

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Aeroespacial

Vehículos aeroespaciales

Estudio de la influencia del estado reológico de los  
componentes durante el pegado en paneles  
rigidizados

Autor: Juan Ramón Campano Hernández

Tutor: Jesús Justo Estebaranz

Federico París Carballo

Dep. de Mecánica de Medios Continuos y  
Teoría de Estructuras  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla



Sevilla, 2017





Trabajo de Fin de Grado  
Ingeniería Aeroespacial

# **Estudio de la influencia del estado reológico de los componentes durante el pegado en paneles rigidizados**

Autor:

Juan Ramón Campano Hernández

Tutores:

Jesús Justo Estebaranz

Profesor Ayudante Doctor

Federico París Carballo

Catedrático de Universidad

Dep. de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de Estructuras

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017



Trabajo de Fin de Grado: Estudio de la influencia del estado reológico de los componentes durante el pegado  
en paneles rigidizados

Autor: Juan Ramón Campano Hernández

Tutores: Jesús Justo Estebaranz  
Federico París Carballo

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2017

El Secretario del Tribunal



---

<b>Índice</b>	<b>vii</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>ix</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xi</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>3</b>
1.1. <i>Motivación</i>	3
1.2. <i>Objetivo</i>	5
1.3. <i>Estructura del trabajo</i>	6
<b>2 Plan de Fabricación y Ensayo</b>	<b>7</b>
2.1 <i>Introducción</i>	7
2.2 <i>Plan de Fabricación</i>	8
2.3 <i>Plan de Ensayo</i>	10
<b>3 Diseño y Fabricación de las probetas</b>	<b>11</b>
3.1 <i>Introducción</i>	11
3.2 <i>Proceso de fabricación de las probetas</i>	13
3.2.1 Unión entre piel y rigidizador según la configuración	13
3.2.2 Fabricación del revestimiento	13
3.2.3 Fabricación de la omega	15
3.2.4 Ciclo de curado	17
3.2.5 Extracción de la pieza y resanado	18
3.3 <i>Dificultades encontradas en el proceso</i>	19
3.4 <i>Resultado de la fabricación</i>	22
<b>4 Ensayo de arrancamiento</b>	<b>11</b>
4.1 <i>Introducción</i>	11
4.2 <i>Fabricación del útil de ensayo</i>	13
4.3 <i>Preparación de las probetas para el ensayo</i>	15
4.3.1 Posición de las bandas extensométricas	15
4.3.2 Procedimiento de colocación de bandas extensométricas	15
<b>5 Análisis de los resultados del ensayo</b>	<b>19</b>
5.1 <i>Introducción</i>	19
5.2 <i>Ensayo de configuración Curado-Curado</i>	20
5.2.1 Ensayo de C-C1	20
5.2.2 Ensayo de C-C2	23
5.2.3 Ensayo de C-C3	26
5.2.4 Comparación preliminar de C-C	29
5.3 <i>Ensayo de configuración Fresco-Curado</i>	30
5.3.1 Ensayo de F-C1	30
5.3.2 Ensayo de F-C2	33
5.3.3 Ensayo de F-C3	35

5.3.4	Comparación preliminar de F-C	37
5.4	<i>Ensayo de configuración Curado-Fresco</i>	38
5.4.1	Ensayo de C-F1	38
5.4.2	Ensayo de C-F2	40
5.4.3	Ensayo de C-F3	42
5.4.4	Comparación preliminar de C-F	44
5.5	<i>Ensayo de configuración Fresco-Fresco</i>	45
5.5.1	Ensayo de F-F1	45
5.5.2	Ensayo de F-F2	46
5.5.3	Ensayo de F-F3	48
5.5.4	Comparación preliminar de C-F	50
5.6	<i>Comparación de resultados finales</i>	51
<b>6</b>	<b>Conclusiones y Desarrollo futuro</b>	<b>55</b>
6.1	<i>Resumen del trabajo</i>	55
6.2	<i>Conclusiones</i>	57
6.3	<i>Desarrollos futuros</i>	58
	<b>Bibliografía y Referencias</b>	<b>61</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 2-1. Secuencias de apilado [s: simétrico]	9
Tabla 3-1. Ciclo de curado de carbono	17
Tabla 3-2. Ciclo de curado de adhesivo	18
Tabla 5-1. Resumen de resultados de los ensayos	51
Tabla 5-2. Valores medios de cargas de grieta y máxima	53



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1-1. Goodrich fan cowl abierto [1]	3
Figura 2-1. Diseño de la probeta	8
Figura 2-2. Dimensiones de la probeta	8
Figura 2-3. Dimensiones del molde	9
Figura 3-1. Plano de la probeta	11
Figura 3-2. Orientaciones de apilado de 0 grados en piel y omega	12
Figura 3-3. Dimensiones de paneles de la piel (Cotas en mm)	13
Figura 3-4. Utensilios y materiales	15
Figura 3-5. Tejido aireador, plástico y lámina desmoldeante	15
Figura 3-6. Dimensiones de paneles de la omega (Cotas en mm)	16
Figura 3-7. Moldes de aluminio	16
Figura 3-8. Ciclo de curado de carbono	17
Figura 3-9. Ciclo de curado de adhesivo	18
Figura 3-10. Bolsa con escape de resina	19
Figura 3-11. Bolsa completa con tres moldes, placas y doble tejido	20
Figura 3-12. Placas de elevación del molde	20
Figura 3-13. Probeta con defecto de pegado	21
Figura 3-14. Piezas listas para el resanado	22
Figura 3-15. Probetas cortadas y numeradas	22
Figura 4-1. Máquina de ensayo	12
Figura 4-2. Diseño del útil de ensayo	13
Figura 4-3. Útil de ensayo fabricado	14
Figura 4-4. Posición de las bandas extensométricas	15
Figura 4-5. Gramil	16
Figura 4-6. Catalizador y pegamento	17
Figura 5-1. Carga frente a desplazamiento en C-C1	20
Figura 5-2. Detalle de la grieta inicial en C-C1	21
Figura 5-3. Aspecto de la probeta en C-C1	21
Figura 5-4. Lecturas de las bandas en C-C1	22
Figura 5-5. Carga frente a desplazamiento en C-C2	23
Figura 5-6. Detalle de la grieta de fallo en C-C2	24
Figura 5-7. Aspecto de la probeta en C-C2	24
Figura 5-8. Lectura de las bandas en C-C2	25
Figura 5-9. Carga frente a desplazamiento en C-C3	26
Figura 5-10. Aspecto de la probeta en C-C3	27

Figura 5-11. Lectura de las bandas en C-C3	28
Figura 5-12. Comparación preliminar C-C	29
Figura 5-13. Carga frente a desplazamiento en F-C1	30
Figura 5-14. Detalle de la grieta de fallo en F-C1	30
Figura 5-15. Aspecto de la probeta en F-C1	31
Figura 5-16. Lectura de las bandas en F-C1	32
Figura 5-17. Carga frente a desplazamiento en F-C2	33
Figura 5-18. Aspecto de la probeta en F-C2	33
Figura 5-19. Lectura de las bandas en F-C2	34
Figura 5-20. Carga frente a desplazamiento en F-C3	35
Figura 5-21. Aspecto de la probeta en F-C3	35
Figura 5-22. Lectura de las bandas en F-C3	36
Figura 5-23. Comparación preliminar F-C	37
Figura 5-24. Carga frente a desplazamiento en C-F1	38
Figura 5-25. Detalle de grieta en C-F1	39
Figura 5-26. Aspecto de la probeta en C-F1	39
Figura 5-27. Carga frente a desplazamiento en C-F2	40
Figura 5-28. Aspecto de la probeta en C-F2	41
Figura 5-29. Lectura de las bandas en C-F2	41
Figura 5-30. Carga frente a desplazamiento en C-F3	42
Figura 5-31. Aspecto de la probeta en C-F3	42
Figura 5-32. Lectura de las bandas en C-F3	43
Figura 5-33. Comparación preliminar C-F	44
Figura 5-34. Carga frente a desplazamiento en F-F1	45
Figura 5-35. Carga frente a desplazamiento en F-F2	46
Figura 5-36. Detalle de grieta inicial en F-F2	46
Figura 5-37. Aspecto de la probeta en F-F2	47
Figura 5-38. Lectura de las bandas en F-F2	47
Figura 5-39. Cargas frente a desplazamiento en F-F3	48
Figura 5-40. Aspecto de la probeta en F-F3	48
Figura 5-41. Lectura de las bandas en F-F3	49
Figura 5-42. Comparación preliminar F-F	50





# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1. Motivación

Debido a la propia naturaleza del diseño de las aeronaves, en la industria aeronáutica abundan las estructuras compuestas por un revestimiento tubular cerrado y reforzado con elementos que reciben diferentes nombres según su tamaño o posición: largueros, larguerillos, etc... Estos elementos se encargan de aportar rigidez a la estructura ante las grandes tensiones a las que se somete durante su uso.

En particular, para este trabajo, se observa la situación del carenado del fan o "*fan cowl*", que cumple la función de revestimiento del fan. Este se ve reforzado por elementos, típicamente en forma de omega, que recorren el perímetro de la estructura a modo de rigidizadores.



Figura 1-1. Goodrich fan cowl abierto [1]

Con el reciente auge de los materiales compuestos y el aumento a pasos agigantados de su uso en los aviones comerciales, el "*fan cowl*" se ha unido a la lista de estructuras que actualmente se fabrican con material compuesto. Sin embargo, de un tiempo a esta parte se tiene constancia de fallos en dichos elementos de refuerzo.

El método de fabricación empleado en los rigidizadores en esta pieza consiste en curar por

un lado el revestimiento y por otro cada uno de los refuerzos con su forma en omega. Posteriormente, se unen con material adhesivo que también pasa por un ciclo en autoclave, proceso conocido como co-pegado.

Este método implica que los curados de cada una de las piezas unidas son independientes y, por tanto, no se logra la compacidad y propiedades de una sola pieza de material compuesto curada a la vez. A tener en cuenta está la dificultad del curado del conjunto entero a la vez en una planta de fabricación. Sin embargo, cabe la duda de si los fallos encontrados en las uniones de los rigidizadores y el revestimiento podrían ser solventados haciendo uso de otro método de unión.

De aquí surge la motivación de este trabajo: estudiar los tipos de pegado entre un revestimiento y un rigidizador en forma de omega fabricados en material compuesto y la influencia del estado reológico de los mismos en el momento de su unión.

## **1.2. Objetivo**

El objetivo de este trabajo es el de estudiar el tipo de unión entre piezas de material compuesto y encontrar la forma de adhesión que presente las mejores prestaciones en cuanto a arrancamiento.

Se va a concretar el caso específico de unión entre pieles planas y rigidizadores en forma de omega, por lo que, de forma adicional, se va a estudiar el mecanismo de fallo de estas uniones y la propagación de la grieta que provoca la rotura.

### 1.3. Estructura del trabajo

A continuación, se explica el contenido de cada uno de los posteriores capítulos del trabajo:

- **Capítulo 2:** se propone el plan de fabricación de las probetas y de diseño del ensayo que se pretende realizar. Incluye el plano de las probetas con sus dimensiones.
- **Capítulo 3:** se detalla el proceso de fabricación de las probetas y las dificultades encontradas, así como el resultado final de las piezas y su comparación con el planteado en el plan inicial.
- **Capítulo 4:** se centra en los resultados obtenidos en los ensayos de las probetas: gráficas, imágenes de las superficies y explicación de la ruptura observada, además de incluir una comparación final de los resultados de las cuatro configuraciones.
- **Capítulo 5:** supone la conclusión del trabajo, el resumen del mismo y una proposición de las posibilidades de desarrollo futuro del estudio.

# 2 PLAN DE FABRICACIÓN Y ENSAYO

---

## 2.1 Introducción

A continuación, se va a detallar la planificación inicial del proyecto. Por un lado, es necesario definir un proceso para alcanzar los objetivos propuestos con anterioridad. Esto es, diseñar la forma y dimensiones de las probetas que se van a querer fabricar, así como el proceso que se seguirá para producirlas.

Además, resulta primordial definir el ensayo posterior que se realizará a las probetas para comprobar sus propiedades y obtener resultados de interés.

## 2.2 Plan de Fabricación

Para cumplir con los objetivos de este proyecto se han fabricado una serie de probetas de material compuesto representando cuatro configuraciones posibles en la unión entre el rigidizador y el revestimiento:

- Piel fresca-Omega fresca (co-curado)
- Piel fresca-Omega curada
- Piel curada-Omega fresca
- Piel curada-Omega curada (co-pegado)

El conjunto entero, tanto el revestimiento como el rigidizador, han sido fabricados en fibra de carbono con resina epoxy, material cuya denominación es HexPly<sup>®</sup> M21, en las instalaciones del Laboratorio de Elasticidad y Resistencia de Materiales de la ETSI, Sevilla. Se han fabricado probetas que tienen la forma que se observa en la Figura 2-1.

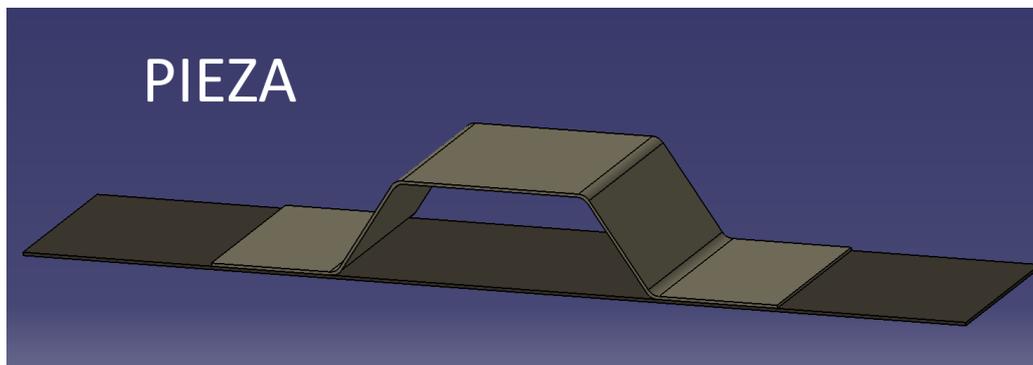


Figura 2-1. Diseño de la probeta

Las dimensiones exactas de cada probeta quedan definidas en la Figura 2-2. Los criterios seguidos para el dimensionamiento de la probeta obedecen, para el revestimiento, a la suficiente separación de las alas de la omega con el borde de la piel con el objetivo de dejar suficiente espacio para el agarre durante el ensayo y, para el rigidizador, a un tamaño suficiente de las alas para que se produzca un arrancamiento convencional.

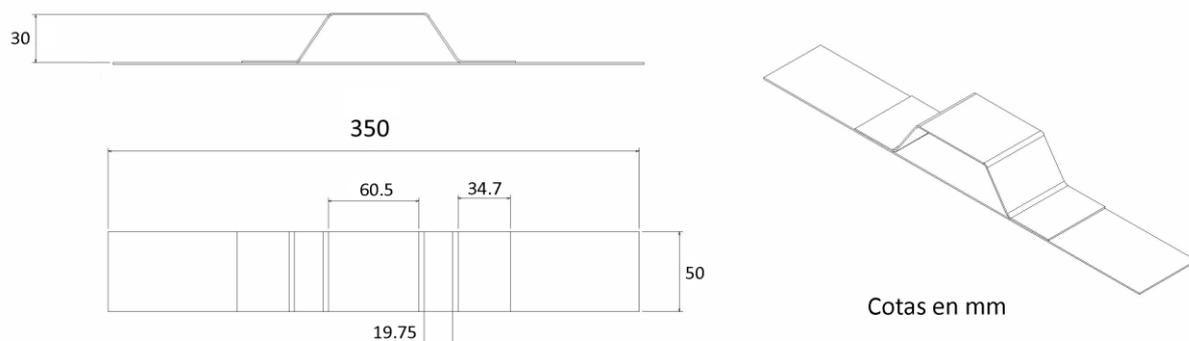


Figura 2-2. Dimensiones de la probeta

Las dimensiones del hueco interior de la omega, tanto la altura como el ancho y el ángulo, han sido definidos por las piezas que se han usado durante su fabricación: cuatro machos de aluminio macizo con las dimensiones descritas en la Figura 2-3.

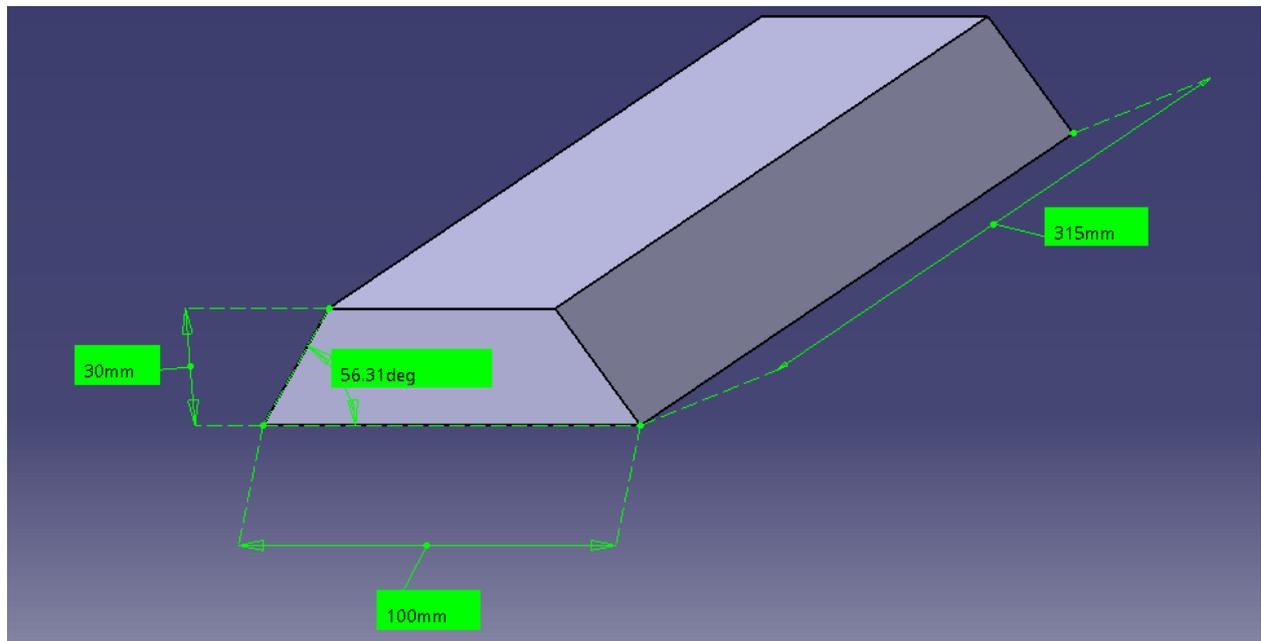


Figura 2-3. Dimensiones del molde

Las probetas han sido fabricadas en piezas mayores que comprenden 4 probetas individuales que han sido recortadas y resanadas tras su fabricación.

En ambos componentes, piel y rigidizador, se ha usado la misma secuencia de apilado, que se describe en la Tabla 2-1.

Secuencia de apilado	
Piel y Rigidizador	[0/45/-45/90/-45/45/0]s

Tabla 2-1. Secuencias de apilado [s: simétrico]

Para cada una de las cuatro configuraciones que se barajan se empleó un método apropiado para la unión de los dos componentes, haciendo uso de láminas de adhesivo FILM FM300K.05 para los casos en los que alguna de las dos piezas se encuentre curada.

## 2.3 Plan de Ensayo

Tras la fabricación de las probetas se diseñó un ensayo de arrancamiento en el cual se fija la piel por los extremos y se tracciona la zona central del rigidizador para provocar la separación de las dos piezas. La evolución de las deformaciones en el arrancamiento se ha monitorizado mediante la colocación de bandas extensométricas en las alas del rigidizador, así como observando la evolución de la grieta durante la separación.

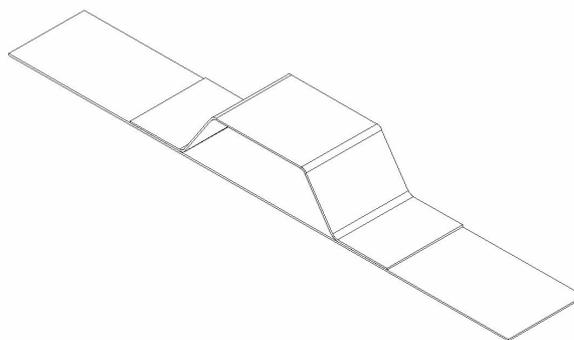
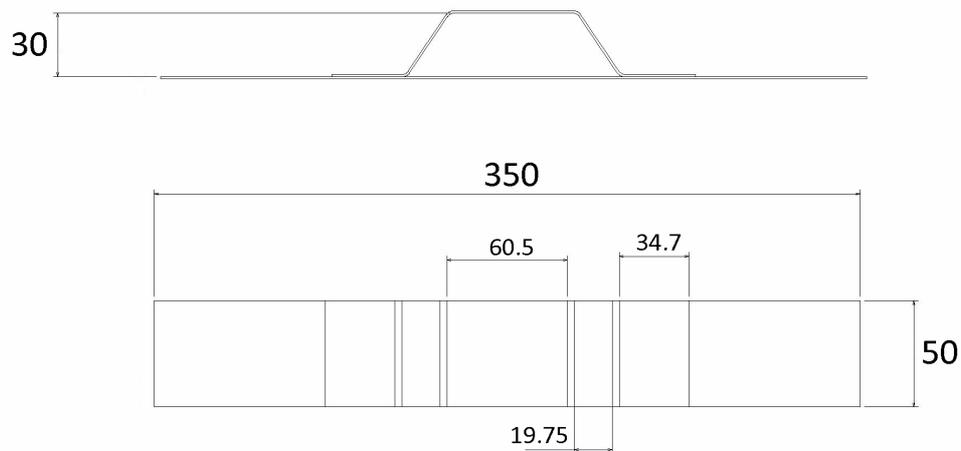
Posteriormente, en el análisis de resultados se ha estudiado la superficie de rotura y se han comparado los resultados obtenidos para todas las configuraciones.

# 3 DISEÑO Y FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS

## 3.1 Introducción

En este capítulo se describe el proceso de fabricación de las probetas destinadas a su ensayo por arrancamiento.

Las probetas fabricadas para representar cada una de las cuatro configuraciones de unión tienen la misma forma y dimensiones con el fin de comparar sus capacidades. Las dimensiones exactas son las mostradas en la Figura 3-1.



Cotas en mm

Figura 3-1. Plano de la probeta

Cada probeta está formada por dos componentes fácilmente diferenciables: la piel o revestimiento, placa plana de mayores dimensiones, y la omega o rigidizador, unida sobre la piel y que tiene la forma propia de los usados en la industria.

El laminado de ambos componentes para todas las configuraciones es el mismo, siendo uno simétrico formado por 7 capas que alternan diferentes ángulos para obtener unas propiedades lo más homogéneas posibles en todas las direcciones del plano. En la Tabla 2-1 se puede ver en detalle la secuencia de apilado usada.

Resulta importante precisar que la dirección de 0 grados es diferente en la piel y en el revestimiento. Con el fin de asemejar el ensayo lo más posible a las piezas reales de la industria, la dirección de 0 grados del revestimiento es a lo largo del ancho de la probeta, mientras que para la omega es a lo largo de la probeta. Esto se puede ver con mayor claridad en la Figura 3-2.

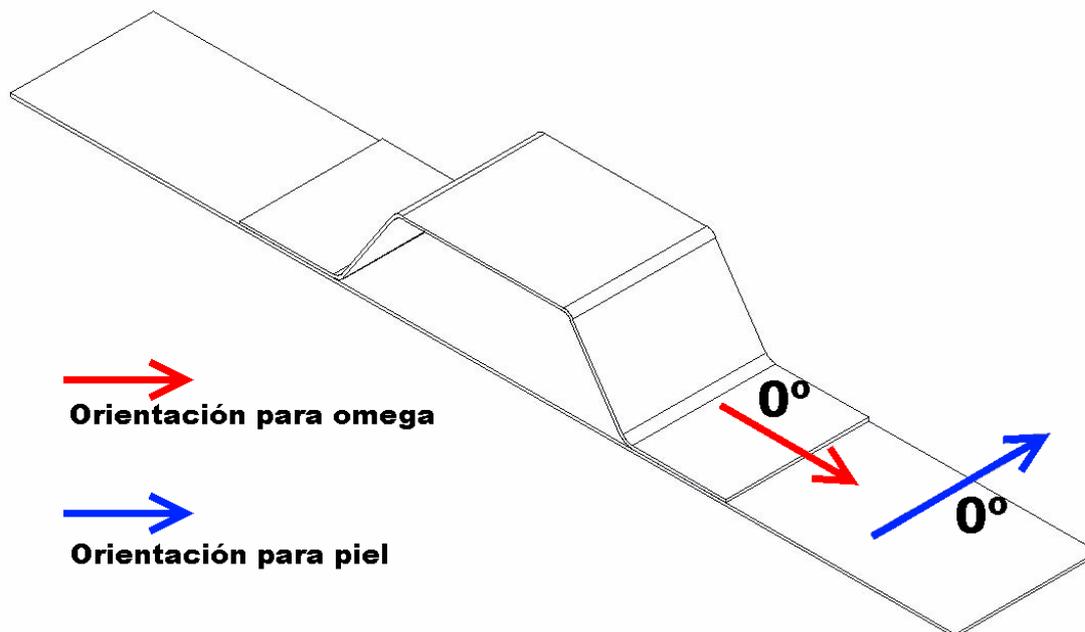


Figura 3-2. Orientaciones de apilado de 0 grados en piel y omega

Se han fabricado 16 probetas, 4 de cada configuración, debido a que en su fabricación se obtienen 4 probetas por cada pieza original curada.

El método de fabricación de las probetas ha sido el de apilado manual de prepreg o preimpregnados con compactación en bolsa de vacío y curado en autoclave. En cuanto a la unión de los dos componentes, para cada configuración se ha seguido un proceso diferente de acuerdo a la naturaleza de cada caso que se explicará en detalle más adelante.

## 3.2 Proceso de fabricación de las probetas

### 3.2.1 Unión entre piel y rigidizador según la configuración

La unión de piel y omega frescas recibe el nombre de co-curado, y consiste en sencillamente realizar el apilado a la vez e introducir el conjunto en el autoclave. De esta forma la unión entre ambas se produce por el propio polímero del material.

En cuanto a la configuración de piel y omega curadas es necesario realizar un ciclo de autoclave previo a ambas de forma separada. Una vez se tienen las dos piezas totalmente curadas se unen mediante un adhesivo en lámina que requiere de otro ciclo de curado. El resultado es el conocido como co-pegado.

Para las dos configuraciones “mixtas”, piel fresca y omega curada o piel curada y omega fresca, ha sido necesario curar previamente de forma individual los componentes que deben estar curados. Posteriormente se aplica el mismo adhesivo en la zona de unión y se une al componente fresco recién apilado. El propio ciclo que requiere el adhesivo será el que se encargue de curar la zona fresca para obtener una probeta finalizada.

### 3.2.2 Fabricación del revestimiento

El proceso de fabricación de los revestimientos fue el del apilado manual para generar placas planas. Dado que de cada pieza fabricada se debían extraer 4 probetas, las dimensiones de las pieles debían ser las mostradas en la Figura 3-3. Nótese que, frente a las dimensiones esperadas, existe un sobredimensionamiento de 20 milímetros en las dos direcciones, debido a que posteriormente sería necesario resanarlas y se perdería parte del material.

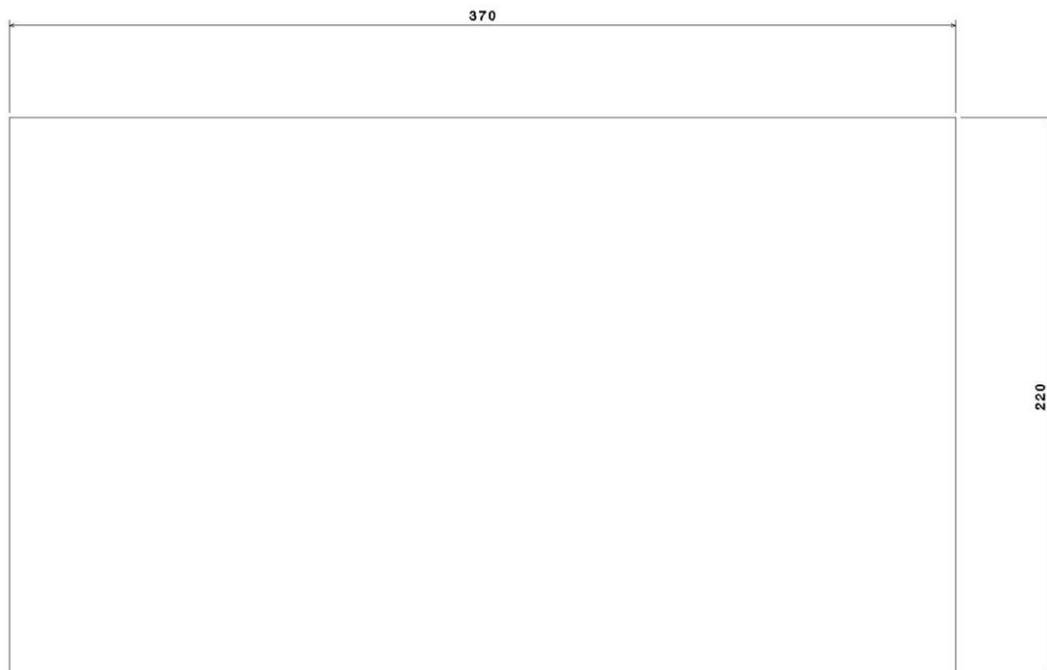


Figura 3-3. Dimensiones de paneles de la piel (Cotas en mm)

El primer paso es cortar de forma precisa las láminas de un rollo de preimpregnado ya atemperado con las dimensiones y orientación necesarias para cada una. Dado que estos paneles no son cuadrados, fue necesario cortar de forma específica cada una de las orientaciones (0, 90, 45 y -45 grados). Para esto se usó cúter e instrumentos de medición: regla, escuadra y cartabón.

A continuación, se realiza el apilado siguiendo la secuencia descrita en la Tabla 2-1. Para ello se van colocando una a una con la orientación adecuada y presionando cada una tras ser colocada con una espátula de nylon para yudar a la compactación. De forma adicional, cada 4 láminas, el conjunto se introducía en una bolsa de vacío durante 5 minutos para precompactarlo correctamente.

Para el caso de las pieles que requerían de adhesión estando frescas (piel fresca-omega curada y co-curado) en este punto se produce la unión con adhesivo o apilado con el otro componente, la omega. En este proceso es común hacer uso de un tejido peel-ply que provoca rugosidades en las láminas previamente a la aplicación del adhesivo para mejorar la sujeción. Sin embargo, para este caso se optó por lijar la superficie ya que en primeros intentos el tejido resultó difícil de retirar y de manipular.

El siguiente paso, ya sea para la fabricación de un revestimiento individual o para uno fresco ya unido a una omega, es la preparación de la plancha para el autoclave: sobre la plancha se colocó una lámina de material desmoldeante sobre la que se sitúa el revestimiento. Éste se rodea de corcho adhesivo para evitar que durante el curado la resina fluya hacia fuera provocando defectos en el material.

Sobre esto se coloca otra lámina de desmoldeante y sobre ella una capa de tejido aireador que garantiza que el vacío se distribuya por toda la plancha. Sobre el tejido se colocan dos tomas de vacío necesarias para el autoclave.

Finalmente, sobre todo se coloca una lámina de bolsa de plástico fijada a la plancha con cromato dejando hermético el interior de la bolsa. Se realizaron dos incisiones en la bolsa en la zona de las tomas de vacío con la misma toma superior para abrir el canal de succión y la bolsa estaba terminada.

Previamente a la introducción de la plancha en el autoclave es necesario comprobar que el vacío es total en el interior, para lo que se conecta al propio autoclave y se asegura que una vez hecho el vacío, la presión se mantiene de forma considerable. En caso de que no se mantenga, es necesario reparar la unión entre el cromato y la bolsa, ya que suelen aparecer pequeños pliegues o huecos en las esquinas por los que el aire fluye. Con presionar fuertemente estas zonas el problema desaparece.

Los materiales y utensilios totales usados en este proceso son los que aparecen en las Figuras 3-4 y 3-5.



Figura 3-4. Utensilios y materiales



Figura 3-5. Tejido aireador, plástico y lámina desmoldeante

### 3.2.3 Fabricación de la omega

Para la fabricación de la omega el procedimiento es análogo al del revestimiento. Los paneles de prepreg cortados para ésta deben obedecer las dimensiones mostradas en la Figura 3-6. Se puede apreciar el sobredimensionamiento en la dirección del ancho de la probeta para el resanado posterior, pero no en la dirección del largo de la probeta ya que esta parte se encuentra unida a la piel y en varias configuraciones no es posible resanarla.

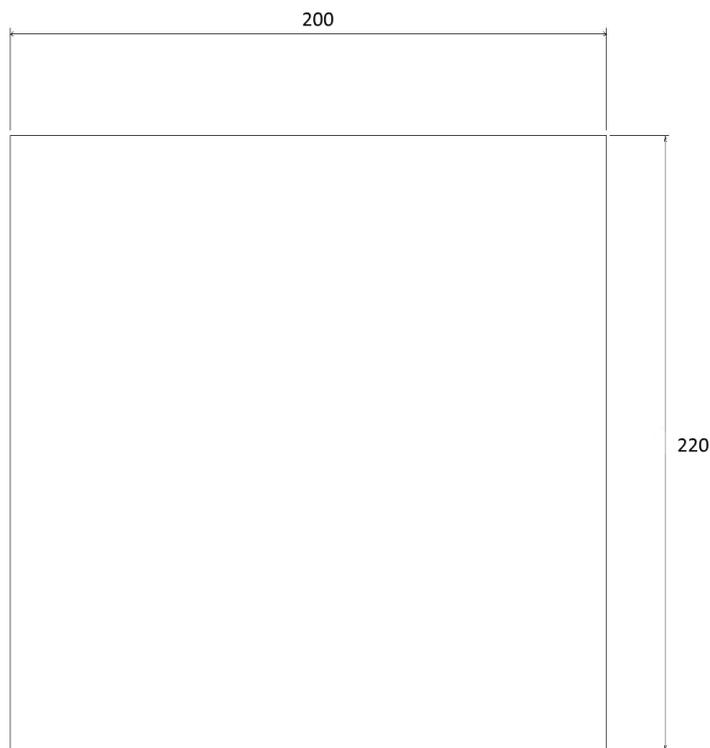


Figura 3-6. Dimensiones de paneles de la omega (Cotas en mm)

El apilado de las omegas ha sido especialmente dificultoso en comparación con el de los revestimientos, ya que es necesario darle la forma adecuada a medida que se apila. Para ello se hizo uso de los moldes de la Figura 3-7.

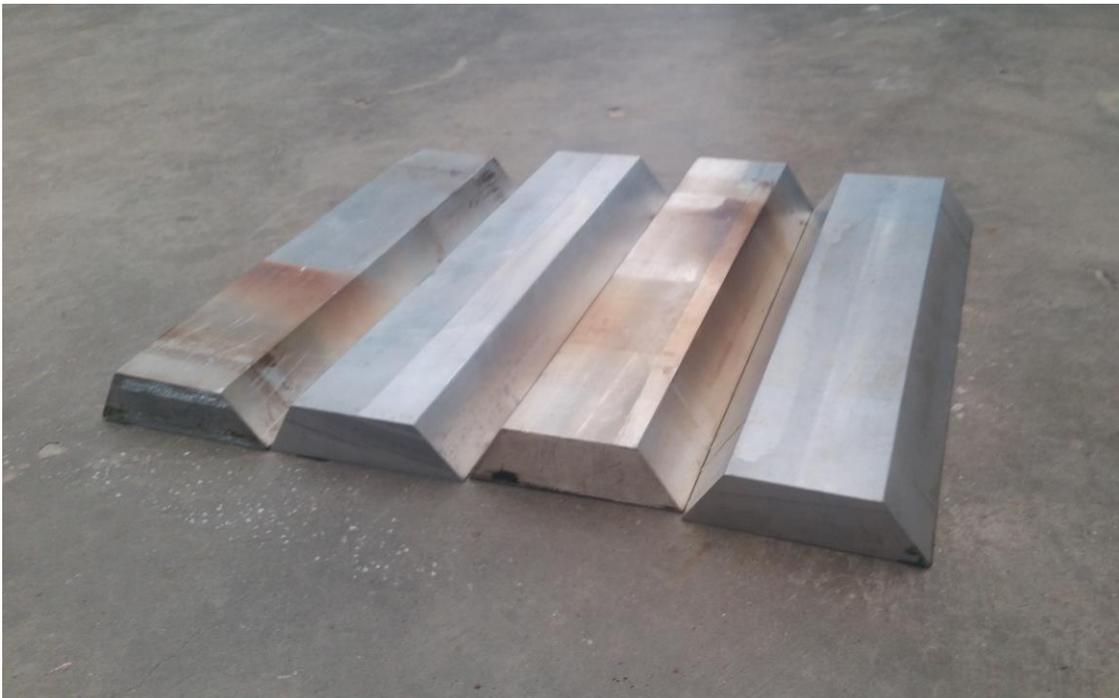


Figura 3-7. Moldes de aluminio

Para proteger el molde y a la vez evitar que la resina se adhiriera al mismo, se recubrió de lámina desmoldeante en su totalidad, y sobre él se apilaron una a una las capas con ayuda de la espátula

y de un secador, para hacer el material compuesto más maleable. Fue de gran importancia marcar la esquina del molde donde comienza la unión entre omega y revestimiento, ya que este punto debía tener el ángulo diseñado para evitar la aparición de una grieta inicial en el ensayo.

Una vez se tenía la pieza individual o unida a una piel en la plancha preparada, se procedía al ciclo de curado.

### 3.2.4 Ciclo de curado

El ciclo de curado varía según el contenido de la plancha. Para el caso del curado de piezas de únicamente fibra de carbono y epoxy, como son los componentes individualmente o la configuración de co-curado, el ciclo tiene una duración total de 4 horas y media. Cada uno de los puntos por los que pasa están descritos en la Tabla 3-2. Asimismo, en la Figura 3-8 se puede ver una representación gráfica de la evolución de la temperatura, presión y vacío de la bolsa durante el mismo.

Puntos	Inicio	1	2	3	4	Fin
Tiempo	00:00:00	00:20:36	01:42:20	03:42:20	04:15:40	04:34:00
Temperatura (°C)	30.0	56.0	180.0	180.0	80	25.0
Presión del autoclave (bar)	0.0	1.4	9.0	9.0	9.0	0.0
Vacío de la bolsa (bar)	-0.800	-0.800	-0.800	-0.800	-0.800	0.000

Tabla 3-1. Ciclo de curado de carbono

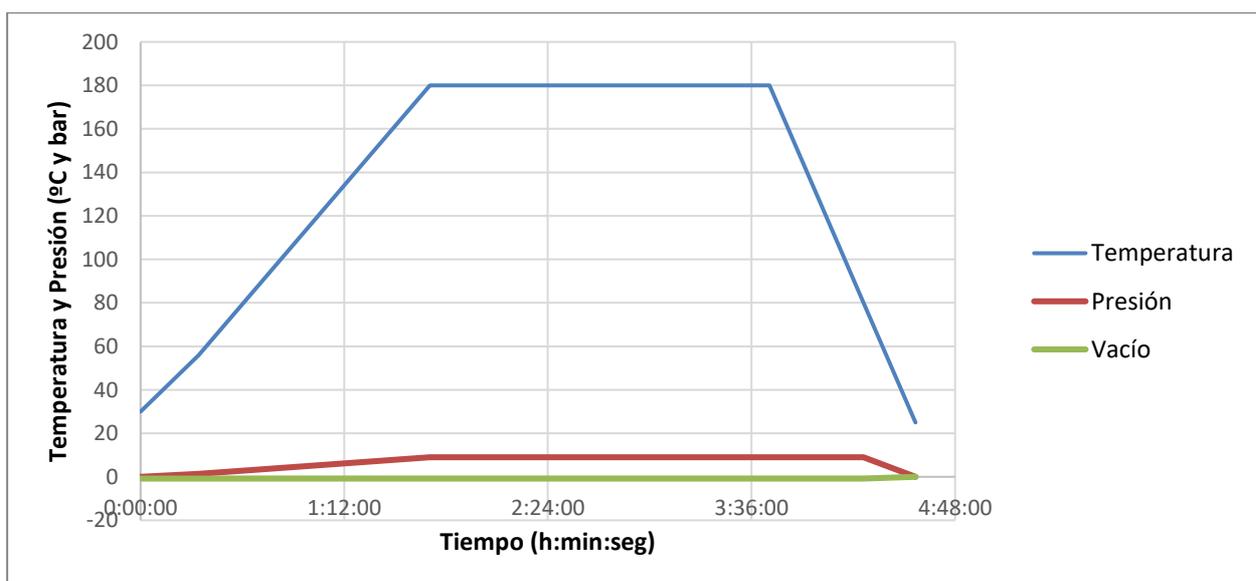


Figura 3-8. Ciclo de curado de carbono

Por el otro lado, cuando el contenido es con adhesivo, ya sea el co-pegado o las

configuraciones mixtas ya unidas, el ciclo es ligeramente diferente, con una duración total de 6 horas y media. Una vez más, los puntos del ciclo son los descritos en la Tabla 3-3, además de encontrarse representados de forma más clara en la gráfica de la Figura 3-9.

Puntos	Inicio	1	2	3	4	5	6	Fin
Tiempo	00:00:00	00:05:00	00:06:00	00:21:00	02:51:00	05:11:00	06:26:00	06:36:00
Temperatura (°C)	30.0	30.0	30.0	30.0	180	180	25	25
Presión del autoclave (bar)	0.0	1.4	1.5	4.0	4.0	4.0	4.0	0.0
Vacío de la bolsa (bar)	-0.800	-0.800	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Tabla 3-2. Ciclo de curado de adhesivo

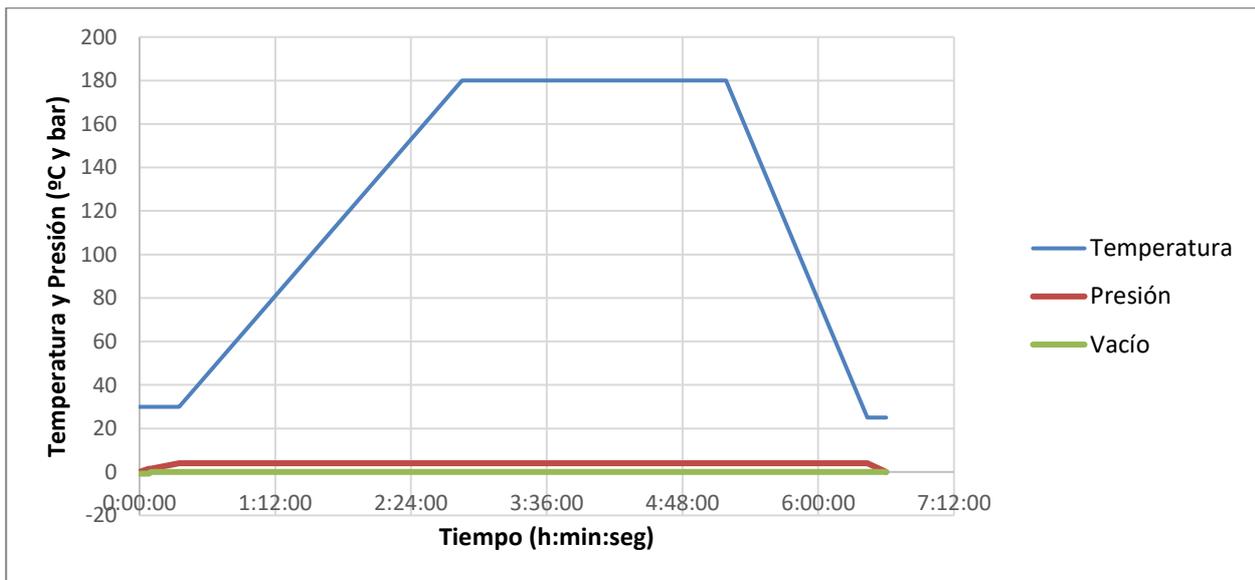


Figura 3-9. Ciclo de curado de adhesivo

### 3.2.5 Extracción de la pieza y resanado

Una vez ha terminado el ciclo de curado, se retira la bolsa cuando se haya enfriado y se extraen las piezas terminadas. Estas poseen restos de corcho adhesivo unido con la propia resina del compuesto en los extremos, así como imperfecciones en los bordes debido a un corte y apilado de láminas no totalmente exacto. Estos defectos se solventan con el resanado posterior.

En el taller, haciendo uso de sierra abrasiva de filo de diamante refrigerada con agua, se retiran los bordes y se cortan las probetas con el tamaño de diseño.

### 3.3 Dificultades encontradas en el proceso

En el proceso de pasar del diseño de las probetas a su forma física han surgido varios problemas.

El primero apareció al colocar los corchos adhesivos a las omegas. Estos deben rodear por completo el material compuesto, por lo que fue necesario que se colocaran sobre el molde de aluminio. En los ángulos de inclinación se producían aberturas por las que, durante el curado, la resina fluyó hacia fuera. Sin embargo, como se puede observar en la Figura 3-10, no es una cantidad considerable y el estado de las piezas no se vió afectado.

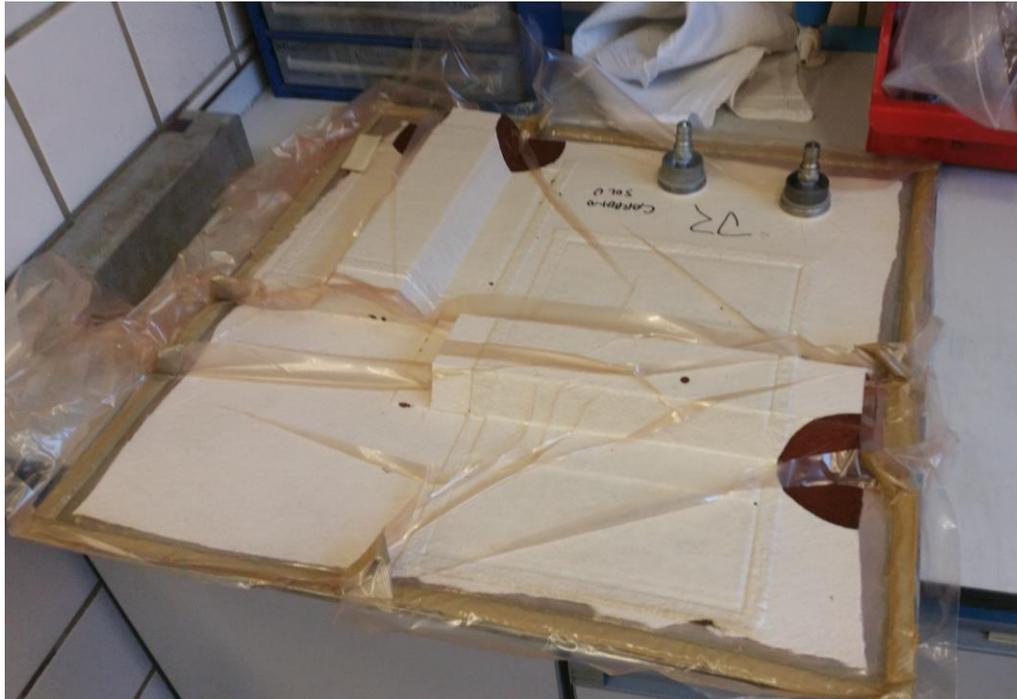


Figura 3-10. Bolsa con escape de resina

Otro aspecto que se tuvo en cuenta fue que aquellas planchas que no contuvieran piezas planas presentarían dobleces en la bolsa ya que esta tendría que adaptarse a la forma tridimensional de la omega y el molde, no sólo provocando tirones del plástico al hacer vacío sino creando ángulos agudos como en los bordes del molde, que podrían llegar a romper la bolsa. La solución dada fue la de hacer “pinzas” con el cromato en paralelo a los bordes del molde, creando así un pliegue natural a la bolsa de plástico y evitando tensiones. Estas “pinzas” se pueden apreciar tanto en la Figura 3-10 como en la Figura 3-11, donde además se ven tres piezas completas listas para el ciclo de curado con adhesivo. Adicionalmente, para evitar bordes angulosos en el molde se colocó una doble capa de tejido aireador recortando pequeñas tiras del mismo y colocándolos en los extremos con filo, creando un rebordeado más suave.



Figura 3-11. Bolsa completa con tres moldes, placas y doble tejido

En cuanto a las bolsas que contenían piezas completas con los dos componentes unidos y el molde en su interior, surgió el problema de que, durante el curado, la piel adquiriría cierto grado de fluidez y el propio peso del molde podría provocar una marca sobre ella, creando serios defectos. Para solucionar este inconveniente se optó por colocar pequeñas placas de aluminio como las que se pueden ver en la Figura 3-12 debajo del molde a los laterales de la piel. Estas placas tienen el espesor aproximado de las 7 láminas de la piel y, por tanto, impedirían que el molde reposara sobre el revestimiento.



Figura 3-12. Placas de elevación del molde

Sin embargo, el uso de unas placas inicialmente demasiado gruesas provocó un importante defecto en las primeras piezas fabricadas. Debido a que el molde se encontraba demasiado alto, la unión entre omega y piel no fue completa y parte del adhesivo se perdió, produciendo una separación a lo largo de toda la pieza como la que se muestra en la Figura 3-13.



Figura 3-13. Probeta con defecto de pegado

El uso de otras placas levemente más finas solucionó el problema en las probetas posteriores.

### 3.4 Resultado de la fabricación

Finalmente se obtuvo las cuatro piezas asociadas a cada configuración sin ningún defecto notable. Se cortó cada una en cuatro probetas que se adaptaran a las dimensiones de diseño. En las Figuras 3-14 y 3-15 se pueden ver las piezas enteras y preparadas para el resanado y cortado, y el resultado final, respectivamente.



Figura 3-14. Piezas listas para el resanado



Figura 3-15. Probetas cortadas y numeradas

Las probetas han sido nombradas siguiendo una nomenclatura simple como se aprecia en la Figura 3-15. Consiste en dos letras separadas con un guión, que indican la configuración siguiendo la norma piel-omega (por ejemplo, F-C es piel fresca, omega curada), seguidas de un número que indica la probeta dentro de cada configuración.

Con las probetas preparadas y en perfectas condiciones se procedió a su ensayo.

# 4 ENSAYO DE ARRANCAMIENTO

---

## 4.1 Introducción

En este capítulo se describe la preparación de las probetas para el ensayo de arrancamiento, así como el diseño del ensayo en sí mismo y la fabricación de los útiles necesarios.

Al final del proceso de fabricación se obtuvo 16 probetas, 4 para cada configuración. De estas 16, 4 de ellas se retiraron con objetivo de guardar ejemplo para la presentación del trabajo, mientras que las 12 restantes se prepararon para ser ensayadas.

En los ensayos realizados se ha estudiado:

- La evolución del nivel de carga a lo largo del arrancamiento de la probeta, así como sus valores en la aparición y propagación de grietas y en el fallo.
- La evolución y características de la grieta, así como cualquier fenómeno ocurrido durante el ensayo.
- Los registros de deformaciones en las alas de la omega proporcionados por bandas extensométricas.
- El aspecto de la superficie de unión entre piel y rigidizador tras el ensayo.



Figura 4-1. Máquina de ensayo

Todos los ensayos se han realizado con una máquina Instron 4482 como la de la Figura 4-1, con una célula de carga de 100KN, mucho más de lo necesario, y con ayuda de un útil diseñado y fabricado específicamente para el ensayo de las probetas. En un principio la velocidad escogida para el ensayo fue de 0.5 mm/min. Sin embargo, quedó patente en el primer ensayo que se podía aumentar a un valor para el resto de pruebas de 4 mm/min.

## 4.2 Fabricación del útil de ensayo

Para realizar un ensayo de arrancamiento es necesario disponer de un útil con unas dimensiones exactas que se adapten a la forma de nuestra probeta. Para nuestro caso, este útil debe tener una doble función: sujetar la probeta por la piel en los extremos para garantizar que no se mueva ni deslice y proporcionar un agarre de la parte superior de la omega por parte de la máquina de ensayo para realizar la tracción.

El diseño preliminar del ensayo como tal se puede observar en la Figura 4-2. Constaría de una base plana donde reposa la piel y de dos sujeciones laterales atornilladas que fijarían los extremos de la probeta. Otra pieza iría sujeta a la zona central del rigidizador y atornillada, con un vástago superior que se uniría a la máquina de ensayo para el arrancamiento.

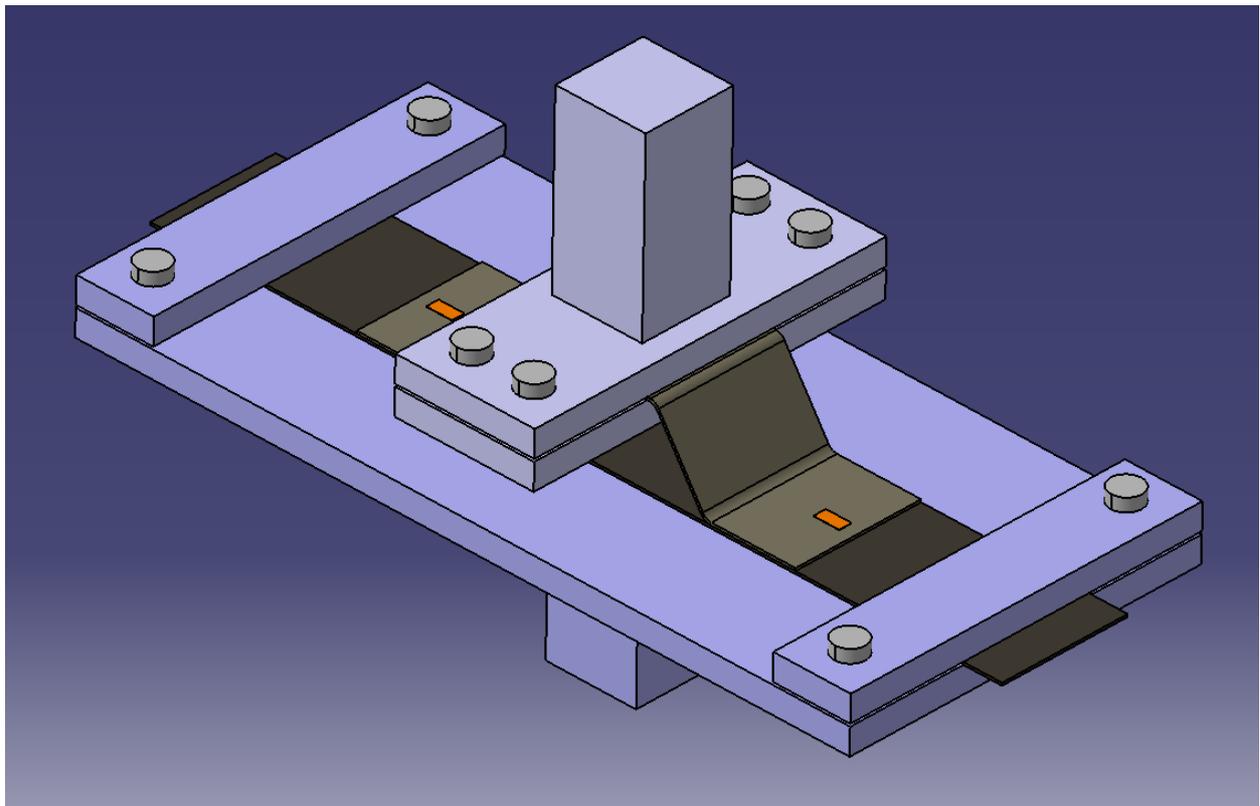


Figura 4-2. Diseño del útil de ensayo

Ambos útiles, agarre superior y agarre inferior, han sido fabricados en el taller. El resultado final es el que se puede ver en la Figura 4-3. Cabe decir que el agarre superior iría sujeto a la máquina por su propia mordaza y el agarre inferior se sujetaría a la base de la máquina de ensayo mediante gatos mecánicos.



Figura 4-3. Útil de ensayo fabricado

### 4.3 Preparación de las probetas para el ensayo

#### 4.3.1 Posición de las bandas extensométricas

Una vez las probetas estaban cortadas y nombradas correctamente, el siguiente paso fue la colocación de las bandas extensométricas. La posición de las mismas es la de los puntos de mayor interés en el ensayo: las alas de la omega, bajo las cuales debe producirse la grieta. Estas pueden verse en la Figura 4-4.

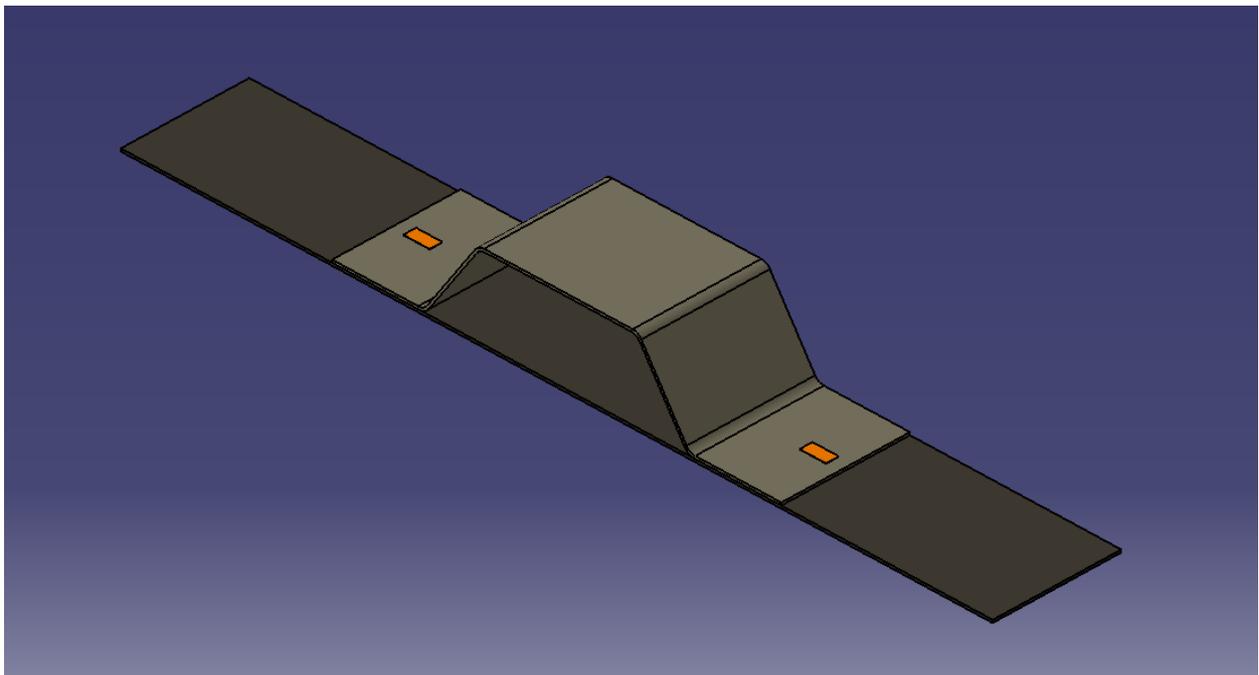


Figura 4-4. Posición de las bandas extensométricas

La posición exacta está centrada en el ancho, a 25 mm de cada borde, y a 105 mm del extremo de la piel en la dirección del largo.

Se barajó la posibilidad de agregar más bandas en zonas como la parte inferior del revestimiento o en el interior del hueco sobre la piel. Sin embargo, el útil impide la colocación de bandas en la cara inferior de la probeta. Además, se intentó colocar bandas en el hueco de la omega, encontrándose este proceso difícil ya que la visibilidad y manipulación de las mismas en esta zona era dificultosa, por lo que sólo se incluyó en la primera probeta, la C-C1.

#### 4.3.2 Procedimiento de colocación de bandas extensométricas

Las bandas extensométricas usadas son del tipo LY41, de la empresa HBM. Se trata de bandas lineales con una rejilla de medición con resistencia nominal de 120 ohmios y factor de galga 2.04.

El procedimiento para colocar cada banda extensométrica fue el siguiente:

- Se lijó la zona donde iba a ser colocada con un papel de lija hasta que la superficie perdiera el brillo.
- Se limpió la zona con alcohol evitando la retención de polvo.
- Se marcó la posición de la banda realizando una cruceta cortada con un gramil como el de la

Figura 4-5.



Figura 4-5. Gramil

- Haciendo uso de pinzas, se colocó la banda en la zona con su lado opaco hacia abajo y se pegó la misma a una cinta adhesiva para su manipulación.
- Se centró la banda sobre la cruceta usando las marcas que la misma banda posee. Un extremo de la cinta adhesiva se adhirió a la probeta para mantener la posición fijada, mientras que la banda se separó de la superficie para el siguiente paso.
- Sobre la superficie se aplicó catalizador, esperando a que se secase por completo.
- Con una gota de pegamento sobre la banda, se depositó la banda sobre la superficie junto con la cinta adhesiva y se presionó durante 30 segundos sobre la misma para garantizar una buena unión. (Tanto el catalizador como el pegamento se guardan en nevera y deben ser sacados 30 minutos antes de su uso).



Figura 4-6. Catalizador y pegamento

- Mientras el pegamento hacía su efecto, se procedió a preparar el cableado. Se usaron tres cables unidos que se pelaron y se enrolló dos de ellos juntos.
- Se aplicó líquido decapante a los extremos y se estañó con soldador, asegurándose después de limpiar el cable con alcohol para no dejar resto de decapante.
- Una vez se tuvo los cables preparados, se procedió a retirar la cinta adhesiva de la banda para tratar sus terminales.
- Con un lápiz de fibra de vidrio se rasparon los terminales retirando el pegamento o resina y dejándolos opacos.
- Se pasó un lápiz decapante para eliminar impurezas y se estañaron los terminales.
- Para prevenir que hubiera conexión con la misma probeta, que es conductora, se colocó cinta adhesiva frente a los terminales, y se soldaron a los cables, sujetándolos con más cinta para prevenir tirones.
- Una vez el proceso terminó, fue necesario comprobar la resistividad, que debe ser de 120 ohmios, con un polímetro.
- Finalmente, la comprobación final vino con la conexión con la máquina de ensayo para asegurar que los valores dados son estables y adecuados.



# 5 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL ENSAYO

---

## 5.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos en los ensayos de cada configuración y un análisis posterior de estos.

A continuación, se repasarán uno a uno los ensayos de cada pieza observando, en primer lugar, el diagrama carga-desplazamiento junto con dibujos de la evolución de la grieta en los diferentes puntos, en segundo lugar, el aspecto de la probeta tras el ensayo y, en tercer lugar, las lecturas de las bandas extensométricas.

En cada ensayo se proporcionarán los valores de interés de carga de aparición de grieta y de carga máxima soportada. Adicionalmente, al finalizar los ensayos de cada configuración, se dedicará un apartado a comparar las gráficas obtenidas en conjunto.

## 5.2 Ensayo de configuración Curado-Curado

### 5.2.1 Ensayo de C-C1

En la Figura 5-1 se puede ver la evolución de la carga a lo largo del ensayo.

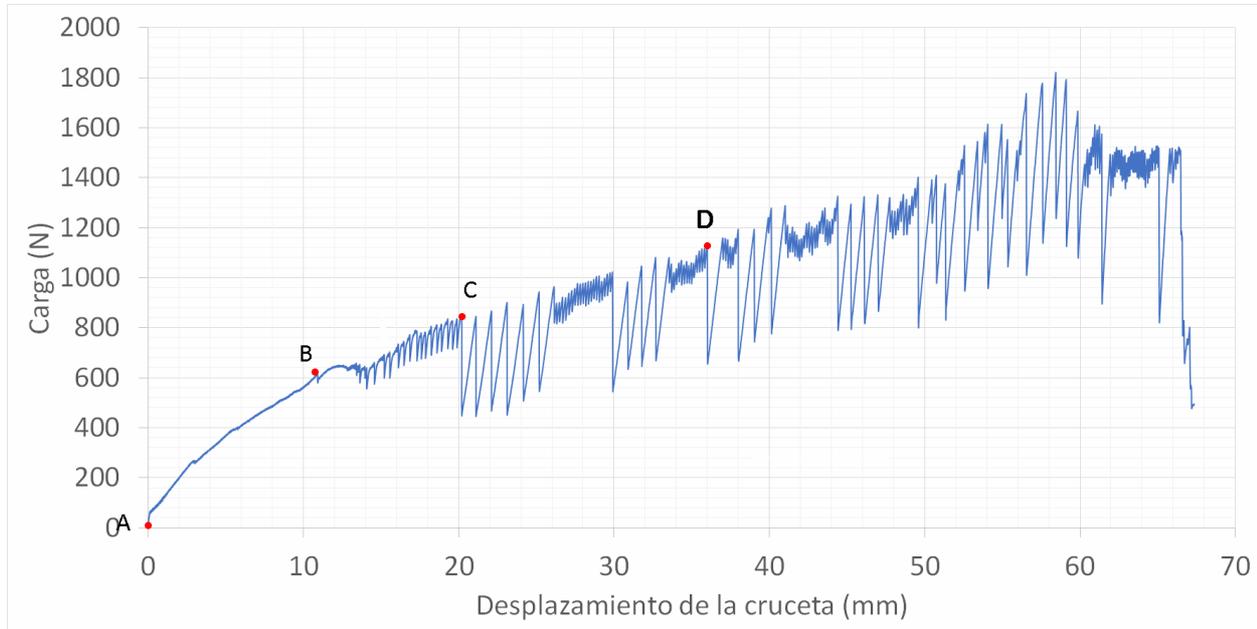


Figura 5-1. Carga frente a desplazamiento en C-C1

Existe un pequeño tramo inicial tras A de gran rigidez, asociada a la carga inicial de la probeta. Una vez se alcanza un pequeño desplazamiento, menor a un milímetro, se considera que el ensayo comienza. Esto ocurrirá en todos los ensayos posteriores.

Analizando la gráfica, se ve que entre los puntos A y B la pendiente conserva una tendencia de decrecer, indicando que la probeta disminuye su rigidez pero no sufre ningún daño. En estos momentos únicamente se escuchaban crujidos provenientes del adhesivo más débil alrededor de las uniones. En el punto B se inicia la grieta. Sin embargo, al contrario de lo esperado, la grieta ocurrió en el interior de la omega en la zona de la unión, como se ve marcado en rojo en la Figura 5-2. El adhesivo permanecía en buen estado, mientras que era la grieta interna la que se propagaba lentamente desde la esquina de la unión hacia el extremo de la omega, es decir, el final del ala en la dirección longitudinal. Llegado cierto punto, también fue apreciable en el otro ala de la omega otra grieta de igual aspecto, entre láminas.

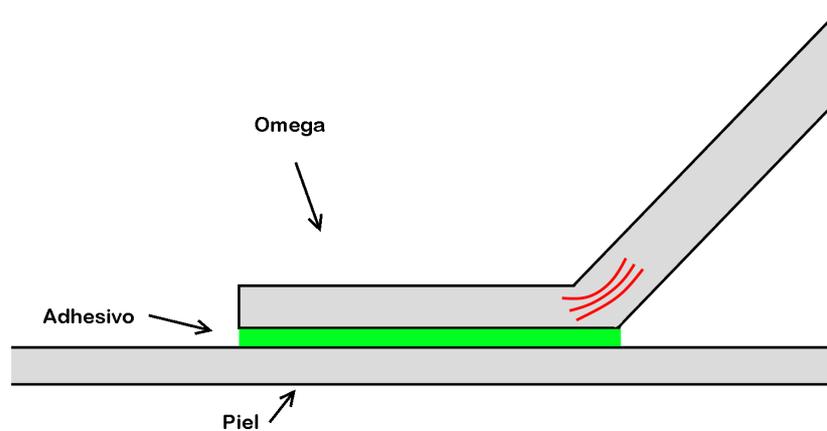


Figura 5-2. Detalle de la grieta inicial en C-C1

Ambas grietas se propagaron muy lentamente siguiendo ciclos de carga y descarga hasta llegar al punto D. Llegados a este punto, el ensayo se da por concluido, ya que el aspecto de la probeta sugiere que la unión ya no trabaja a flexión, y dejan de cumplirse las premisas del estudio. La forma de la probeta llega a ser casi triangular como se observa en la Figura 5-3, probablemente debido a un mal agarre de las sujeciones de la piel que le permitieron deslizarse lentamente. El fallo final de la probeta ocurrió por rotura de la piel en la sujeción, fenómeno fuera de estudio.



Figura 5-3. Aspecto de la probeta en C-C1

En este primer ensayo se colocó de forma excepcional una banda extensométrica en la piel central bajo la omega. De las tres bandas, esta fue la única que funcionó de forma relativamente buena. Los resultados se pueden ver en la Figura 5-4. Son claramente apreciables las enormes fluctuaciones de la deformación, debidas a que cada vez que se extendía la grieta lo hacía de forma brusca, provocando un temblor general de la probeta y haciendo oscilar rápidamente a la piel bajo la omega.

Como es de esperar, las mayores deformaciones aparecen en los momentos previos al fallo bajo gran tracción debido a la forma triangular de la probeta.

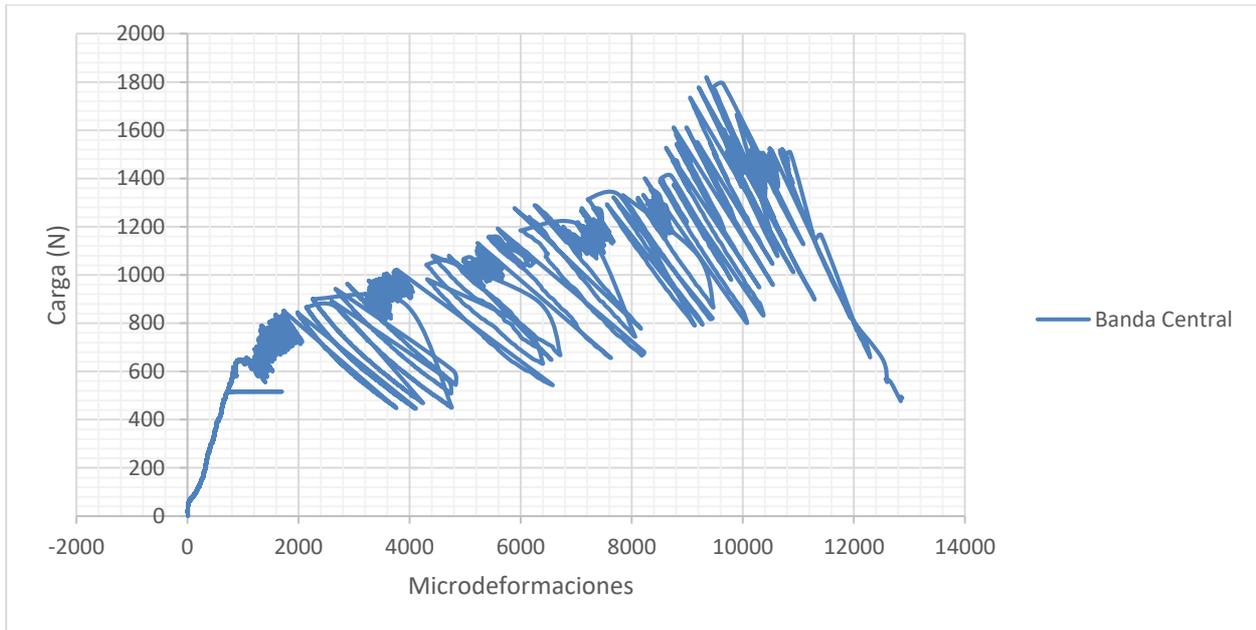


Figura 5-4. Lecturas de las bandas en C-C1

En general, este ensayo no arrojó datos útiles debido a la falta de sujeción de los extremos. Sin embargo, se puede decir que la grieta interlaminar apareció para 625N de carga y el fin del ensayo rondó los 1150N. De cualquier forma, estos valores no se tendrán en cuenta en el análisis final de datos.

### 5.2.2 Ensayo de C-C2

La evolución de la carga fue la mostrada en la Figura 5-5.

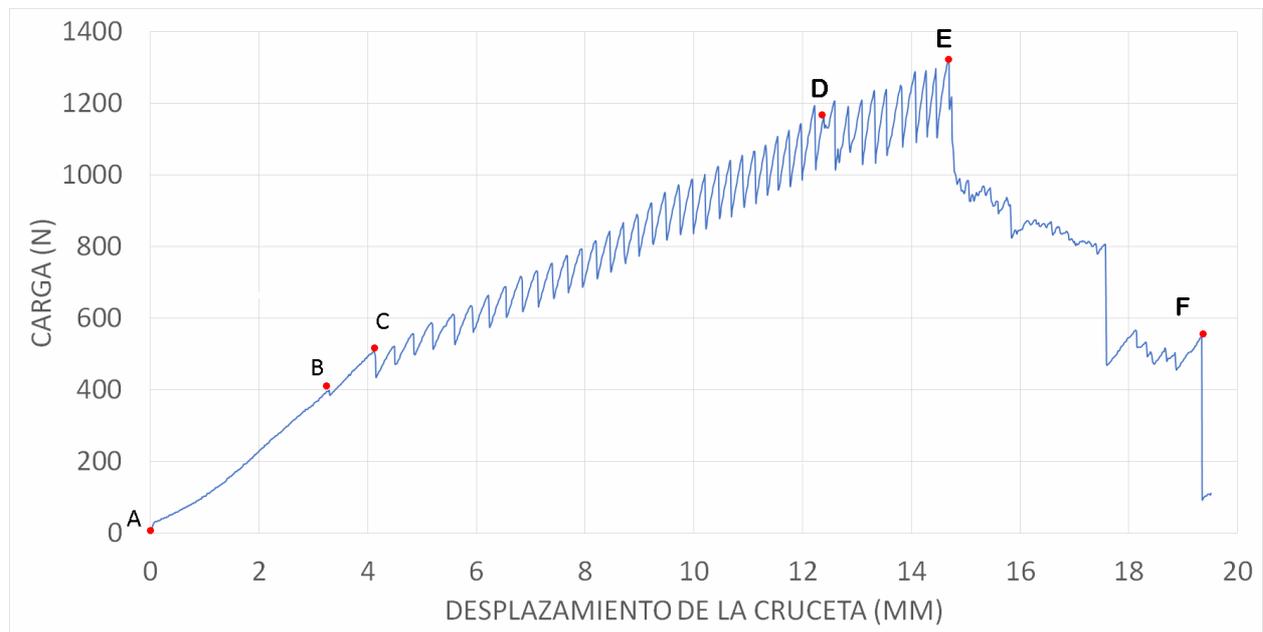


Figura 5-5. Carga frente a desplazamiento en C-C2

En este ensayo, para evitar que la probeta se deslizara en la zona de las sujeciones, se apretó fuertemente el agarre inferior, hasta el límite sin que la propia piel crujiera de la presión. En consecuencia, el comportamiento que se ve en la gráfica es el real de un ensayo correcto a esta configuración.

En este caso, entre los puntos A y B la rigidez tiende a aumentar sin cambios en el estado de la probeta. Este aumento responde a la mayor carga que soportan las alas de la omega a medida que la piel se deforma por flexión. Al llegar a B se escuchan crujidos fuertes de adhesivo, formándose una grieta análoga a la del anterior ensayo: en la zona de la curva en el interior de la omega, como la que se vio en la Figura 5-2. Esta grieta nace en B pero comienza a propagarse apreciablemente a partir de C.

A continuación, se suceden oscilaciones de carga a medida que la grieta se propaga lentamente. En el punto D, en el otro ala de la omega aparece otra grieta en el interior de la piel pero bajo el adhesivo, que se propaga con rapidez con fuertes crujidos a medida que la unión se rompe.

La carga sigue aumentando a base de oscilaciones mientras la segunda grieta se propaga hasta que alcanza un punto crítico en E, provocándose el fallo final de la probeta en F. El recorrido de la grieta hasta el fallo se aprecia en la Figura 5-6. El estado final del otro ala es de una grieta pequeña en el interior de la omega en la esquina de la unión.

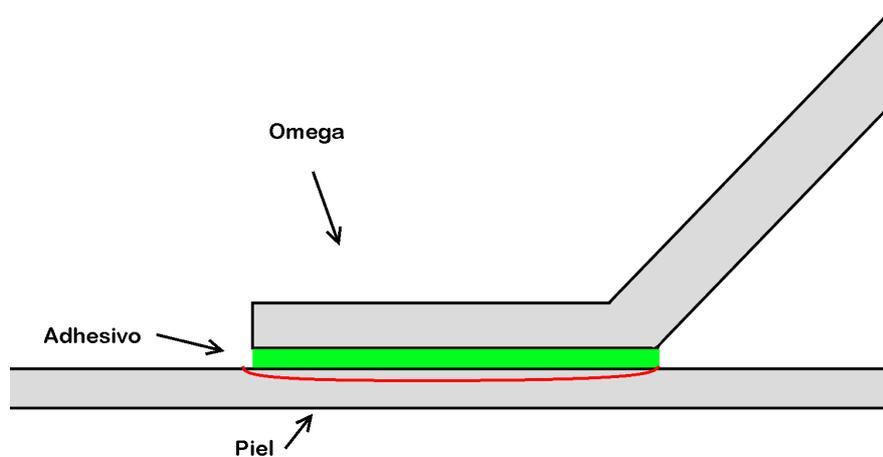


Figura 5-6. Detalle de la grieta de fallo en C-C2

En la Figura 5-7 se aprecia el ala donde ocurre el fallo. La grieta se inicia en el adhesivo, pero al propagarse arranca la primera lámina de la piel, por donde continúa hasta el fallo. También se pueden ver las fibras entre láminas entre la omega y la piel.

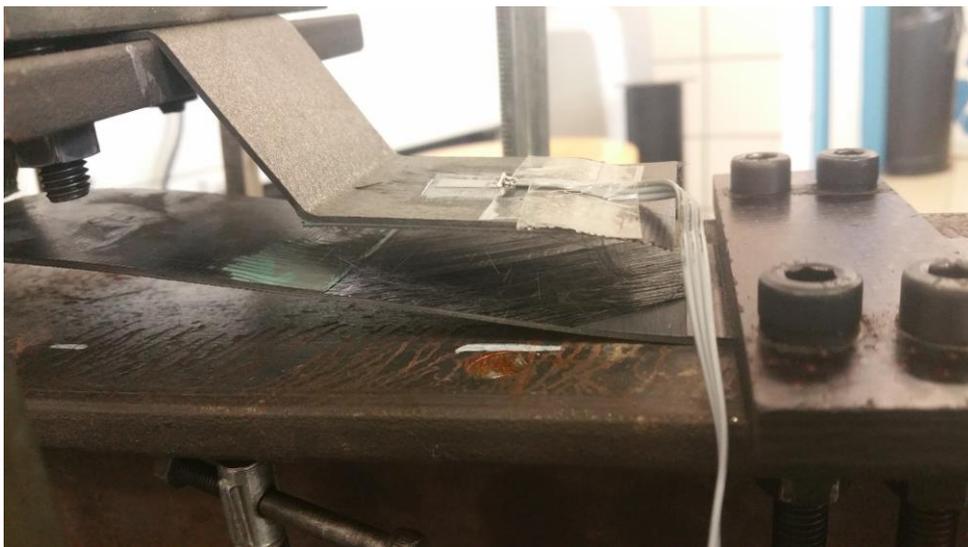


Figura 5-7. Aspecto de la probeta en C-C2

En cuanto a las medidas de las bandas extensométricas, sólo una de las dos bandas funcionó, aunque con fluctuaciones notables, como se puede apreciar en la Figura 5-8. Esta banda fue la del ala contraria a la del fallo. Se puede ver claramente cómo las deformaciones aumentan a medida que se produce la carga lineal debido a la tracción que sufre cuando la probeta en conjunto se eleva.

Sobre los 400N se produce la aparición de la grieta interlaminar en la esquina, lo que provoca una relajación de la zona y una caída de las deformaciones. Las deformaciones continúan subiendo con fluctuaciones debido a los temblores cada vez que se propaga un poco más la grieta, hasta alcanzar la carga de formación de la grieta en el otro ala. En este momento la zona se alivia ya que aumenta la separación del ala contraria. Finalmente, el otro ala falla y la deformación cae debido a la pequeña compresión de este ala tras la separación de la opuesta.

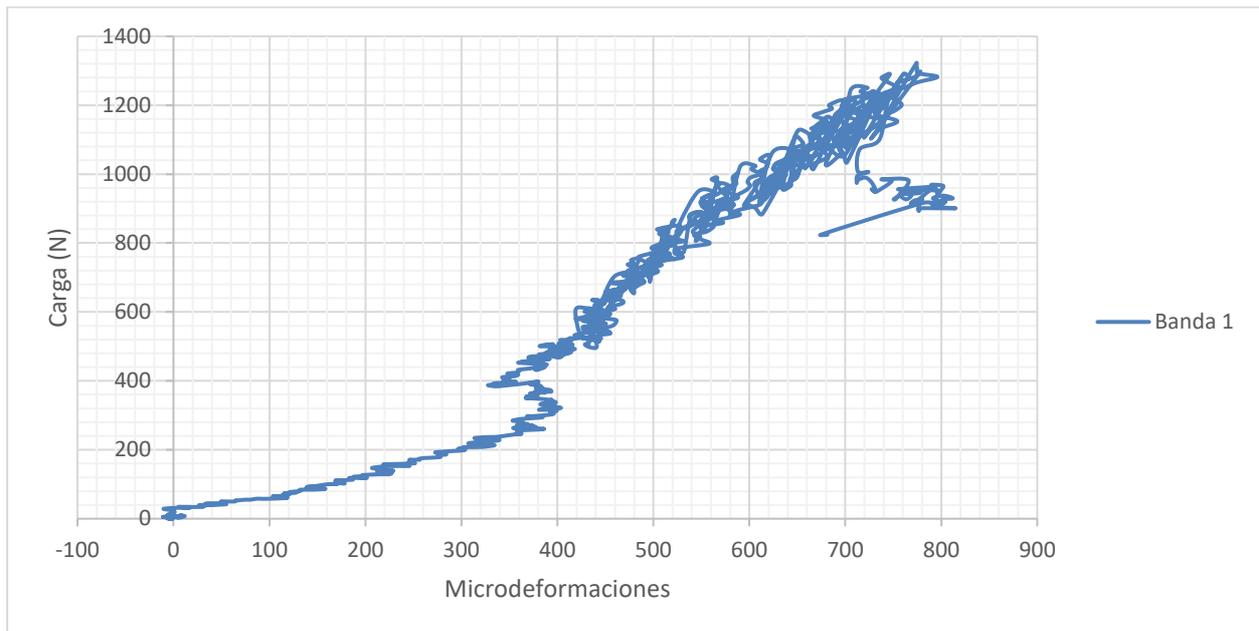


Figura 5-8. Lectura de las bandas en C-C2

De este ensayo se extrae que la carga de aparición de la grieta es de 400N y la carga máxima de 1300N.

### 5.2.3 Ensayo de C-C3

La Figura 5-9 muestra la relación carga-desplazamiento de la cruceta en este ensayo.

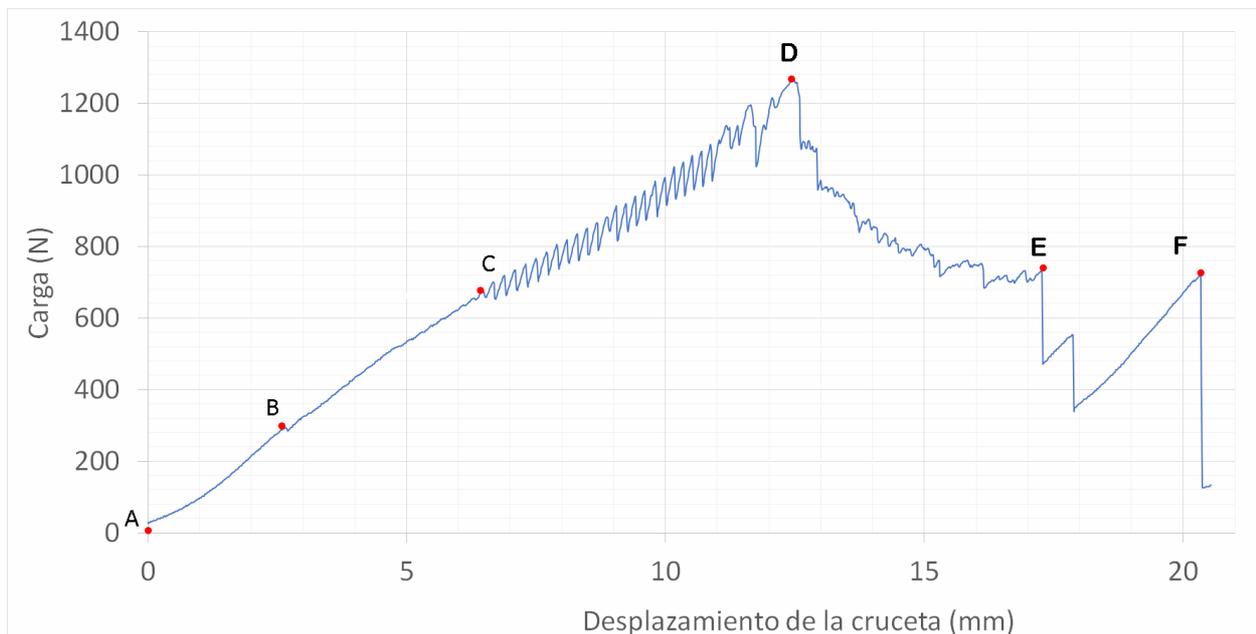


Figura 5-9. Carga frente a desplazamiento en C-C3

El tramo A-B se mantuvo sin daños con una rigidez en aumento, al igual que en C-C2. Al llegar a B se produjo una grieta interna en la omega, seguida de otra simétrica en la esquina opuesta en el punto C.

Ambas grietas provocan fluctuaciones en la carga a medida que se propagan hacia los bordes del rigidizador. Sin embargo, en el punto de mayor carga, D, se produce una apertura casi a la vez de dos grietas en las capas superiores de la piel, debajo de los adhesivos de cada una de las alas, siguiendo el patrón de la Figura 5-6. Estas grietas se propagan con rapidez desde la zona central hacia los bordes provocando un fallo casi total de un ala en E. La grieta, al situarse en capas de la piel, se propaga ya fuera de las alas hacia las sujeciones, alcanzando la rotura final en F. El aspecto de este fallo se puede apreciar en la Figura 5-10.



Figura 5-10. Aspecto de la probeta en C-C3

Las lecturas que nos proporcionan las bandas describen el comportamiento descrito anteriormente. En la Figura 5-11 se puede ver cómo las deformaciones aumentan por la tracción propia del ensayo a la par en ambos lados. El paralelismo de las medidas, diferenciado por la distinta formación de grietas interlaminares, se mantiene hasta llegar a la carga máxima en la que se produjo la aparición de grietas en la unión de los componentes en ambos lados.

Llegados a este punto, ambas deformaciones pasan a estar regidas por compresión, debido a la flexión que sufren las dos alas a medida que las grietas se propagan hacia los bordes de la omega. Este aspecto es diferente a los anteriores ensayos, en lo que las deformaciones siempre eran positivas, lo que nos lleva a pensar que cuando son las dos alas las que se separan, la deformada por compresión es más alta que si es sólo un ala la que se separa. De nuevo, apreciamos un cambio brusco en dirección a la parte positiva del eje de deformaciones cuando se produce la separación de la omega previa al fallo final, en el ala de la banda 2. A partir de esta rotura, las alas se relajan y las deformaciones bajan a valores cercanos a cero.

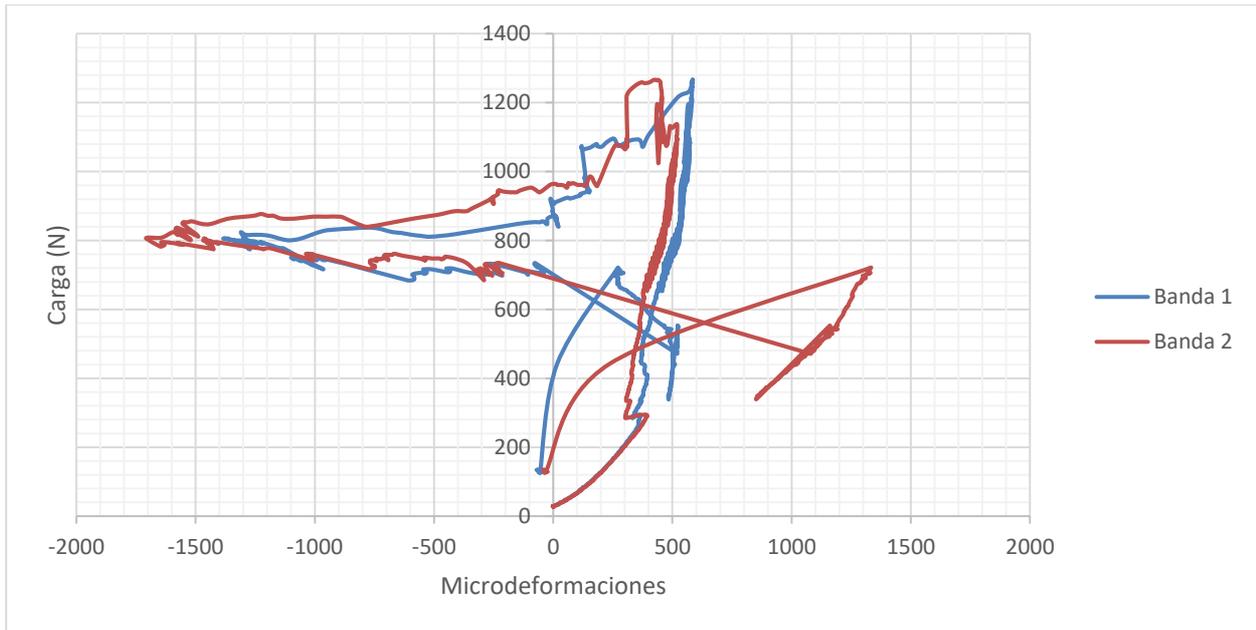


Figura 5-11. Lectura de las bandas en C-C3

La carga de aparición de la grieta es de 300N, mientras que la máxima es de 1275N.

#### 5.2.4 Comparación preliminar de C-C

Previamente a la comparación final que se realizará después de la exposición de los ensayos, es conveniente poner en perspectiva los datos obtenidos para los diagramas de carga-desplazamiento de todas las probetas co-pegadas consideradas como válidas, como se ve en la Figura 5-12.

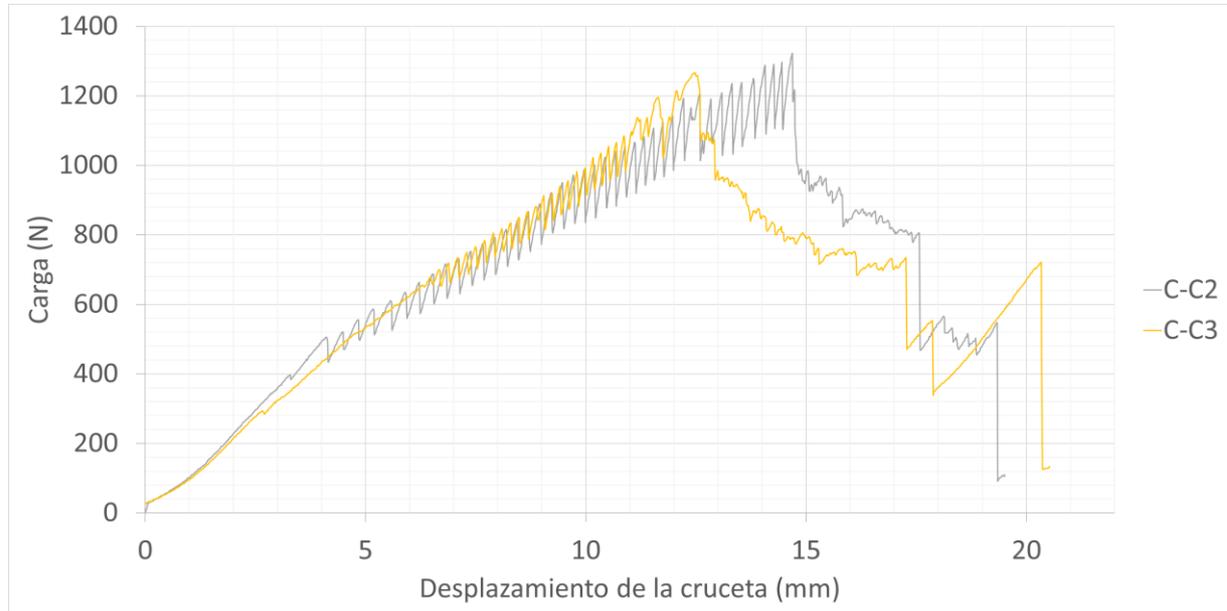


Figura 5-12. Comparación preliminar C-C

La evolución en ambos ensayos es bastante similar y presenta los mismos picos, ya que la aparición de grietas y la forma del fallo final fueron las mismas. La rigidez antes de la aparición de la primera grieta es prácticamente la misma y el desplazamiento al que se produce ronda los 3 milímetros en ambos casos. La carga presenta una diferencia de casi 100N, lo cual es notable, y probablemente es el origen de que se formara una grieta entre omega y piel en C-C2, mientras que en C-C1 no.

### 5.3 Ensayo de configuración Fresco-Curado

#### 5.3.1 Ensayo de F-C1

La Figura 5-13 ilustra la evolución del ensayo.

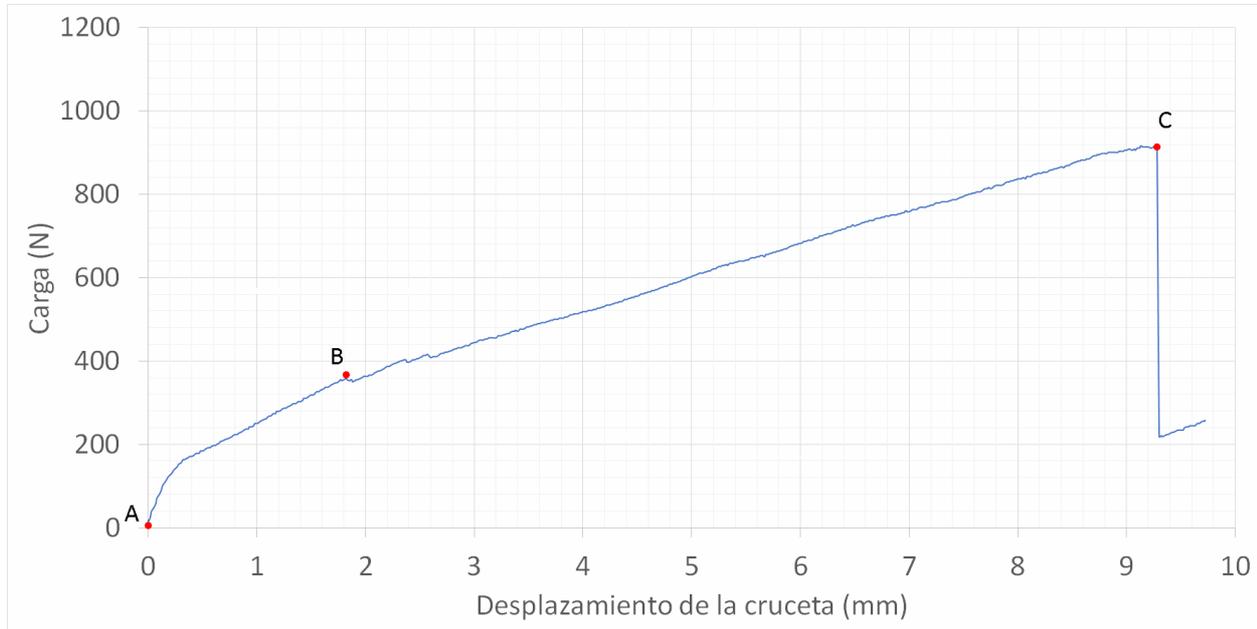


Figura 5-13. Carga frente a desplazamiento en F-C1

Tras la curva de carga inicial de la probeta hasta 0.3 mm, la rigidez de la probeta se mantiene constante entre A y B, hasta que se produce una grieta por el adhesivo naciendo en el borde del ala de la omega, en lugar de en la esquina del hueco central. Esta grieta se propaga a lo largo del tramo B-C hasta que finalmente alcanza al hueco central de la probeta y provoca el fallo. Este camino se describe en la Figura 5-14.

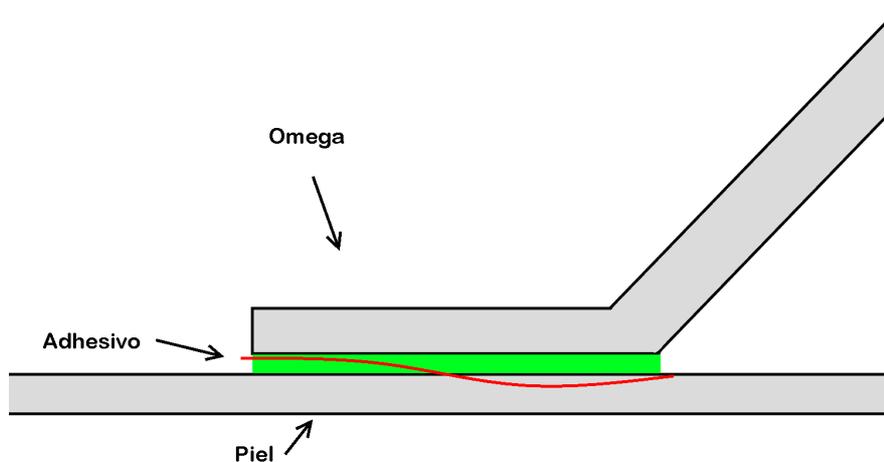


Figura 5-14. Detalle de la grieta de fallo en F-C1

Es importante destacar que en todo el tramo de propagación de la grieta la rigidez baja muy lentamente y de forma constante hasta que se produce la rotura por el adhesivo. Como se puede

apreciar en la Figura 5-15, la separación se produce por el adhesivo hasta alcanzar el punto crítico del fallo de la probeta. Por esta razón, existe una parte en la que aún quedan restos de adhesivo sobre la piel, mientras que en el resto el adhesivo verde se encuentra únicamente en la omega.



Figura 5-15. Aspecto de la probeta en F-C1

Ambas bandas extensométricas funcionaron correctamente, aunque una conexión imperfecta provoca notables fluctuaciones.

Como se puede apreciar en la Figura 5-16, ambas bandas miden deformaciones por tracción en primer momento (la banda 1 fluctúa hacia valores negativos, pero debe ser fallo de conexión dado el comportamiento posterior). La banda 1 es la del ala que falló, mientras que la 2 es la propia del ala donde no se produjo la rotura. En el momento en que se forma la grieta, la banda 1 comienza a dar lecturas de bajada de la deformación llegando a valores claramente negativos, mientras que la banda 2 continúa aumentando sus deformaciones por tracción.

La razón por la que la banda del ala de fallo mide valores negativos a medida que la grieta se extiende, cuando lo lógico sería que tendiera a 0 ya que esa zona libre vuelve a su estado natural, es que el agarre superior no se encuentra perfectamente centrado y alineado. En esta situación, un pequeño ángulo de desviación en el agarre provoca que el alma de la omega se encuentra levemente inclinada. El ala que se encuentre en la posición más baja de esa inclinación se verá sometida a una pequeña flexión, traccionando su cara inferior y comprimiendo la superior.

Cuando se produce el fallo la carga baja bruscamente, sin embargo, la deformación de la banda 1 aumenta, ya que desaparece la tracción que provoca su unión con la piel y sólo queda la deformada por compresión debida al fenómeno anteriormente explicado.

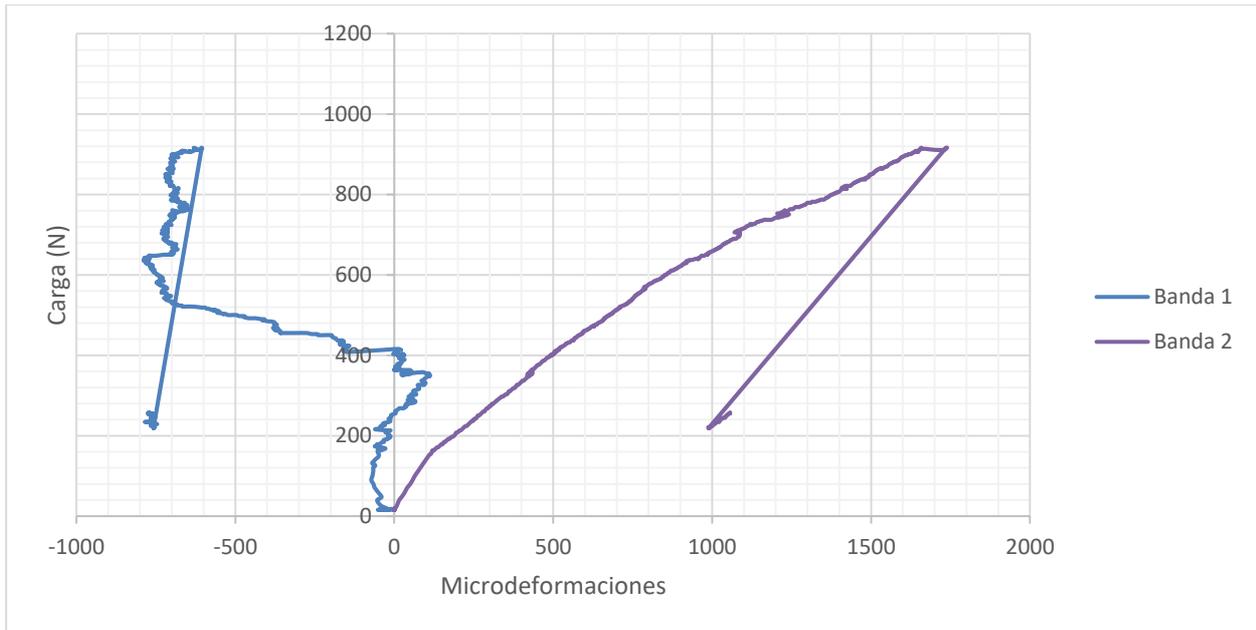


Figura 5-16. Lectura de las bandas en F-C1

Para este ensayo la carga de aparición de la grieta ha sido muy baja, de 360N, mientras que la carga de fallo, y máxima, se sitúa en 900N.

### 5.3.2 Ensayo de F-C2

En la Figura 5-17 se puede ver la evolución de la carga a lo largo del ensayo.



Figura 5-17. Carga frente a desplazamiento en F-C2

De la misma forma que en el ensayo anterior, al alcanzar el punto B aparece una grieta en el borde exterior del ala en la unión entre piel y omega. La grieta continúa haciéndose mayor hasta alcanzar el hueco de la probeta y provocar el fallo en C. El otro ala de la probeta no sufre ningún daño. El recorrido de la grieta es el de la Figura 5-14

En la Figura 5-18 se aprecia el estado de la unión tras el fallo. En la zona inicial de la grieta se ve restos de adhesivo a ambos lados, omega y piel, mientras que, en la zona propia de arrancamiento en el fallo, las primeras capas de la piel se encuentran en la zona superior adheridas a la omega.

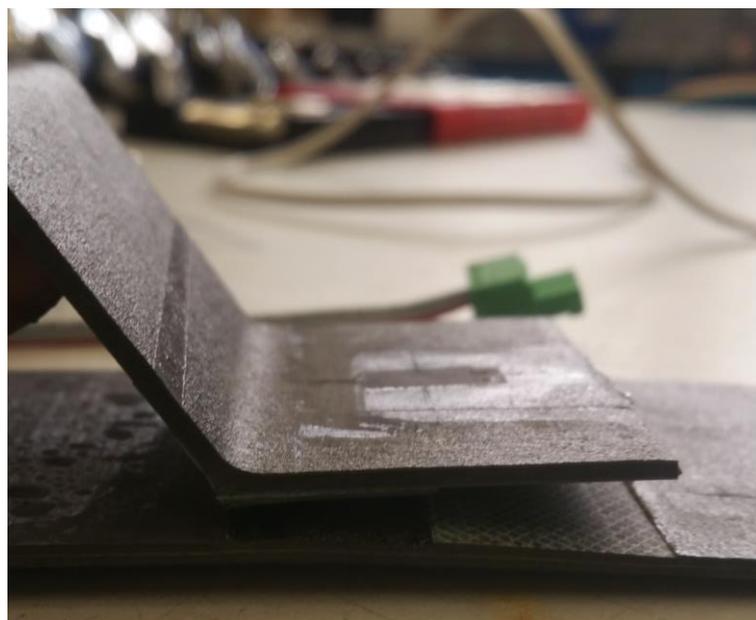


Figura 5-18. Aspecto de la probeta en F-C2

De la misma forma que el comportamiento de la grieta fue similar al anterior ensayo, las medidas de las bandas también lo han sido, como se puede ver en la Figura 5-19. A pesar de las fluctuaciones por malas conexiones, se aprecia cómo ambas bandas se deforman por tracción hasta la aparición de la grieta, donde el ala de la grieta (banda 2) comienza a deformarse por compresión y el ala opuesta continúa traccionando con las fluctuaciones propias de los temblores durante la rotura del adhesivo. La razón de la compresión es la explicada en el anterior apartado: un centrado imperfecto del agarre superior.

Cabe destacar que la banda 1 posee un final brusco debido a que fue arrancada en el momento del fallo.

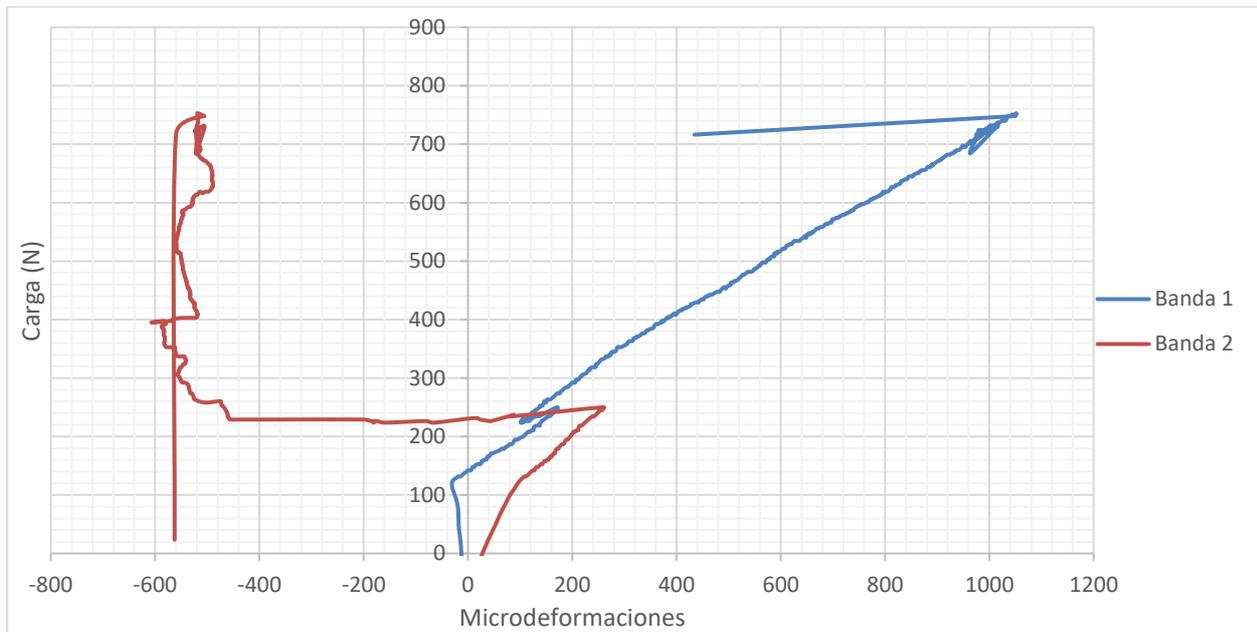


Figura 5-19. Lectura de las bandas en F-C2

De este ensayo se extrae que la carga de aparición de la grieta es de 250N y la carga de fallo de 750N.

### 5.3.3 Ensayo de F-C3

La relación entre carga y desplazamiento de cruceta se puede ver en la Figura 5-20.



Figura 5-20. Carga frente a desplazamiento en F-C3

Una vez más se repite el mismo fenómeno. Aparece una grieta en el borde exterior de un ala de la omega a través de la unión en B. Desde ahí se propaga hacia el centro de la probeta hasta provocar el fallo en C. En la Figura 5-21 se puede ver la forma de la rotura.



Figura 5-21. Aspecto de la probeta en F-C3

Las lecturas de las bandas mantienen la misma tendencia que en los ensayos anteriores, con una evolución paralela a tracción de las dos alas hasta la aparición de la grieta. De nuevo, el problema del centrado del agarre aparece proporcionando compresiones en la banda 1, la propia del ala que ha fallado.

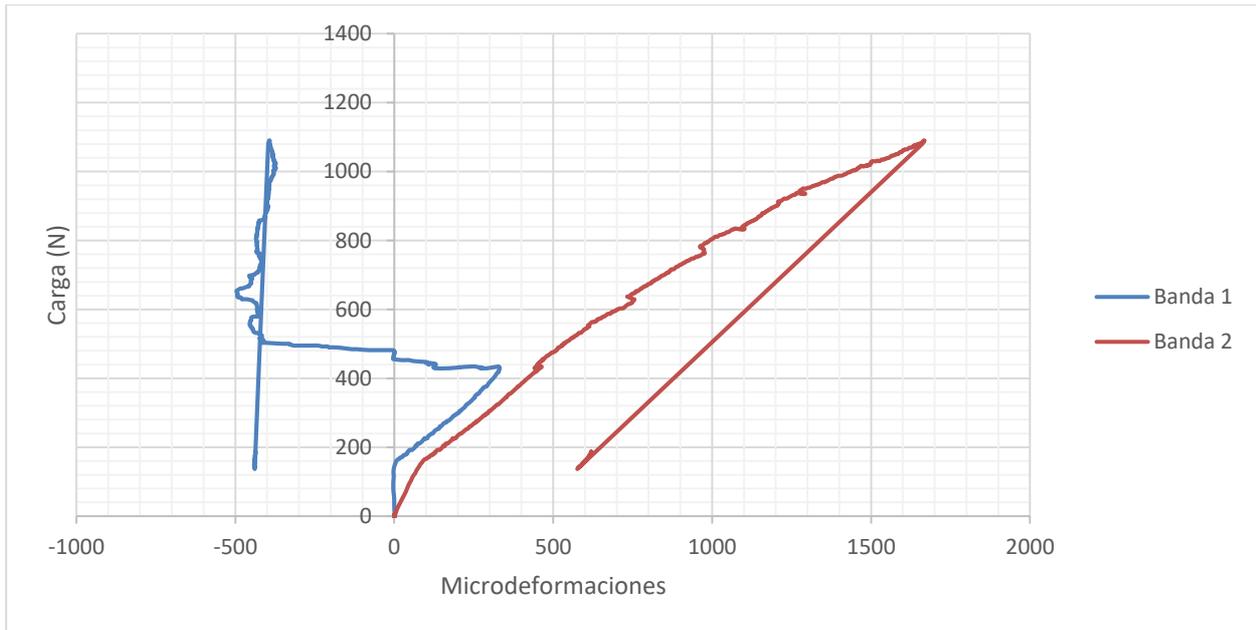


Figura 5-22. Lectura de las bandas en F-C3

Los resultados del ensayo son una carga de aparición de la grieta de 400N y máxima o de fallo de 1100N.

### 5.3.4 Comparación preliminar de F-C

Las tres evoluciones de la carga frente al desplazamiento en los ensayos de F-C se pueden ver en la Figura 5-23.

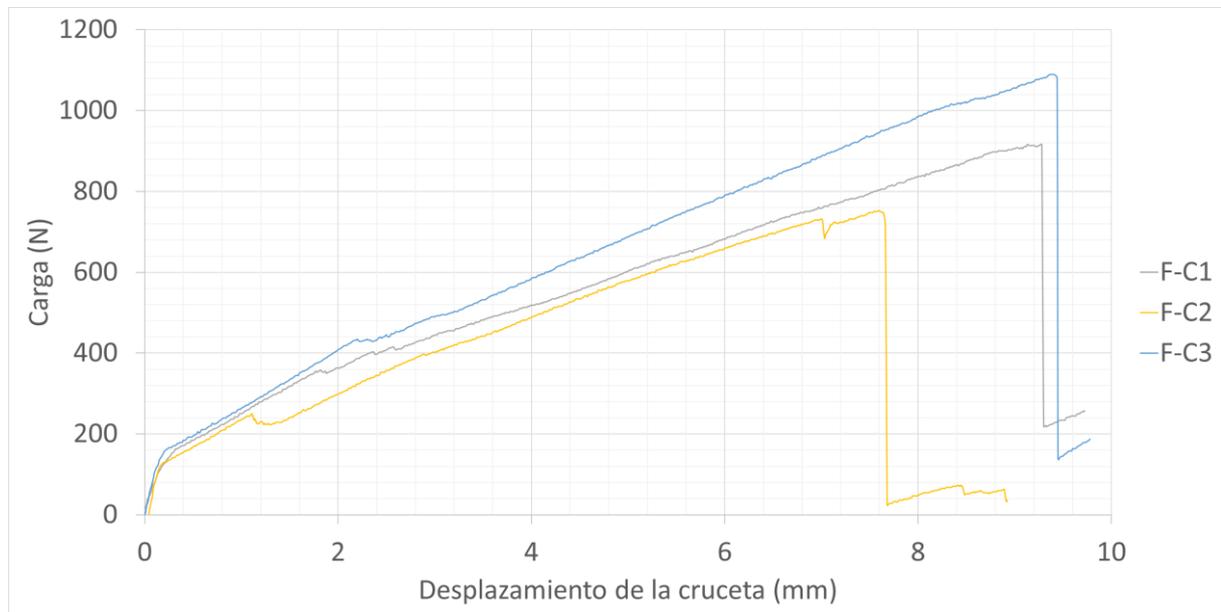


Figura 5-23. Comparación preliminar F-C

Tras la carga inicial del ensayo, las tres gráficas poseen una pendiente idéntica, y por tanto la misma rigidez. La forma en general es muy similar, así como el mecanismo de fallo comentado en apartados anteriores. Sin embargo, la F-C2 se separa del resto fallando bastante pronto y con una caída de carga bastante pronunciada. Esto probablemente es producto de un pequeño fallo en la alineación de la probeta en este ensayo en específico.

## 5.4 Ensayo de configuración Curado-Fresco

### 5.4.1 Ensayo de C-F1

En la Figura 5-24 se puede ver la evolución de la carga a lo largo del ensayo.

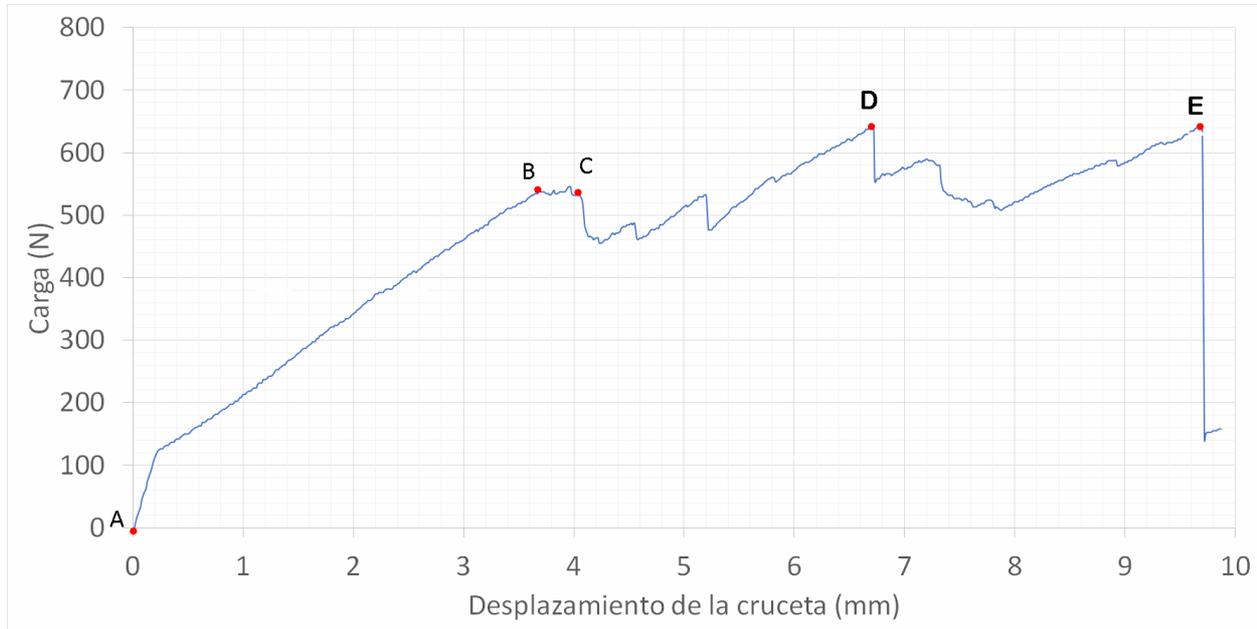


Figura 5-24. Carga frente a desplazamiento en C-F1

Como en los ensayos anteriores, una vez que la rigidez se estabiliza tras los crujidos de adhesivo iniciales se entra en un tramo recto hasta el punto B sin cambios apreciables. Sin embargo, entre B y C se produce la aparición de una grieta en la zona de la esquina del hueco central entre omega y piel en el interior del adhesivo.

En el punto C se produce una apertura brusca de la grieta provocando una caída de la carga. Desde este punto la grieta se propaga lentamente. En el punto D, mientras la grieta inicial continúa abriéndose, aparece otra grieta en la misma posición en el otro ala, provocando otra caída brusca. El aspecto de ambas grietas es el que se describe en la Figura 5-25.

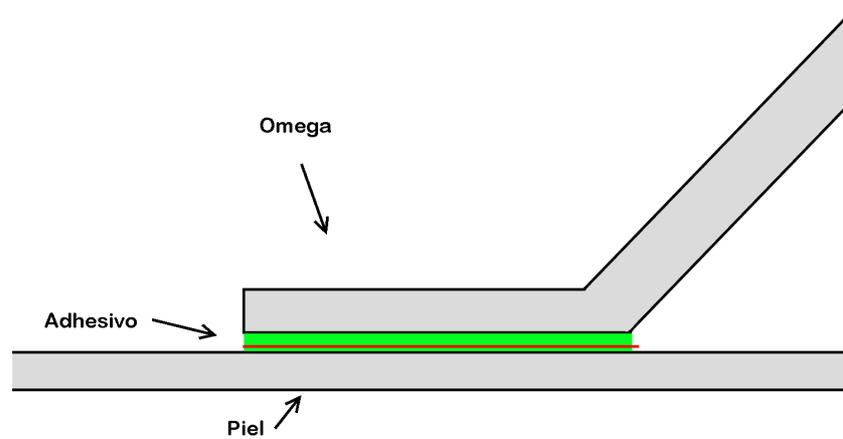


Figura 5-25. Detalle de grieta en C-F1

Ambas grietas continúan propagándose. En el momento en el que la grieta inicial alcanza el borde de la omega se detiene, dejando aparentemente apenas una fina unión de adhesivo que no se rompe. Sin embargo, poco después, cuando la grieta opuesta ha crecido lo suficiente, se produce un fallo de la probeta por el lado en que se formó la primera grieta. El aspecto de la probeta se aprecia en la Figura 5-26.

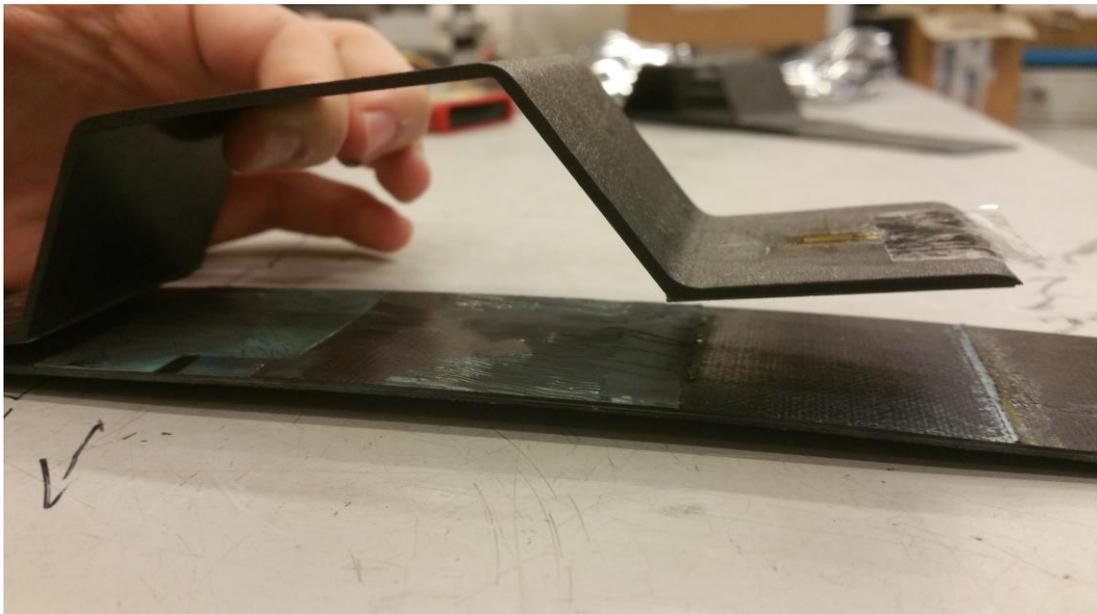


Figura 5-26. Aspecto de la probeta en C-F1

En este ensayo ambas bandas fallaron, por lo que no se ha podido extraer datos de las deformaciones, aunque se puede suponer que, dado que ambas grietas se propagaban casi a la vez, la omega probablemente mantendría ambas caras superiores de las alas a tracción hasta fallo.

Los datos finales del ensayo son de una carga de aparición de grieta de 550N y una carga de fallo de 680N.

### 5.4.2 Ensayo de C-F2

La Figura 5-27 muestra la gráfica propia de la carga en el ensayo.

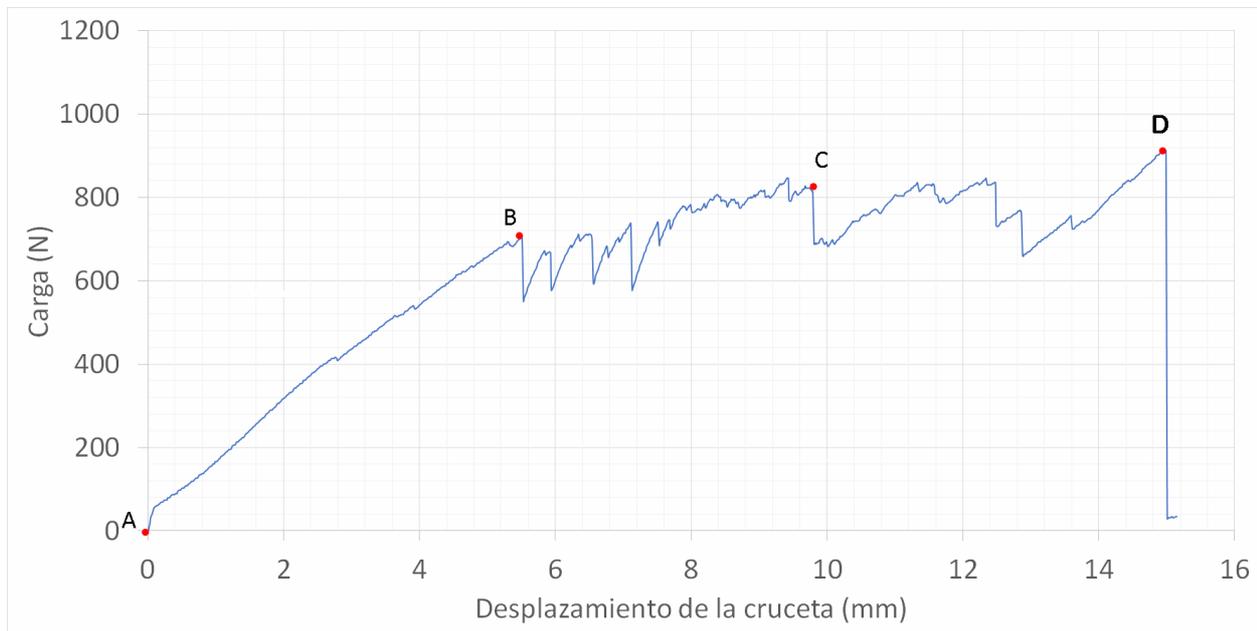


Figura 5-27. Carga frente a desplazamiento en C-F2

Tanto la forma de la gráfica como el modo de fallo es análogo a la anterior probeta: en B se produce una grieta en el adhesivo de un ala en la zona del hueco de la omega y comienza a propagarse de la forma descrita en la Figura 5-25. Cuando alcanza C aparece otra grieta igual en el otro ala.

Ambas grietas avanzan hasta que la inicial se detiene en el borde externo de la omega brevemente antes de producirse el fallo en D.

Como se ve en la Figura 5-28, el ala que falla es en la que se produce la grieta inicial, mientras que, en el momento de rotura, la grieta opuesta es notablemente grande.



Figura 5-28. Aspecto de la probeta en C-F2

Las medidas dadas por las bandas se pueden ver en la Figura 5-29. Queda claro que la hipótesis realizada en el ensayo C-F1 sobre las deformaciones es relativamente acertada: ambas bandas miden deformaciones por tracción similares. Sin embargo, en el momento en que comienzan a aparecer diferencias entre las grietas de ambas alas se separan.

Las grandes fluctuaciones que tienen las medidas en momentos posteriores se deben a los temblores de la probeta a medida que las dos grietas avanzan, lo que provoca oscilaciones de la pieza. De cualquier forma, se puede apreciar como la banda 2, asociada al ala que falla, se somete a deformaciones por compresión debido al problema de centrado, cuando debería tender a deformación nula.

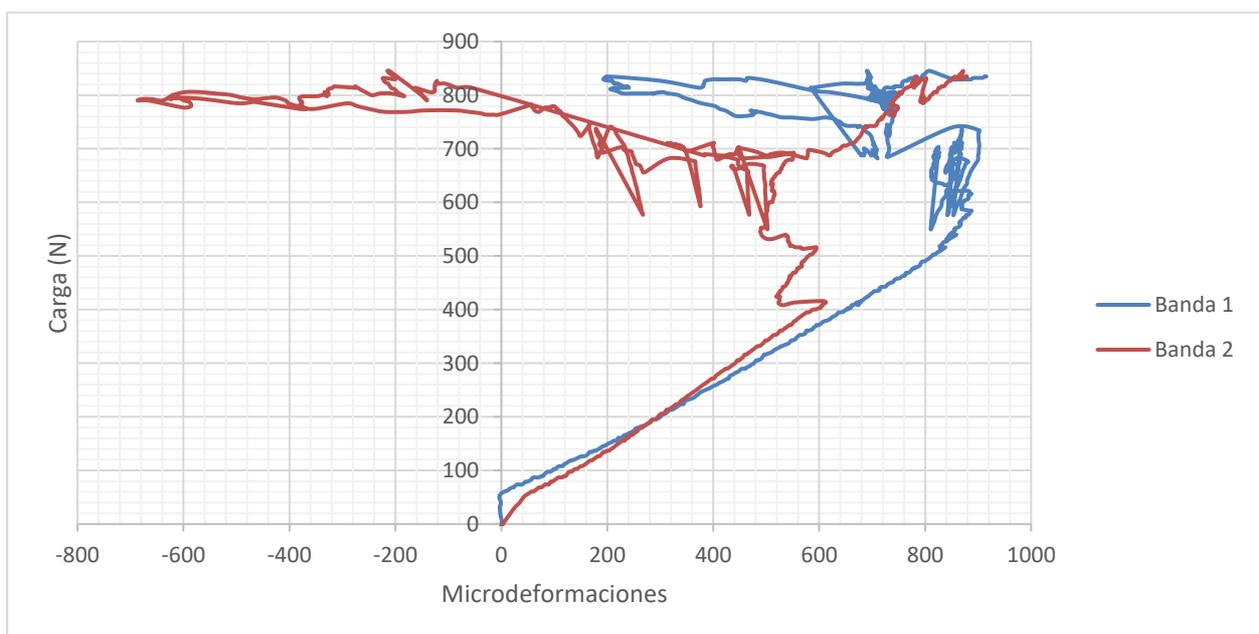


Figura 5-29. Lectura de las bandas en C-F2

Los resultados del ensayo marcan una carga de aparición de grieta de 700N y una carga de fallo de 900N.

### 5.4.3 Ensayo de C-F3

El ensayo evolucionó como se aprecia en la figura 5-30.

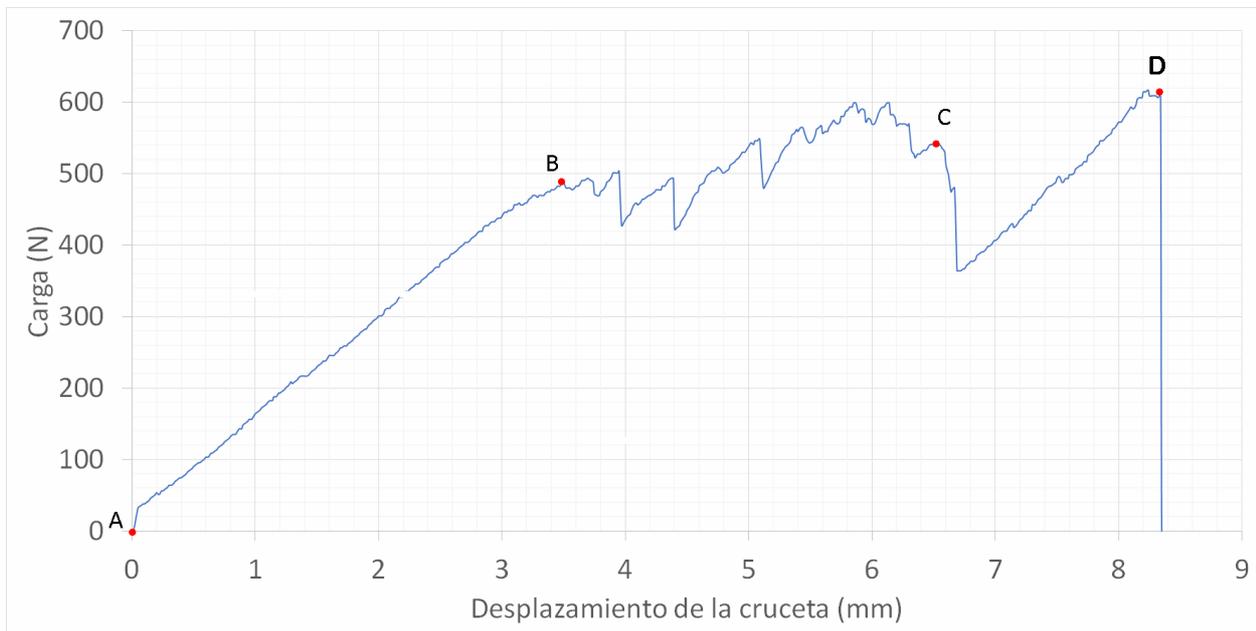


Figura 5-30. Carga frente a desplazamiento en C-F3

El ensayo transcurrió de forma análoga a los anteriores de la misma configuración, formándose una grieta en la esquina bajo el adhesivo, en B. Mientras esta se propaga a ras de la piel hacia el borde del rigidizador, se forma otra grieta similar y opuesta, en el punto C.

Finalmente se produce el fallo en el ala donde se produjo la primera grieta, el punto D. La Figura 5-31 muestra la probeta tras el ensayo.



Figura 5-31. Aspecto de la probeta en C-F3

Las medidas obtenidas de las deformaciones muestran a su vez un comportamiento similar. La banda 1 es la del ala que no falló, mientras que la 2 es la del ala de rotura, en cuyo momento se desprendió, dando razón a su final brusco.

Ambas deformaciones son similares hasta la formación de las grietas. Una vez más, las deformaciones del ala de fallo pasan a ser provocadas por compresión, debido al centrado del agarre superior. Se puede apreciar como esta banda pasa a valores positivos momentos antes del fallo antes de producir señales erróneas por arrancamiento. En el momento del fallo, la banda 1 tiende a valores bajos debido al alivio de tensiones.

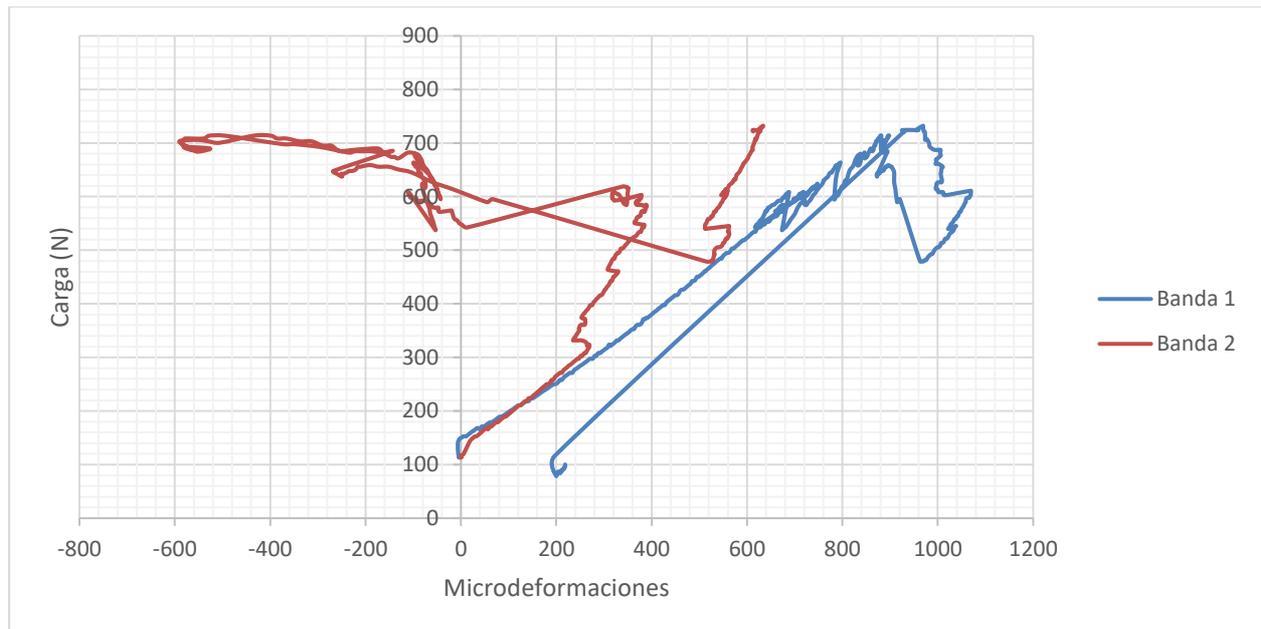


Figura 5-32. Lectura de las bandas en C-F3

Del ensayo se extrae un valor de aparición de la grieta de 500N y una carga máxima de 600N.

#### 5.4.4 Comparación preliminar de C-F

Una comparación entre los diagramas carga-desplazamiento se puede ver en la Figura 5-33.

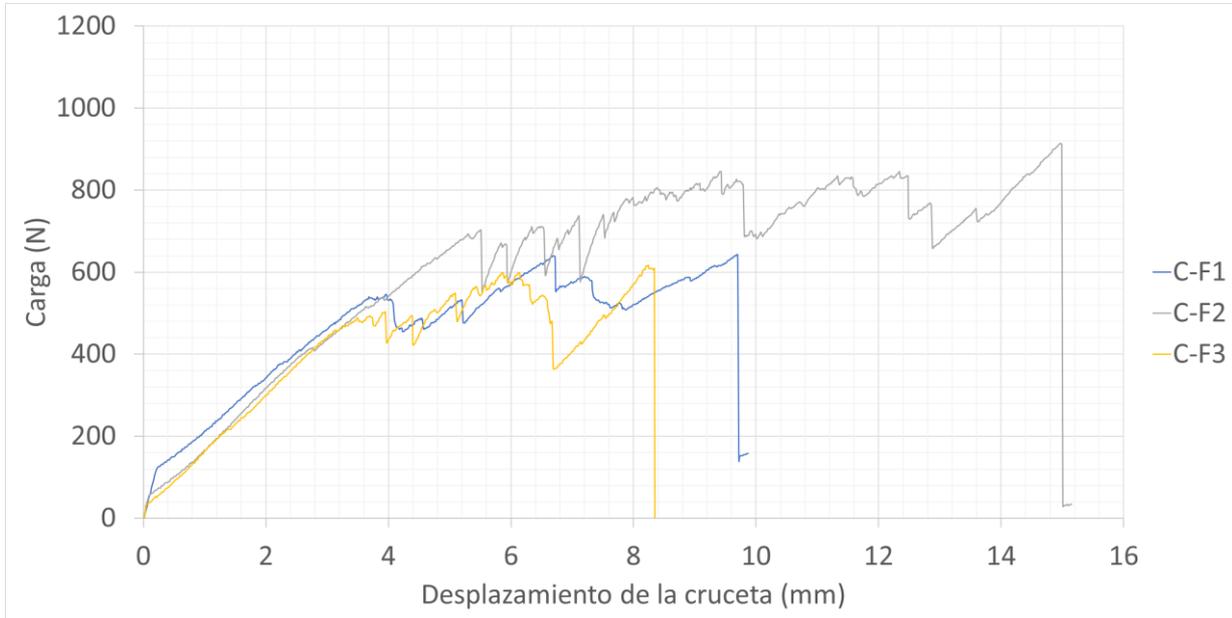


Figura 5-33. Comparación preliminar C-F

En este caso las diferencias son notables. A pesar de poseer el mismo método de fallo, los recorridos de los diagramas varían mucho. La rigidez durante la fase de carga sin daños es similar. Sin embargo, mientras que C-F1 y C-F3 forman grieta a una carga parecida, C-F2 tarda mucho más. Adicionalmente, se aprecia cómo C-F2 alcanza una carga y desplazamiento finales muy superiores que el resto. Esta diferencia tan apreciable se asocia a una mala alineación de la probeta en el ensayo.

## 5.5 Ensayo de configuración Fresco-Fresco

### 5.5.1 Ensayo de F-F1

En la Figura 5-34 se puede ver la evolución de la carga a lo largo del ensayo.

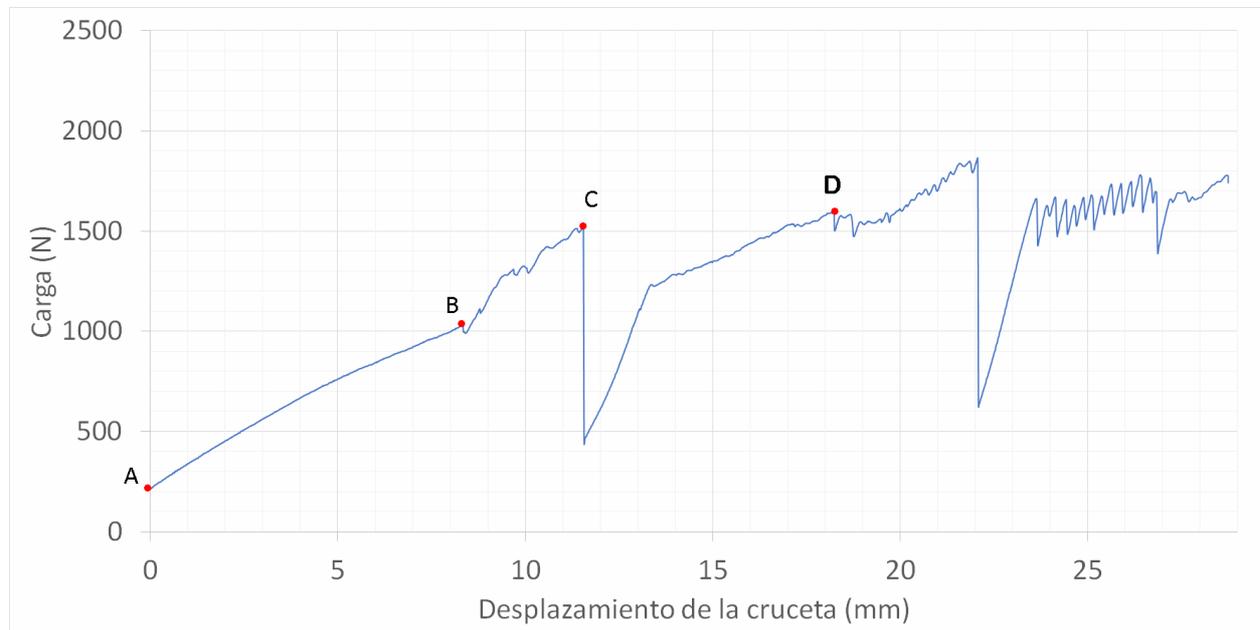


Figura 5-34. Carga frente a desplazamiento en F-F1

Es necesario decir que el ensayo comenzó con la cruceta no reseteada y por ello 0 mm equivale a 200N de carga. La evolución de este ensayo recuerda a la de la primera pieza C-C1. Una vez más la rigidez se mantuvo constante hasta el punto B, donde apareció una grieta interna en la omega en la zona de la esquina, como la mostrada en la Figura 5-2 teniendo en cuenta que en este caso no existe capa de adhesivo. A partir de este punto la rigidez aumenta notablemente, pero la carga comienza a fluctuar y a perder pendiente.

Esta grieta se propagó lentamente hasta que en C se abre con brusquedad. A partir de este momento, otra grieta similar se abre en el otro ala, pero la probeta alcanza demasiada elevación debido a una mala sujeción de los extremos de la piel, por lo que las alas comienzan a trabajar casi a tracción. Se puede dar por concluido el ensayo en el punto D.

Además del fallo en la sujeción de la probeta, ambas bandas extensométricas no proporcionaron medidas, por lo que el ensayo no aportó más información sobre la probeta o la unión. Aún así se podría llegar a tomar un valor aproximado de aparición de grieta en 1000N y de fallo en 1500N. De igual forma que en el ensayo C-C1, estos valores, pese a mostrarse, no se tendrán en cuenta en los análisis finales.

### 5.5.2 Ensayo de F-F2

El ensayo transcurrió como muestra la Figura 5-35.

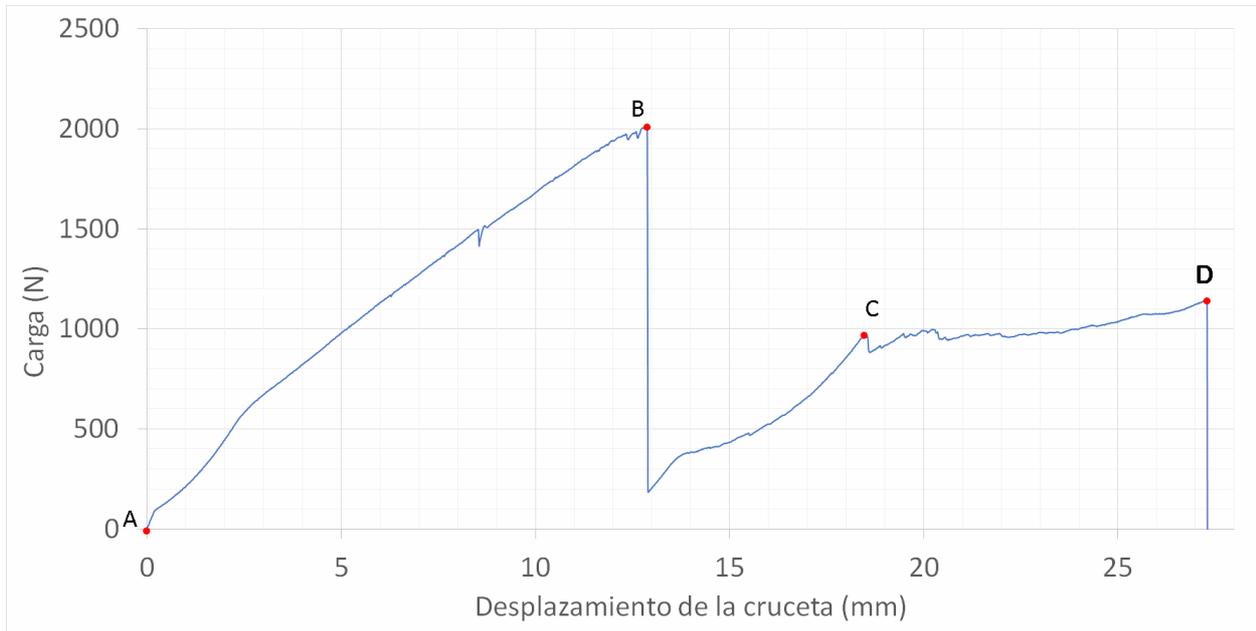


Figura 5-35. Carga frente a desplazamiento en F-F2

El ensayo comenzó de forma simétrica en un largo período entre A y B con un pequeño pico de bajada en los 1500N sin cambios visuales, tras el cual la rigidez se recupera. Sin embargo, de forma repentina, en B, se produjo una grieta de grandes dimensiones en un ala, comenzando por el borde de la omega e introduciéndose en las capas del revestimiento, por lo que no produjo fallo de la probeta. Este ala se quedó unida a la piel por capas de la misma, llegando la grieta hasta el hueco central de la probeta. Un esquema de esta grieta se aprecia en la Figura 5-36.

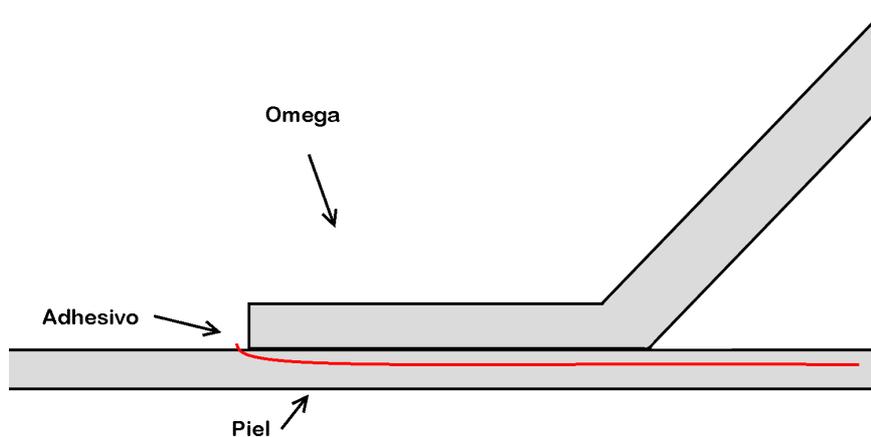


Figura 5-36. Detalle de grieta inicial en F-F2

Dicha grieta permaneció en ese estado, dejando paso a una nueva en la esquina del ala opuesta llegado el punto C. La nueva grieta se propagó hacia el borde como se describió en la Figura 5-6, de nuevo teniendo en cuenta la ausencia de capa adhesiva, hasta provocar el fallo en D.



Figura 5-37. Aspecto de la probeta en F-F2

La evolución de las deformaciones sigue lo descrito por la gráfica de la carga. Durante un largo período, ambas alas se deforman por igual. En el momento de rotura instantánea de un ala, la banda 1, asociada a esta zona, se desprende violentamente, cesando sus medidas. Por el otro lado, la banda 2 sufre una bajada notable de la deformación, que vuelve a aumentar lentamente a medida que la probeta vuelve a cargarse.

Llegado cierto punto, la carga se mantiene casi constante, mientras que las deformaciones se disparan, ya que se está propagando la grieta en ese ala. Finalmente, la probeta falla y las deformaciones caen.

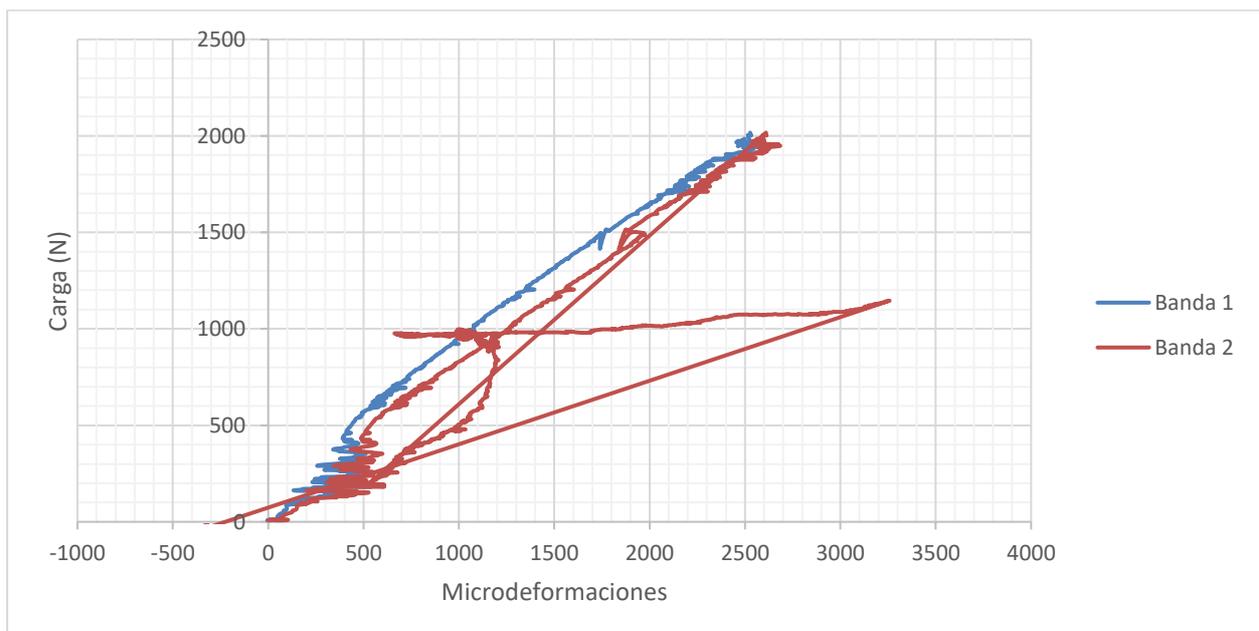


Figura 5-38. Lectura de las bandas en F-F2

La carga de aparición de la grieta se sitúa en 2000N, siendo esta la carga máxima también.

### 5.5.3 Ensayo de F-F3

La evolución de la carga se muestra en la siguiente gráfica.



Figura 5-39. Cargas frente a desplazamiento en F-F3

Existe un tramo muy largo desde el punto A hasta el B con una rigidez apenas variante excepto por pequeñas oscilaciones como el ensayo anterior. En el punto B aparece una grieta en el interior de la omega en la zona de la esquina, pero su propagación es muy leve.

Cuando la pieza vuelve a cargarse aparece otra grieta, en C, esta vez en el ala opuesta y comenzando por el borde de la omega hacia el hueco central. Es esta fisura la que provoca el fallo final de la pieza en D, como se puede ver en la Figura 5-40.



Figura 5-40. Aspecto de la probeta en F-F3

Las bandas extensométricas midieron un aumento de las deformaciones debidas a la tracción hasta alcanzar la carga de aparición de la primera grieta interlaminar en la omega. En este momento, ambas descienden, siendo la bajada de la banda 2, la colocada en el ala donde se produce dicha grieta, más acusada.

Una vez ahí, las deformaciones vuelven a aumentar en sentido positivo con la carga de la probeta, hasta llegar al fallo y bajar a valores cercanos a 0.

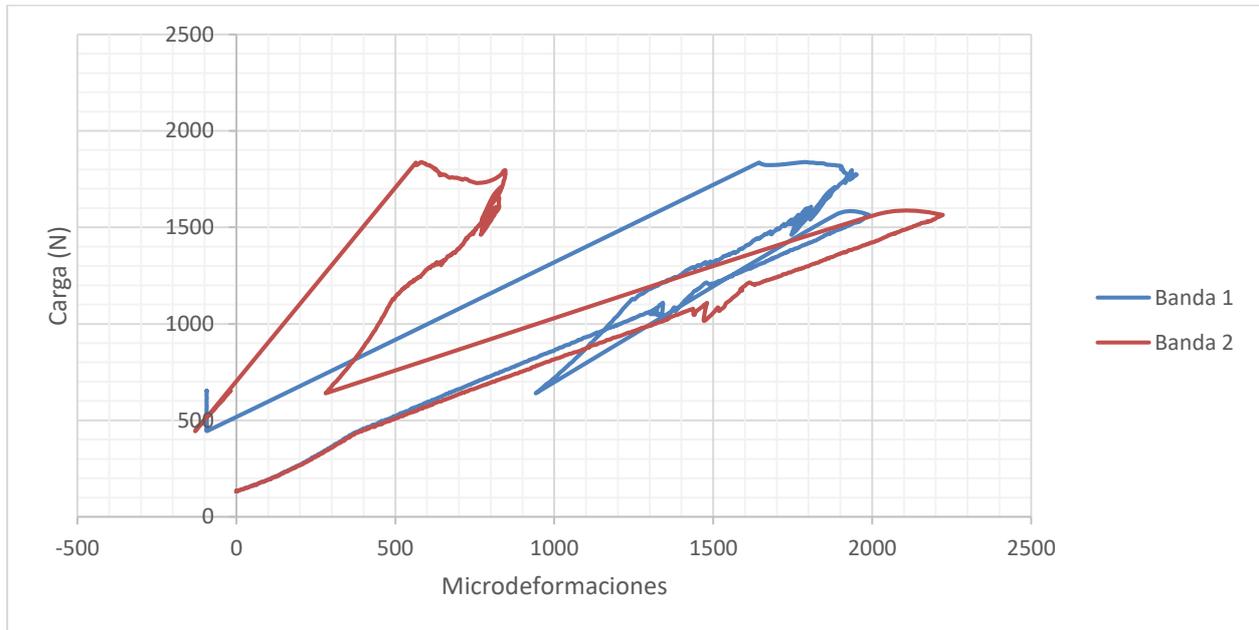


Figura 5-41. Lectura de las bandas en F-F3

La carga de aparición de la grieta se sitúa en 1550N y la carga máxima o de fallo en 1850N.

#### 5.5.4 Comparación preliminar de C-F

En la Figura 5-42 se observa la comparación de diagramas de carga a lo largo de los ensayos de F-F.

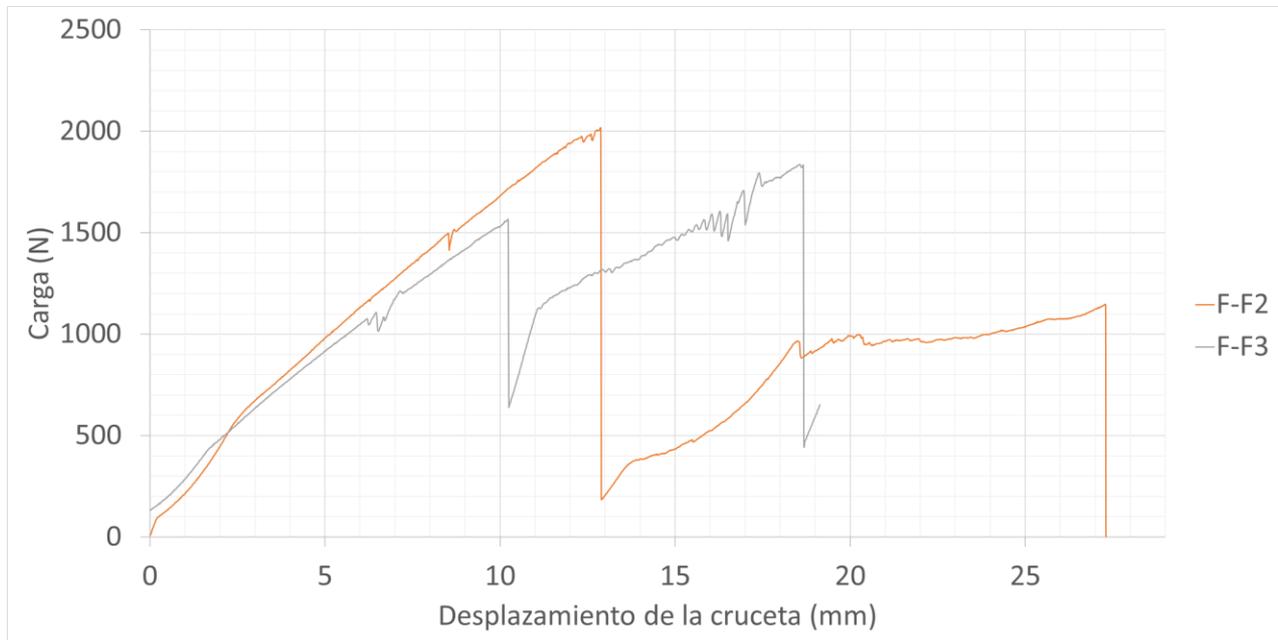


Figura 5-42. Comparación preliminar F-F

Dejando de lado el ensayo F-F1, la evolución inicial de los ensayos es similar. La rigidez es aproximadamente la misma y ambas tienen un pequeño pico de baja de carga, probablemente asociado a la aparición de alguna grieta inapreciable a simple vista y que ni siquiera altera la rigidez. En ambos casos, la formación final de la grieta es brusca, aunque se da a cargas muy diferentes. Este fenómeno se estudiará en el siguiente apartado.

## 5.6 Comparación de resultados finales

En la Tabla 5-1 se recogen los resultados totales de todos los ensayos en cuanto a la carga de aparición de la grieta, carga de fallo de la probeta y características de propagación de la grieta en el ala de rotura y en la opuesta.

Probeta	Carga de aparición de grieta (N)	Carga de fallo (N)	Evolución de grieta en ala de fallo final	Evolución de grieta en ala opuesta
C-C1	625	1150	Inválido	Inválido
C-C2	400	1300	Desde el centro hacia el extremo	Interlaminar en la curva de la omega
C-C3	300	1275	Desde el centro hacia el extremo	Desde el centro sin llegar al extremo
F-C1	360	900	Desde el extremo hacia el centro	Ausencia
F-C2	250	750	Desde el extremo hacia el centro	Ausencia
F-C3	400	1100	Desde el extremo hacia el centro	Ausencia
C-F1	550	680	Desde el centro hacia el extremo	Desde el centro sin llegar al extremo
C-F2	700	900	Desde el centro hacia el extremo	Desde el centro sin llegar al extremo
C-F3	500	600	Desde el centro hacia el extremo	Desde el centro sin llegar al extremo
F-F1	1000	1500	Inválido	Inválido
F-F2	2000	2000	Desde el centro hacia el extremo	Desde el extremo hasta la piel en el hueco central
F-F3	1550	1850	Desde el extremo hacia el centro	Desde el centro sin llegar al extremo

Tabla 5-1. Resumen de resultados de los ensayos

Como comentario general cabe decir que, si bien los métodos de fallo y la posición y propagación de las grietas dentro de cada configuración han sido similares, los valores asociados a las cargas de aparición de grieta y de fallo han resultado muy dispares. Aun dejando de lado los ensayos considerados inválidos, marcados en rojo en la tabla, hay variaciones en cargas de generación de grieta que alcanzan el 50 y 60%. El centrado imperfecto de la probeta en algunos ensayos parece ser el causante de la mayoría de las diferencias, aunque, dada la complejidad de la probeta, no es de extrañar que una pequeña diferencia de ángulo en el agarre o de gravedad de la grieta inicial tenga importantes

consecuencias en el resto del ensayo.

Aun teniendo en cuenta este aspecto, en general las distintas configuraciones han mostrado claras tendencias, lo que nos permite hacer un análisis dentro de cada combinación y otro en común.

Dentro de la serie C-C las probetas, a excepción del ensayo inválido inicial, han presentado unas cargas de fallo final similares. Predominantemente, la grieta se forma en la unión en la zona central de la probeta, propagándose hacia los extremos.

Además, la rotura no se produce en la lámina de adhesivo en sí mismo, sino entre las láminas más externas de la cara superior del revestimiento, mostrando que la fuerza de adhesión de la resina es menor que la del adhesivo empleado. Por esta razón, en las figuras de las probetas se pueden ver las láminas de 45 y -45 grados en los restos de la piel.

Las probetas correspondientes a F-C presentan notables similitudes en su forma de fallo. Todas ellas poseen una evolución de la carga respecto al desplazamiento prácticamente idéntica. La grieta nace en el extremo de la unión del ala y se propaga a través del mismo adhesivo hacia el hueco central. Sin embargo, un aspecto interesante es que una vez se alcanza la carga de fallo en ese ala, la grieta pasa al interior de la piel, arrancando las láminas superficiales de fibra. De esta forma, aparecen dos zonas diferenciadas en la superficie tras el ensayo, una con adhesivo y otra con las fibras al descubierto.

En cuanto a las C-F, los ensayos presentan los mismos resultados. Ambas alas presentan grietas desde la esquina central hacia los bordes, siendo sólo una de ellas la que llega hasta el final y provoca el fallo. También cabe decir que todas las fisuras se han producido a través del propio adhesivo, no adentrándose en la piel ni en la omega.

Finalmente, para las probetas F-F se han registrado altos niveles de carga máximos. El mecanismo de fallo es el de una grieta desde la esquina central hacia el extremo. Sin embargo, queda patente que existen mayores diferencias entre un ensayo y otro que en el resto de configuraciones. En este caso no existe lámina de adhesivo por la que la grieta pueda propagarse, por lo que en casi todos los casos lo ha hecho a través de las capas superiores de la piel, dejando fibra al descubierto, en lugar de en la misma unión o en la omega.

Con el fin de realizar una comparación entre los valores de carga soportados por todas las configuraciones, se ha calculado la media de la carga de aparición de grieta y de la máxima en cada combinación de curado, ignorando los ensayos inválidos. Esto se muestra en la Tabla 5-2.

Configuración	Carga media de aparición de grieta (N)	Carga media máxima (N)
C-C	350	1285
F-C	335	915
C-F	580	725
F-F	1775	1925

Tabla 5-2. Valores medios de cargas de grieta y máxima

De esta tabla se extrae que, en cuanto a carga máxima, la configuración co-curada es de lejos la mejor, seguida de la co-pegada y dejando en últimos lugares a las combinaciones “mixtas”. Es de especial interés constatar que la característica que diferencia a la C-F del resto en cuanto a su mecanismo de fallo, y lo que la convierte en la que soporta menor carga final, es que la grieta se propaga a través del adhesivo, mientras que en el resto de configuraciones siempre se adentra en la piel o nace directamente en ella. Este hecho queda respaldado por la tendencia de la combinación F-F, la de mayor carga última, a formar grieta en la piel y propagarse a través de ella sin acercarse a la omega.

Sin embargo, la carga de mayor interés no es la máxima que haya soportado la pieza durante el ensayo tras múltiples roturas, sino la carga en la que aparecen los daños permanentes en ella. En esta línea, de la tabla se extrae que la configuración co-curada es muy resistente a la aparición de la fisura, mientras que el resto de combinaciones son muy sensibles a la formación de grietas, sobre todo comparando las cargas a las que ocurre con sus cargas máximas. Cabe destacar que el co-curado no es el segundo más resistente a la aparición de la grieta, pese a ser el segundo en carga máxima. En su lugar, es la combinación piel curada, rigidizador fresco la que aguanta mayores cargas sin presentar grietas, a pesar de tener una menor carga máxima que su compañera mixta.

Ahondando más en este aspecto, se descubre que la combinación que genera una grieta a menor carga, la F-C, es la única que tiene a agrietarse en los bordes de las alas de la omega, en lugar de en la zona central de la probeta. Por tanto, se puede ver que la sensibilidad a este mecanismo de fallo, provocada por el curado conjunto del adhesivo con la piel fresca, supone una desventaja en cuanto a carga de aparición de grieta.

Por el otro lado, la combinación más resistente a la aparición de grietas es la F-F, la cual sufre de fisuras en la zona central de la probeta que extienden hacia los bordes, al contrario de la F-C. Sin embargo, resulta interesante que la C-F, aun siendo la de carga máxima más baja debido a su fallo a través del adhesivo, sea la segunda mejor opción en cuanto a generación de grieta. Para encontrar la razón se debe buscar en las similitudes entre la C-F y la F-F. Aunque ambas fallen por distintos mecanismos y a diferentes cargas, el aspecto común más notable es el estado de la omega en el momento de la unión, fresca, por lo que se puede barajar la posibilidad de que esto ayude a la resistencia total de la pieza frente a la aparición de grietas.

En general se ha observado que el método de fallo más común es comenzando desde el hueco central hacia los extremos de las alas de la omega, y a través de las capas del revestimiento en lugar del adhesivo. Han sido sólo configuraciones específicas las que se han comportado de forma diferente, como la F-C fallando desde los extremos hacia el centro o la C-F teniendo la mitad de la

fisura en adhesivo, y la mitad de fallo final entre capas de la piel.

Por último, cabe decir que, en casi todos los ensayos, el ala que no falla queda seriamente dañada, excepto en los de la combinación de revestimiento fresco y omega curada, en los que queda totalmente intacta o con pequeñas grietas interlaminares en la curva de la omega.

## 6 CONCLUSIONES Y DESARROLLO FUTURO

### 6.1 Resumen del trabajo

El primer paso fue el diseño de las probetas que se consideraron necesarias para comparar la bondad de la unión en las cuatro configuraciones del estado reológico del material. Para ello se estudió la forma y dimensiones de una serie de probetas formadas por una piel plana y un rigidizador en forma de omega que se obtendría a partir de un molde de aluminio.

El proceso de fabricación fue optimizado para la creación del total de 16 probetas. La primera meta fue la de obtener la configuración de co-pegado, con los dos componentes previamente curados y unidos mediante adhesivo. Sin embargo, surgieron numerosos inconvenientes, como problemas con la tridimensionalidad de la pieza en las bolsas de vacío o la necesidad de elevar el molde ya que su peso deformaría el revestimiento cuando este fluyera en el interior del autoclave. En consecuencia, se tomaron una serie de medidas para paliar cada uno de los contratiempos, como fueron el uso de pliegues en el cromato de la bolsa o de placas del mismo espesor que la piel.

Una vez se hubo fabricado esta primera pieza, se descubrió un importante fallo: la unión adhesivo no cubría toda la zona de contacto, debido a un espesor demasiado grande de las placas que sujetan al molde. Encontrar placas más finas fue un aspecto clave, ya que este error podría haberse extendido al resto de piezas, alterando seriamente sus propiedades.

De esta forma, la optimización del proceso durante la fabricación de la primera pieza co-pegada permitió la producción del resto de probetas sin mayores dificultades. Finalmente se obtuvieron las cuatro piezas en un estado perfecto, procediendo a su resanado y cortado en las dimensiones exactas del diseño de probetas.

Por otro lado, el ensayo escogido fue el de arrancamiento de la omega de la piel. Con este objetivo, fue necesario el diseño de un útil que hiciera, a la vez, de base y sujeción del revestimiento y de agarre de la omega para su adhesión a la mordaza de la máquina de tracción. Así se diseñaron dos útiles separados, agarre superior e inferior, que posteriormente fueron fabricados en el taller, cumpliendo las especificaciones sin problemas.

Una vez los elementos para el ensayo estuvieron listos, llegó el momento de preparar las probetas para el arrancamiento. Además de las gráficas carga/desplazamiento, que proporcionaría la máquina de ensayo, se buscó conocer las deformaciones en las alas de la omega, con el objetivo de comprender la naturaleza del arrancamiento. De esta forma se incluyeron dos bandas extensométricas en cada probeta, centradas una en cada ala.

El siguiente paso fue el ensayo en sí mismo. En este punto se encontraron varios problemas. Las primeras pruebas no tuvieron una sujeción suficientemente fuerte, provocando deslizamiento de la probeta e invalidando los resultados en gran medida. Por otro lado, un cierto

número de bandas extensométricas fallaron en sus lecturas debido a la sensibilidad que poseen, lo que hizo que una pequeña imperfección en las conexiones cableadas provocara grandes oscilaciones en las medidas o incluso su ausencia.

Sin embargo, finalmente se pudieron obtener suficientes datos de los ensayos como para realizar una buena comparación entre las cuatro configuraciones, ya que a los valores de carga, desplazamiento y deformaciones se sumaron las notas tomadas durante el arrancamiento de la evolución de la grieta en cada caso. En este paso se descubrieron diferencias importantes entre valores de carga dentro de ensayos de las mismas configuraciones. Aun así, las tendencias dentro de cada combinación eran claramente diferentes a las del resto de configuraciones, por lo que se pudo extraer conclusiones.

## 6.2 Conclusiones

Los resultados del trabajo se han visto condicionados en cierta medida por algunos fallos en el centrado de la probeta y del agarre superior que han provocado ciertas medidas de carga de aparición de grieta dispares. Sin embargo, se han podido extraer una serie de conclusiones de interés.

El objetivo principal del trabajo es estudiar y comparar la bondad de la unión entre piel y omega según la configuración de curado de ambas. Como resultado más notable se tiene una clara superioridad de la combinación de piel fresca y omega fresca, sin ningún tipo de adhesivo, respecto al resto de opciones en cuanto a carga a la que aparece la primera grieta. En este aspecto, esta configuración llega a ser hasta 5 veces más resistente que las demás. Cabe decir, que esta grieta inicial surgida se propaga a través de la unión, pero por las capas superiores de la piel, no por la omega, lo que indica que, frente a la tracción de la omega, es el revestimiento en la zona de la unión el que sufre las mayores tensiones.

En cuanto al resto de configuraciones, al contrario de lo que se creía en un principio, la combinación co-pegada no es la segunda que más carga soporta antes de agrietarse. En su lugar tenemos a la propia de la piel curada y la omega fresca unida mediante adhesivo. La tercera opción es la co-curada, y como última tenemos la de piel fresca y omega curada. Este orden nos indica que el hecho que la omega se encuentre fresca en el momento de la unión, ya sea con o sin adhesivo, resulta beneficioso para la resistencia de la pieza a la aparición de grietas. De cualquier forma, es necesario recalcar que la diferencia entre el valor de carga de generación de grieta de estas tres configuraciones y la de la co-curada es muy notable, siendo el de esta última de unos 180 kilogramos de fuerza y el del resto entre 30 y 60.

Claro está, que la mejor opción en cuanto a propiedades es la llamada F-F o co-curado. Sin embargo, no se debe perder de vista el enfoque de este trabajo, ya que se ha trabajado con probetas individuales de base plana relativamente fáciles de fabricar. En la industria, piezas como el carenado del fan poseen geometrías curvadas y precisas, con los rigidizadores en su interior en determinadas posiciones. El hecho de realizar un curado conjunto a ambas piezas en estado fresco, con las dimensiones y complejidad que poseen, resulta de gran dificultad.

Esta es la razón por la cual, como en numerosos problemas en la ingeniería, es necesario llegar a una solución de compromiso entre el método teórico ideal y el factible o eficiente de implementar en la realidad.

### 6.3 Desarrollos futuros

Como resultado de este trabajo, se han hallado posibles campos de investigación futura sobre el tema. Algunos ejemplos son:

- Mejora de la superficie de adhesión en las configuraciones con adhesivo mediante el uso de tejido “peel-ply” en lugar de lijado.
- Fabricación en diferentes ciclos de autoclave de probetas de la misma configuración de curado, con el objetivo de tener diversidad de medidas dentro de cada combinación.
- Diseño de un método para un perfecto centrado del agarre superior, evitando las compresiones en situaciones que deberían ser de ausencia de tensiones que se han observado.
- Uso de un mayor número de bandas extensométricas en diferentes puntos como la zona central de la piel o la cara inferior de la misma, pudiendo hallar las deformaciones de flexión en combinación con las bandas de la cara superior.
- Añadir una sujeción adicional en la zona central de la piel, evitando así problemas de deslizamiento de la piel cuando se tracciona la pieza.
- Variar la orientación de apilado a la opuesta, teniendo las láminas de 0 grados del revestimiento a lo largo de la probeta y las de 90 grados de la omega a lo ancho de la probeta, para estudiar las diferencias con el caso aquí estudiado.
- Estudio de la posibilidad de, en las configuraciones con adhesivo, introducir una o varias láminas frescas rodeadas de dos capas de adhesivo entre los dos componentes, así como su comparación con los resultados de este trabajo.





## BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

---

- [1] [http://blog.al.com/press-register-business/2011/09/united\\_technologies\\_agrees\\_to.html](http://blog.al.com/press-register-business/2011/09/united_technologies_agrees_to.html)
1. Federico París, *Teoría de la Elasticidad*, GERM (2000)
  2. Blanca Gómez, TFG: *Desarrollo, optimización y ensayo de probetas de material compuesto para ensayos de arrancamiento*, Mayo (2013)