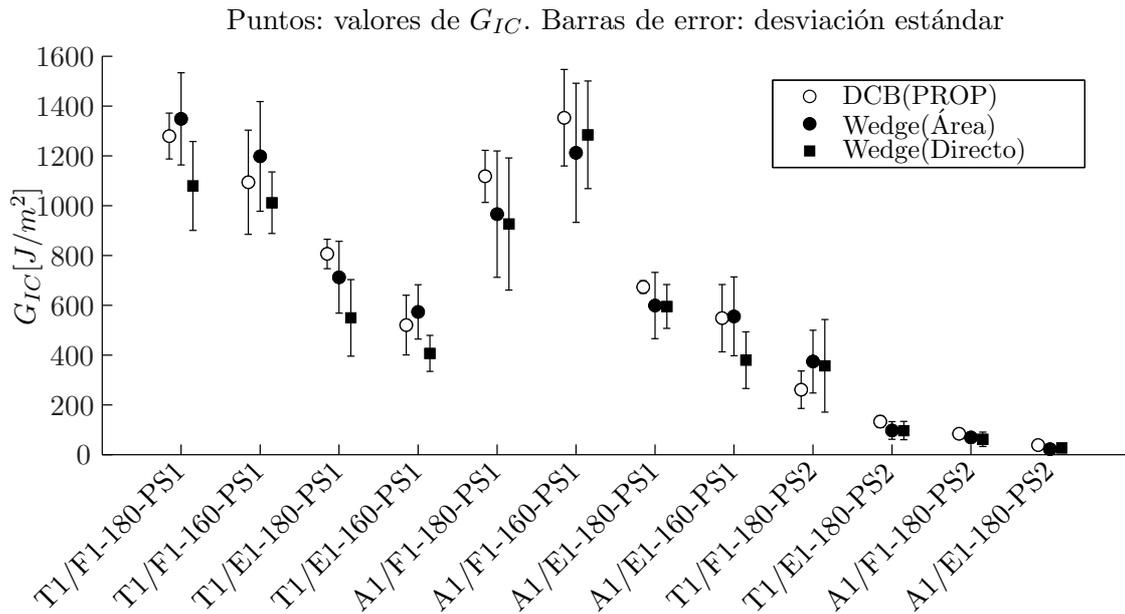


Figura 8.19: Comparación de los valores de G_{IC} obtenidos a partir de los dos métodos experimentales: DCB y WDT.

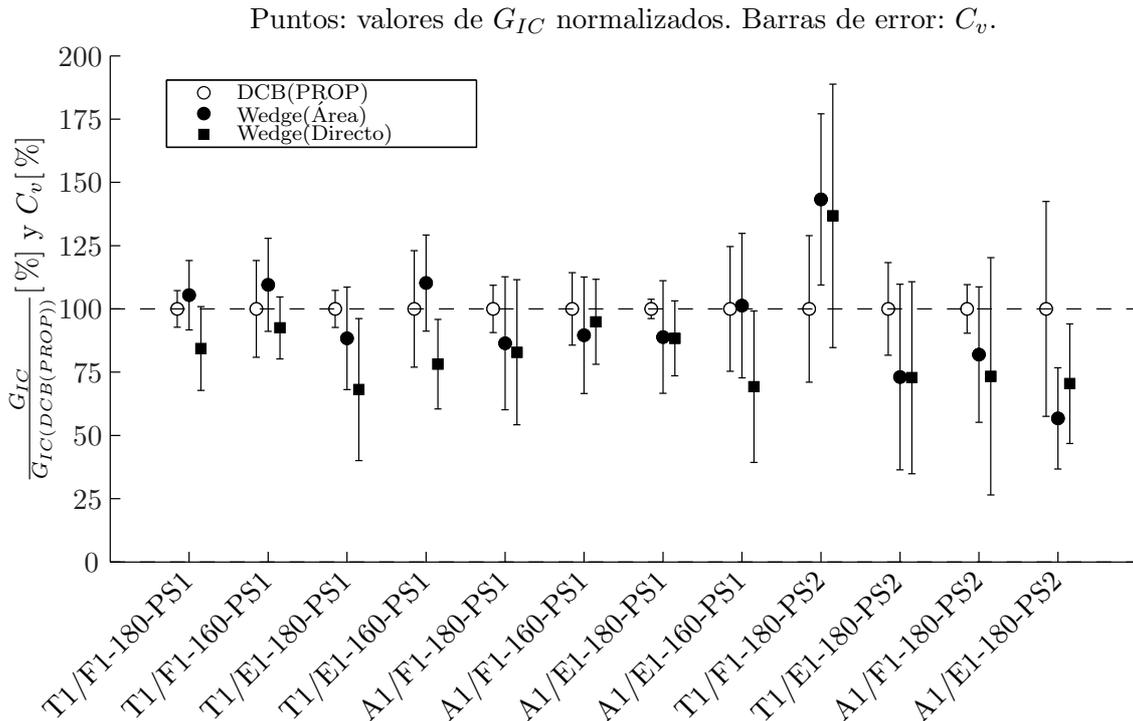


Figura 8.20: Valores normalizados de G_{IC} en función de $G_{IC}(PROP)$ del ensayo DCB.

embargo, en el ensayo WDT el coeficiente de variación que se obtiene es superior porque el procedimiento es muy sensible a la rugosidad superficial. Es recomendable, de cara a futuras campañas de ensayos, aumentar el número de probetas analizadas por lote del ensayo WDT.

Finalmente, en la figura 8.20 se observan diferencias significativas, entre los dos procedimientos

de ensayo, para las probetas con una configuración T1/F1-180-PS2. De la observación visual de la superficie fracturada no se ha podido detectar cuál ha sido la causa de estas variaciones. Sin embargo las probetas T1/F1/08/02 y T1/F1/08/04 (de la campaña/lote DCB UA UD PS2 180/04) y T1/F1/08/03 (de la campaña/lote WED UA UD PS2 180/04) han presentado valores de G_{IC} superiores al resto.

Del mismo modo que ocurre con los ensayos DCB. En el ensayo WDT, las probetas con una preparación superficial inadecuada presentan una mayor dispersión de los resultados de G_{IC} .

8.6. Análisis de la sensibilidad de la preparación superficial de las probetas

En este apartado se ha analizado la capacidad de los 2 métodos de ensayo (DCB y WDT), para diferenciar entre una preparación superficial óptima y una preparación inadecuada. De cada configuración (A1/E1, A1/F1, T1/E1 o T1/F1), se han comparado los resultados de la tenacidad a la fractura de los siguientes tipos de probetas:

- Probetas con preparación superficial con tejido pelable (PS1) y temperatura de curado de la unión a 180 °C.
- Probetas con preparación superficial con tejido pelable (PS1) y temperatura de curado de la unión a 160 °C.
- Probetas con preparación superficial sin tejido pelable (PS2) y temperatura de curado de la unión a 180 °C.

Del ensayo DCB, se han obtenido los resultados de G_{IC} obtenidos a partir de los puntos de propagación según el método CBT, y estos valores se han comparado con los resultados de G_{IC} obtenidos a partir del ensayo WDT según el método del área y método directo, ver capítulo 7. Para determinar el grado de sensibilidad de cada método de reducción de datos, se han normalizado los resultados en función de los valores de la configuración PS1-180 (preparación superficial con tejido pelable y temperatura de curado de la unión a 180 °C). Esta configuración es la que se propone como óptima para producir las uniones adhesivas. En las figuras 8.21 y 8.22 se presentan los resultados de las configuraciones de unión adhesiva.

De los resultados de las figuras 8.21 y 8.22 se observa que en todos los lotes de probetas, la preparación superficial inadecuada proporciona valores de G_{IC} inferiores, entre un 10÷40% de los valores que se obtienen con la configuración óptima. Y el cambio de temperatura da valores del 60÷90% respecto a los obtenidos con la preparación superficial óptima, excepto en las probetas con una configuración de adherente-adhesivo A1/F1, en los cuales los valores de G_{IC} son superiores, tal y como se ha visto anteriormente.

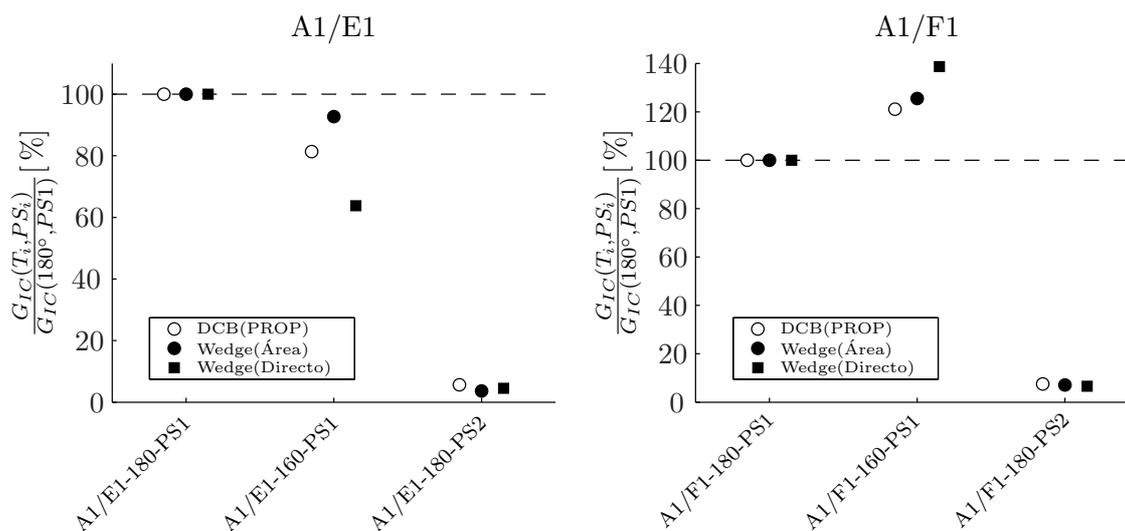


Figura 8.21: Comparación de la sensibilidad de los métodos de ensayo experimental para las configuraciones de probeta A1/E1 y A1/F1.

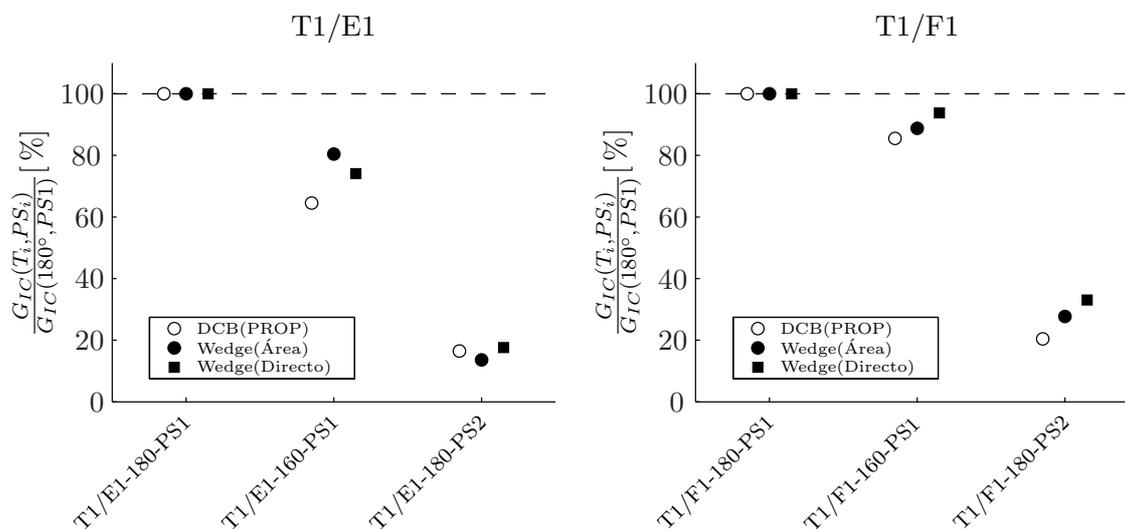


Figura 8.22: Comparación de la sensibilidad de los métodos de ensayo experimental para las configuraciones de probeta T1/E1 y T1/F1.

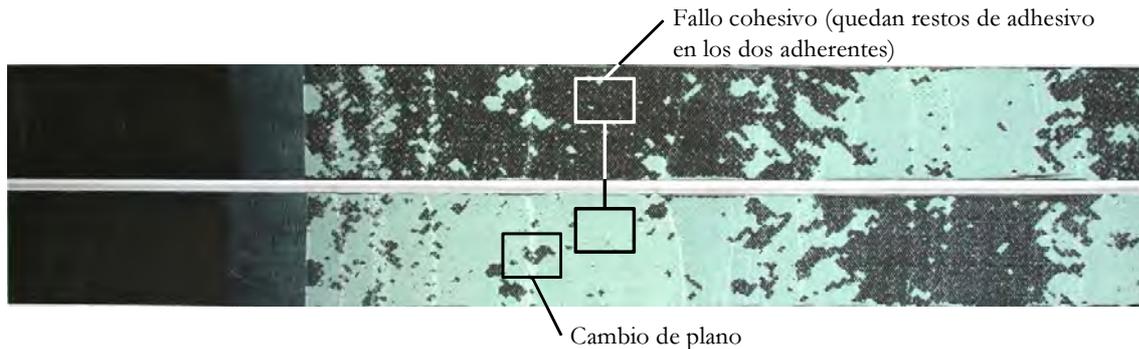
Del análisis de sensibilidad se observa que el ensayo WDT sigue la tendencia de los resultados obtenida con los ensayos de doble viga en voladizo, y que las diferencias entre los lotes de probetas con la configuración T1/F1-180-PS2, que se observaban en la figura 8.20 no resultan tan significativas a la vista de estos resultados.

8.7. Discusión de los resultados

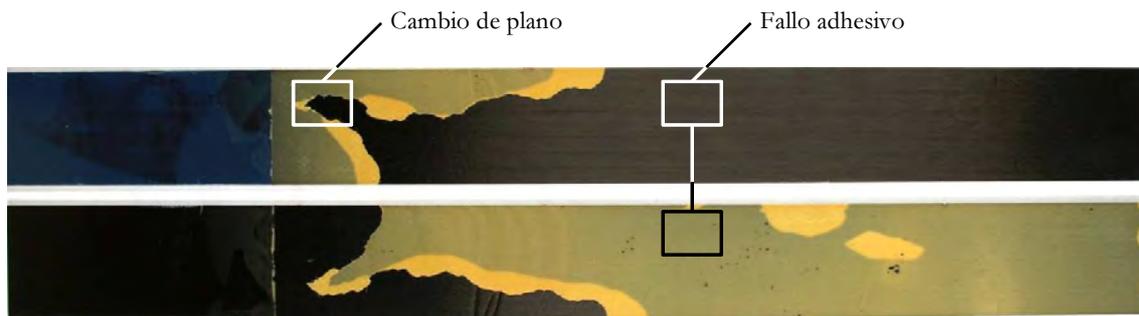
A partir de los resultados del análisis del coeficiente de variación de los distintos tipos de probetas, se ha observado que las probetas que se han producido con una preparación superficial inadecuada presentan una mayor dispersión en los resultados que las probetas con preparación superficial óptima. Estando, los resultados de estas últimas, sujetos al efecto *stick-slip*, además

de disponer de muy pocos puntos de la curva $P(\delta)$ para determinar G_{IC} .

Esta diferencia se debe al proceso de fractura que ha tenido lugar. En la figura 8.23 se muestran las superficies fracturadas de 2 uniones adhesivas. Una de las probetas es del tipo A1/F1/180-PS1 con resultados de G_{IC} de propagación de $1117.4 J/m^2$ y un coeficiente de variación del 9%. Y la otra probeta es del grupo A1/E1-180-PS2, con $G_{IC} = 38.2 J/m^2$ y con un $C_v = 40\%$.



(a) Superficie fracturada de la probeta A1/F1/11/04 del tipo A1/F1/180-PS1.



(b) Superficie fracturada de la probeta A1/E1/08/06 del tipo A1/E1/180-PS2.

Figura 8.23: Superficies fracturadas de dos probetas con dos tipos de preparación superficial: óptima (PS1) y inadecuada (PS2).

En la probeta del lote A1/F1/180-PS1, aunque el adhesivo se haya arrancado de una de las caras de la probeta, en la otra quedan algunos restos, de manera que el tipo de fallo que se produce es cohesivo (siendo más elevado el valor de G_{IC} en las probetas de este tipo). Por otra parte en la probeta del tipo A1/E1/180-PS2 al arrancarse el adhesivo, la superficie del adherente ha quedado completamente libre de restos, de manera que el fallo se ha producido en la interfase (fallo de tipo adhesivo).

A pesar de producirse un fallo cohesivo o adhesivo, ha habido cambios de plano del frente de grieta durante su propagación. Un cambio de plano conlleva que se deba romper la lámina de adhesivo por el plano medio, esta rotura tiene un efecto en el cálculo de G_{IC} incrementando su valor. Por consiguiente, las probetas con los valores de G_{IC} inferiores son más susceptibles al efecto del cambio de plano. El cambio de plano se produce de forma aleatoria en algunas de las probetas de un mismo lote. Por lo que si ocurre en una o dos probetas del lote y en el resto no

sucede, los valores de G_{IC} de estas probetas van a ser muy superiores al del resto del lote. De manera que el coeficiente de variación obtenido del lote va aumentar.

Por otra parte, a partir de los resultados del análisis fractográfico de las probetas se han obtenido diferencias en cuanto a las dimensiones de los poros que han aparecido en la superficie del adhesivo. Estas diferencias de diámetro entre las cavidades de la superficie del adhesivo obtenidas en las fase de crecimiento rápido y lento del frente de grieta, proporcionan información sobre el tipo de fractura que tiene lugar en estas regiones.

En la fase de crecimiento rápido de la grieta se han obtenido cavidades de pequeño diámetro en el adhesivo y superficies lisas en las zonas de la rotura de la resina del adherente. De manera que el tipo de fractura que se produce en estas regiones es frágil. En cambio, en las zonas de crecimiento lento del frente de grieta, el diámetro de las cavidades ha aumentado y no se han observado signos de rotura frágil del adherente. Las cavidades han aumentado de diámetro porque ha habido una deformación plástica en esta región, produciéndose una deformación permanente en la lámina de adhesivo.

Finalmente, a partir de los resultados del ensayo WDT, se ha observado, en algunas de las probetas, que el valor de F_{PUSH} en la fase de propagación no es del todo estable, se producen incrementos o disminuciones de su valor a lo largo de un determinado incremento del desplazamiento de la cuña. Estos incrementos o decrementos del valor de F_{PUSH} se atribuyen a dos fenómenos, por una parte la rugosidad de la superficie sobre la cuál avanza la cuña no tiene una rugosidad uniforme, y por otra parte durante la realización del ensayo experimental se observo, que en algunas de las probetas la cuña no quedaba totalmente centrada con el plano del adhesivo. Esta desalineación ha podido provocar las variaciones de F_{PUSH} en la curva de resultados.

8.8. Valoración final del ensayo WDT

A partir de los resultados obtenidos, se observa que no hay diferencias significativas ni en el ajuste de G_{IC} , ni en el análisis de la sensibilidad, entre el ensayo experimental DCB y el WDT. Por consiguiente, puede considerarse el ensayo WDT como un buen candidato a substituir el ensayo DCB en grandes campañas de ensayo. Puesto que su implementación y realización es mucho mas sencilla que la del DCB.

El principal inconveniente que presenta el ensayo es que considera que μ es homogéneo en toda la superficie fracturada, cuando en realidad no es cierto. Sin embargo los resultados no se ven excesivamente afectados por este problema. Y si su ejecución se compara con la del ensayo DCB, además de proporcionar información similar, el ensayo WDT resulta sensiblemente mucho más sencillo de realizar.

Capítulo 9

Conclusiones y futuras líneas de trabajo

9.1. Resumen del trabajo realizado

En este trabajo se ha presentado un análisis de los ensayos experimentales, que se utilizan para evaluar la calidad de las uniones adhesivas entre laminados de material composite. Se han considerado dos tipos de ensayo: el de doble viga en voladizo (DCB), que es el más utilizado actualmente, y un ensayo alternativo de propagación de grieta por avance forzado de una cuña (o *wedge driven test*, WDT).

En primer lugar, se ha realizado una revisión del estado del arte de los ensayos experimentales existentes que están normalizados, y los avances que se han realizado para pasar del análisis con adherentes metálicos a uniones entre laminados de composite. También se han analizado las estrategias de simulación numérica para este tipo de uniones, y los parámetros que tienen un efecto directo en la determinación de la tenacidad a la fractura en modo I del adhesivo.

A continuación, se han descrito los métodos de fabricación de las probetas que se posteriormente han analizado, tanto para caracterizar los constituyentes de la unión como las uniones adhesivas. Y se han indicado los ensayos experimentales que se han llevado a cabo para caracterizar las propiedades experimentales de los constituyentes de la unión.

Seguidamente, se han presentado las mejoras realizadas en el ensayo de doble viga en voladizo. Una de estas mejoras ha sido el desarrollo de un nuevo sistema de sujeción mecánico, en los laterales de la probeta, para reducir los tiempos de preparación y montaje del ensayo. Y la otra, el desarrollo de un procedimiento para el tratamiento de los datos experimentales, en presencia de propagación discontinua del frente de grieta.

Por otra parte, se ha desarrollado un método alternativo al ensayo de doble viga en voladizo, el ensayo de propagación de grieta por avance forzado de cuña (o *Wedge Driven Test*, WDT). A diferencia de otros ensayos de este tipo, el método que se propone tiene en cuenta el efecto

de la fricción entre la cuña y la probeta, de manera que permite el uso de utillajes con un diseño simple y fáciles de montar. Y además se calcula el valor de G_{IC} sin tener que medir la posición del frente de grieta durante todo el ensayo, simplificando el procedimiento experimental.

Finalmente, se han comparado los resultados de los dos métodos de ensayo, doble viga en voladizo y propagación de grieta por avance forzado de cuña. En las campañas de ensayo para realizar la comparación, se han analizado las 4 configuraciones de probeta que se han producido anteriormente, también se han comparado uniones adhesivas con dos temperaturas de curado del adhesivo y dos preparaciones superficiales de los adherentes, con el objetivo de tener un amplia clasificación de tipos de unión.

9.2. Conclusiones

Las conclusiones que se presentan en este trabajo hacen referencia a los resultados obtenidos con las mejoras realizadas en el ensayo de doble viga en voladizo y en el desarrollo del ensayo de propagación de grieta por avance forzado de cuña (WDT).

En relación al ensayo de doble viga en voladizo se presentan las siguientes conclusiones:

- Se ha mejorado el procedimiento experimental que existe actualmente, reduciendo los tiempos de preparación del ensayo, mediante el diseño de unos nuevos utillajes de sujeción de la probeta a la máquina de ensayo. El diseño de los nuevos utillajes se ha validado mediante una campaña experimental, comparando los resultados con otro tipo de utillajes propuestos por la norma de ensayos ISO 15024.
- Se ha revisado el protocolo de ensayo actual, teniendo en cuenta el efecto de la propagación discontinua del frente de grieta, y se ha propuesto una metodología experimental para determinar G_{IC} para determinar la calidad de la unión adhesiva.
- Se han realizado 3 campañas experimentales con uniones adhesivas, haciendo uso del nuevo procedimiento de ensayo, para determinar la calidad de la preparación superficial de las uniones adhesivas de las cuales se disponía.
- Se ha realizado un análisis fractográfico de las probetas ensayadas para ver que efecto tiene la propagación discontinua del frente de grieta (*stick-slip*). A partir de los resultados, se ha observado que en la zona de crecimiento lento del frente de grieta el adhesivo presenta plasticidad.

En relación al ensayo de propagación de grieta por avance forzado de cuña, se presentan las siguientes conclusiones:

- Se ha desarrollado una nueva metodología de ensayo para uniones adhesivas entre materiales composites, con el objetivo de que fuera más rápida y simple de realizar que el actual ensayo de doble viga en voladizo. El nuevo método que se ha desarrollado es un ensayo de propagación de grieta por avance forzado de cuña.

- Se ha diseñado un utillaje para poder realizar el ensayo experimental, introduciendo de forma automática la cuña en la probeta, sin tener que abrir manualmente los brazos de la probeta. El diseño de los utillajes se ha realizado lo más sencillo posible para reducir al máximo el tiempo de montaje de la probeta en la máquina de ensayo.
- Se han desarrollado diferentes métodos de ajuste de los datos experimentales a partir de los datos de la fuerza de empuje de la cuña (F_{PUSH}) y de su desplazamiento, sin tener en cuenta la longitud de grieta a . Para poder determinar el valor de la tenacidad a la fractura en modo I del adhesivo, en primer lugar ha sido necesario determinar el coeficiente de fricción entre la cuña y la probeta. Se ha demostrado, que para determinar el coeficiente de fricción, es necesario encontrar una superficie virgen fracturada por la cuña. Esto provoca que el ensayo experimental tenga que realizarse en dos etapas de avance y retroceso de la cuña.
- Alternativamente, se ha desarrollado un método de ensayo experimental directo para determinar el valor de G_{IC} . El método consiste en realizar un solo ciclo de avance y retroceso de la cuña, sin necesidad de tener que determinar el coeficiente de fricción. A partir de las fuerzas que intervienen durante el avance y retroceso de la cuña se ha calculado G_{IC} .
- Del mismo modo que en los ensayos de doble viga en voladizo, se ha realizado una campaña experimental con el mismo tipo de probetas, preparación superficial y temperatura de curado del adhesivo. Los resultados de los ensayos experimentales se han comparado con los del DCB. Los valores promedios de los lotes de probeta han dado resultados similares a los del ensayo de doble viga en voladizo, indicativo de que el ensayo es válido para analizar la calidad de la preparación superficial de las uniones adhesivas, sin embargo se han obtenido más dispersión de los resultados por lo que se recomienda, en futuros trabajos, analizar los lotes de probetas con un número superior de probetas por lote.
- A partir de los resultados experimentales, se ha realizado un estudio de la sensibilidad superficial de los dos ensayos (DCB y WDT). Como resultado del estudio, se ha comprobado que el ensayo WDT permite diferenciar una preparación superficial óptima de una preparación superficial inadecuada, del mismo modo que lo hace el ensayo de doble viga en voladizo.
- De las simulaciones numéricas del ensayo de propagación de grieta por avance forzado de cuña (WDT) se ha observado que la longitud cohesiva produce diferencias entre los resultados de la simulación numérica y los resultados analíticos. Cuanto mayor es la longitud cohesiva mayor es el efecto. Sin embargo se ha comprobado numéricamente que una vez la l_{cz} se ha estabilizado, ésta deja de tener influencia en el ajuste de μ .

9.3. Futuras líneas de trabajo

De los resultados de las simulaciones numéricas que se han llevado a cabo con el ensayo WDT, se ha observado que existen diferencias entre el modelo analítico y el modelo numérico. Estas

diferencias están directamente relacionadas con la longitud de zona cohesiva. El ensayo WDT resulta ser mucho más sensible al efecto de la longitud cohesiva que el ensayo de doble viga en voladizo, porque durante la propagación, la longitud de grieta permanece estable y es siempre mucho más pequeña que en el ensayo de doble viga en voladizo.

Los modelos cohesivos, que actualmente se utilizan para analizar los procesos de deslaminación o procesos de fractura de las uniones adhesivas, incluyen en su formulación ciertos parámetros que no pueden ser directamente determinados mediante un ensayo experimental, como por ejemplo el umbral de tensión que define el criterio de iniciación de la degradación, parámetro τ^0 . El ajuste de estos valores se consigue comparando el modelo numérico con los resultados de un ensayo experimental de fractura en modo puro I, II o modo mixto I-II. Y se extrapolan los parámetros del modelo numérico a una simulación de un componente estructural con una geometría más compleja.

La determinación de algunos de estos parámetros, que están directamente relacionados con la longitud de la zona cohesiva, supondría un avance en el campo de los ensayos virtuales, porque para un determinado material podrían determinarse las variables del modelo cohesivo de forma directa.

Uno de los mecanismos para intentarlo, sería corregir la longitud de grieta con un parámetro relacionado con la longitud cohesiva. Con el modelo analítico que se presenta en este trabajo esto no es posible, porque ya existe un parámetro de ajuste relacionado directamente con la longitud de grieta, el parámetro a_0 . Para conseguir determinar la longitud cohesiva, tendría que determinarse el valor de a_0 durante el ensayo experimental, y realizar un ajuste de la curva $F_{PUSH}(\delta)$ considerando la longitud cohesiva como parámetro de ajuste.

Por otra parte, a partir de los resultados experimentales de los ensayos WDT, se ha observado que, en determinados casos, el valor de F_{PUSH} de la curva de propagación no permanece constante durante toda la fase de propagación. En algunas de las probetas, estos cambios de F_{PUSH} pueden atribuirse a variaciones del coeficiente de fricción de la superficie por la cual se desplaza la cuña. Pero en otras ocasiones esto puede deberse a una mala alineación entre la cuña y la probeta. Mediante simulaciones numéricas se pretende analizar la influencia de la mala colocación de la cuña en los resultados del ajuste del coeficiente de fricción y en la determinación de la tenacidad a la fractura en modo I del adhesivo.

También, el autor de este trabajo propone realizar nuevas campañas de ensayo para estudiar la validez del método a diferentes condiciones de humedad y temperatura, analizar el efecto del espesor de los adherentes en la determinación de la tenacidad a la fractura de la unión adhesiva, y realizar la medición del coeficiente de fricción en probetas con a_0 conocida para analizar la influencia de $\Delta G(\Delta\mu)$.

Finalmente, se propone realizar algunas mejoras en el utillaje diseñado, como por ejemplo modificar el sistema de sujeción de la probeta con una base que permita la rotación libre de la

probeta, para poderla alinear de forma automática con la cuña.

Bibliografía

- Adams, R. D., Cowap, J. W., Farquharson, G. M., Margary, G. M., Vaughn, D., 2009. The relative merits of the Boeing wedge test and the double cantilever beam test for assessing the durability of adhesively bonded joints, with particular reference to the use of fracture mechanics. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 29, 609–620.
- AITM 1-0053, 2006. Carbon fibre reinforced plastics – Determination of fracture toughness energy of bonded joints – Mode I – G1C. Vol. AITM, Airbus Test Method Standard.
- Anderson, T. L., 1995. *Fracture mechanics: fundamentals and applications*. CRC Press, Boca Raton.
- Armstrong, K. B., 1996. Effect of absorbed water in CFRP composites on adhesive bonding. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 16 (1), 21.
- Ashcroft, I. A., Hughes, D. J., Shaw, S. J., 2001. Mode I fracture of epoxy bonded composite joints: 1. Quasi-static loading. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 21 (2), 87–99.
- ASTM D1002-05, 2005. Standard test method for apparent shear strength of single-lap-joint adhesively bonded metal specimens by tension loading (metal-to-metal). Vol. *Annual Book of ASTM Standards*. ASTM International, West Conshohocken, PA, Ch. 15.06.
- ASTM D1781-98(2004), 2004. Standard test method for climbing drum peel for adhesives. Vol. *Annual Book of ASTM Standards*. ASTM International, West Conshohocken, PA, Ch. 15.06.
- ASTM D1876-08, 2008. Standard Test Method for Peel Resistance of Adhesives (T-Peel Test). Vol. *Annual Book of ASTM Standards*. ASTM International, West Conshohocken, PA, Ch. 15.06.
- ASTM D3039/D3039M-08, 2008. Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials. Vol. *Annual Book of ASTM Standards*. ASTM International, West Conshohocken, PA, Ch. 15.03.
- ASTM D3165-07, 2007. Standard test method for strength properties of adhesives in shear by tension loading of single-lap-joint laminated assemblies. Vol. *Annual Book of ASTM Standards*. ASTM International, West Conshohocken, PA, Ch. 15.06.
- ASTM D3167-03a(2004), 2004. Standard test method for floating roller peel resistance of adhesives. Vol. *Annual Book of ASTM Standards*. ASTM International, West Conshohocken, PA, Ch. 15.06.

- ASTM D3433-99(2005), 2005. Standard test method for fracture strength in cleavage of adhesives in bonded metal joints. Vol. Annual Book of ASTM Standards. ASTM International, West Conshohocken, PA, Ch. 15.06.
- ASTM D3518/D3518M-94(2007), 2007. Standard test method for in-plane shear response of polymer matrix composite materials by tensile test of a $\pm 45^\circ$ laminate. Vol. Annual Book of ASTM Standards. ASTM International, West Conshohocken, PA, Ch. 15.03.
- ASTM D3528-96(2008), 2008. Standard test method for strength properties of double lap shear adhesive joints by tension loading, astm international Edition. Vol. Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken, PA, Ch. 15.06.
- ASTM D3762-03, 2003. Standard test method for adhesive-bonded surface durability of aluminium (wedge test). Vol. Annual Book of ASTM Standards. ASTM International, West Conshohocken, PA, Ch. 15.06.
- ASTM D5528-01(2007)e3, 2007. Standard test method for mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber reinforced polymer matrix composites. Vol. Annual Book of ASTM Standards. ASTM International, West Conshohocken, PA, Ch. 15.03.
- ASTM D6671/D6671M-06, 2006. Standard test method for mixed mode I-mode II interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber reinforced polymer matrix composites. Vol. Annual Book of ASTM Standards. ASTM International, West Conshohocken, PA, Ch. 15.03.
- ASTM D903-98(2004), 2004. Standard test method for peel or stripping strength of adhesive bonds, astm international Edition. Vol. Annual Book of ASTM Standards. West Conshohocken, PA, Ch. 15.06.
- Bardis, J. D., Kedward, K. T., 2001. Effects of surface preparation on long-term durability of composite adhesive bonds. Tech. Rep. DOT/FAA/AR-01/8.
- Bardis, J. D., Kedward, K. T., 2002. Surface preparation effects on mode I testing of adhesively bonded composite joints. *Journal of Composites Technology & Research* 24 (1), 30–37.
- Blackman, B., Kinloch, A., Taylor, A., Wang, Y., 2000. The impact wedge-peel performance of structural adhesives. *Journal of Materials Science* 35 (8), 1867–1884.
- Blackman, B. R. K., Kinloch, A. J., 2001. Fracture tests for structural adhesive joints. Fracture mechanics testing methods for polymers, adhesives and composites. Elsevier Science.
- Blackman, B. R. K., Kinloch, A. J., Paraschi, M., Teo, W. S., 2003. Measuring the mode I adhesive fracture energy, $G(IC)$, of structural adhesive joints: the results of an international round-robin. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 23 (4), 293–305.
- Blanco, N., 2005. Variable mixed-mode delamination in composite laminates under fatigue conditions. Thesis. Advisor: Dr. Josep Costa Balanzat.
- Blanco, N., Costa, J., Gamstedt, E. K., 2008. Mechanical hinge system for delamination tests in beam-type composite specimens. *Composites Science and Technology* 68 (7-8), 1837–1842.

- Brandt, F., 1998. New load introduction concept for improved and simplified delamination beam testing. *Experimental Techniques* 22 (1), 17–20.
- BS 7991, 2001. Determination of the mode I adhesive fracture energy, GIC, of structural adhesives using the double cantilever beam (DCB) and tapered double cantilever beam (TDCB) specimens. Vol. British Standards.
- Chen, B., Dillard, D. A., 2001. The effect of the T-stress on crack path selection in adhesively bonded joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 21 (5), 357–368.
- Cognard, J., 1986. The mechanics of the wedge test. *The Journal of Adhesion* 20 (1), 1–13.
- Cognard, J., 1987. Quantitative measurement of the energy of fracture of an adhesive joint using the wedge-test. *The Journal of Adhesion* 22 (2), 97–108.
- Crocombe, A. D., Bigwood, D., 1992. Development of a full elastoplastic adhesive joint design analysis. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design* 27 (4), 211–218.
- Daghyani, H., Ye, L., Mai, Y., 1995. Mode-I fracture behaviour of adhesive joints .1. Relationship between fracture energy and bond thickness. *The Journal of Adhesion* 53 (3-4), 149–162.
- Estefani, A., Cañas, J., París, F., 2007. Estudios preliminares para definir un nuevo ensayo de pelado en uniones adhesivas composite-composite. In: *Actas del VII Congreso Nacional de Materiales Compuestos*. pp. 627–634.
- Ferracin, T., Landis, C. M., Delannay, F., Pardoën, T., 2003. On the determination of the cohesive zone properties of an adhesive layer from the analysis of the wedge-peel test. *International Journal of Solids and Structures* 40 (11), 2889–2904.
- Flinn, B., Phariss, M. K., 2006. The effect of peel-ply surface preparation variables on bond quality. Tech. Rep. DOT/FAA/AR-06/28.
- Glessner, A. L., Takemori, M. T., Vallance, M. A., Gifford, S. K., 1989. Mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional carbon fiber composites using a novel wedge-driven delamination design. ASTM Special Technical Publications 1012.
- Guo, S., Dillard, D. A., Nairn, J. A., 2006. Effect of residual stress on the energy release rate of wedge and DCB test specimens. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 26 (4), 285–294.
- Hart-Smith, L. J., 1999. A peel-type durability test coupon to assess interfaces in bonded, co-bonded, and co-cured composite structures. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 19 (2-3), 181–191.
- Ikeda, T., Yamashita, A., Lee, D., Miyazaki, M., 2000. Failure of a ductile adhesive layer constrained by hard adherends. *Journal of Engineering Materials and Technology-Transactions of the Asme* 122 (1), 80–85.
- Ilyas, M., Espinosa, C., Lachaurd, F., Salaün, M., 2009. Simulation of dynamic delamination and mode I energy dissipation. In: *7th European LS-DYNA Conference*.

- ISO 15024, 2001. Fibre-reinforced plastic composites – Determination of mode I interlaminar fracture toughness, GIC, for unidirectionally reinforced materials. Vol. ISO International Standards.
- ISO 25217, 2009. Adhesives – Determination of the mode I adhesive fracture energy of structural adhesive joints using double cantilever beam and tapered double cantilever beam specimens. Vol. ISO International Standards.
- Kafkalidis, M. S., Thouless, M. D., Yang, Q. D., Ward, S. M., 2000. Deformation and fracture of adhesive layers constrained by plastically-deforming adherents. *Journal of Adhesion Science and Technology* 14 (13), 1593–1607.
- Kanninen, M. F., 1973. Augmented double cantilever beam model for studying crack-propagation and arrest. *International Journal of Fracture* 9 (1), 83–92.
- Kim, H., 2007. Fracture surface morphology in thermosets modified with hollow microspheres. *Journal of Applied Polymer Science* 105 (6), 3287–3294.
- McGowan, D. M., Ambur, D. R., 1998. Damage characteristics and residual strength of composite sandwich panels impacted with and without compression loading. In: 39th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference.
- Moidu, A., Sinclair, A., Spelt, J., 1998. On the determination of fracture energy using the peel test. *Journal of Testing and Evaluation* 26 (3), 247.
- Mostovoy, S., Ripling, E. J., Bersch, C. F., 1971. Fracture toughness of adhesive joints. *Journal of Adhesion* 3 (2), 125–144.
- Olsson, R., 1992. Simplified improved beam analysis of the DCB specimen. *Composites Science and Technology* 43 (4), 329.
- Olsson, R., 2007. On improper foundation models for the DCB specimen. 16th International Conference on Composite Materials.
- Ozdil, F., Carlsson, L. A., 1999. Beam analysis of angle-ply laminate DCB specimens. *Composites Science and Technology* 59 (2), 305.
- Pardoen, T., Ferracin, T., Landis, C. M., Delannay, F., 2005. Constraint effects in adhesive joint fracture. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 53 (9), 1951–1983.
- Penado, F. E., 1993. A closed form solution for the energy-release rate of the double cantilever beam specimen with an adhesive layer. *Journal of Composite Materials* 27 (4), 383–407.
- Petrie, E. M., 2000. Handbook of adhesives and sealants. McGraw-Hill, New York, Edward M. Petrie; McGraw-Hill handbooks.
- Ripling, E. J., Mostovoy, S., Patrick, R. L., 1964. Application of fracture mechanics to adhesive joints. ASTM Special Technical Publications 360.

- Sener, J. Y., Ferracin, T., Caussin, L., Delannay, F., 2002. On the precision of the wedge-opened double cantilever beam method for measuring the debonding toughness of adhesively bonded plates. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 22 (2), 129–137.
- Shields, J., 1985. *Adhesives handbook*. Butterworths, London.
- Thouless, M. D., Adams, J. L., Kafkalidis, M. S., Ward, S. M., Dickie, R. A., Westerbeek, G. L., 1998. Determining the toughness of plastically deforming joints. *Journal of Materials Science* 33, 189–197.
- Turon, A., Camanho, P., Costa, J., Davila, C., 2004. An interface damage model for the simulation of delamination under variable-mode ratio in composite materials. Tech. Rep. NASA/TM-2004-213277.
- Turon, A., Camanho, P., Costa, J., Davila, C., 2006. A damage model for the simulation of delamination in advanced composites under variable-mode loading. *Mechanics of Materials* 38 (11), 1072–1089.
- Turon, A., Costa, J., Camanho, P., Maimi, P., 2008. Analytical and numerical investigation of the length of the cohesive zone in delaminated composite materials. Vol. 10 of *Mechanical Response of Composites*. Springer Netherlands.
- Turon, A., Davila, C., Camanho, P., Costa, J., 2007. An engineering solution for mesh size effects in the simulation of delamination using cohesive zone models. *Engineering Fracture Mechanics* 74 (10), 1665–1682.
- Tvergaard, V., Hutchinson, J. W., 1992. The relation between crack-growth resistance and fracture process parameters in elastic plastic solids. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 40 (6), 1377–1397.
- Tvergaard, V., Hutchinson, J. W., 1993. The influence of plasticity on mixed-mode interface toughness. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 41 (6), 1119–1135.
- Tvergaard, V., Hutchinson, J. W., 1994. Toughness of an interface along a thin ductile layer joining elastic solids. *Philosophical magazine. A, Physics of condensed matter, defects and mechanical properties* 70 (4), 641–656.
- Tvergaard, V., Hutchinson, J. W., 1996. On the toughness of ductile adhesive joints. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids* 44 (5), 789–800.
- Vicens, J., Blanco, N., Corbella, B., Costa, J., Baraibar, I., Cabrerizo, F., Pintado, J. M., Canteli, A. F., Viña, J. A., Argüelles, A., 2006. New mechanical fixtures for load introduction in DCB tests: design and performance. Porto, Portugal.
- Wang, R. X., Cui, J., Sinclair, A. N., Spelt, J. K., 2003a. Strength of adhesive joints with adherend yielding: I. Analytical model. *Journal of Adhesion* 79 (1), 23–48.
- Wang, R. X., Sinclair, A. N., Spelt, J. K., 2003b. Strength of adhesive joints with adherend yielding: II. Peel experiments and failure criteria. *Journal of Adhesion* 79 (1), 49–66.

- Williams, J. G., 1989. End corrections for orthotropic DCB specimens. *Composites Science and Technology* 35 (4), 367–376.
- Williams, J. G., 1998. Friction and plasticity effects in wedge splitting and cutting fracture tests. *Journal of Materials Science* 33 (22), 5351–5357.
- Yan, C., Mai, Y. W., Yuan, Q., Ye, L., Sun, J., 2001. Effects of substrate materials on fracture toughness measurement in adhesive joints. *International Journal of Mechanical Sciences* 43 (9), 2091–2102.

Anexo A

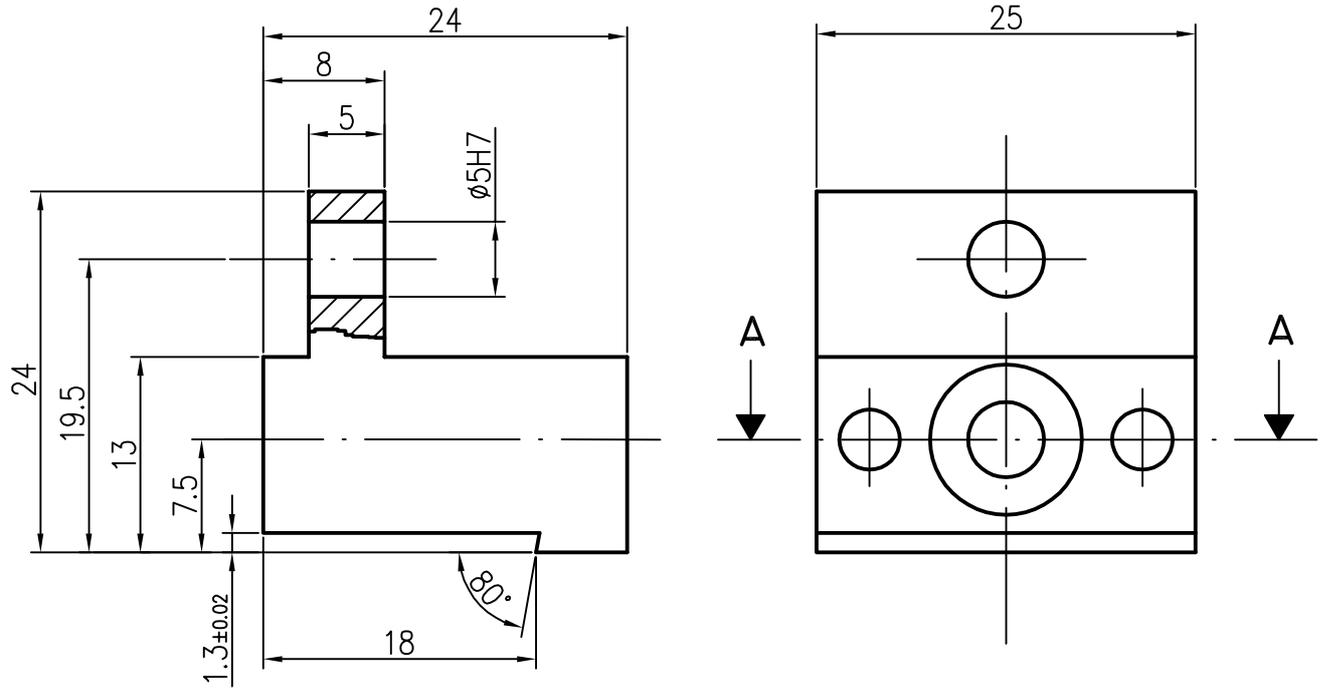
Planos utillajes

En este anexo se incluyen los planos de los utillajes, que se han diseñado y fabricado, para realizar los ensayos experimentales de doble viga en voladizo y el ensayo de propagación de grieta por avance forzado de cuña (WDT).

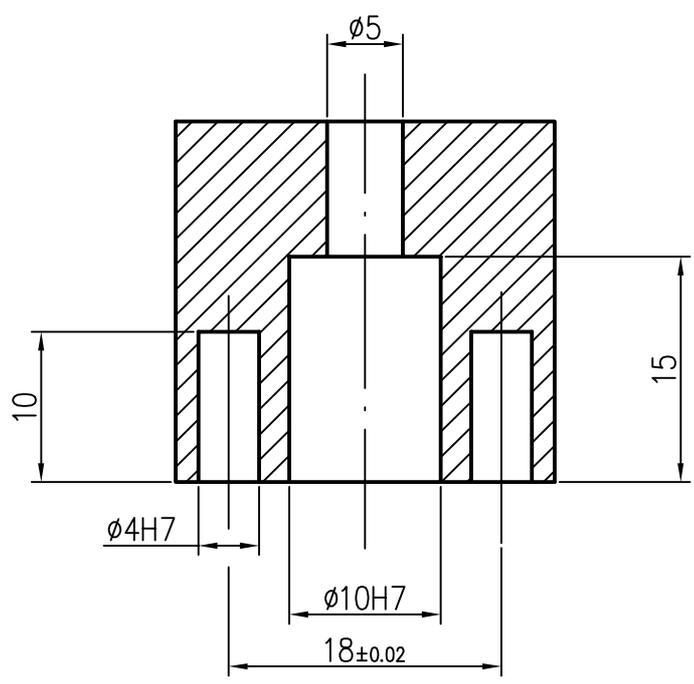
Para realizar los ensayos de doble viga en voladizo (DCB) se ha utilizado el utillaje de agarre lateral (*Side Clamped Beam*, SCB) presentado en el capítulo 4. Y para realizar el ensayo WDT se ha utilizado la cuña y los mecanismos de apertura de los brazos de la probeta descritos en el capítulo 7. En la tabla A.1 se indican los planos de cada utillaje.

Utillaje	Nº plano	Descripción	Cantidad
SCB	SCB-01/05	Bloque: base cilíndrica	2
	SCB-02/05	Bloque: base desplazable	2
	SCB-03/05	Adaptador máquina	2
	SCB-04/05	Pasador 4x18mm	4
	SCB-05/05	Pasador 5mm	2
Cuña	WED-01/05	Cuña	1
	WED-02/05	Mecanismo de apertura: postizo	2
	WED-03/05	Mecanismo de apertura: bloque de apriete	2
	WED-04/05	Soporte de unión cuña-actuador	1
	WED-05/05	Clip de cobre	2

Tabla A.1: Listado de los planos de los utillajes.



SECCIÓN A-A

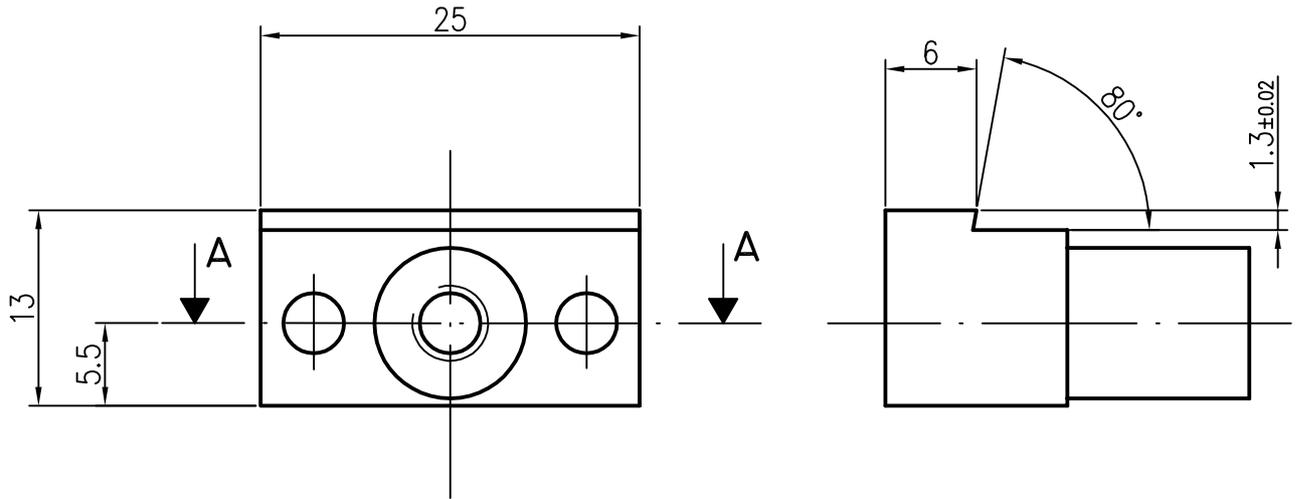


MATERIAL: INOX
CANTIDAD: 2

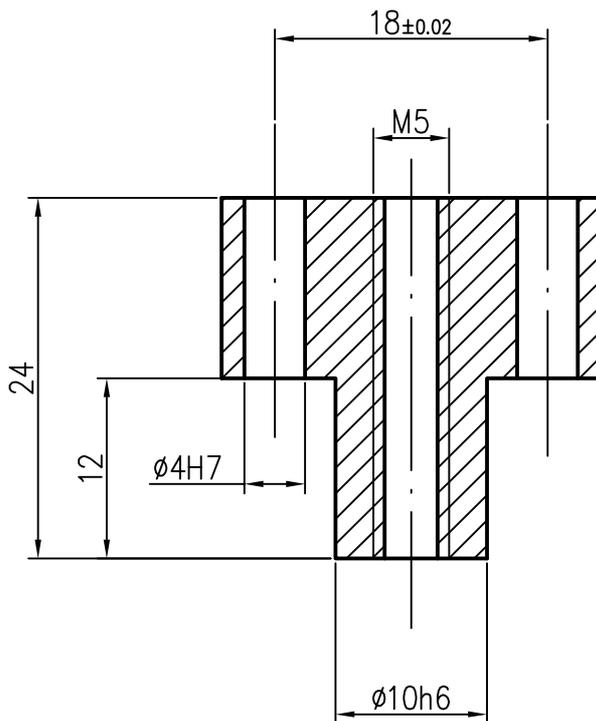
TOLERANCIAS NO INDICADAS SEGÚN NORMA ISO 2768-M

	Fecha	Nombre			Escuela Politécnica Superior	
Dibujado	07-03-07	Elio	Pajares			
Compro.		Jordi	Renart			
Escala	Bloque: base cilíndrica				Nº plano	SCB-01/05
2/1					Sustituye a:	
					Especialidad	

N6



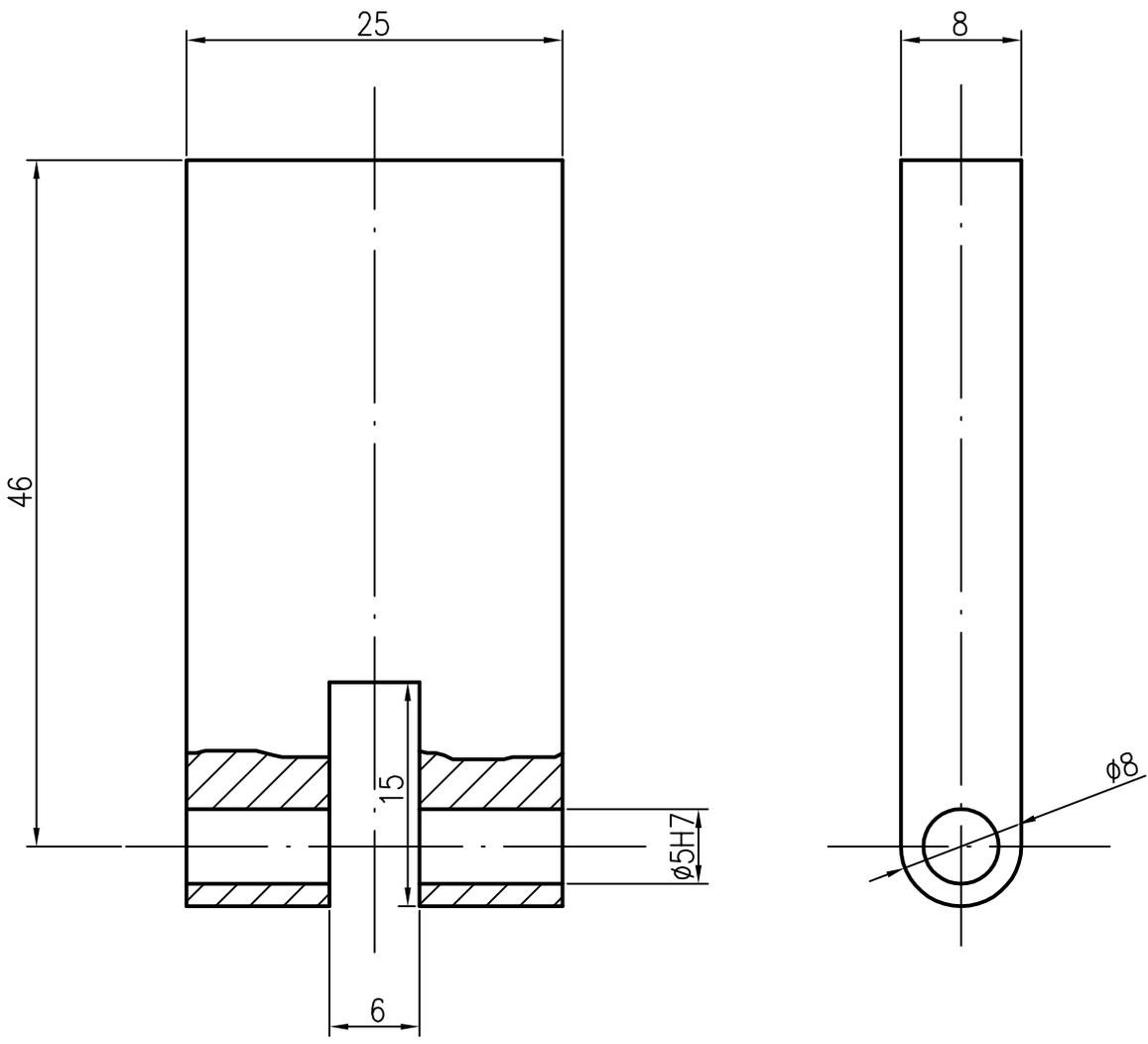
SECCIÓN A-A



MATERIAL: INOX
CANTIDAD: 2

TOLERANCIAS NO INDICADAS SEGÚN NORMA ISO 2768-M

	Fecha	Nombre		 Escuela Politécnica Superior
Dibujado	08-03-07	Elio	Pajares	
Compro.		Jordi	Renart	
Escala	Bloque: base desplazable			Nº plano SCB-02/05
2/1				Sustituye a:
				Especialidad

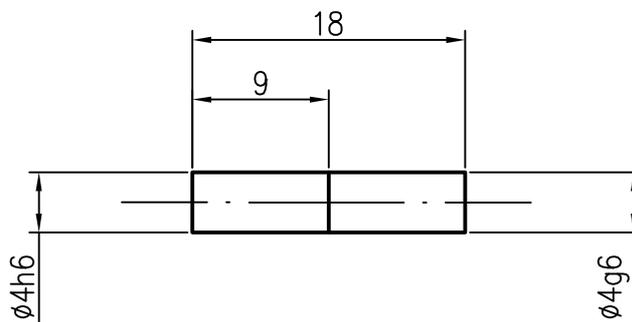


MATERIAL: INOX
 CANTIDAD: 2

TOLERANCIAS NO INDICADAS SEGÚN NORMA ISO 2768-M

	Fecha	Nombre		 Escuela Politécnica Superior
Dibujado	03-12-07	Elio	Pajares	
Compro.		Jordi	Renart	
Escala	<h1>Adaptador máquina</h1>			Nº plano SCB-03/05
2/1				Sustituye a:
				Especialidad

N6

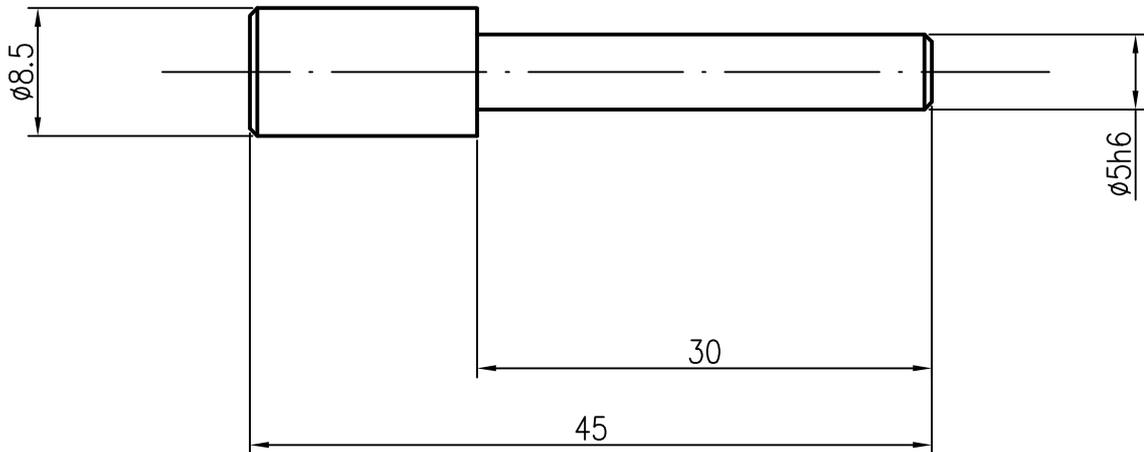


MATERIAL: INOX
CANTIDAD: 4

TOLERANCIAS NO INDICADAS SEGÚN NORMA ISO 2768-M

	Fecha	Nombre		 UdG	Escuela Politécnica Superior
Dibujado	09-03-07	Elio	Pajares		
Compro.		Jordi	Renart		
Escala 2/1	Pasador 4x18mm			Nº plano SCB-04/05	
				Sustituye a:	
				Especialidad	

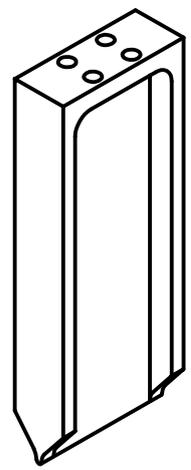
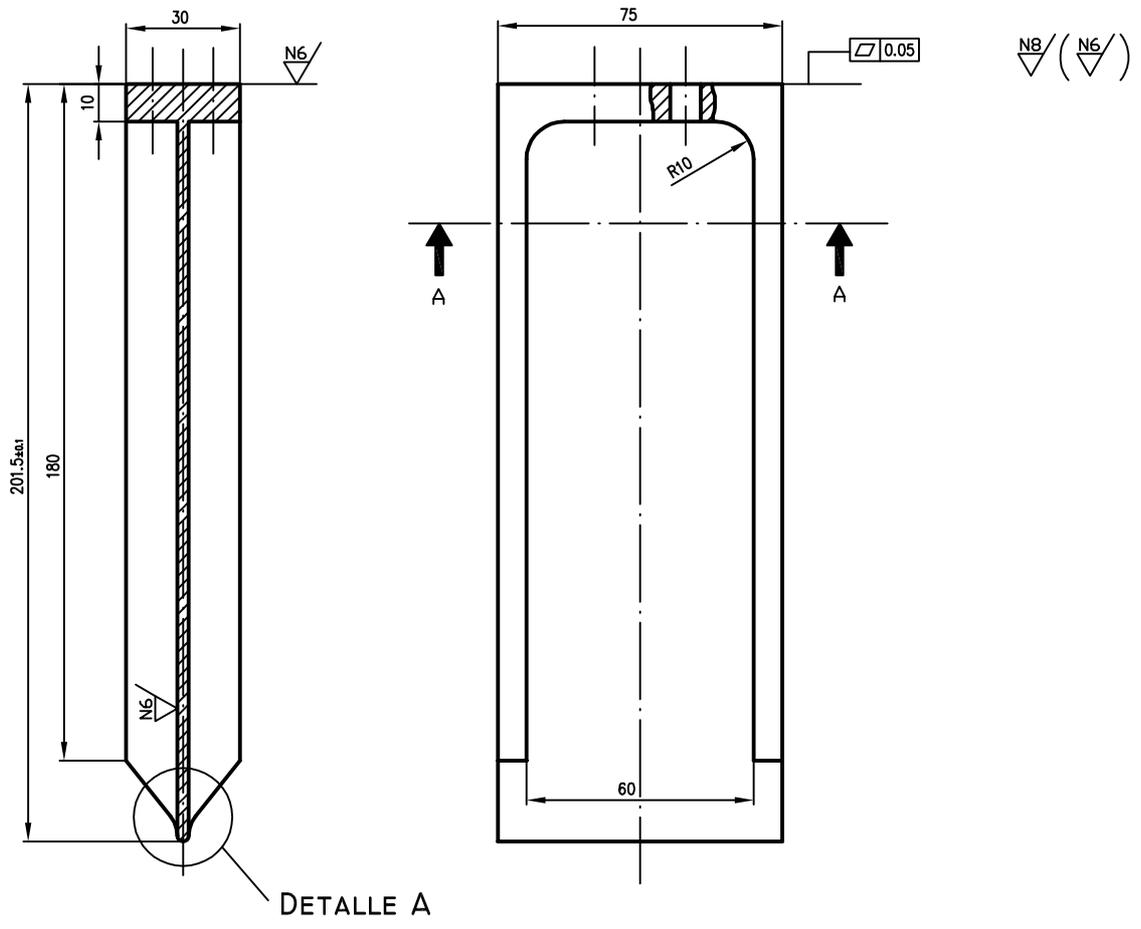
N6



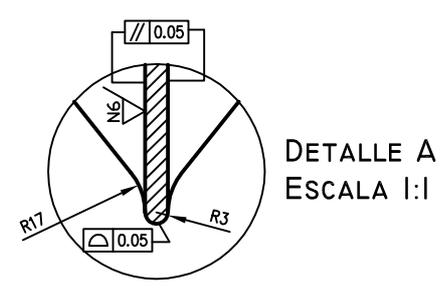
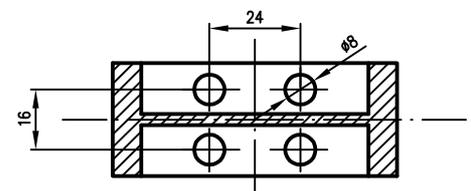
MATERIAL: INOX
 CANTIDAD: 2

TOLERANCIAS NO INDICADAS SEGÚN NORMA ISO 2768-M

	Fecha	Nombre		 UdG	Escuela Politécnica Superior
Dibujado	09-03-07	Elio	Pajares		
Compro.		Jordi	Renart		
Escala	<h1>Pasador 5mm</h1>			Nº plano	SCB-05/05
2/1				Sustituye a:	
				Especialidad	



CORTE A-A



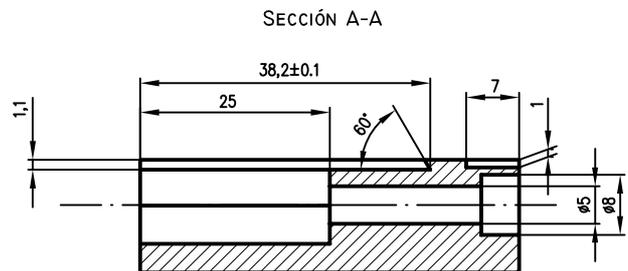
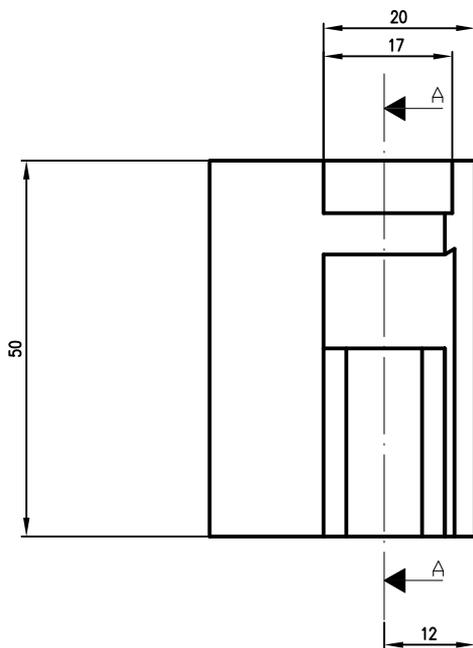
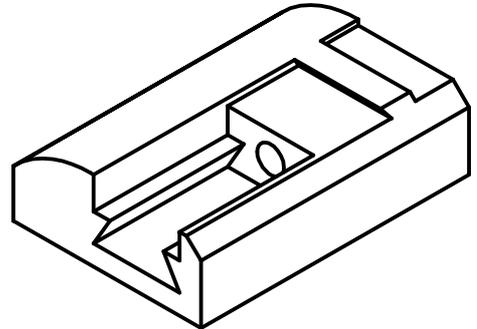
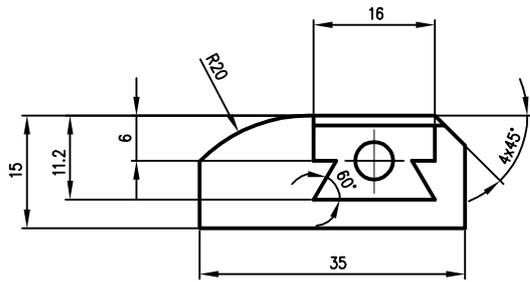
DETALLE A
ESCALA 1:1

MATERIAL: DURALUMINIO 7075 T6 o 6061
CANTIDAD: 1

TOLERANCIAS NO INDICADAS SEGÚN NORMA ISO 2768-M

	Fecha	Nombre		 UdG	Escuela Politécnica Superior
Dibujado	22-05-06	Elio	Pajares		
Compro.		Jordi	Renart		
Escala	<h1>Cuña</h1>				Nº plano WED-01/05
1/2					Sustituye a:
					Especialidad

N8/

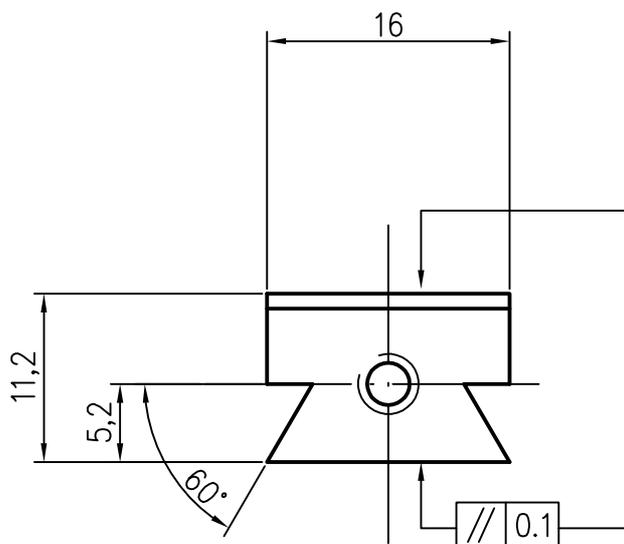


MATERIAL: DURALUMINIO 7075 T6 o 6061
 CANTIDAD: 2

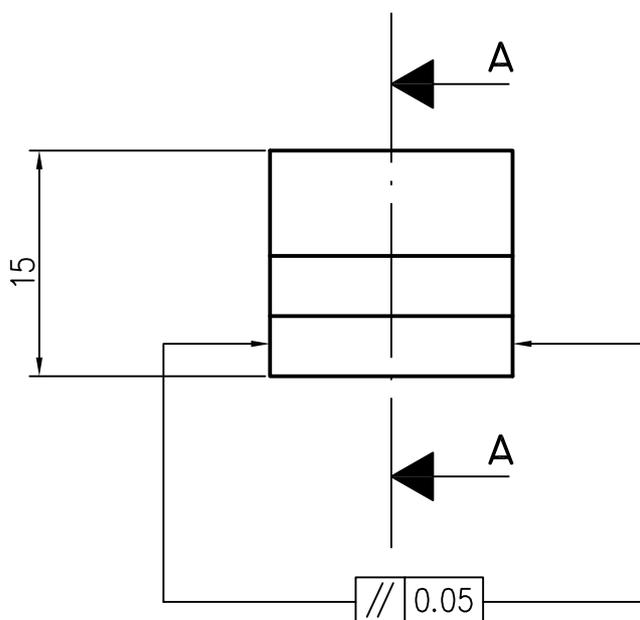
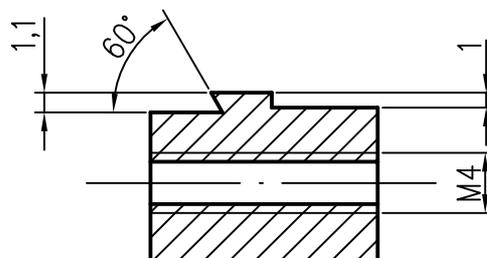
TOLERANCIAS NO INDICADAS SEGÚN NORMA ISO 2768-M

	Fecha	Nombre		 Escuela Politécnica Superior
Dibujado	06-03-06	Elio	Pajares	
Compro.		Jordi	Renart	
Escala	Mecanismo de apertura: postizo			Nº plano WED-02/05
1/1				Sustituye a:
				Especialidad

N8



SECCIÓN A-A

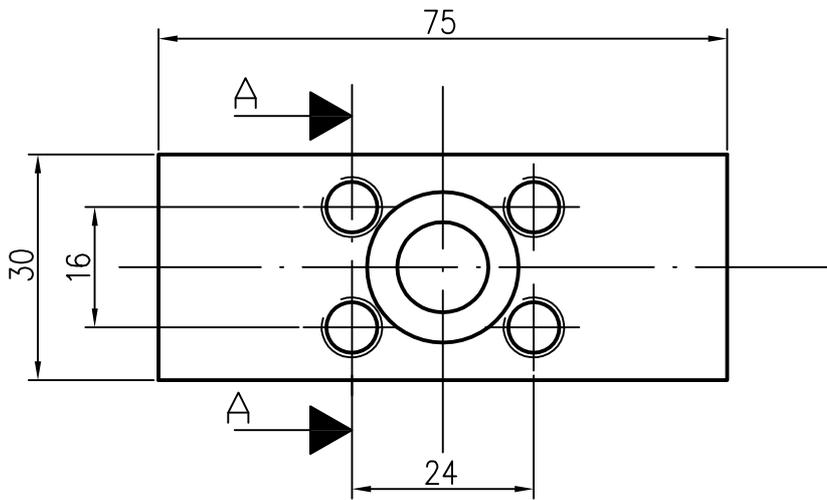


MATERIAL: INOX
CANTIDAD: 2

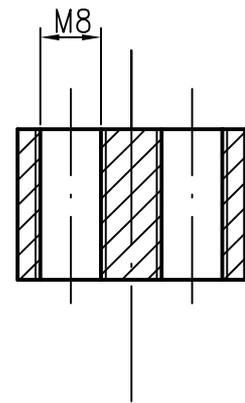
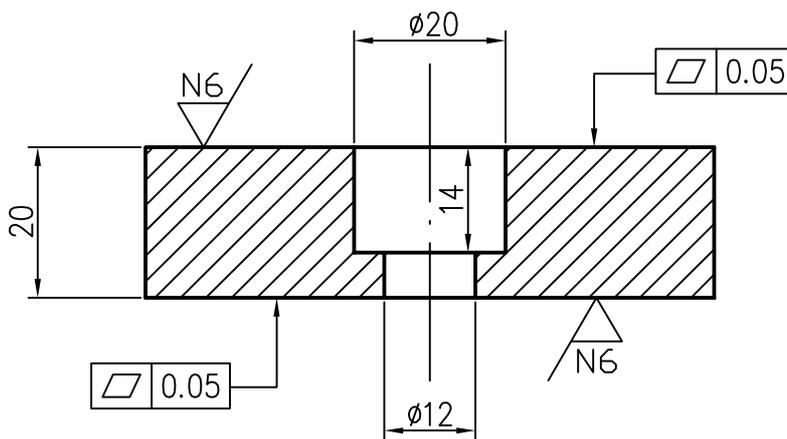
TOLERANCIAS NO INDICADAS SEGÚN NORMA ISO 2768-M

	Fecha	Nombre		 Escuela Politécnica Superior
Dibujado	06-03-06	Elio	Pajares	
Compro.		Jordi	Renart	
Escala	Mecanismo de apertura: bloque de apriete			Nº plano WED-03/05
2/1				Sustituye a:
				Especialidad

N8 / (N6 /)



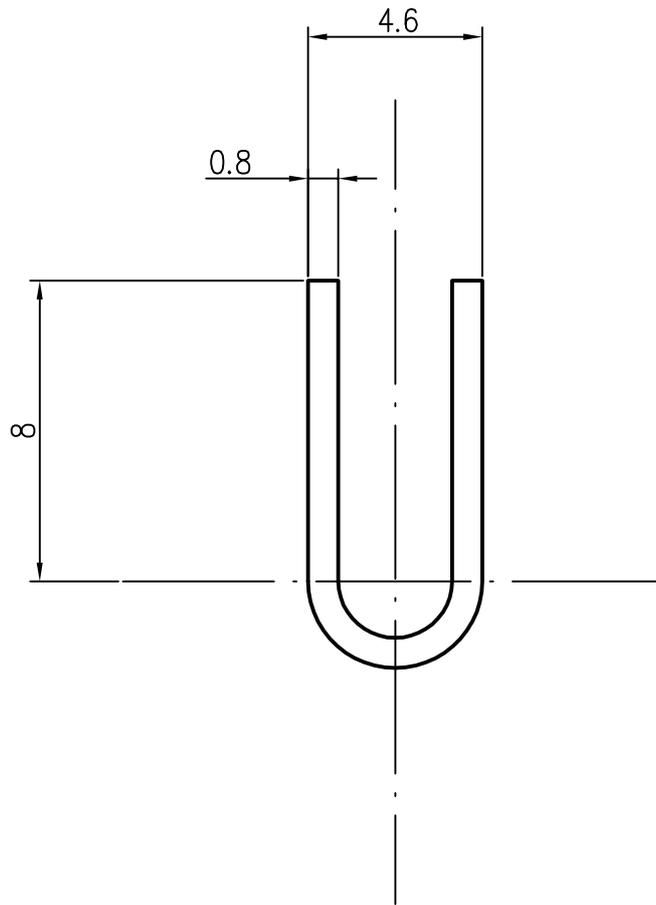
SECCIÓN A-A



MATERIAL: ACERO
CANTIDAD: 1

TOLERANCIAS NO INDICADAS SEGÚN NORMA ISO 2768-M

	Fecha	Nombre		 UdG	Escuela Politécnica Superior
Dibujado	22-05-06	Elio	Pajares		
Compro.		Jordi	Renart		
Escala	Soporte de unión cuña-actuador			Nº plano	WED-04/05
1/1				Sustituye a:	
				Especialidad	



ANCHO CONSTANTE: 10MM

MATERIAL: LÁMINA DE COBRE, ESPESOR 0'8MM
 CANTIDAD: 2

TOLERANCIAS NO INDICADAS SEGÚN NORMA ISO 2768-M

	Fecha	Nombre		 UdG	Escuela Politécnica Superior
Dibujado	22-05-06	Elio	Pajares		
Compro.		Jordi	Renart		
Escala 5/1	Clip de cobre				Nº plano WED-05/05
					Sustituye a:
					Especialidad

Anexo B

Equipamiento utilizado

En este anexo se describen los equipos que se han utilizado para caracterizar las propiedades de los adherentes y para analizar las uniones adhesivas (análisis experimentales). En el anexo se incluyen las fichas de los siguientes equipos:

- Máquinas de ensayo: hidráulicas y electromecánicas.
- Transductores de fuerza: células de carga.
- Transductores de desplazamiento: extensómetro uniaxial y biaxial.
- Instrumentos de metrología: micrómetro y pie de rey.

B.1. Máquinas de ensayo

Equipo:	Máquina hidráulica MTS 810	
Especificaciones técnicas		
Núm. de serie	1313033	
Carga máxima	250 KN	
Rango trabajo hor.	635 mm	
Rango trabajo ver.	1625 mm	
Observaciones:		
<p>Máquina hidráulica de mordazas hidráulicas. Se ha utilizado para realizar los ensayos de tracción longitudinal y de cortadura en el plano.</p>		

Equipo:	Máquina hidráulica MTS 858 (Bionix 2)	
Especificaciones técnicas		
Núm. de serie	10148353	
Carga máxima	25 KN	
Rango trabajo hor.	460 mm	
Rango trabajo ver.	1289 mm	
Observaciones:		
<p>Máquina hidráulica de mordazas mecánicas. Se ha utilizado para realizar los ensayos de tracción transversal.</p>		

Equipo:	Máquina electromecánica MTS Insight 100	
Especificaciones técnicas		
Núm. de serie	513846	
Carga máxima	100 KN	
Rango trabajo hor.	650 mm	
Rango trabajo ver.	1200 mm	
Observaciones:		
Máquina electromecánica de mordazas mecánicas. Se ha utilizado para realizar los ensayos de fractura interlaminar, y para analizar las uniones adhesivas (DCB y WDT).		

B.2. Transductores de fuerza

Equipo:	Célula de carga 250KN MTS Modelo 661.22D-01	
Especificaciones técnicas		
Núm. de serie	1261214	
Capacidad	250 KN	
No linealidad	0.08 %	
Histéresis	0.05 %	
Salida	2 mV/V	
Deflexión max.	0.06 mm	
Observaciones:		
Célula de carga para máquina MTS 810 de 250 KN.		

Equipo:	Célula de carga 25KN MTS Modelo 661.19F-04 (Bionix 2)	
Especificaciones técnicas		
Núm. de serie	V143479	
Capacidad	25 KN	
No linealidad	0.08 %	
Histéresis	0.05 %	
Salida	2 mV/V	
Deflexión max.	0.05 mm	
Observaciones:		
Célula de carga para máquina MTS 858 de 25 KN (Bionix 2).		



Equipo:	Célula de carga 1KN MTS Modelo 661.18F-01 (Bionix 2)	
Especificaciones técnicas		
Núm. de serie	-	
Capacidad	1 KN	
No linealidad	0.08 %	
Histéresis	0.08 %	
Salida	1 mV/V	
Deflexión max.	0.08 mm	
Observaciones:		
Célula de carga para máquina MTS 858 de 25 KN (Bionix 2).		



Equipo:	Célula de carga 1KN MTS Modelo 569329-01 (Insight 100)	
Especificaciones técnicas		
Núm. de serie	35016	
Capacidad	1 KN	
No linealidad	- %	
Histéresis	- %	
Salida	- mV/V	
Deflexión max.	- mm	
Observaciones:		
Célula de carga para máquina Insight de 100 KN.		

B.3. Transductores de desplazamiento

Equipo:	Extensómetro axial MTS 634.25	
Especificaciones técnicas		
Núm. de serie	1381470	
Longitud galga	50 mm	
Deformación max.	50 %	
Rango Temp.	-84÷120 °C	
Observaciones:		
Rango de trabajo hasta la rotura de la probeta.		

Equipo:	Extensómetro biaxial Epsilon 3560	
Especificaciones técnicas		
Núm. de serie	E83562	
Longitud galga	25 mm	
Dimensiones probeta	0÷25 mm	
Rango def. axial	±5 %	
Rango def. transv.	±0.5 mm	
Rango de Temp.	-40÷200 °C	
Observaciones:	No es posible utilizarlo hasta la rotura de la probeta.	



B.4. Instrumentos de metrología

Equipo:	Pie de rey Horex No. 41 2810 150	
Especificaciones técnicas		
Núm. de serie	HO42830	
Rango de medición	0 a 150 mm	
Resolución	0.01 mm	
Err. instrum. (20°C)	±0.03 mm	
Rango de Temp.	0÷40 °C	



Equipo:	Micrómetro Mitutoyo No. 293-805	
Especificaciones técnicas		
Núm. de serie	293-805	
Rango de medición	0 a 25 mm	
Resolución	0.001 mm	
Err. instrum. (20°C)	±2μm	
Fuerza de medición	5 a 10 N	
Rango de Temp.	5÷40 °C	



Anexo C

Fabricación de las probetas

C.1. Introducción

En este anexo se incluye la información adicional referente a la fabricación de las probetas que se ha descrito en el capítulo 3. En primer lugar se listan los paneles fabricados con la información de las probetas obtenidas de cada panel (dimensiones y secuencia de apilamiento). Y en segundo lugar se indican los esquemas de corte de los distintos paneles para obtener las probetas.

C.2. Listado de paneles fabricados

En la tabla C.1 se ha incluye la información adicional de los paneles que se han producido, que complementa los datos de la tabla 3.3 del capítulo 3. Las probetas se han codificado como UD: probeta unidireccional, INT: probeta para ensayos de fractura interlaminar, UA: unión adhesiva, ± 45 : probeta para ensayos de cortadura en el plano o Tacón: tacón de fibra de vidrio.

En la columna “Número de probetas” se indica cuantas probetas se han obtenido del corte de cada panel. No todas las probetas que se han obtenido de los paneles, se han ensayado experimentalmente en las campañas que se incluyen en los Volúmenes II y III. Las probetas que no se incluyen en estas campañas se han utilizado para realizar las pruebas preliminares. Los resultados de estas pruebas no se han incluido en el trabajo.

Nombre del panel	Tipo	Materiales		Dimensiones del panel [mm×mm]	Temp. de curado de la unión [°C]	Preparación superficial	Tacón	Numero de probetas	Dimensiones de las probetas [mm×mm]	Secuencia de apilamiento
		Adherente	Adhesivo							
A1/01	UD	AS4/8552	-	300×300	-	-	5T ₁ /01	17	250×15	[0 ₆]
A1/03	±45	AS4/8552	-	300×300	-	-	-	10	175×25	[+45/-45] _{4S}
A1/04	INT	AS4/8552	-	300×300	-	-	-	10	250×25	[0 ₁₂ /d/0 ₁₂]
A1/05	INT	AS4/8552	-	300×300	-	-	-	10	250×25	[0 ₁₂ /d/0 ₁₂]
A1/06	INT	AS4/8552	-	300×300	-	-	-	10	250×25	[0 ₁₂ /d/0 ₁₂]
A1/07	INT	AS4/8552	-	300×300	-	-	-	10	250×25	[0 ₁₂ /d/0 ₁₂]
A1/12	UD	AS4/8552	-	300×300	-	-	5T ₁ /03	10	175×25	[90 ₁₂]
A1/E1/02	UA	AS4/8552	EA9695	300×300	160	Pelable	-	10	250×25	[0 ₈ /ad/0 ₈]
A1/E1/03	UA	AS4/8552	EA9695	300×300	160	Pelable	-	10	250×25	[0 ₈ /ad/0 ₈]
A1/E1/07	UA	AS4/8552	EA9695	300×300	180	Pelable	-	10	250×25	[0 ₈ /ad/0 ₈]
A1/E1/08	UA	AS4/8552	EA9695	300×300	160	Sin preparación	-	10	250×25	[0 ₈ /ad/0 ₈]
A1/F1/03	UA	AS4/8552	FM300K	300×300	160	Pelable	-	10	250×25	[0 ₈ /ad/0 ₈]
A1/F1/04	UA	AS4/8552	FM300K	300×300	160	Pelable	-	10	250×25	[0 ₈ /ad/0 ₈]
A1/F1/07	UA	AS4/8552	FM300K	300×300	160	Pelable	-	10	250×25	[0 ₈ /ad/0 ₈]
A1/F1/10	UA	AS4/8552	FM300K	300×300	160	Pelable	-	10	250×25	[0 ₈ /ad/0 ₈]
A1/F1/11	UA	AS4/8552	FM300K	300×300	180	Pelable	-	10	250×25	[0 ₈ /ad/0 ₈]
A1/F1/13	UA	AS4/8552	FM300K	300×300	180	Sin preparación	-	10	250×25	[0 ₈ /ad/0 ₈]
T1/01	UD	T800S/M21	-	300×300	-	-	5T ₁ /02	17	250×15	[0 ₆]
T1/03	±45	T800S/M21	-	300×300	-	-	-	10	175×25	[+45/-45] _{4S}
T1/04	INT	T800S/M21	-	300×300	-	-	-	10	250×25	[0 ₁₂ /d/0 ₁₂]
T1/05	INT	T800S/M21	-	300×300	-	-	-	10	250×25	[0 ₁₂ /d/0 ₁₂]
T1/06	INT	T800S/M21	-	300×300	-	-	-	10	250×25	[0 ₁₂ /d/0 ₁₂]
T1/07	INT	T800S/M21	-	300×300	-	-	-	10	250×25	[0 ₁₂ /d/0 ₁₂]
T1/15	UD	T800S/M21	-	300×300	-	-	5T ₁ /03	10	175×25	[90 ₁₂]
T1/E1/02	UA	T800S/M21	EA9695	300×300	160	Pelable	-	10	250×25	[0 ₈ /ad/0 ₈]
T1/E1/03	UA	T800S/M21	EA9695	300×300	160	Pelable	-	10	250×25	[0 ₈ /ad/0 ₈]
T1/E1/07	UA	T800S/M21	EA9695	300×300	180	Pelable	-	10	250×25	[0 ₈ /ad/0 ₈]
T1/E1/08	UA	T800S/M21	EA9695	300×300	180	Sin preparación	-	10	250×25	[0 ₈ /ad/0 ₈]
T1/F1/02	UA	T800S/M21	FM300K	300×300	160	Pelable	-	10	250×25	[0 ₈ /ad/0 ₈]
T1/F1/03	UA	T800S/M21	FM300K	300×300	160	Pelable	-	10	250×25	[0 ₈ /ad/0 ₈]
T1/F1/05	UA	T800S/M21	FM300K	300×300	160	Pelable	-	10	250×25	[0 ₈ /ad/0 ₈]
T1/F1/07	UA	T800S/M21	FM300K	300×300	180	Pelable	-	10	250×25	[0 ₈ /ad/0 ₈]
T1/F1/08	UA	T800S/M21	FM300K	300×300	180	Sin preparación	-	10	250×25	[0 ₈ /ad/0 ₈]
5T ₁ /01	Tacón	8552/Glass	-	350×300	-	-	-	5	300×56	[+45/-45] _{2S}
5T ₁ /02	Tacón	8552/Glass	-	350×300	-	-	-	5	300×56	[+45/-45] _{2S}
5T ₁ /03	Tacón	8552/Glass	-	350×300	-	-	-	12	300×25	[+45/-45] _{2S}

Tabla C.1: Información de todos los paneles fabricados.

C.3. Tipo de corte

En este apartado se indican los esquemas de corte de los paneles para obtener las probetas. En total se han realizado 6 tipos de corte: 4 para obtener las probetas y 2 para obtener los tacones de fibra de vidrio, que posteriormente se han pegado a los paneles. En la tabla C.2 se indican los tipos de corte.

Tipo de corte	Descripción	Dimensiones de las probetas [mm × mm]	Tacones
1	Probetas tracción longitudinal (ASTM D3039/D3039M-08)	250×15	SÍ
2	Probetas tracción transversal (ASTM D3039/D3039M-08)	175×25	SÍ
3	Probetas cortante en el plano (ASTM D3518/D3518M-94(2007))	175×25	NO
4	Probetas fractura interlaminar (ASTM D5528-01(2007)e3) Uniones adhesivas	250×25	NO
T1	Tacones probetas tracción longitudinal (ASTM D3039/D3039M-08)	300×56	-
T2	Tacones probetas tracción transversal (ASTM D3039/D3039M-08)	300×25	-

Tabla C.2: Tipos de corte para obtener las probetas y los tacones.

C.3.1. Corte 1

C.3.1.1. Descripción:

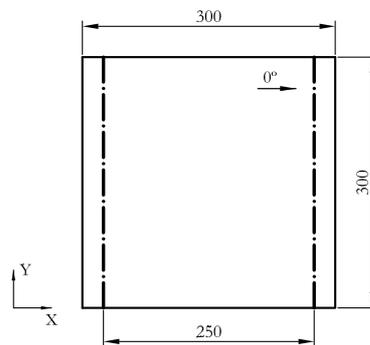
Corte realizado para obtener probetas para ensayos de tracción longitudinal. Las dimensiones de probeta que se obtienen son de 250×15 mm tal y como se indica en la norma de ensayos ASTM D3039/D3039M-08.

C.3.1.2. Listado de paneles:

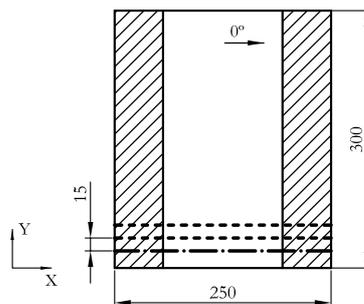
Panel	Probetas/Panel
A1/01	17
T1/01	17

C.3.1.3. Esquemas de corte:

Corte 1A: Corte según la dirección del eje Y para obtener un subpanel de 250 mm de ancho.



Corte 1B: Corte según la dirección del eje X se los subpaneles con tacones para obtener probetas de 15 mm de ancho (17 probetas por panel).



C.3.2. Corte T1

C.3.2.1. Descripción:

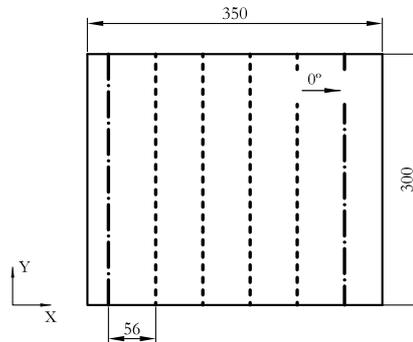
Corte realizado para obtener los tacones que se unen a los subpaneles de carbono, de los cuales posteriormente se han cortado las probetas para ensayos de tracción longitudinal. Las dimensiones de la banda a partir de la cual se obtiene el tacón son de 300×56 mm tal y como se indica en la norma de ensayos ASTM D3039/D3039M-08.

C.3.2.2. Listado de paneles:

Panel	Tacones/Panel
5T ₁ /01	5
5T ₁ /02	5

C.3.2.3. Esquemas de corte:

Corte T1A: Corte según la dirección del eje Y para obtener 5 bandas de 56 mm de ancho.



C.3.3. Corte 2

C.3.3.1. Descripción:

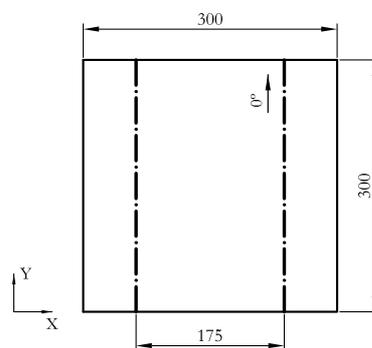
Corte realizado para obtener probetas para ensayos de tracción transversal. Las dimensiones de probeta que se obtienen son de 175×25 mm tal y como se indica en la norma de ensayos ASTM D3039/D3039M-08.

C.3.3.2. Listado de paneles:

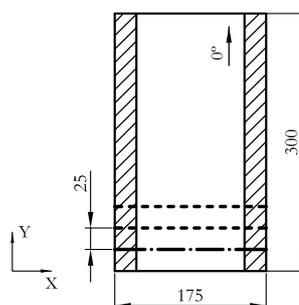
Panel	Probetas/Panel
A1/12	10
T1/15	10

C.3.3.3. Esquemas de corte:

Corte 2A: Corte según la dirección del eje Y para obtener un subpanel de 175 mm de ancho.



Corte 1B: Corte según la dirección del eje X se los subpaneles con tacones para obtener probetas de 25 mm de ancho (10 probetas por panel).



C.3.4. Corte T2

C.3.4.1. Descripción:

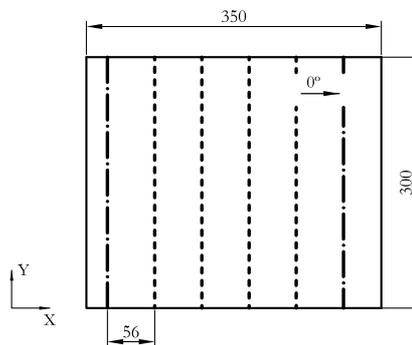
Corte realizado para obtener los tacones que se unen a los subpaneles de carbono, de los cuales posteriormente se han cortado las probetas para ensayos de tracción transversal. Las dimensiones de la banda a partir de la cual se obtiene el tacón son de 300×25 mm tal y como se indica en la norma de ensayos ASTM D3039/D3039M-08.

C.3.4.2. Listado de paneles:

Panel	Tacones/Panel
5T ₁ /03	12

C.3.4.3. Esquemas de corte:

Corte T2A: Corte según la dirección del eje Y para obtener 12 bandas de 25 mm de ancho.



C.3.5. Corte 3

C.3.5.1. Descripción:

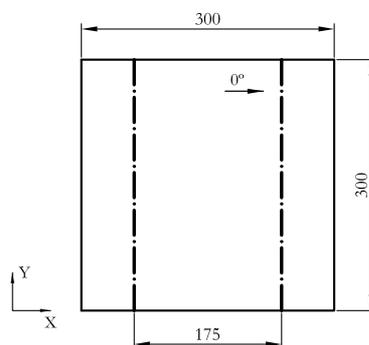
Corte realizado para obtener probetas para ensayos de cortante en el plano. Las dimensiones de probeta que se obtienen son de 175×25 mm tal y como se indica en la norma de ensayos ASTM D3518/D3518M-94(2007).

C.3.5.2. Listado de paneles:

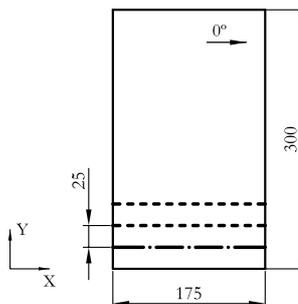
Panel	Probetas/Panel
A1/03	10
T1/03	10

C.3.5.3. Esquemas de corte:

Corte 3A: Corte según la dirección del eje Y para obtener un subpanel de 175 mm de ancho.



Corte 3B: Corte según la dirección del eje X se los subpaneles para obtener probetas de 25 mm de ancho (10 probetas por panel).



C.3.6. Corte 4

C.3.6.1. Descripción:

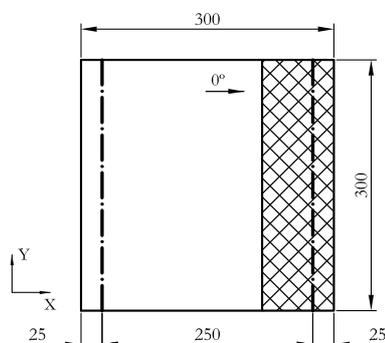
Corte realizado para obtener probetas para ensayos de fractura interlaminar y las uniones adhesivas. Las dimensiones de probeta que se obtienen son de 250×25 mm tal y como se indica en la norma de ensayos ISO 15024.

C.3.6.2. Listado de paneles:

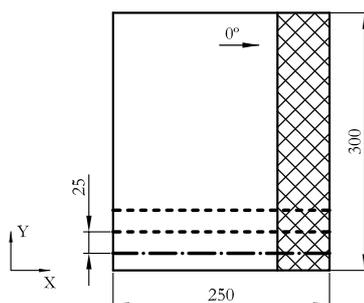
Panel	Nº Pr.	Panel	Nº Pr.	Panel	Nº Pr.	Panel	Nº Pr.	Panel	Nº Pr.	Panel	Nº Pr.
A1/04	10	A1/E1/02	10	A1/F1/03	10	T1/04	10	T1/E1/02	10	T1/F1/02	10
A1/05	10	A1/E1/03	10	A1/F1/04	10	T1/05	10	T1/E1/03	10	T1/F1/03	10
A1/06	10	A1/E1/07	10	A1/F1/07	10	T1/06	10	T1/E1/07	10	T1/F1/05	10
A1/07	10	A1/E1/08	10	A1/F1/10	10	T1/07	10	T1/E1/08	10	T1/F1/07	10
-	-	-	-	A1/F1/11	10	-	-	-	-	T1/F1/08	10
-	-	-	-	A1/F1/13	10	-	-	-	-	-	-

C.3.6.3. Esquemas de corte:

Corte 4A: Corte según la dirección del eje Y para obtener un subpanel de 250 mm de ancho.



Corte 4B: Corte según la dirección del eje X se los subpaneles para obtener probetas de 25 mm de ancho (10 probetas por panel).



Anexo D

Inspección fractográfica de la superficie dañada de las probetas

D.1. Introducción

En este anexo se describen las técnicas de microscopia que se han utilizado para realizar la inspección fractográfica de la superficie dañada de las uniones adhesivas. Y también se incluyen parte de los resultados de las probetas, para interpretar el análisis de la variación de la rugosidad superficial debida al paso de la cuña del capítulo 7, y el análisis fractográfico del efecto *stick-slip* que se presenta en el capítulo 8.

D.2. Métodos de inspección fractográfica

Se han utilizado tres técnicas de microscopia: óptica, electrónica y confocal.

La observación con microscopia óptica se ha realizado con una lupa estereoscópica. La muestra se ha observado con factores de 10 hasta 50 aumentos. Para diferenciar la interfase entre el adherente y el adhesivo y visualizar las fibras de los adherentes se ha utilizado la técnica de fluorescencia por reflexión: las fibras de carbono no tienen fluorescencia y la resina del adhesivo y el adherente presentan valores de autofluorescencia distintos. Los resultados que se han obtenido han servido para interpretar el análisis de la morfología superficial que se ha realizado con el microscopio electrónico.

La observación con microscopia electrónica se ha realizado con un microscopio electrónico de barrido. Se han obtenido imágenes desde $10\times$ hasta $3000\times$. Para aumentar la conductividad de la superficie de la muestra se ha recubierto con partículas de oro. Se ha realizado un análisis de la morfología superficial de las superficies fracturadas. Se han obtenido imágenes planas de la superficie y en perspectiva, inclinado la muestra un ángulo de 32° .

La observación con microscopia confocal se ha realizado con un microscopio confocal con disco

giratorio por reflexión del haz de luz. Se han obtenido imágenes desde $20\times$ y $50\times$. No se ha preparado la muestra antes de realizar su análisis. Se ha utilizado este equipo para analizar la rugosidad de las superficies fracturadas, porque permite obtener valores cuantitativos de la rugosidad. En este anexo no se incluyen los resultados del análisis de la rugosidad superficial que se ha realizado con el microscopio confocal. Estos resultados se incluyen en el capítulo 7, dónde se analiza el efecto de la variación de la rugosidad superficial por el paso de la cuña.

D.3. Análisis fractográfico

En este apartado se presentan las imágenes obtenidas con las técnicas de microscopía óptica y electrónica. A partir de estas imágenes se han identificado los distintos componentes que constituyen la unión. Las imágenes se han obtenido de una unión adhesiva producida con el adherente T800S/M21 y el adhesivo FM300K.

D.3.1. Imagen de la sección de la probeta sin fracturar

Para identificar los componentes que constituyen la unión, sus dimensiones y interfases, se han analizado en primer lugar las imágenes de las secciones transversal y longitudinal de un fragmento de probeta sin fracturar, ver figura D.1. Las imágenes de las secciones se han obtenido con la lupa esterescópica a $50\times$.

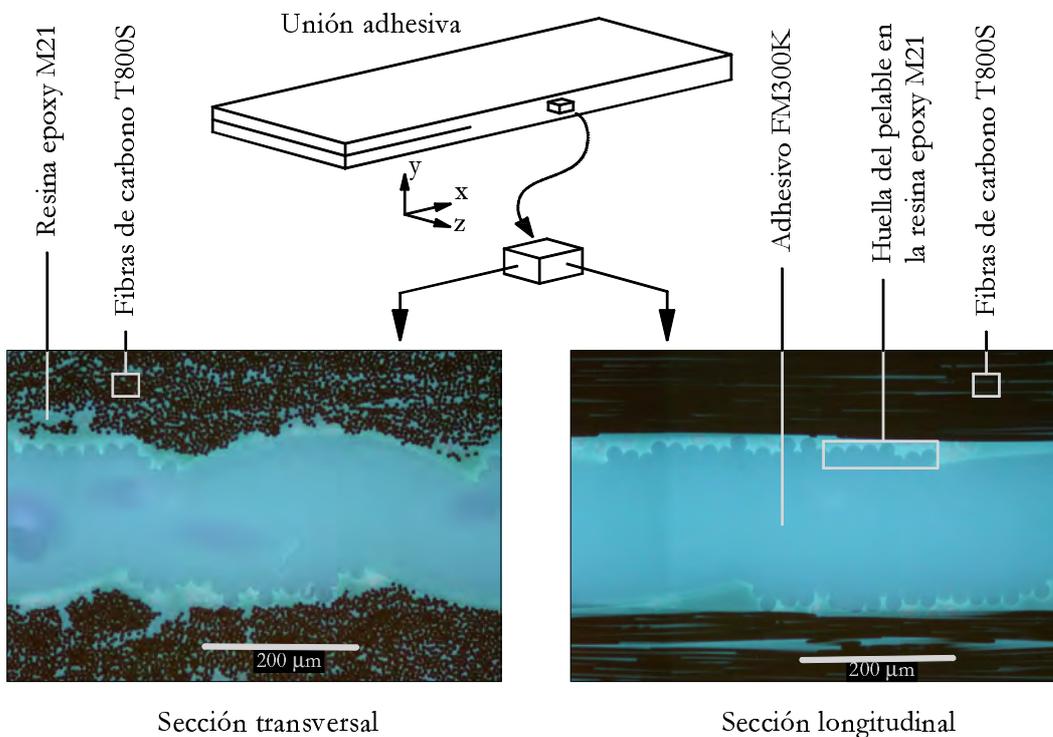


Figura D.1: Esquema de las secciones longitudinales y transversales que se han obtenido de una probeta sin fracturar.

Tanto en la sección transversal como en la longitudinal se diferencian las fibras de carbono del resto de los elementos (resina y adhesivo) porque no tienen fluorescencia. En la sección transversal se observa que la disposición de las fibras en el composite es claramente aleatoria. La resina del composite presenta un nivel de autofluorescencia ligeramente superior al del adhesivo y por tanto se puede identificar su interfase. Esta interfase presenta una rugosidad acentuada producida por la marca que dejó el pelable preimpregnado sobre la superficie del adherente durante la fase de curado.

Se diferencian dos tipos de huellas en la superficie del adherente en relación a su tamaño: una ondulación de 300-400 μm de longitud debida a la trama del tejido, y un dentado con un diámetro de 20 μm por diente producido por cada una de las fibras del tejido pelable. El dentado se visualiza cada dos ondulaciones de tejido, de manera que puede deducirse que el tejido pelable preimpregnado está formado por un entramado simple de un haz de fibras orientado a 0 y 90°. El diámetro de estas fibras del tejido pelable es muy superior al de las fibras de carbono.

El espesor de la lámina de adhesivo se ha medido a partir de una composición secuencial de imágenes tomadas en las secciones longitudinal y transversal. Se ha obtenido un espesor promedio de la lámina de adhesivo de 150 μm para este tipo de probetas (T800S/M21 y FM300K). La lámina de adhesivo contiene un tejido portador (*carrier*) para dotarla de un espesor constante en toda la probeta. Mediante las técnicas de fluorescencia no ha sido posible visualizar el tejido portador embebido en el adhesivo.

D.3.2. Análisis superficial de la probeta fracturada

En este apartado se muestran las imágenes de la superficie fracturada de una unión adhesiva obtenidas con el microscopio electrónico de rastreo (MER). De la superficie de la probeta se han analizado 2 zonas: la zona del inserto de teflón y la superficie generada por la propagación de la grieta, ver figura D.2.



Figura D.2: Puntos analizados de la superficie fracturada.

D.3.2.1. Zona del inserto de teflón

La región de la figura D.2 indicada como inserto de teflón pertenece a la superficie de la probeta en la cual, durante el proceso de fabricación, se introdujo un inserto de teflón para crear una grieta inicial. Por consiguiente la superficie que se puede ver en esta región es la del adherente.

En la figura D.2 hay una región del inserto que está cubierta por una capa de adhesivo. En esta zona del inserto el adhesivo fluyó durante el proceso de curado de la unión. El análisis de esta superficie se ha realizado en el capítulo 7. En este anexo se ha analizado la morfología superficial en una zona del inserto que no tiene adhesivo.

En la figura D.3 se muestra una imagen en perspectiva de la superficie en el punto A de la zona del inserto a 50 aumentos. La imagen en perspectiva se ha obtenido girando el portaprobetas un ángulo de 32° .

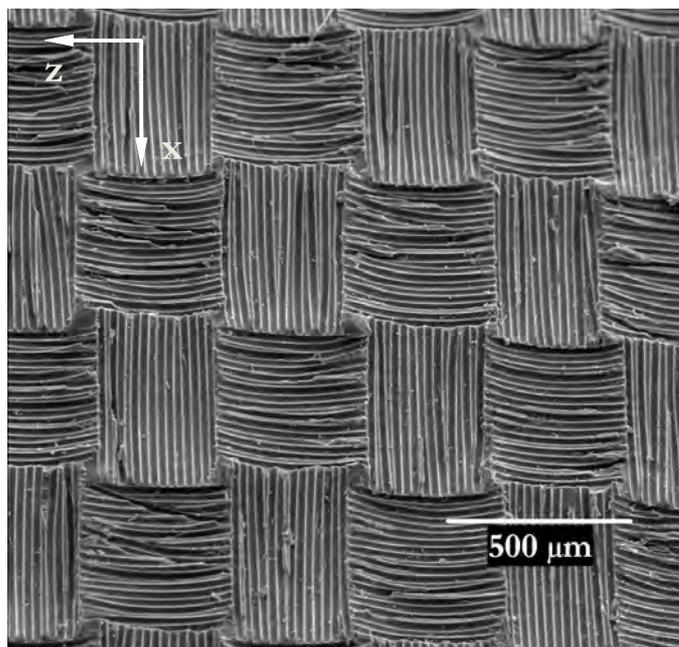


Figura D.3: Imagen en perspectiva de una región del inserto de teflón a 50×.

En la figura D.3 se observan unos surcos que están orientados a 0-90°. El surco es la marca que deja cada fibra del tejido pelable sobre la superficie del adherente el conjunto de surcos orientados en la misma dirección son la marca del haz de fibras del pelado que conforma el urdimbre y la trama del tejido. La disposición de las fibras permite identificar el tipo de tejido pelable que se ha utilizado, que es un tejido con un entramado simple con las fibras orientadas a 0° y 90°.

Para validar que las marcas que aparecen en la figura D.3, en la figura D.4 se muestra una ampliación de la región central de la figura D.3 en la cual se observa que el diámetro aproximado de cada surco es de unos $20 \mu m$, que se corresponde con el diámetro de las huellas de la sección transversal de la figura D.1.

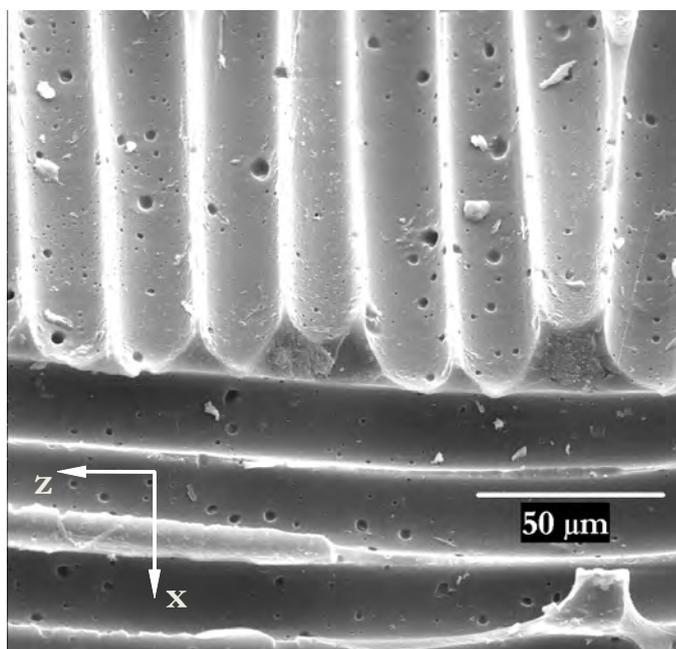


Figura D.4: Ampliación de la región central de la figura D.3 a 500 \times .

D.3.2.2. Superficie generada por la propagación de la grieta

La región de la figura D.2 indicada como propagación de grieta es la superficie que se ha creado durante el ensayo experimental por el avance del frente de grieta. En esta zona se observa que quedan restos de adhesivo en ambas caras de los adherentes. No obstante, la fractura no se ha producido en el plano medio de la lámina de adhesivo porque la superficie de la propagación de la grieta presenta dos tipos de regiones: regiones en las que el adhesivo ha quedado unido al adherente superior dejando visible la superficie del adherente inferior, y regiones en las que ocurre exactamente lo contrario.

Por consiguiente las imágenes que se han obtenido de estas regiones intentan ser representativas del proceso de fractura de la unión adhesiva, y por tanto en ellas se han mostrado zonas en las que se han producido un cambio de plano en el avance de grieta, y que por consiguiente presentan los dos tipos de superficie (la del adhesivo y la del adherente).

En la figura D.5 se muestra una imagen en perspectiva de una región fracturada en la cual se produjo un cambio de plano del frente de grieta durante la propagación de este.

A la derecha de la figura D.5 se muestra la superficie del adhesivo que ha quedado unido al adherente, y a la izquierda de la misma figura la superficie del adherente después de que se haya arrancado el adhesivo. La marca que queda sobre la superficie del adhesivo tiene la forma del negativo de la superficie del adherente. Como la huella que dejó el pelable sobre la superficie del adherente tenía forma convexa (ver figura D.3), la superficie del adhesivo tendrá una geometría

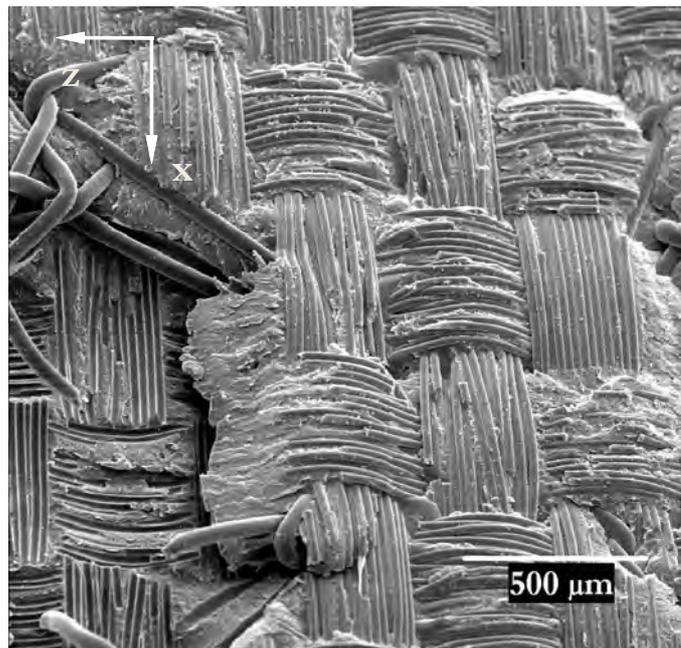


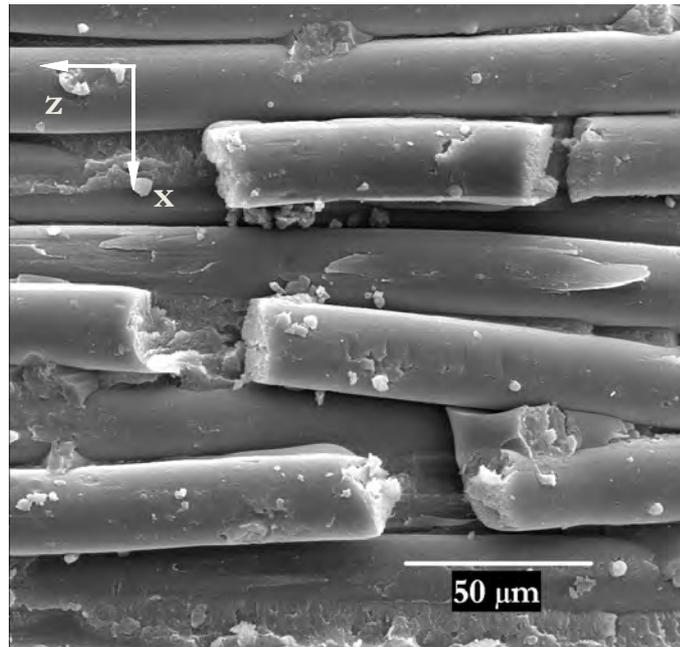
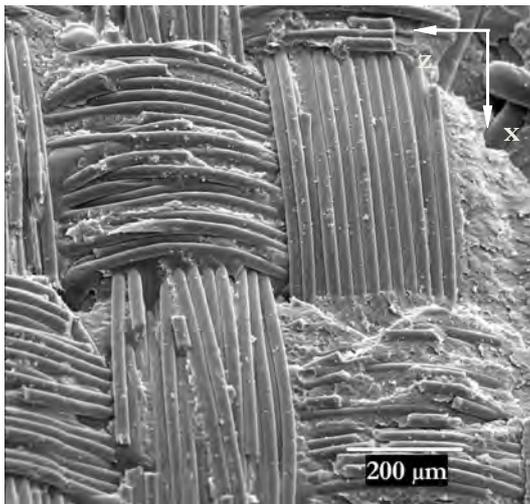
Figura D.5: Imagen en perspectiva de un punto de la región fracturada en la cual se produjo un cambio de plano del frente de grieta tomada a 50 aumentos.

cóncava, y los surcos del adherente producen un dibujo superficial en el adhesivo que adquiere la forma de un *haz de fibras* sobre la superficie del adhesivo. Estas *fibras* en la superficie del adhesivo tienen el mismo diámetro que los surcos que dejó el pelable en los adherentes ($20\ \mu\text{m}$), ver figura D.6. Por lo que en ningún caso deben confundirse las *fibras* que aparecen sobre la superficie del adhesivo con las fibras de las láminas de carbono del adherente, puesto que estas últimas son de un diámetro inferior.

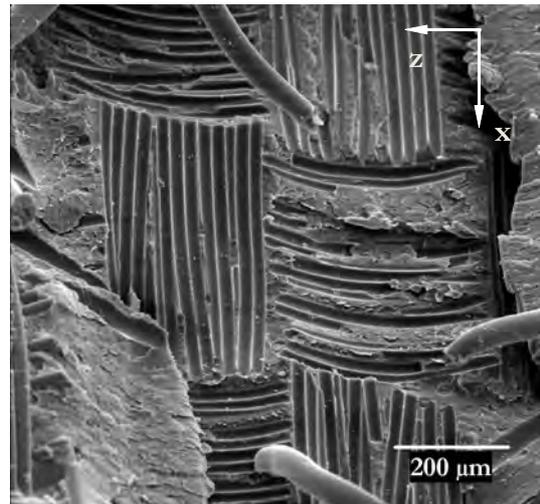
Volviendo a la figura D.5, en la zona en que el frente de grieta cambia de plano se produce una rotura transversal completa de la lámina de adhesivo, dejando a la vista el tejido portador (*carrier*) embebido en la lámina. El diámetro de las fibras del tejido portador es superior al de las *fibras* que aparecen en la superficie del adhesivo. En la figura D.5 se observa como producirse el cambio de plano algunas de las fibras del tejido portador se han roto.

En relación a la morfología de las superficies que se han creado en la zona de propagación, en las figuras D.7(a) y D.7(b) se muestran dos regiones: una de la superficie del adhesivo y otra del adherente a 100 aumentos. En la figura D.7(a) se observa que sobre la superficie del adherente aún quedan algunos restos de adhesivo y en la figura D.7(b) se observa que en algunas zonas de la superficie del adhesivo faltan parte de las *fibras*. Éstas han quedado unidas al otro adherente.

De estas imágenes puede deducirse que la fractura no se produce únicamente en la interfase entre el adhesivo y el adherente (fractura adhesiva), si no que hay un cierto nivel de fractura en la lámina de adhesivo (fractura cohesiva).

Figura D.6: Imagen del *haz de fibras* de la superficie del adhesivo a 500×.

(a) Superficie del adhesivo



(b) Superficie del adherente

Figura D.7: Imágenes a 100× de las superficie del adhesivo y del adherente de la figura D.5.

Análisis de la región del adhesivo en la cual se ha producido un cambio de plano en el frente de grieta

Tal y como se ha comentado anteriormente, en la zona en la que ha se ha producido un cambio de plano del frente de grieta se produce una ruptura de la lámina del adhesivo y por consiguiente, se produce un fallo cohesivo. Para analizar esta zona se han obtenido imágenes de otro punto de la zona fracturada, en las cuales también se ha visualizado un cambio de plano del frente de grieta, ver figura D.8.

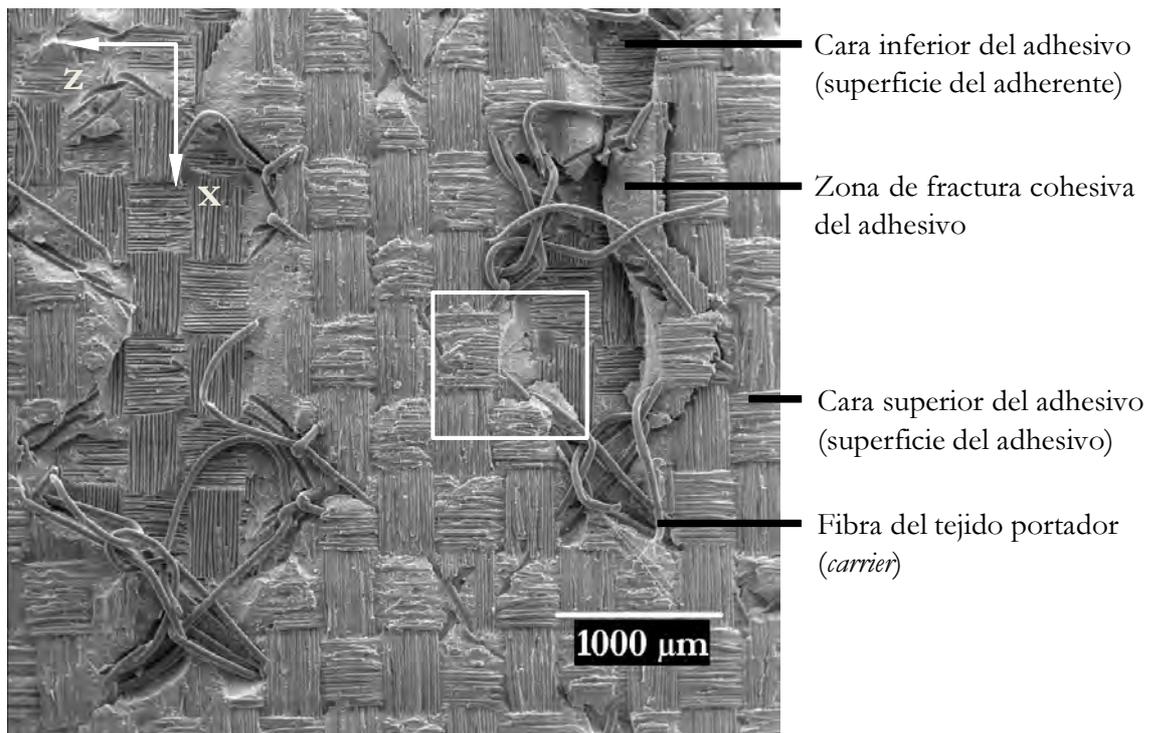


Figura D.8: Imagen de otro punto de la superficie creada por la propagación de la grieta en la que ha habido un cambio de plano del frente de grieta. Imagen tomada a 20× aumentos.

En la figura D.8 se muestra una región de la superficie fracturada a 20 aumentos en la cual se han producido 2 cambios de plano del frente de grieta. En la figura se ha identificado la superficie del adhesivo y del adherente (identificadas como caras superior e inferior del adhesivo respectivamente), la zona de fractura cohesiva del adhesivo, y el tejido portador que queda visible al producirse la rotura de la lámina de adhesivo. De la figura D.8 se ha analizado un punto cuya secuencia de ampliaciones se muestra en las figuras D.9(a) e D.9(b).

De manera que finalmente se ha obtenido una imagen a 3000 aumentos de un punto de la zona de rotura de la lámina de adhesivo.

En esta ampliación se observa que hay una microporosidades a lo largo de la superficie. Los adhesivos estructurales de alta resistencia contienen micropartículas embebidas en su interior. Porque se ha demostrado que estas partículas permiten aumentar la tenacidad a la fractura, la temperatura de transición vítrea y la resistencia a cortante de la unión. Los orificios se corresponden con las cavidades dónde se albergaban estas microporosidades antes de producirse la fractura de la unión adhesiva.

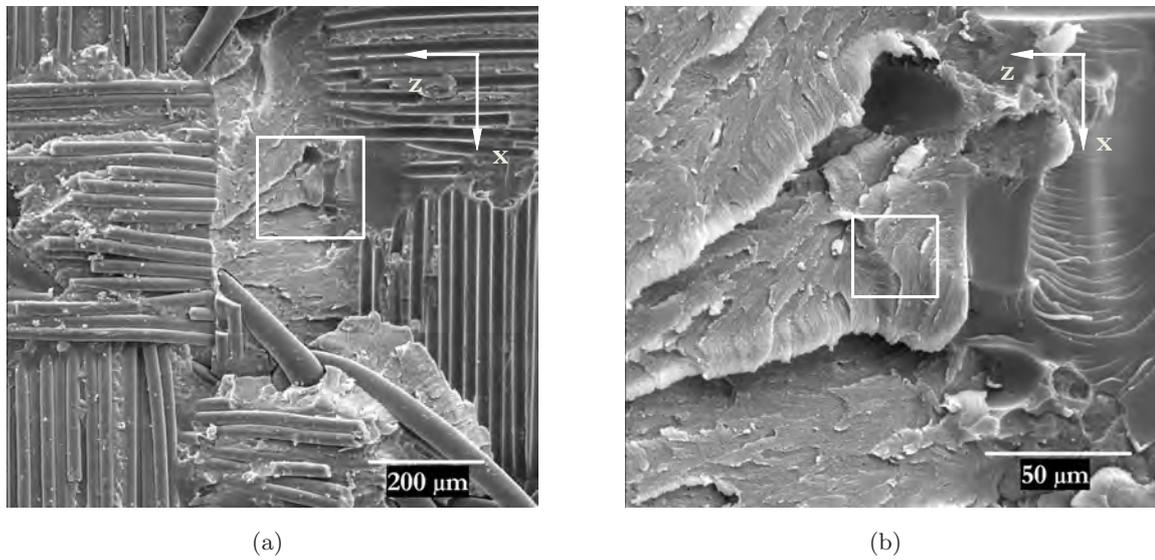


Figura D.9: Secuencia de ampliaciones que relaciona la posición de la zona de la figura D.10 en la superficie de la figura D.8.

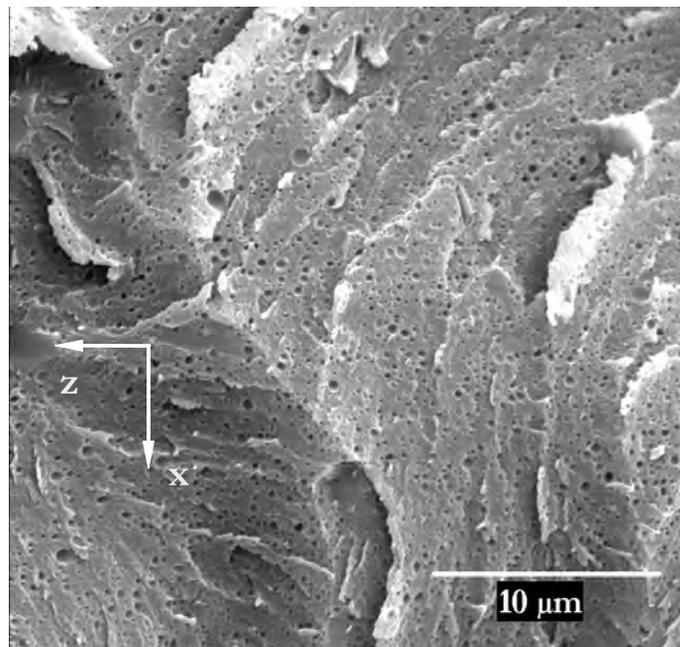


Figura D.10: Imagen de la superficie fracturada del adhesivo a 3000 \times .

Anexo E

Listado de las campañas de ensayo realizadas

En este anexo se presenta el resumen de las campañas experimentales que se han llevado a cabo, las fichas de los resultados individuales de las probetas y de los lotes de probetas se indican en los Volúmenes II y III. En la tabla E.1 se indican los datos de las campañas experimentales de ensayo, los lotes asociados a cada campaña, las probetas que pertenecen a cada lote y el volumen donde se incluyen los datos.

Campana	Lote	Probetas				Documento
CARAC-1	01	A1/01/01	A1/01/03	A1/01/05	A1/01/07	A1/01/09
	03	A1/03/01	A1/03/03	A1/03/05	A1/03/07	A1/03/09
	05	T1/01/01	T1/01/03	T1/01/05	T1/01/07	T1/01/09
	06	T1/03/01	T1/03/03	T1/03/05	T1/03/07	T1/03/09
	01	A1/12/01	A1/12/02	A1/12/03	A1/12/04	A1/12/07
	02	T1/15/01	T1/15/02	T1/15/03	T1/15/05	T1/15/06
CARAC-6	01	A1/04/03	A1/05/06	A1/06/05	A1/06/10	A1/07/05
	02	T1/04/03	T1/05/04	T1/06/10	T1/07/01	T1/07/08
DCB_SCB_vs_STD	01	A1/04/08	A1/05/01	A1/06/03	A1/06/08	A1/07/04
	02	T1/04/04	T1/04/08	T1/05/09	T1/06/04	T1/06/08
DCB_UA_UD_PSL-160	01	A1/E1/02/02	A1/E1/02/05	A1/E1/02/09	A1/E1/03/02	A1/E1/03/09
	02	A1/F1/03/10	A1/F1/04/02	A1/F1/04/04	A1/F1/04/08	A1/F1/07/10
	03	T1/E1/02/02	T1/E1/02/05	T1/E1/02/07	T1/E1/02/09	T1/E1/03/01
	04	T1/F1/02/05	T1/F1/03/06	T1/F1/03/10	T1/F1/05/04	T1/F1/05/06
DCB_UA_UD_PSL-180	01	A1/E1/07/02	A1/E1/07/04	A1/E1/07/06	A1/E1/07/08	A1/E1/07/10
	02	A1/F1/11/02	A1/F1/11/04	A1/F1/11/06	A1/F1/11/08	A1/F1/11/10
	03	T1/E1/07/02	T1/E1/07/04	T1/E1/07/06	T1/E1/07/08	T1/E1/07/10
	04	T1/F1/07/02	T1/F1/07/04	T1/F1/07/06	T1/F1/07/08	T1/F1/07/10
DCB_UA_UD_PSL-180	01	A1/E1/08/02	-	A1/E1/08/06	A1/E1/08/08	A1/E1/08/10
	02	-	A1/F1/13/04	A1/F1/13/06	A1/F1/13/08	A1/F1/13/10
	03	T1/E1/08/02	T1/E1/08/04	T1/E1/08/06	T1/E1/08/08	T1/E1/08/10
	04	T1/F1/08/02	T1/F1/08/04	T1/F1/08/06	T1/F1/08/08	T1/F1/08/10
WED_UA_UD_PSL-160	01	A1/E1/02/06	A1/E1/02/07	A1/E1/03/03	A1/E1/03/06	A1/E1/03/07
	02	A1/F1/04/07	A1/F1/04/09	A1/F1/04/10	A1/F1/10/07	A1/F1/10/09
	03	T1/E1/02/03	T1/E1/02/06	T1/E1/02/08	T1/E1/02/10	T1/E1/03/02
	04	T1/F1/03/01	T1/F1/03/04	T1/F1/03/08	T1/F1/05/01	T1/F1/05/05
WED_UA_UD_PSL-180	01	A1/E1/07/01	A1/E1/07/03	A1/E1/07/05	A1/E1/07/07	A1/E1/07/09
	02	A1/F1/11/01	A1/F1/11/03	A1/F1/11/05	A1/F1/11/07	A1/F1/11/09
	03	T1/E1/07/01	T1/E1/07/03	T1/E1/07/05	T1/E1/07/07	T1/E1/07/09
	04	T1/F1/07/01	T1/F1/07/03	T1/F1/07/05	T1/F1/07/07	T1/F1/07/09
WED_UA_UD_PSL-180	01	A1/E1/08/01	A1/E1/08/03	A1/E1/08/05	A1/E1/08/07	A1/E1/08/09
	02	A1/F1/13/01	A1/F1/13/03	A1/F1/13/05	A1/F1/13/07	A1/F1/13/09
	03	T1/E1/08/01	T1/E1/08/03	T1/E1/08/05	T1/E1/08/07	T1/E1/08/09
	04	T1/F1/08/01	T1/F1/08/03	T1/F1/08/05	T1/F1/08/07	T1/F1/08/09

Tabla E.1: Campanas, lotes y probetas analizadas.