

Proyecto Fin de Grado
Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Estudio del spring-back y recuperación de forma
de zonas de detalle de un rigidizador en omega
fabricado en material compuesto

Autor: Raúl Sotillo Guzmán

Tutores: Jesús Justo Estebaranz, Enrique Graciani Díaz

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

Sevilla, 2019



Proyecto Fin de Grado
Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Estudio del spring-back y recuperación de forma de zonas de detalle de un rigidizador en omega

Autor:

Raúl Sotillo Guzmán

Tutor:

Jesús Justo Estebanz

Profesor Contratado Doctor Interino

Enrique Graciani Díaz

Catedrático de Universidad

Dpto. de Elasticidad y Resistencia de Materiales

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2019

Autor: Raúl Sotillo Guzmán

Tutor: Jesús Justo Estebaranz
Enrique Graciani Díaz

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

A mis padres y a mi hermana

Agradecimientos

Agradecer en primer lugar a mis tutores, Don Jesús Justo y Don Enrique Graciani la posibilidad de hacer este proyecto, por la disponibilidad casi incondicional a la hora de resolver mis dudas, por las correcciones y por su apoyo en general.

A Antonio, Miguel, José Ramón, Patricia, y a todos los del Departamento y Laboratorio de Elasticidad y Resistencia de Materiales por aguantarme estos meses en el laboratorio y ofrecer su ayuda siempre que me hizo falta. En especial a Antonio Cañas por la fabricación de los útiles para este proyecto y por todas las respuestas a esas preguntas que para mí no eran tan obvias. Sin la ayuda de todos ellos no habría sido posible.

A mi familia, por acompañarme a lo largo de esta experiencia en todo momento.

A mis profesores y compañeros de la rama de Materiales, en especial a Federico, Jesús, Israel y Laureano, por enseñarme todo el mundo de los materiales y la elasticidad y hacerme ver lo bonita que es esta rama de la ingeniería.

A mis compañeros de la rama por los buenos ratos que hemos pasado juntos en clase y fuera de ella.

A mis amigos, los de la facultad y los de siempre, por animarme y darme ese apoyo que me hacía falta cuando no veía el final de la época de exámenes.

A Juan Manuel Muñoz Rodríguez, por abrirme los ojos a la ingeniería desde tan pequeño.

A todos mis amigos de ESTIEM, por darme siempre motivación extra desde cualquier punto de Europa.

A todas las personas que tanto quiero y tanto me quieren, que me acompañan en esta aventura, gracias por abrirme la mente y por sacar lo mejor de mí.

Raúl Sotillo Guzmán

Sevilla, 2019

Resumen

Este proyecto se centrará en estudiar la viabilidad de una metodología que permita reducir las deformaciones residuales (spring-back) en los componentes fabricados en material compuesto, las mismas que aparecen durante la fabricación de piezas de material compuesto. En concreto estudiaremos un rigidizador en omega en el cual las deformaciones residuales se manifiestan en las zonas curvas del componente, y afecta significativamente a la forma del mismo generando deformaciones no deseadas. Estas deformaciones hacen que, a la hora de ensamblar, las tolerancias dimensionales de la pieza no sean precisas y generan cambios notables en los ángulos de los detalles del estudio.

Se han fabricado dos probetas diferentes para el estudio de las curvas características del rigidizador en omega. Una de esas dos probetas se producirá en serie para su ensayo. Estos ensayos consistirán someter las probetas a un estado de carga que modifique el ángulo de la zona curva de las mismas y mantener dicha carga, a diferentes temperaturas, con objeto de provocar deformaciones viscoelásticas, y ver si es posible y en qué medida es posible cambiar permanentemente este ángulo después de haber sufrido este fenómeno, ofreciendo de esta manera una posible solución al spring-back y reduciendo las tensiones residuales que se producen durante el ensamblaje.

Abstract

This project will focus on studying the feasibility of a methodology to reduce spring-back in composite components, which appear during the manufacture of composite parts. Specifically, we will study an omega stiffener in which the residual deformations are manifested in the curved areas of the component, and significantly affect its shape, generating undesired deformations. These deformations mean that, when assembling, the dimensional tolerances of the part are not precise and generate notable changes in the angles of the details of the study.

Two different specimens have been manufactured for the study of the characteristic curves of the omega stiffener. One of these two specimens will be produced in series for testing. These tests will consist of subjecting the specimens to a state of load that modifies the angle of the curved area of the specimens and maintaining said load, at different temperatures, in order to provoke viscoelastic deformations, and to see if it is possible and to what extent it is possible to permanently change this angle after having suffered this phenomenon, thus offering a possible solution to spring-back and reducing the residual stresses that occur during assembly.

Índice

Agradecimientos	i
Resumen	iii
Abstract	v
Índice	vii
Índice de figuras	ix
Índice de tablas	xi
1. Introducción	1
1.1. <i>Materiales compuestos</i>	2
1.2. <i>Fenómeno del spring-back</i>	3
2.1.1. Deformación térmica anisótropa	3
2.1.1. Otros mecanismos de formación de spring-back	4
1.3. <i>Objetivo del proyecto</i>	5
1.4. <i>Estructura del proyecto</i>	5
2. Fabricación de las probetas	7
2.1. <i>Material y molde usados para la fabricación</i>	7
2.1.1. Modo de laminación	8
2.1.2. Material usado	8
2.1.3. Útiles usados para la fabricación de las probetas	11
2.2. <i>Apilado de las láminas</i>	12
2.3. <i>Construcción de la bolsa de vacío</i>	14
2.4. <i>Dificultades encontradas en el proceso</i>	18
2.4.1. Dimensiones de las láminas	19
2.4.2. Corcho para el control de la resina	19
2.4.3. Apilado de láminas de 0 y ± 45 grados	19
2.4.4. Bolsa de vacío tensa	20
2.4.5. Imperfecciones en la bolsa	20
2.4.6. Dobleces del plástico desmoldeante	21
2.4.7. Configuración de apilado elegida: cocurado	21
3. Preparación de los ensayos	23
3.1. <i>Útil usado en los ensayos</i>	23
3.2. <i>Cálculo de la fuerza máxima a aplicar en los ensayos</i>	26
3.3. <i>Máquina y útiles de ensayo</i>	27
3.3.1. Primeros ensayos a temperatura ambiente	27
3.3.2. Primer ensayo a alta temperatura	32

4. Ensayos	37
4.1. <i>Resultados de los ensayos</i>	37
4.1.1. Ensayos a temperatura ambiente	37
4.1.2. Ensayos a alta temperatura	39
4.1.3. Ensayos a temperatura ambiente posteriores	43
4.2. <i>Observación de las gráficas</i>	44
4.2.1. Detalles característicos de las curvas	44
4.2.2. Comparación de los diferentes ensayos	44
4.2.2.1. Resultados de los ensayos a temperatura ambiente	44
4.2.2.1. Resultados de los ensayos a alta temperatura	45
4.2.2.1. Resultados de los ensayos a temperatura ambiente posteriores	45
4.3. <i>Comparación de los ángulos</i>	45
5. Micrografías	49
5.1. <i>Proceso de lijado y pulido</i>	49
5.2. <i>Obtención de las micrografías</i>	50
5.3. <i>Visualización de las micrografías</i>	50
6. Conclusiones	53
Referencias	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Comparación de los ángulos modificados por el spring-back y los ángulos del molde.	9
Tabla 2.2. Secuencia de apilado y dimensiones de las láminas usadas en la fabricación de las piezas.	10
Tabla 3.1. Medidas fijadas para la uniformidad de los ensayos.	25
Tabla 4.1. Temperatura y carga fijada para cada ensayo en su ensayo a alta.	39
Tabla 4.2. Comparación del ángulo anterior al ángulo girado en las probetas ensayadas para la temperatura y carga a la que se ensayó cada probeta.	46
Tabla 5.1. Descripción de los diferentes pasos a seguir para el pulido de las probetas.	50

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Deformaciones en una pieza del fuselaje de un Airbus A350 después del curado.	3
Figura 1.2. Deformaciones por spring-back en las probetas fabricadas durante este proyecto.	4
Figura 2.1. Pieza a construir, con sus partes vistas y ocultas	7
Figura 2.2. Piezas elaboradas para el estudio.	8
Figura 2.3. Dimensiones y ángulos de la sección del molde.	9
Figura 2.4. Disposición que se usó para el sentido de la fibra durante el apilado de las láminas.	10
Figura 2.5. Herramientas usadas para la fabricación de los laminados.	11
Figura 2.6. Rollos de material que se usaron para la fabricación de los laminados.	12
Figura 2.7. Molde y laminados metidos dentro de la bolsa de precompactación mientras succiona.	13
Figura 2.8. Colocación de los corchos adhesivos antes de introducir la bolsa en el autoclave.	14
Figura 2.9. Láminas apiladas, rodeadas de corcho y situadas sobre la placa de acero, dentro del recinto creado para la bolsa de vacío en construcción.	15
Figura 2.10. Pinzas de cinta de cromato que protegen las zonas más altas del molde de que la tensión que soporta el film de vacío durante las tan bajas presiones acabe rompiéndolo.	16
Figura 2.11. Ciclo de curado del autoclave, donde se muestra la temperatura que tuvo a lo largo del tiempo, la presión exterior a la bolsa y la presión interior de la bolsa de vacío.	17
Figura 2.12. Bolsa de vacío usada para la fabricación de la pieza larga, que se cortará más en adelante para obtener más probetas.	18
Figura 2.13. Apilado donde se pueden apreciar errores notables en las dimensiones de las láminas.	19
Figura 2.14. Aspecto de la una pieza quemada en el autoclave tras una imperfección y de su bolsa de vacío desde fuera.	20
Figura 2.15. Problemas de espesor debidos a un doblez en el plástico desmoldeante.	21
Figura 2.16. Piezas montadas una encima de la otra. Los resultados están ordenados cronológicamente de izquierda a derecha.	22
Figura 3.1. Útil usado en los primeros ensayos.	23
Figura 3.2. Útil definitivo, usado en los ensayos posteriores.	24
Figura 3.3. Perspectiva estallada del útil usado para los ensayos.	25
Figura 3.4. Detalles de las medidas usadas en la colocación de las probetas uniformadas.	26
Figura 3.5. Ensayo con el acople corto fijado a la cruceta.	28
Figura 3.6. Ensayo con el acople corto fijado a la cruceta, aplicando lubricante.	29
Figura 3.7. Disposición usada en los primeros ensayos con el acople cilíndrico largo.	30
Figura 3.8. Resultados de un ensayo con el acople cilíndrico largo.	31
Figura 3.9. Cilindro colocado en la posición correcta encima del cubo.	31
Figura 3.10. Curva carga-desplazamiento a 180 °C para la probeta 2.	33

Figura 3.11. Curva carga-tiempo a 180 °C para la probeta 2 desde que se inicia el ensayo.	33
Figura 3.12. Detalle de la curva carga-tiempo a 180 °C para la probeta 2 a partir del momento para el cual mantenemos constante el desplazamiento.	34
Figura 3.13. Diferencia de ángulo visible entre la probeta referencia y la probeta 2 superpuestas.	34
Figura 3.14. Curva carga-tiempo para la probeta 3, ensayada a 150 °C.	35
Figura 3.15. Diferencia de ángulo visible entre la probeta referencia y la probeta 3.	35
Figura 3.16. Configuración elegida finalmente para los ensayos uniformizados.	36
Figura 4.1. Curva carga-desplazamiento aplicando carga a temperatura ambiente para todas las probetas ensayadas de manera uniforme.	38
Figura 4.2. Curva carga-desplazamiento descargando a temperatura ambiente para todas las probetas ensayadas de manera uniforme.	38
Figura 4.3. Curva carga-desplazamiento aplicando carga a alta temperatura para todas las probetas ensayadas de manera uniforme.	40
Figura 4.4. Curva carga-desplazamiento aplicando carga a temperatura ambiente para las probetas ensayadas a 180 °C tras el ensayo a alta temperatura.	40
Figura 4.5. Carga entre carga inicial respecto del tiempo para todas las probetas con ensayo uniforme en el tramo para el cual se mantiene el desplazamiento de la cruceta constante.	41
Figura 4.6. Diferencia entre la carga inicial y la carga respecto del tiempo para todas las probetas con ensayo uniforme en el tramo para el cual se mantiene el desplazamiento de la cruceta constante.	41
Figura 4.7. Carga entre carga inicial respecto del tiempo para las probetas ensayadas a 180 °C en el tramo para el cual se mantiene el desplazamiento de la cruceta constante.	42
Figura 4.8. Diferencia entre la carga inicial y la carga respecto del tiempo para las probetas ensayadas a 180 °C en el tramo para el cual se mantiene el desplazamiento de la cruceta constante.	42
Figura 4.9. Curva carga-desplazamiento aplicando carga a temperatura ambiente para todas las probetas ensayadas de manera uniforme tras el ensayo a alta temperatura.	43
Figura 4.10. Curva carga-desplazamiento descargando a temperatura ambiente para todas las probetas ensayadas de manera uniforme tras el ensayo a alta temperatura.	43
Figura 4.11. Cambio del ángulo en las probetas ensayadas a 180 °C.	46
Figura 4.12. Cambio del ángulo en las probetas ensayadas a 150 y 120 °C.	47
Figura 5.1. Diferentes paños usados en el lijado y pulido de las probetas.	49
Figura 5.2. Detalle de las roturas producidas en las láminas de 90 grados de la probeta 4.	51
Figura 5.3. Detalle de las roturas producidas por compresión en la probeta 5.	51
Figura 5.4. Detalle de los numerosos defectos en las capas interior, intermedia, y exterior de la probeta 2 tras ser ensayada de manera no uniforme.	52

1 INTRODUCCIÓN

«Si el conocimiento puede crear problemas, no es con la ignorancia con lo que podremos resolverlos»

- Isaac Asimov-

El uso de los materiales compuestos en la industria ingenieril ha aumentado considerablemente en los últimos 30 años. Principales fabricantes como Airbus han estado integrando estructuras hechas de material compuesto en sus últimas aeronaves comerciales, como en el A350 (donde lo compone más del 50%), debido a sus altas propiedades específicas comparadas con las de los metales, y llegando a elevados porcentajes en peso en su rama militar, donde se buscan materiales ligeros y resistentes sin importar demasiado su coste.

Sin embargo, el constante auge de estos materiales en los últimos años requiere un abaratamiento de estos materiales para una mayor producción. Este elevado precio es el que hace que merezcan la pena tantos estudios para estudiar exhaustivamente el comportamiento de los materiales compuestos en ciertos usos y configuraciones, para así aprovechar estos conocimientos para hacer de la fabricación de estos materiales tan versátiles algo mucho más rentable.

En todos los materiales, el proceso de fabricación induce, en mayor o menor medida, defectos indeseados. En el caso de los materiales compuestos, las deformaciones producidas durante su fabricación inducen tensiones residuales en la pieza, provocan problemas de tolerancia que se hacen notables en el proceso de ensamblaje. Este inconveniente obliga a la industria a forzar estas piezas durante su montaje para que encajen, aumentando las tensiones residuales en el material y reduciendo su vida útil.

Hoy en día se vive con estas tensiones residuales a diario. Gracias a los estudios sobre el spring-back se puede predecir, aunque no de manera demasiado exacta (y por supuesto mucho menos para piezas más complejas) la forma que va a adoptar una pieza tras su curado (endurecimiento de la resina termoestable por reacción química) y enfriamiento, lo que minimiza estas tensiones residuales, pero nunca las elimina.

A pesar de ello, y como se menciona antes, siempre se tendrán tensiones residuales en las piezas que fuercen sus tolerancias. En este proyecto se pretende estudiar una metodología que permita reducir las tensiones residuales, mejorando por tanto las tolerancias y disminuyendo las tensiones residuales introducidas durante el montaje.

La idea que se presenta en este trabajo es la de poder devolver a una angular de material compuesto al ángulo deseado, es decir, al que forma el molde. Se estudiará un rigidizador en omega fabricado con fibra de carbono, en concreto dos detalles de las zonas curvas, que tras la fabricación tienen un ángulo distinto al del molde. Se comprobará el efecto de tratar de devolver a la pieza a la forma que debería tener, eliminando la variación angular producida por el spring-back. Para adentrarnos en este tema, antes debemos introducir el tipo de material que vamos a usar.

1.1 Materiales compuestos

Antes de hablar de los fenómenos de estudio, se debe hacer una introducción al material del que se va a hablar durante todo este proyecto. En [1], se define un material compuesto como la combinación a escala macroscópica de dos o más materiales con interfases de separación entre ellos para formar un nuevo material. De manera general, esta mezcla se compone de una matriz y un refuerzo. La matriz, que es isotrópica, se usa para transferir la carga a todas las fases, y el refuerzo, que en el caso de la fibra de carbono es ortótropo, le da las mejores propiedades al compuesto. Algunas de las propiedades que despiertan especial interés son la resistencia mecánica, la resistencia a la corrosión, la densidad, el aislamiento térmico, la rigidez, la resistencia a la abrasión, la vida a fatiga y el aislamiento acústico. Además, los materiales compuestos son anisótropos, por lo que sus propiedades no son las mismas para cualquier dirección, aunque lo que realmente los hacen interesantes son sus propiedades específicas.

Esta definición no siempre ha sido la misma. Como estos materiales son relativamente jóvenes en términos de industrialización y uso, esta definición ha sufrido bastantes revisiones y correcciones para poder incorporar nuevos productos que no encajaban con la antigua definición y que seguían manteniendo diferencias con los existentes que no se consideran dentro de esta definición.

Debido a las importantes propiedades que tienen y a la facilidad con la que se pueden alterar dependiendo del método y diseño de fabricación, pueden llegar a tener prestaciones que no pueden ser alcanzadas por los materiales convencionales e incluso por ninguno de los materiales que constituyen el material compuesto actuando por separado. Cambiando la proporción matriz-refuerzo, el número y orden de láminas, y la orientación y longitud de las fibras, podemos conseguir lo descrito anteriormente. De hecho, dependiendo del uso que les demos, como serán necesarias unas prestaciones u otras, se procederá a un diseño personalizado del material compuesto con la finalidad de potenciar estas propiedades que tanta falta hacen para su utilización. Pequeños cambios conllevan grandes diferencias y en la fabricación de los materiales compuestos se hace notable.

El refuerzo puede ser utilizado de diferentes maneras, ya sea en partículas, que mejoran la resistencia a la abrasión y la dureza y son muy utilizadas en la fabricación de herramientas, o como fibras, con las que se consigue elevada resistencia y rigidez a baja densidad. Este último es el tipo de refuerzo más utilizado por sus propiedades específicas especialmente elevadas. Las fibras tienen una densidad cinco veces menor que la del acero, una rigidez dos veces mayor y un límite elástico diez veces mayor que el de éste. Las fibras más utilizadas son la de vidrio, kevlar o de carbono. Esta última es la más usada de todas y la que se ha usado en este proyecto para la fabricación de las piezas: un material compuesto con fibra de carbono y matriz epoxi.

Un recurso tan novedoso con unos comportamientos que no se conocen aún en profundidad, no puede permitirse unos diseños que presten el cien por cien de sus propiedades, ya que no se sabe exactamente qué mecanismos pueden provocar fallos. De esta manera se usan, para la construcción con materiales compuestos, coeficientes de seguridad muy altos comparados con los materiales convencionales, de los que se conocen con mayor fiabilidad las propiedades que tienen.

El hecho de que sea un material anisótropo tiene también desventajas. Una de ellas es que provoca deformaciones residuales durante el proceso de fabricación. Por ello se requiere un estudio de los mecanismos que provocan estos efectos indeseados, así como un análisis de las posibles soluciones para evitar así que se fueren las tolerancias dimensionales durante el ensamblaje.

Conociendo un poco más mecanismos como el spring-back que crean deformaciones residuales en el material, y sabiendo cómo corregirlas, podríamos mejorar las tolerancias dimensionales para un mejor conocimiento del comportamiento del material. Así se puede saber más de los mecanismos que provocan las alteraciones que se producen en el material y, gracias a esto, sacar provecho al máximo de sus propiedades.

1.2 Fenómeno del spring-back

El nombre de spring-back (o recuperación elástica en español), es un término que se generó en la rama de fabricación para explicar un fenómeno que ocurría en el doblado de chapa metálica: ésta se introduce en una matriz, donde se le aplica una fuerza que hace se acople al molde. Una vez acoplada, cuando la fuerza cesa, la chapa tiende a volver a su posición original, ya que parte de la deformación que estaba sufriendo era elástica. El efecto llamado spring-back en materiales compuestos no se debe a mismo motivo, aunque en inglés recibe el mismo nombre dado que el efecto que se produce en los dos procesos de fabricación es el mismo.

Como ya se dijo antes, las tolerancias dimensionales de los materiales compuestos no son tan precisas como las de las aleaciones ligeras a las que sustituyen en la industria aeronáutica. Este inconveniente viene dado, en parte, por las deformaciones que aparecen en el proceso de curado, paso final de la fabricación de una pieza de material compuesto, cuando lo que queremos fabricar es una pieza de material compuesto con fibras continuas. Esto es debido a que el refuerzo de la fibra de carbono es ortótropo. Además, mientras las propiedades de la fibra permanecen razonablemente constantes durante la temperatura de curado, las propiedades de la matriz evolucionan a medida que la resina polimeriza.

1.2.1 Deformación térmica anisótropa

En la fabricación de materiales compuestos con fibras continuas, normalmente se parte de láminas preimpregnadas (pre-preg), que se van apilando en una orientación u otra dependiendo de la configuración que se desee. Este apilado puede ser en plano o sobre un molde, si queremos que tenga una forma determinada. Una vez que tenemos todas las capas apiladas, la pieza y el molde se introducen en una bolsa de vacío. Esta bolsa, como su nombre indica, extrae el aire de su interior, creando unas condiciones muy cercanas al vacío, comprobando que no hay fugas y que todo el aire sale por la manguera que se conecta a la bolsa. Tras esto, se introduce en un horno autoclave y comienza el proceso de curado, el cual necesita un ciclo de alta temperatura (180 °C) y presión para que la resina se cure y el material obtenga sus propiedades finales.

Este proceso fija la temperatura de referencia del material a 180 °C. El hecho de que una vez solidificado el material se enfríe a temperatura ambiente (25 °C, es decir, a una diferencia de temperatura de $\Delta T = -155 \text{ }^\circ\text{C}$), conlleva unas deformaciones térmicas importantes. Estas deformaciones contribuyen significativamente al spring-back, y dependen de la temperatura de conformado según el estudio realizado en [2].

Mientras que en materiales isotrópicos una diferencia de temperatura sólo genera alteraciones del volumen sin cambiar la forma de la pieza, ya que los coeficientes térmicos son los mismos para toda la pieza y no se producen irregularidades, en materiales anisótropos como los materiales compuestos, este efecto no es tan simple, tal y como se puede apreciar en la Figura 1.

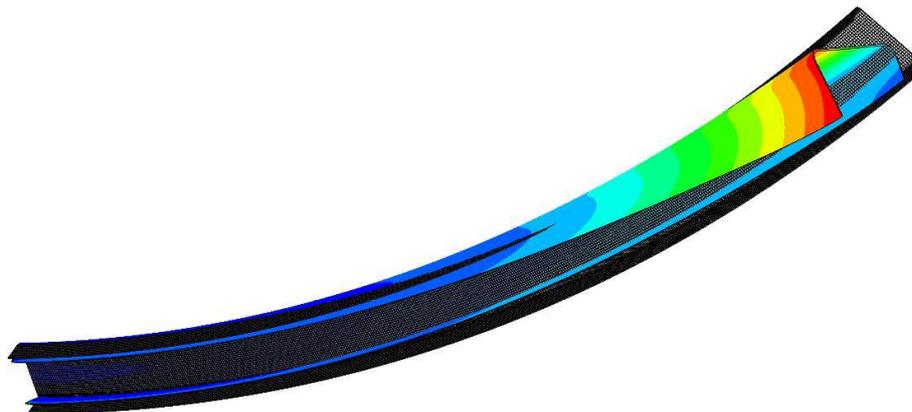


Figura 1.1. Deformaciones en una pieza del fuselaje de un Airbus A350 después del curado, con un factor de magnificación de 30, cuyo estudio está expuesto en [3].

Los laminados de material compuesto tienen diferentes coeficientes térmicos de expansión para la dirección de las fibras y para las direcciones perpendiculares a estas (la perpendicular a las fibras contenida en el plano de la capa y la perpendicular a las fibras en la dirección también perpendicular al espesor). De esta manera, el coeficiente de expansión térmica en el plano está dominado por el refuerzo de las fibras y el coeficiente de expansión térmica a través del espesor está gobernado por la matriz. Por ello, se deforman de manera diferente en las diferentes direcciones, lo que supone un reto desde el punto de vista del diseño del apilado, donde compensa estudiar que el efecto de la diferencia de los coeficientes térmicos se compense y se minimice. Este es el caso de en los apilados simétricos. Para los apilados asimétricos, estas deformaciones residuales son mayores según el estudio [4].

Además, en curvas y codos, como estas curvas están formadas por un número determinado de capas (lo que conlleva un espesor determinado) los radios interior y exterior serán diferentes. Además, como en la dirección del espesor se deforma una cantidad diferente a la que lo hace en la dirección de la curvatura, los desplazamientos no son compatibles y el material se curva acorde a compatibilizar los movimientos, lo que genera unas tensiones residuales. Este fenómeno se observa en la práctica, tal y como podemos observar en la Figura 1.2, donde se muestra el efecto del spring-back en probetas fabricadas, donde la variación del ángulo, como veremos en adelante, toma valores significativos.

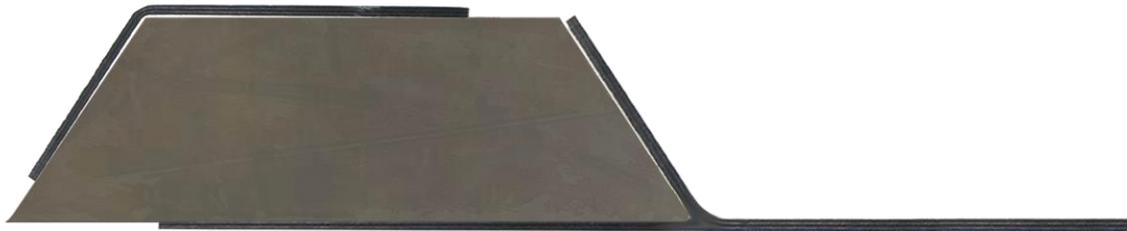


Figura 1.2. Deformaciones por spring-back en las probetas fabricadas para el desarrollo de este proyecto, donde se aprecia la diferencia entre el ángulo del molde y el ángulo que finalmente tuvieron las probetas.

De acuerdo con el estudio [5], el ángulo que se ha desviado depende de los coeficientes térmicos, de la temperatura a la que se cura el material y del ángulo del que parte la pieza según la siguiente relación:

$$\theta = \theta_0 + \frac{(\alpha_{\parallel} - \alpha_{\perp}) \Delta T}{\theta_0} \tag{1}$$

Donde θ es el ángulo del que parte la pieza, α_{\parallel} es el coeficiente térmico longitudinal, α_{\perp} es el coeficiente térmico transversal, y ΔT es la diferencia entre la temperatura a la que se cura el material y la temperatura ambiente.

1.2.2 Otros mecanismos de formación de spring-back

La expansión térmica anisótropa no es el único mecanismo responsable del spring-back. Un curado a presiones suficientemente altas, que produce baja viscosidad de la matriz y altas fuerzas de fricción durante el proceso de formación, asegura que no se produzca otro mecanismo conocido como deslizamiento entre láminas (interply-slip), tal y como explica el estudio [6]. Pero aunque podamos suponer despreciable considerar los efectos del deslizamiento entre láminas, hay que considerar también otro fenómeno, la cristalización.

Durante la cristalización, la parte semi-cristalina de la matriz se contrae, debido a que los cristales tienen mayor densidad que la fase amorfa y la masa se aglomera. [7] explica cómo este efecto puede ser incluso mayor que el efecto producido por la deformación térmica. Reduciendo las tasas de enfriamiento se consigue más cristalización y por lo tanto mayor contracción. Es evidente también que los polímeros amorfos no han sufrido el efecto del cambio volumétrico debido a la cristalización, por lo que la influencia de la temperatura es crucial [8]. Además, cuando la velocidad de curado es baja y debido a la presión de curado y a la geometría, las fibras tienden a moverse al radio interior y la matriz se desplaza

hacia el exterior. Por lo tanto, tal y como afirma el estudio [9], bajas velocidades no siempre crean spring-back, ya que dependería del radio de curvatura.

Este fenómeno depende además de otros factores. De acuerdo con el estudio [2], y confirmado por el estudio [10], bajas velocidades de formación favorecen el spring-back. Además, la temperatura y material de las herramientas y útiles pueden producir que las velocidades de enfriamiento en el material cambien y eso afecte al resultado del spring-back.

De hecho, según [11], además del fenómeno de expansión térmica anisótropa recién estudiado, que actúa en todas las piezas con spring-back, en un 53% se da este fenómeno debido al encogimiento de resina por la cristalización, en un 48% se da por desviación de la fibra, en un 41% de los casos se dio lugar por el gradiente de temperatura en la pieza, un 28% de los casos lo sufrió por culpa del gradiente de temperatura en el útil y un 19% de los casos el culpable fue el flujo del aire del autoclave.

Por todo esto, la motivación del estudio reside en la posibilidad de crear un método que reduzca o incluso, si se pudiese llegar a controlar de manera precisa, anule los efectos del spring-back sin tener que cambiar el molde ni forzar las tolerancias de las piezas durante el ensamblaje, lo que sería de gran ayuda a una industria que está fabricando y usando cada vez más materiales compuestos. El objetivo del proyecto es disminuir las deformaciones, y eso se consigue gracias al comportamiento viscoso del material.

1.3 Objetivo del proyecto

En este proyecto se estudia la posibilidad de conseguir modificar deformaciones residuales en una zona de detalle de un rigidizador en omega fabricado con laminados de fibra de carbono para poder compensar las deformaciones producidas por las deformaciones térmicas que se dan lugar durante el proceso de curado (lo que hemos explicado como spring-back). Se usarán probetas que formen los dos ángulos diferentes de la viga en omega, dado que el objetivo es comprobar la viabilidad de la técnica propuesta, para así asemejar los resultados a los de una viga omega completa. En este proyecto, se va a favorecer el error creado por el spring back, dado que será mucho más fácil doblar la pieza hacia dentro en lugar de hacia fuera, cerrando aún más el ángulo. Con un ensayo a flexión, sujetando la probeta de manera que tan sólo se deforme la parte de la curva, se comprobará si es posible obtener resultados satisfactorios en este proyecto. Lo que interesa es estudiar la posibilidad de mantener un desplazamiento constante en la probeta dentro de un horno, para diferentes temperaturas y diferentes cargas y ver si es posible provocar deformaciones permanentes, que permanezcan a temperatura ambiente.

1.4 Estructura del proyecto

Para llevar a cabo este estudio, primero se explicará detenidamente cómo se fabricaron las probetas, desde el apilado de las láminas hasta el curado, pasando por las dificultades encontradas en el proceso para poder entender su comportamiento mecánico. A continuación, se hablará de cómo se llegó al ensayo uniformizado del que se sacarán más tarde los resultados, y se comentarán los mismos. Más tarde, se explicará el proceso para obtener micrografías y se finalizará con las conclusiones obtenidas del estudio.

2 FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS

La fabricación de los detalles del rigidizador en omega se realizaron en el Laboratorio del Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales. Dentro del laboratorio, hay una sala libre de impurezas, lo que se conoce como sala limpia, donde se fabrican los laminados con menor riesgo de inclusiones. Se decidió fabricar por separado el detalle de los dos ángulos distintos que se presentan en un rigidizador en omega, por lo que se crearán dos piezas diferentes, cada una para estudiar uno de los detalles de cada una de las dos curvas diferentes del rigidizador y un molde con sección trapezoidal (molde de un rigidizador en omega) en el que apilar las diferentes láminas de material compuesto.

Para ello, contaremos con dos objetivos: el primero de ellos será fabricar dos probetas con laminados de fibra de carbono para el estudio del detalle de un rigidizador en omega, y medir el spring-back que se produce en los mismos. El segundo objetivo será fabricar una serie de una de estas dos probetas para modificar el ángulo a diferentes temperaturas y cargas.

2.1 Material y molde usados para la fabricación

La pieza que recorre el ángulo obtuso del molde está compuesta de láminas con el mismo orden y las mismas dimensiones que la parte superior de la otra pieza, que estaría compuesta por dos secuencias de apilado diferente, ambas simétricas: una para recorrer uno de las caras laterales del molde y salir de él y otra para recorrer la base (piel) y salir en contacto con el apilado anterior, como se observa en la Figura 2.1.

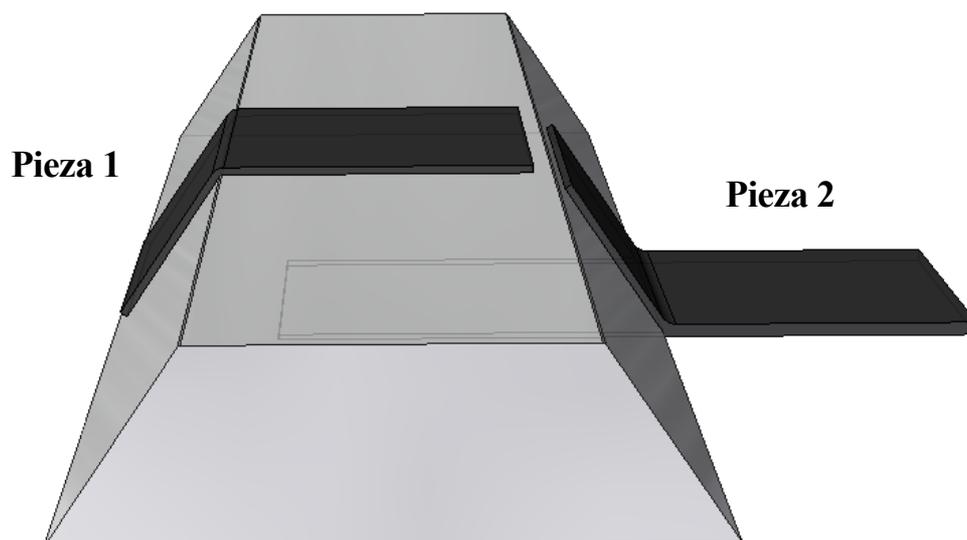


Figura 2.1. Pieza a construir, con sus partes vistas y ocultas. Se observa cómo las láminas recorren todas las caras del molde.

2.1.1 Modo de laminación

Para ahorrar tiempo y energía, se decidió realizar los apilados de las capas de pre-preg de los detalles uno enfrente del otro, de manera que recorren todas las caras del prisma. A las piezas las llamaremos pieza 1 y pieza 2 para referirnos a ellas, tal y como se observa en la Figura 2.1 y se explica en la Figura 2.2. La pieza 1 se producirá más tarde en serie, por lo que se apilarán unas láminas de mayor longitud para luego ser cortadas. Para ahorrar confusiones, se debe destacar que la pieza 2 es una sola, aunque hacemos la referencia a la pieza 2a (formada por láminas que se curvan) y 2b (formada por láminas planas) para describir la diferente configuración de apilado en las dos partes.

Este contacto entre los dos diferentes laminados de la segunda pieza tenía cuatro posibles configuraciones:

- Apilar la piel fresca con la omega fresca y luego curar, lo que se conoce como cocurado (cocuring en inglés). El cocurado, según [12], es el curado de un material compuesto mientras que simultáneamente se une a otra superficie preparada durante el mismo ciclo de curado.
- Apilar la piel fresca con la omega curada y luego curar.
- Apilar la piel curada con la omega fresca y luego curar.
- Apilar la piel curada con la omega curada y luego pegar, lo que se conoce como copegado.

De estas opciones se eligió la primera tras consultarse el previo trabajo de fin de grado [13], de manera que en el apilado que se llevó a cabo se apilaron las láminas de la pieza 2a sobre las láminas de las de la pieza 2b.

2.1.2 Material usado

Se usaron láminas de pre-preg de fibra de carbono HexPly® M21/34%/UD194/IMA-AS7, con unas propiedades que se detallan en [14]. Este pre-preg estaba cortado en grandes láminas, unas con las fibras paralelas a un lado (usadas en las capas de 0 y 90 grados) y otras con las fibras a 45 grados (usadas para las capas de 45 y -45 grados).

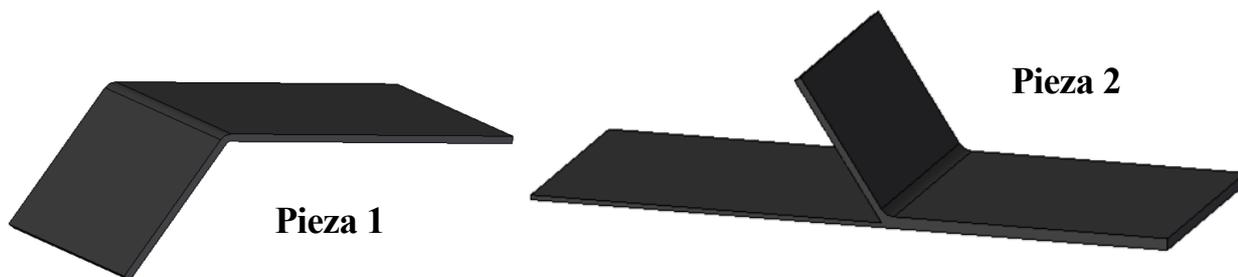


Figura 2.2. Piezas elaboradas para el estudio. A la pieza de la izquierda la llamaremos pieza 1 y a la pieza de la derecha pieza 2. Como la pieza 2 está compuesta por dos apilados diferentes, a la parte de la pieza con apilado y forma similar a la pieza 1 la llamaremos pieza 2a, y a la piel, la llamaremos pieza 2b.

Como era necesario que las piezas desarrollaran las curvas del detalle, se empleó un molde de aluminio con forma de prisma con sección trapezoidal. Esta sección tenía 30 mm de alto, 320 mm de largo, 100 mm de ancho en la base y 60 mm de ancho en la parte superior. La Figura 2.3 muestra las dimensiones y ángulos teóricos de este molde. El objetivo es que las probetas fabricadas tuvieran los mismos ángulos que el molde, pero como ya se vio en la Figura 1.2, el spring-back hace que el ángulo de las probetas cambie mucho respecto al ángulo superior e inferior del molde. La Tabla 2.1 muestra el cambio de estos ángulos respecto a los teóricos y medidos del molde. Los ángulos reales se midieron con Adobe Photoshop®, versión detallada en [15], a partir de fotografías y con una precisión de centésimas de grado.

Tabla 2.1. Comparación de los ángulos modificados por el spring-back y los ángulos del molde.

	Ángulo real del molde	Ángulo de la probeta	Variación del ángulo (spring-back)
Pieza 1 	123,97°	122,44°	1,53°
Pieza 2 	56,84°	57,56°	0,72°

Las variaciones no son las mismas, lo que tiene sentido ya que en la Pieza 2, el cocurado hace que esta geometría cambie y que la unión con la piel provoque que el ángulo se abra mucho menos (algo más de la mitad).

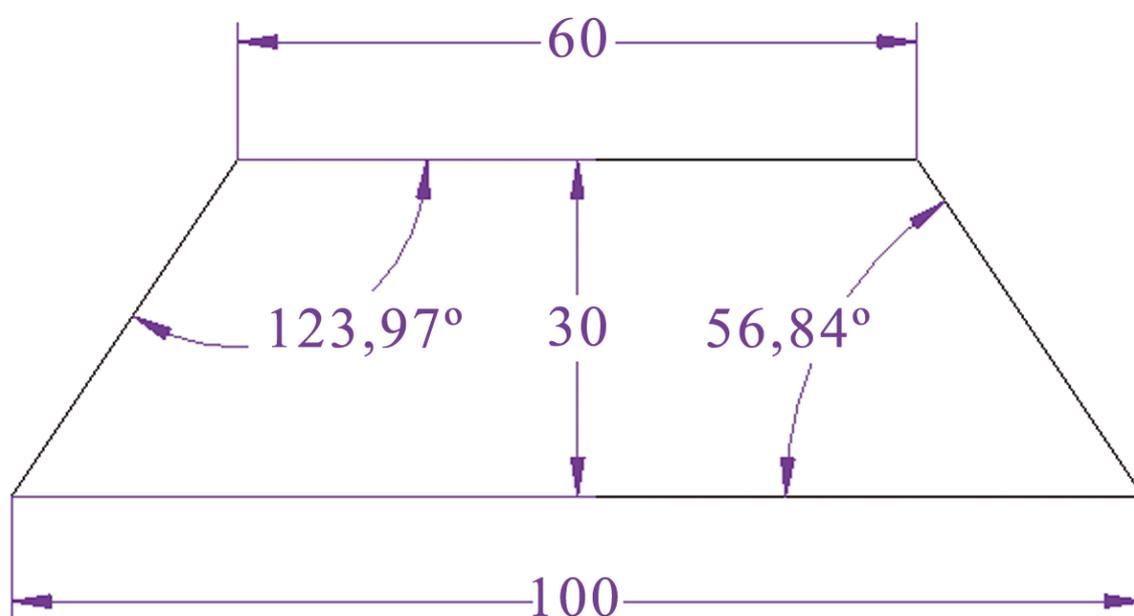


Figura 2.3. Dimensiones y ángulos de la sección del molde.

Como el tamaño de las probetas se basa en las dimensiones del molde, se tuvo que medir todo el molde para no desperdiciar material. Una vez teníamos las medidas, se cortaron las láminas necesarias teniendo en cuenta la orientación de las fibras. Como ya se mencionó antes, la pieza 1 y la primera parte de la pieza 2 tienen la misma secuencia de apilado y las mismas dimensiones, mientras que la segunda parte de la pieza 2 tiene diferente secuencia y dimensiones. La secuencia de apilado que debían tener las piezas es la mostrada en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2. Secuencia de apilado y dimensiones de las láminas usadas en la fabricación de las piezas.

	Secuencia	Dimensiones
Pieza 1	$[45/-45/0/90]_5$	$85 \times 60 \text{ mm}$
Pieza 2a	$[45/-45/0/90]_5$	$85 \times 60 \text{ mm}$
Pieza 2b	$[45/-45/90/-45/45]$	$125 \times 60 \text{ mm}$

De esta manera, se cortaron 8 láminas de 45 grados, 4 láminas de 90 grados y 4 láminas de 0 grados con unas dimensiones de 85x60 mm; también se cortaron 4 láminas de 45 grados y una lámina de 90 grados de 125x60 mm. Las láminas de -45 grados se obtienen al darle la vuelta a las de 45 grados.

Antes de comenzar a apilar se fijó una dirección como la dirección a la que tenían que ir las fibras de 0 grados. Esta dirección se eligió como la transversal al molde, la paralela a la longitud más larga de las probetas. Además, se fijó como +45 grados el ángulo que queda a la derecha de esta línea y como -45 grados el ángulo que queda a la izquierda de esta dirección. Una explicación más visual puede verse en a Figura 2.4.

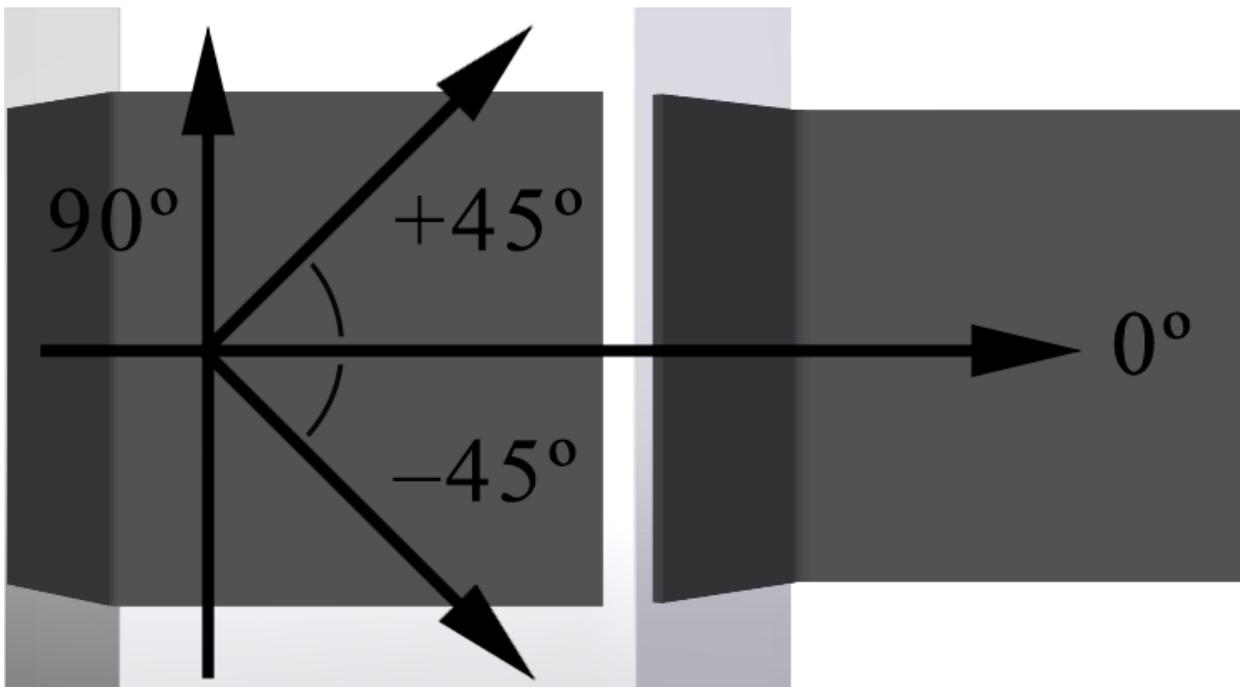


Figura 2.4. Disposición que se usó para el sentido de la fibra durante el apilado de las láminas.

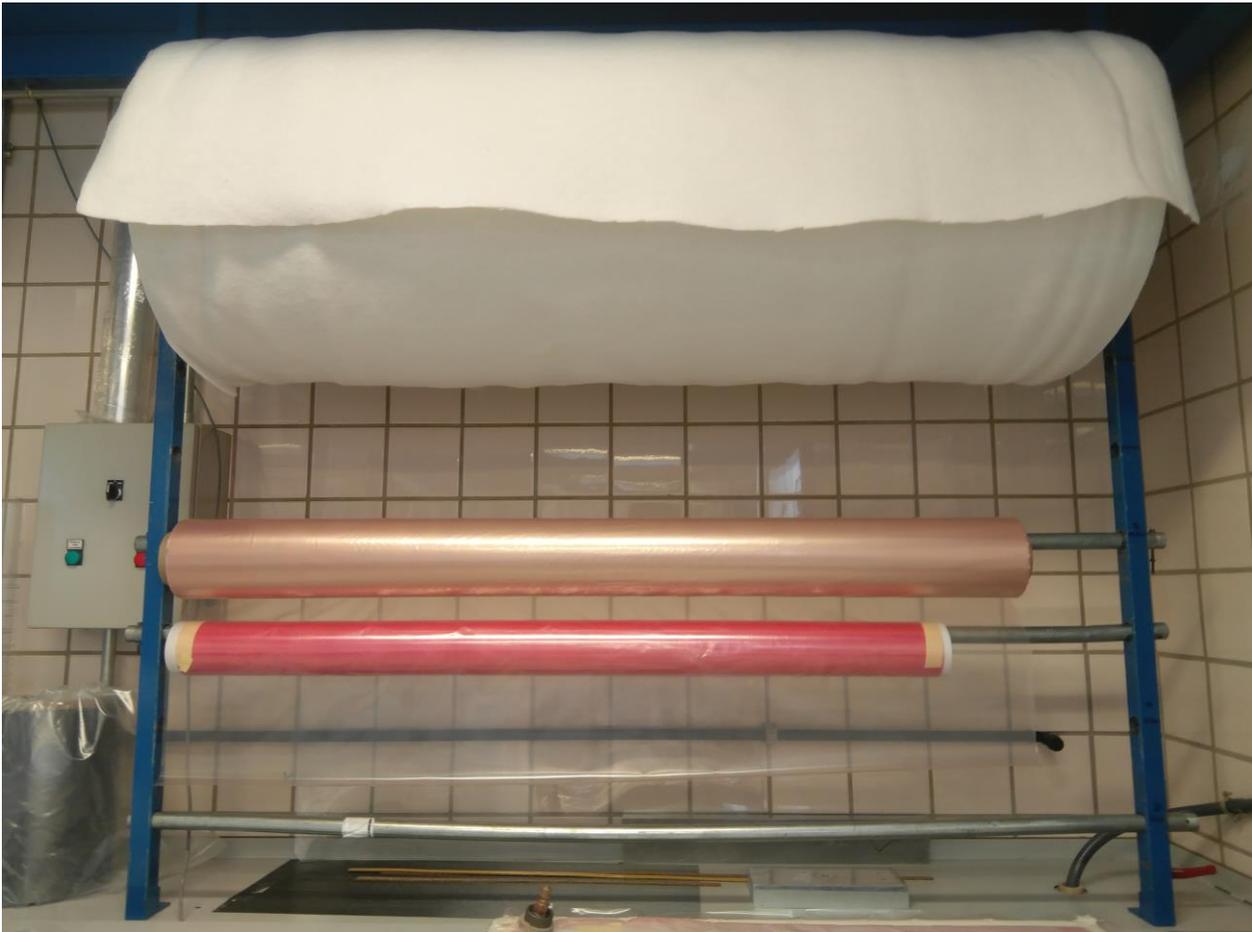


Figura 2.6. Rollos de material que se usaron para la fabricación de los laminados. De arriba abajo, tejido aireador, film de vacío y film separador.

2.2 Apilado de las láminas

Para apilar las láminas se ha tenido en cuenta que la dirección a cero grados de las fibras es la que está contenida en la sección trapezoidal del molde, o sea, la dirección paralela al lado más largo de las láminas de pre-preg cortadas. Se ha procedido de la siguiente manera:

Primero, se preparan los utensilios de trabajo, limpiándolos con acetona y alcohol y se quitan las imperfecciones que pudiese tener pegadas a su superficie, para minimizar problemas durante el curado. Como también vamos a curar por debajo del molde, en la zona de la base, necesitamos una plancha de acero que también se debe limpiar y poner a punto.

Después, se forra el molde con un plástico desmoldeante para que al curar todo no se pegue al molde, teniendo mucho cuidado de que ni la cinta aislante termoestable ni ningún doblez estén alguna zona que pueda tener contacto la pieza, lo que supone un defecto superficial importante en cuanto a espesor.

Más tarde, se coloca la primera capa de pre-preg, teniendo en cuenta que siempre hay que quitar el cartón que viene pegado, e intentamos que esté lo más acoplada posible al molde. Nos ayudamos de un secador que da calor a las láminas y hace el material más maleable, lo que facilita que se acoplen más fácilmente a las curvas. Se recomienda usar una espátula para pegar las láminas de compuesto entre ellas, que no toque directamente al pre-preg por riesgo de rallarlo y de incorporar partículas no deseadas en el laminado. Se debe siempre de apretar y arrastrar la espátula en el sentido de las fibras. Por ello, usaremos plástico desmoldeante como medio entre la espátula y el laminado. Es muy importante ver si tiene algún saliente o imperfección el útil usado para pegar láminas una con la otra, ya que una imperfección como un rallón o algo de este tipo en una lámina puede ser notable.

Cuando se llega a la mitad del apilado, es recomendable aplicarle vacío al apilado junto con el molde en una bolsa de vacío prefabricada como la mostrada en la Figura 2.7. Para ello, hace falta poner un plástico desmoldeante encima de la pieza, de manera que no se pegue a la bolsa.



Figura 2.7. Molde y laminados metidos dentro de la bolsa de precompactación mientras succiona aire.

Una vez finalizado el vacío, se pueden seguir apilando capas hasta acabar la secuencia de apilado. Al acabar, se debe de introducir de nuevo en la bolsa de vacío mientras trabajamos con la otra pieza.

Para la pieza 2 primero se deben apilar las láminas pertenecientes a la pieza 2b, se aplica un vaciado de unos 10 minutos, y más tarde se apilan las láminas que formarán la pieza 2a, donde la parte que no toca al molde reposa en la pieza 2b, pasándose por la bolsa de vacío cuando llevara la mitad del apilado completo.

Una vez todas las láminas estén apiladas, se deben de colocar corchos adhesivos en las delimitaciones de cada laminado para que la resina que fluirá durante el curado esté controlada. Además, ya que el molde tiene un peso importante y puede hacer que la parte de la pieza 2 que se encuentra entre el molde del rigidizador en omega y la plancha de acero tenga un espesor mucho menor, se colocan más corchos para estabilizar y que no oscile el conjunto completo, tal y como se ve en la Figura 2.8.

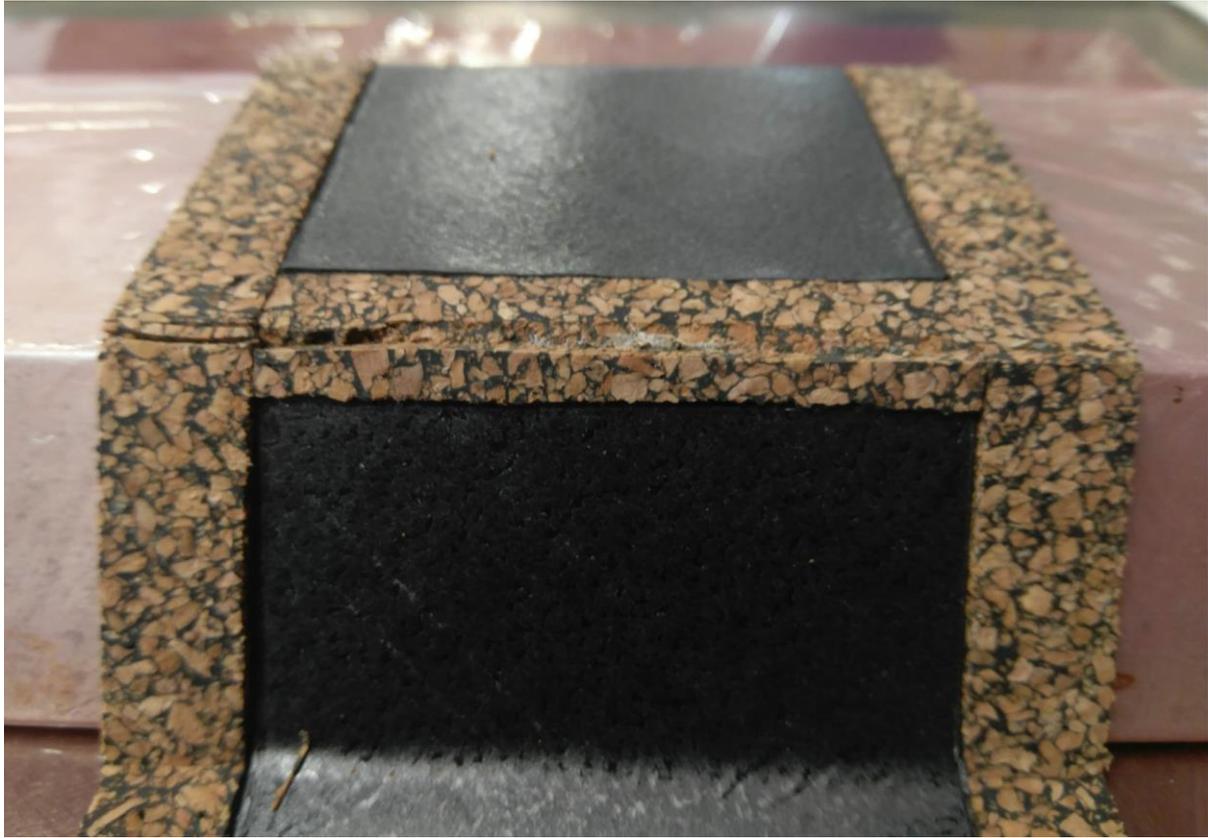


Figura 2.8. Colocación de los corchos adhesivos antes de introducir la bolsa en el autoclave, para que la resina fluya de manera controlada. Además de rodear todos los bordes, también los de la piel, que se sitúa por debajo del molde, situamos corchos en puntos alejados del molde en la base, para estabilizar el conjunto.

2.3 Construcción de la bolsa de vacío

Tras esto, se procede a construir la bolsa de vacío que vamos a meter en el autoclave. Para ello, es muy importante seguir los pasos que proceden:

Primero, se usa una cinta de cromato para delimitar la bolsa de vacío. Antes de situar el molde, se cubre el recinto con un film separador (plástico desmoldeante), para que la piel no se pegue a la plancha de acero. Después, se sitúa el molde con la pieza situada correctamente en una zona central y se cubre por arriba con más film separador para que no se pegue a la bolsa, tal y como se aprecia en la Figura 2.9.



Figura 2.9. Láminas apiladas, rodeadas de corcho y situadas sobre la placa de acero, dentro del recinto creado para la bolsa de vacío en construcción. Como se puede observar, los corchos no coinciden con la imagen anterior ya que esta fotografía es de una probeta que se hizo anteriormente.

Luego, se coloca encima de ella tejido aireador, que permitirá el correcto flujo del aire hasta el exterior desde todas las zonas del interior de la bolsa, teniendo mucho cuidado en que no toque los límites impuestos por la cinta de cromato.

Encima de ella se colocan las dos tomas de vacío para conectarlas a la manguera. Hay que prestar atención en situarlas en zonas separadas una de otra y lejanas a la pieza en cuestión ya que una toma sirve para extraer aire y otra para controlar la presión interior.

Además, se coloca un film de vacío, especial para la parte más externa de las bolsas de vacío. Hay que tener especial cuidado con las zonas donde el plástico pueda quedar más tensado, como zonas altas o con mucha curvatura. Esto se da lugar en el caso de nuestro objeto en estudio.

Para ello, se colocan trozos extra de cinta de cromato en los puntos críticos, obligando al plástico a recorrer más distancia en esos puntos, por lo que habrá más plástico y podrá hacer una mejor maniobra. Solo quedaría hacer un agujero por cada acople, para que el plástico que se sitúa encima del agujero no estorbe en la extracción de aire. En el caso de que haya una rotura en alguna parte de la bolsa de vacío, se debe rodear la zona con cinta de cromato y colocar un trozo nuevo de film de vacío a modo de parche. El resultado se muestra en la Figura 2.10.



Figura 2.10. Pinzas de cinta de cromato que protegen las zonas más altas del molde de que la tensión que soporta el film de vacío durante las tan bajas presiones acabe rompiéndolo. También puede apreciarse el aspecto del parche en la bolsa de vacío, debido a una rotura. En la imagen, aún no se ha aplicado el vacío.

Más tarde, se aplica un vaciado durante 10 minutos para comprobar que no hay pérdidas. Con ayuda de una espátula y de nuestras propias manos, se mueve y se esparce la cinta de cromato para cerrar toda posible conexión del interior de la bolsa de vacío con el exterior, hasta que no escuchemos ninguna fuga.

Por último, se introduce la bolsa de vacío en el autoclave y se conecta a él. Un autoclave de materiales compuestos es un recipiente con un sistema de temperatura y presurización, utilizado para curar y consolidar materiales compuestos. Tras introducirlo, se da comienzo al ciclo de curado del autoclave, que en nuestro caso fue el mostrado en la Figura 2.11.

Por las dificultades en cuanto a ensayar estas piezas, se decidió ensayar tan solo la pieza 1. Para ello se necesitaban bastantes más por lo que se decidió fabricar la pieza 1 en serie.

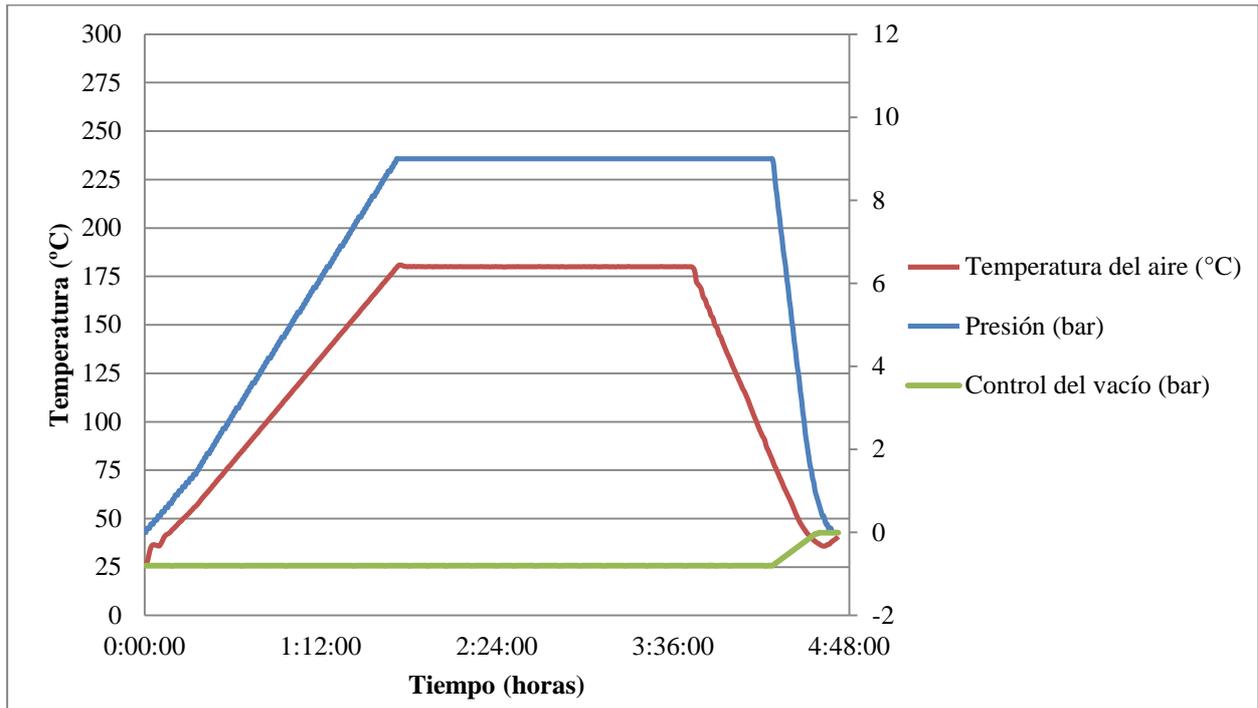


Figura 2.11. Ciclo de curado del autoclave, donde se muestra la temperatura que tuvo a lo largo del tiempo, la presión exterior a la bolsa y la presión interior de la bolsa de vacío. Esta última es negativa al estar conectada a una manguera que succiona.

Para la fabricación de la pieza 1 en serie no hacía falta una plancha metálica debajo del molde, puesto que esta pieza sólo recorre dos caras superiores del molde y no la base. Las capas de este laminado tenían un ancho mucho mayor; en lugar de medir $85 \times 60 \text{ mm}$, medían $85 \times 270 \text{ mm}$, de manera que pudimos sacar 9 probetas de 3 centímetros de ancho de ahí, y de la probeta hecha anteriormente, luego de cortarlas. Este proceso fue similar al anterior, con tan sólo una diferencia: como no hacía falta plancha de acero, la bolsa de vacío no era necesaria situarla sobre la plancha. En su lugar, se fabricó una bolsa de vacío que rodeaba el molde, tal y como se ve en la Figura 2.12. Esta pieza tuvo un ciclo de curado similar al anterior.

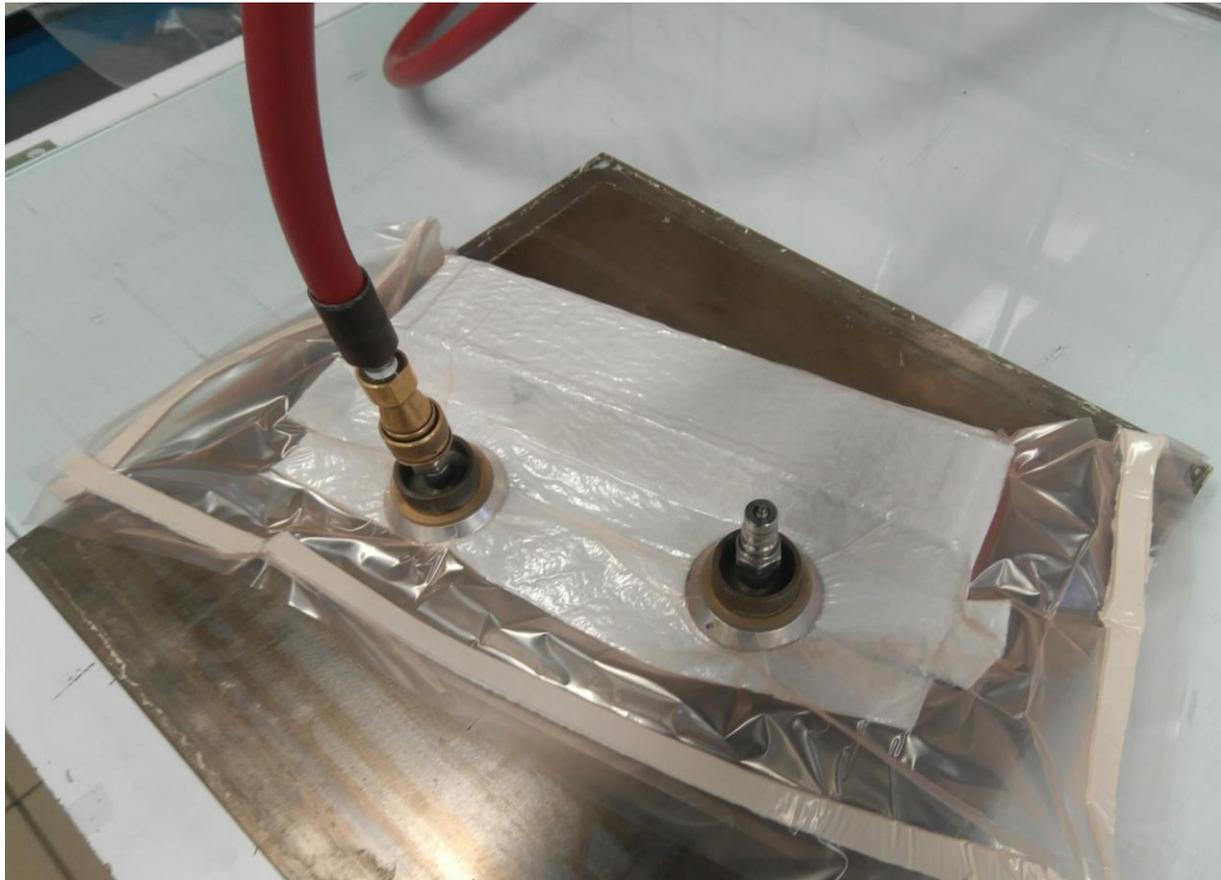


Figura 2.12. Bolsa de vacío usada para la fabricación de la pieza larga, que se cortará más en adelante para obtener más probetas.

Posteriormente, y como ya he mencionado antes, se procedió a cortar las probetas de carbono. Para ello, se hizo uso de una sierra de disco de diamante situada en el taller del laboratorio y se cortó en 9 partes, 9 probetas con 3 centímetros de ancho cada una, para tener en total 11 probetas. También se le recortaron los bordes en contacto con el corcho y se igualaron las dimensiones de todas ellas.

Para poder usar la cortadora es esencial activar el extractor de partículas que hay justo encima de la máquina y abrir el grifo de agua para la eliminación de polvo. Además, durante todo el proceso, de cortado es muy importante prestar atención a la seguridad que requiere. Son necesarias gafas protectoras, bata de laboratorio, mascarilla para no inhalar partículas en suspensión, guantes especiales, cascos insonorizantes y botas de seguridad.

Hubo diferentes dificultades a lo largo de la fabricación de las probetas, que se detallarán en el siguiente punto.

2.4 Dificultades encontradas en el proceso

Como se ha introducido al final del punto anterior, algunas dificultades tuvieron lugar durante la fabricación de las probetas. Todas ellas, aunque supusieron una parada en el avance del proyecto, me ayudaron a mejorar el proceso de construcción hasta llegar al expuesto anteriormente. Se realizaron, de hecho, tres intentos fallidos antes de llegar al cuarto, que fue el definitivo. El laminado en serie de las probetas sí que fue a la primera vez, al ser usadas todas las técnicas aprendidas en los intentos fallidos anteriores. Ahora, se expondrán algunas de estas dificultades en los diferentes intentos.

2.4.1 Dimensiones de las láminas

Al comienzo de los primeros ensayos, no se calcularon bien las dimensiones de las láminas, de manera que los laminados de la pieza 1 y 2a tuvieran las mismas dimensiones. Esto no supone un gran problema, pero sí habría que recortar las probetas una vez el material haya curado, y esta diferencia en el espesor gradual puede provocar más fácilmente que partículas entren entre las láminas. Un ejemplo de ello se dio en el apilado de la primera pieza que se montó.



Figura 2.13. Apilado donde se pueden apreciar errores notables en las dimensiones de las láminas.

2.4.2 Corcho para el control de la resina

La distribución de los corchos adhesivos alrededor de la pieza a curar requería de una medición de estos y de saber dónde ponerlos. En la primera pieza que se fabricó, el perímetro de los corchos fue insuficiente (no se le puso corcho en los laterales de las láminas) y la resina fluyó mucho, quedando un espesor totalmente distinto al que debería de ser.

Además, en el segundo ensayo, los corchos adhesivos que deberían de ser usados para estabilizar no se colocaron en la posición que se debería por lo que la pieza dentro del horno no se estabilizó y el molde hizo presión sobre el laminado, con lo que, tal y como pasó en la primera pieza que se fabricó, el espesor fue mucho menor de lo esperado.

2.4.3 Apilado de láminas de 0 y ± 45 grados

No todas las láminas son igual de fácil de apilar. Las láminas de 90 grados, al tener las fibras paralelas a la dirección de apilado, la fibra no opone ninguna resistencia al doblar a lo largo de una línea paralela a las fibras, tan sólo nos encontramos con el obstáculo de la resina. Doblar estas láminas es sencillo, y si se le aplica calor, la resina se emblandece y son aún más maleables.

Las láminas de 0 grados, todo lo contrario. La fibra muestra una alta oposición a ser dobladas y, por lo tanto, resulta muy difícil doblarlas de manera perfecta. El tejido del pre-preg, si la fibra no gira uniformemente, puede provocar un cortante que separaría las fibras paralelas y dañaría el apilado bastante. Con la ayuda del secador y siendo constante, se consigue un doblado bastante bueno, teniendo en cuenta que tras cada apilado hay que pasar muy bien con la espátula en el sentido de la fibra para que no haya aire entre capas y así queden más unidas las capas, evitando la delaminación antes de aplicarle vacío al laminado completo. Para las láminas de 45 y de -45 ocurre el mismo problema que en las de 0 grados, pero en menor medida. Además, para estos laminados, es muy fácil que al empezar a doblar la lámina se desplace de la dirección que se quería que siguiese. Esto se debe a que, al tener las fibras inclinadas 45° hacia un lado o hacia otro, a medida que vamos pegando una lámina a otra, se tienda a torcer a una dirección. Apilando poco a poco y dándole calor a la lámina se puede conseguir un pegado mucho mejor.

2.4.4 Bolsa de vacío tensa

Al construir la bolsa de vacío para insertarla en el autoclave, habrá algunas zonas donde la pieza insertada junto con el molde tenga una altitud que puede tensar el plástico. Para evitar esto, y como se mencionó antes, se colocan unos dobleces de cinta de cromato en las zonas del borde del recinto próximas a la parte de la pieza que puede causar problemas de tensión. A esto dobleces se les llama pinzas y se colocan para que haya más plástico en esa zona, ya que es necesario para que ocupe más superficie. Es posible, además, que esta tensión en el plástico pueda causar roturas de la bolsa que permitiesen que entre aire en la bolsa de vacío, tema que se tratará a continuación.

2.4.5 Imperfecciones en la bolsa

Además de todo esto, dos de las veces que se curaron piezas en el autoclave, se quemaron. En concreto, las piezas 1 y 3. Esto pudo haber sido provocado por una rotura en la bolsa, o que la bolsa se hubiese abierto durante el proceso dentro del autoclave, entrándole aire y, de esta manera polimerizando de manera diferente la resina. En la Figura 2.14 podemos observar el aspecto exterior de la bolsa y el de las piezas en sí cuando se queman en el autoclave.



Figura 2.14. Aspecto de la una pieza quemada en el autoclave tras una imperfección y de su bolsa de vacío desde fuera.

2.4.6 Dobleces del plástico desmoldeante.

Cuando se forra el molde con plástico desmoldeante, hay que prestar especial atención en los dobleces que aparecerán en el plástico y a la posición de la cinta adhesiva de alta temperatura usada. Estos pueden afectar en gran medida al espesor de la pieza una vez curada. Esto se debe a que, durante las altas presiones y temperaturas del autoclave, cuando se le hace vacío a la bolsa, las capas se pegan con una calidad abismal a toda superficie. Estas diferencias pueden ser notables, tal y como ocurrió con la segunda probeta que se ensayó. En la figura 2.15, podemos ver cómo la pieza 2, bien curada, no valía por problemas de espesor.

Para las siguientes veces, se tuvo mucho cuidado intentando que el dobléz justo coincidiese con una de las dos aristas del molde, de manera que la lámina no estuviese con contacto con él.

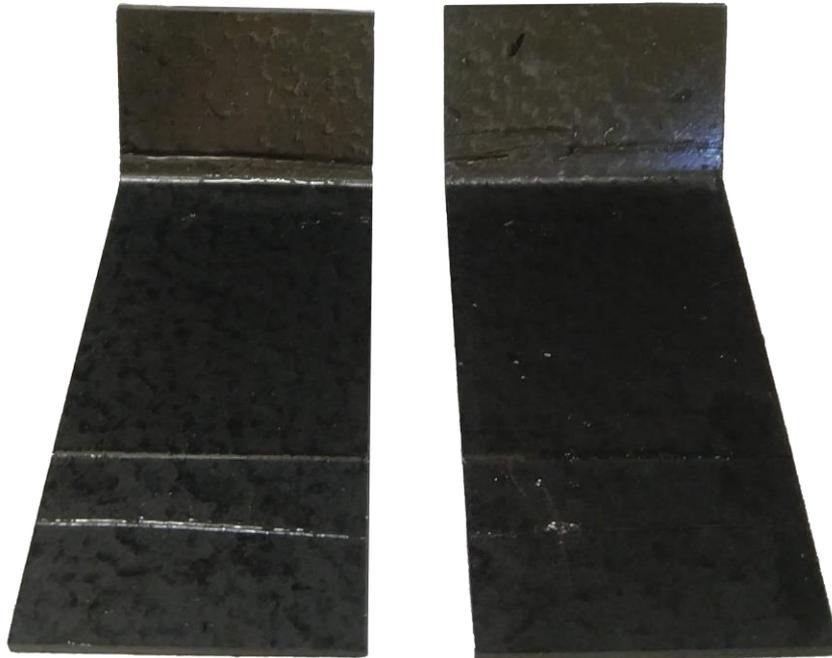


Figura 2.15. Problemas de espesor debidos a un dobléz en el plástico desmoldeante.

2.4.7 Configuración de apilado elegida: cocurado.

Otra dificultad fue el hecho de apilar la pieza 2a y la 2b sabiendo que se apilaban las dos al fresco. Por ello, las distancias tienen que estar muy bien medidas para poder asegurar que al pegar una sobre otra las distancias coinciden. Como las dos piezas que conforman la pieza 2 curan y se adhieren en el mismo ciclo de curado, es muy importante no cometer errores para no tener que repetir el proceso entero.

Estos errores formaron parte de las tres piezas que se fabricaron antes de hacer la cuarta bien. De esta manera, la cuarta y la pieza larga en serie se hicieron sin errores. En la Figura 2.15, se muestra la evolución de las cuatro probetas. Con las 11 probetas que salieron en total, se procedió a preparar los ensayos. Esta preparación será el tema del siguiente capítulo.

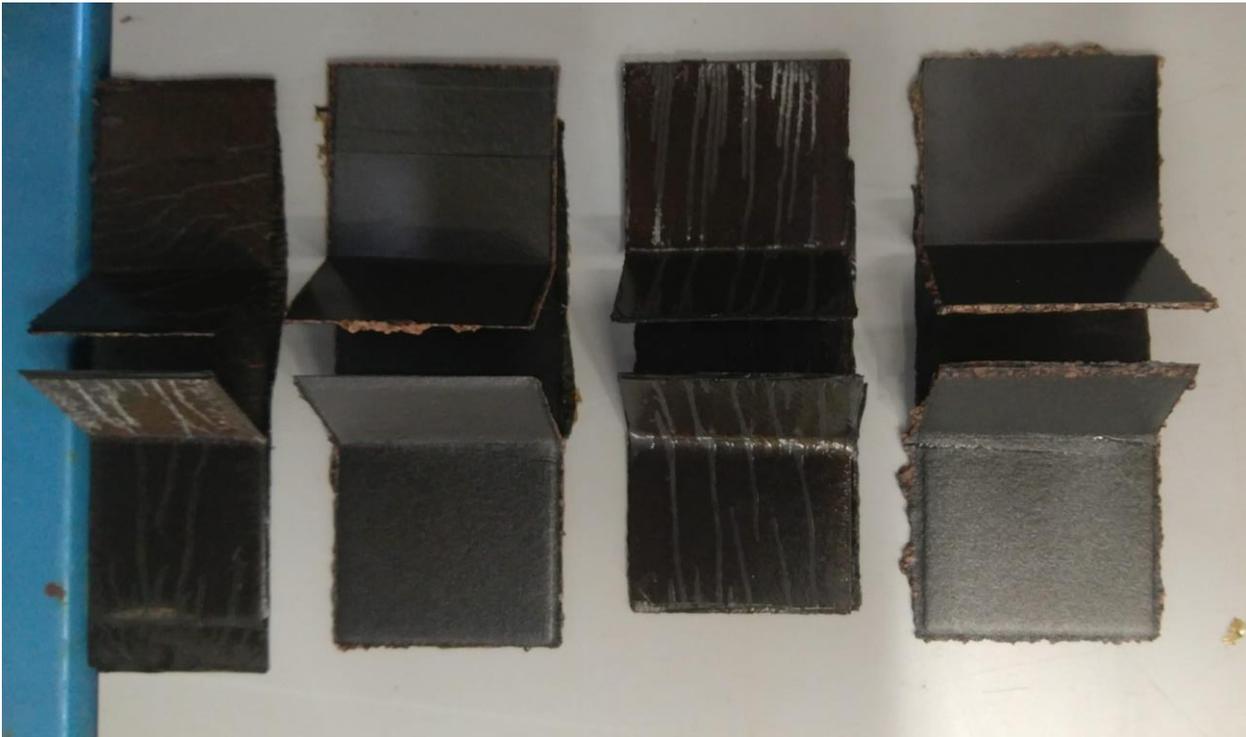


Figura 2.16. Piezas montadas una encima de la otra. Los resultados están ordenados cronológicamente de izquierda a derecha.

3 PREPARACIÓN DE LOS ENSAYOS

Estudiar la variación que queremos imponer en el giro como solución a las deformaciones térmicas que produce el curado puede llevarse a cabo de forma a priori más simple con un ensayo de flexión, que cierre el ángulo, que con un ensayo de tracción. Aunque estemos cerrando el ángulo, que es justo lo contrario a lo que buscamos, los efectos en el material serían los mismos y si los resultados son satisfactorios, esta técnica podría aplicarse para abrir el ángulo. Como ya se explicó antes, debido a las dificultades de ensayar la pieza 2, se optó por ensayar la probeta 1 tan solo.

3.1 Útil usado en los ensayos

Para ensayar una probeta a flexión (de forma que las deformaciones se produzcan únicamente en la parte curva de la probeta) como la del estudio en cuestión, se necesitó un útil del que no se disponía, por lo que se tuvo que diseñar y fabricar. Se buscaba algo que permitiese agarrar la pieza por uno de los dos extremos y, aplicando una carga vertical, cerrar el ángulo. Para conseguir este efecto de la mejor manera posible, era necesario que durante el ensayo las partes que son rectas se mantuvieran rectas, para que al cerrar el ángulo nos aseguremos de que tan sólo el detalle de la curva sea el que se está estudiando y no influyen desplazamientos de las zonas rectas. La primera versión del útil se detalla en la Figura 3.1.

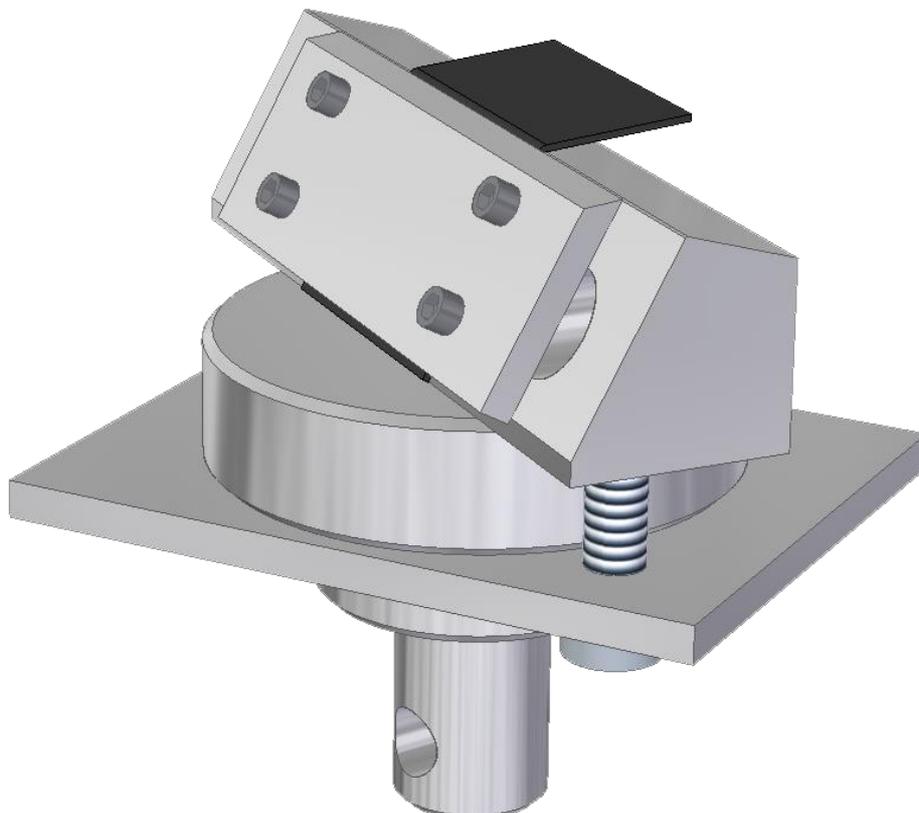


Figura 3.1: Útil usado en los primeros ensayos.

En primera instancia se usó un cubo de aluminio con una de sus caras apoyadas en la parte de la pieza a presionar. Se pensaba que éste transmitiría la fuerza por igual a toda la parte plana de la pieza, como deseábamos. Sin embargo, la pieza bajaba sin hacer contacto total con la pared del cubo, significando esto que la carga era aplicada en una línea, y en concreto en una línea muy cercana a la curva.

Se llegó a la conclusión de que el cubo de aluminio tenía que moverse solidariamente con la probeta, para así asegurarnos de que la parte plana no sufre deformación. A raíz de esta idea, se creó una lengüeta que, mediante presión entre ésta y el cubo de aluminio por medio de unos tornillos, mantenía pegada la cara horizontal de la pieza al cubo, que además tenía una ranura del ancho de la probeta para que sólo tuviera la posibilidad de moverse en una dirección a través de éste. Se recortó el chaflán que tenía la pieza a la que van unidos los tornillos que aprietan el plato cilíndrico para que el cubo no lo tocara al flectar, y se agrandó el agujero de la pieza rectangular sobre la que reposa el cilindro, para poder regular el punto donde se aplicaba la fuerza y poder así situarlo a una distancia adecuada, más alejado de la zona de la curva. Esta segunda versión del útil se representa en la Figura 3.2, y en la perspectiva estallada de la Figura 3.3.

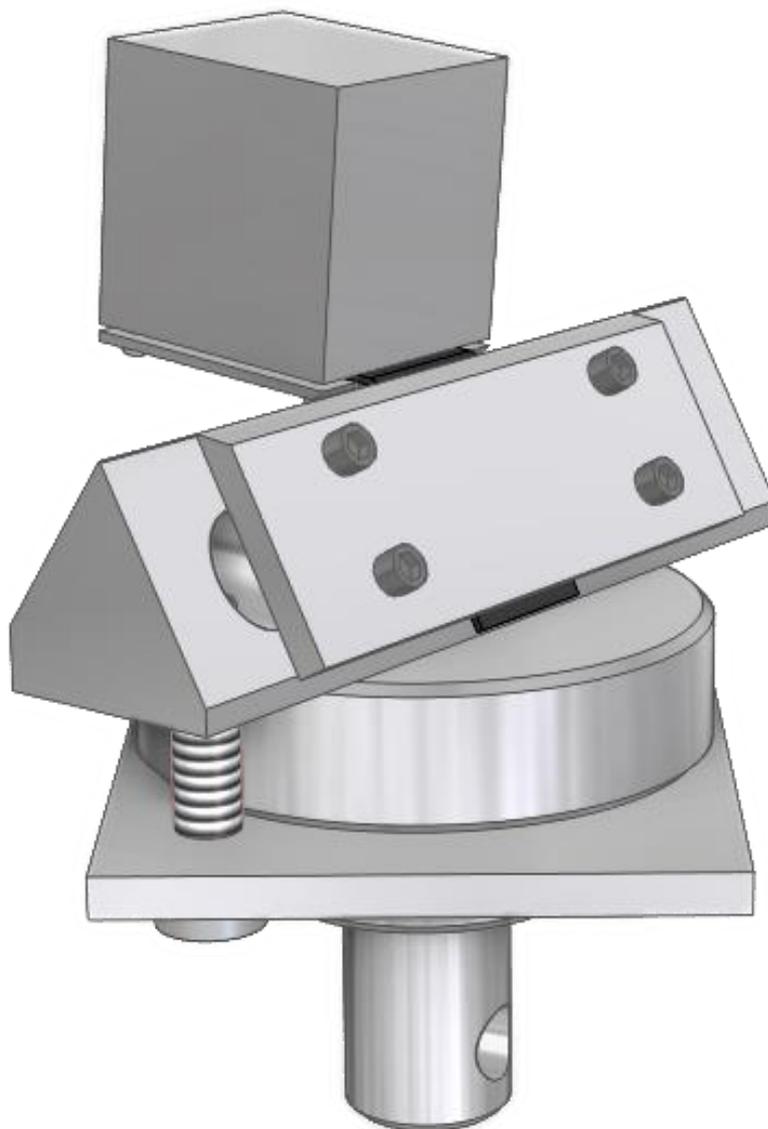


Figura 3.2: Útil definitivo, usado en los ensayos posteriores.

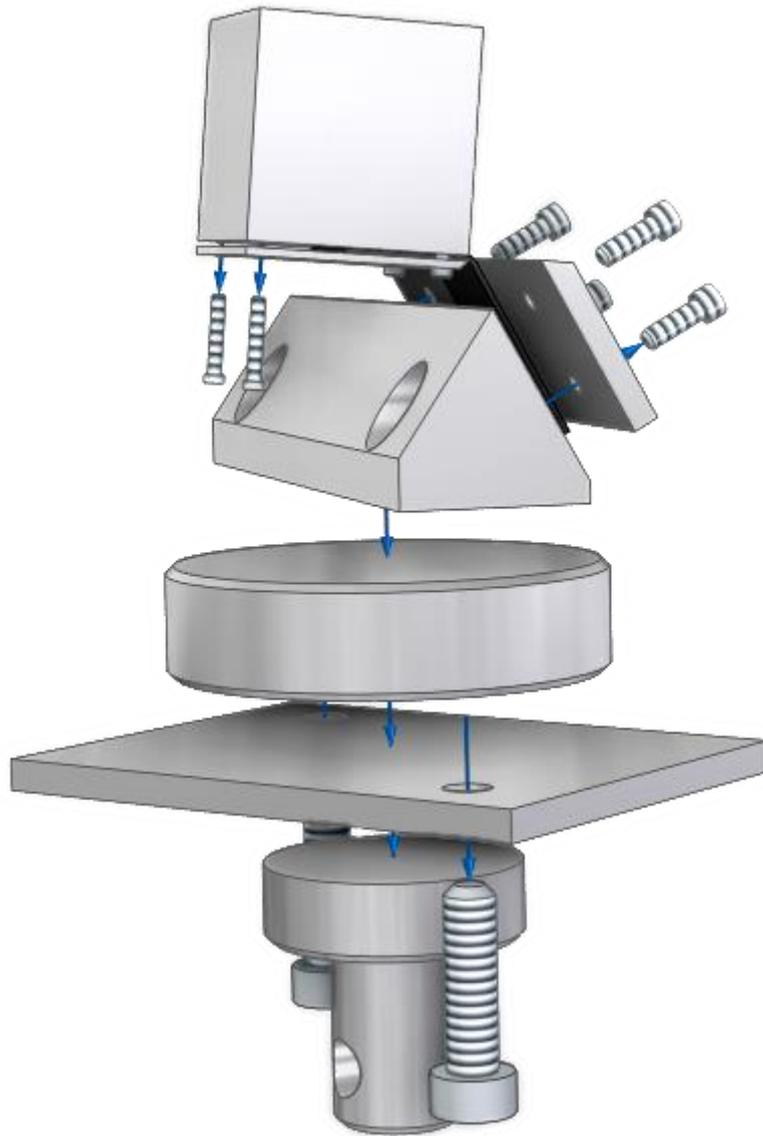


Figura 3.3. Perspectiva estallada del útil usado para los ensayos.

La distancia desde el extremo del cubo al punto de aplicación se fijó en 20 mm. Además, el cubo se fijó para que se situase a 2.25 mm de la cara paralela a la pieza que agarra la zona recta de la probeta que no está pegada al cubo, lo que supone un total de 22.25 mm desde que comienza la curva. Para no medir estos 2.25 mm cada vez que se ensayase, y por cada lado del cubo (ya que había que mantener el paralelismo y la simetría del ensayo), se usó un taco de material compuesto de 2.25 mm de grosor. De esta manera se consiguió que el ensayo se llevara a cabo en condiciones uniformes, y por tanto los resultados obtenidos en las distintas probetas son comparables. Las distancias fijadas se detallan en la Figura 3.4. Los valores de estas distancias son los mostrados en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Medidas fijadas para la uniformidad de los ensayos.

d	c	R	h	b	t	w
22.25 mm	20 mm	5 mm	50 mm	50 mm	2.25 mm	30 mm

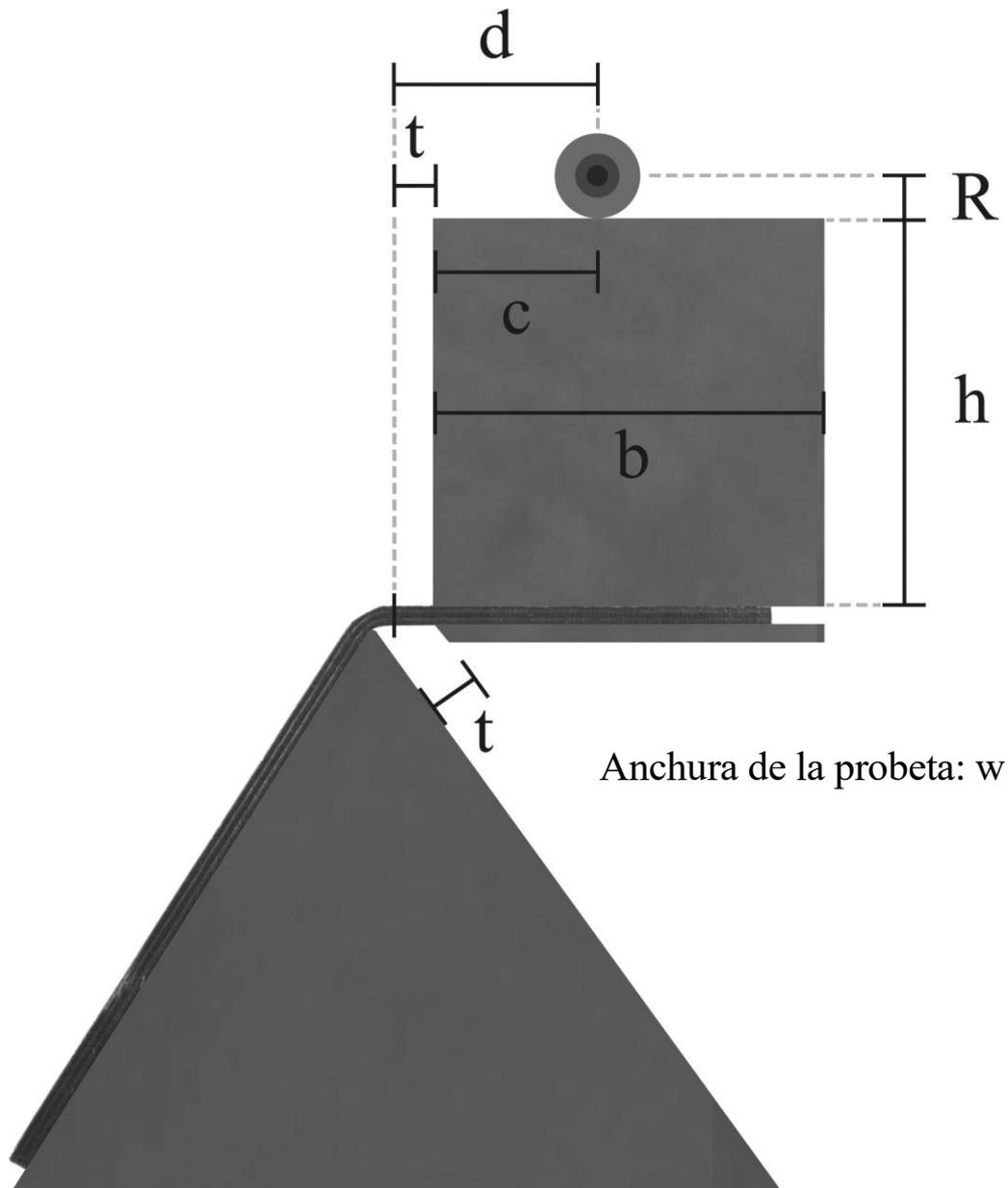


Figura 3.4. Detalles de las medidas usadas en la colocación de las probetas uniformadas.

A pesar de que en la figura anterior aparezca la cara de la probeta que está unida al cubo totalmente paralela a la horizontal, esto no es exactamente así. La cara sobre la que se aplica la carga forma un ángulo de $3,86^\circ$. Como conforme la cruceta va bajando, el ángulo cambia en la dirección de cierre, y siempre hay una componente horizontal de fuerza que se opone al momento y que provoca que el momento total cambie a más rígido a medida que aumenta la carga. En el estudio posterior de los ensayos, estas fuerzas horizontales se tendrán en cuenta.

3.2 Cálculo de la fuerza máxima a aplicar en los ensayos

Además, se halló la carga máxima estimada que podía soportar la probeta de la siguiente manera. Al cargar con la máquina conocemos el valor de la carga y el del brazo del momento aplicado. Pero dado que la probeta cambia su ángulo a medida que añadimos carga, el punto de aplicación poco a poco se acerca a la zona curva, y aparece una componente horizontal de la carga.

Si los ángulos son pequeños, las variaciones de la componente de la carga serán pequeñas.

El momento por unidad de ancho que causa el fallo de la probeta, llamado μ , debe estar entre 144 y 175 N·mm/mm según [16] y el ancho de la probeta es $w = 30$ mm. El criterio de fallo dice que el momento no puede superar el momento crítico, por lo que se debe de cumplir que:

$$F \cdot d < w \cdot \mu \quad (2)$$

Como d , tal y como vimos antes, es 22,25 mm, despejando F en la inecuación y usando el valor mínimo del intervalo ($\mu = 144$ N·mm/mm) se tiene:

$$F < \frac{30 \text{ mm} \cdot 144 \text{ N} \cdot \text{mm/mm}}{22.25 \text{ mm}} \approx 194 \text{ N} \quad (3)$$

Se deduce que la fuerza no debería de superar los 194 N, lo que equivale a 19.8 kg. Por lo tanto, se decidió ensayar esta probeta a un máximo de 180 N de fuerza).

3.3 Máquina y útiles de ensayos

La máquina de ensayos que se usó es la Instron® 4482 del Laboratorio de Elasticidad y Resistencia de Materiales, con una célula de carga de 500 kg, ya que la carga máxima que se iba a ensayar no superaba los 20 kg. Los acoples usados en los ensayos para la cruceta de arriba y para la parte de abajo de la máquina que permanecía estática, cambiaron durante el transcurso de los ensayos que íbamos haciendo hasta que el proceso se uniformizó. Para estos ensayos previos se usó la probeta 2 (P2).

Al principio, se observó que si se le aplicaba la fuerza en un punto, se corría el riesgo de que se produjese torsión al no estar centrado y eso hace que el desplazamiento vertical sea mucho mayor. Aunque la histéresis se redujese, no sería un ensayo válido por el riesgo (y el hecho) de fuerzas de torsión en el la pieza.

A continuación, el acople superior se cambió por un acople de poca longitud con un apoyo de rodillo, y se procedió a hacer el primer ensayo, a modo de prueba para comprobar si la combinación de útiles valía para este estudio. El acople se fabricó a partir de otro útil, en el que se taladró un orificio de 10 mm de diámetro a poco más de 5 mm del extremo, para que encajara un cilindro que será el contacto con el cubo, y a partir de él, transmitir la carga a la probeta. Este acople estaba directamente unido a la cruceta.

3.3.1 Primeros ensayos a temperatura ambiente

Ya conocidas la fuerza máxima a aplicar y la situación exacta de la probeta en el útil personalizado, nos dispusimos a ensayar la primera probeta, para estudiar la configuración adecuada de los útiles acoplados con la cruceta, que transmiten la fuerza a la pieza en cuestión. Antes de comenzar con los resultados de los primeros ensayos a temperatura ambiente de esta probeta, se debe de explicar cómo se debe proceder a un ensayo. Para ello, se tienen que seguir una serie de pasos:

1. Primero, se inicia el ordenador y la máquina de ensayos.
2. En segundo lugar, se arranca el programa (GenTest), se coloca el útil que va a transmitir la carga justo tocando al cubo de aluminio y se resetean tanto el desplazamiento de la cruceta como la carga, que se dejan a cero, para así comenzar el ensayo desde el origen.
3. Configurar el ensayo (el nombre del fichero, el número de probetas y qué variables medir durante el ensayo)
4. A continuación, se presiona el botón IEEE 488 para que los valores que obtiene la célula de carga sean recibidos e interpretados por el programa.
5. Se selecciona una velocidad baja para la carga. En el caso de estudio, 0,5 mm/min es una velocidad correcta.
6. Se carga hasta que la carga llegue hasta 18 kg, un valor cercano (por debajo) a 180 N. El desplazamiento de la cruceta obtenido será un valor a tener muy en cuenta para siguientes ensayos.
7. Se descarga, no necesariamente a baja velocidad pero sí a menos de 1,5 o 2 mm/min.

- Se graba el ensayo y lee con un programa de hojas de cálculo como Microsoft Excel® los datos del fichero .txt en forma de gráfica, para poder comentar los resultados fácil y visualmente.

Los resultados de carga-desplazamiento de este ensayo fueron los mostrados en la Figura 3.5.

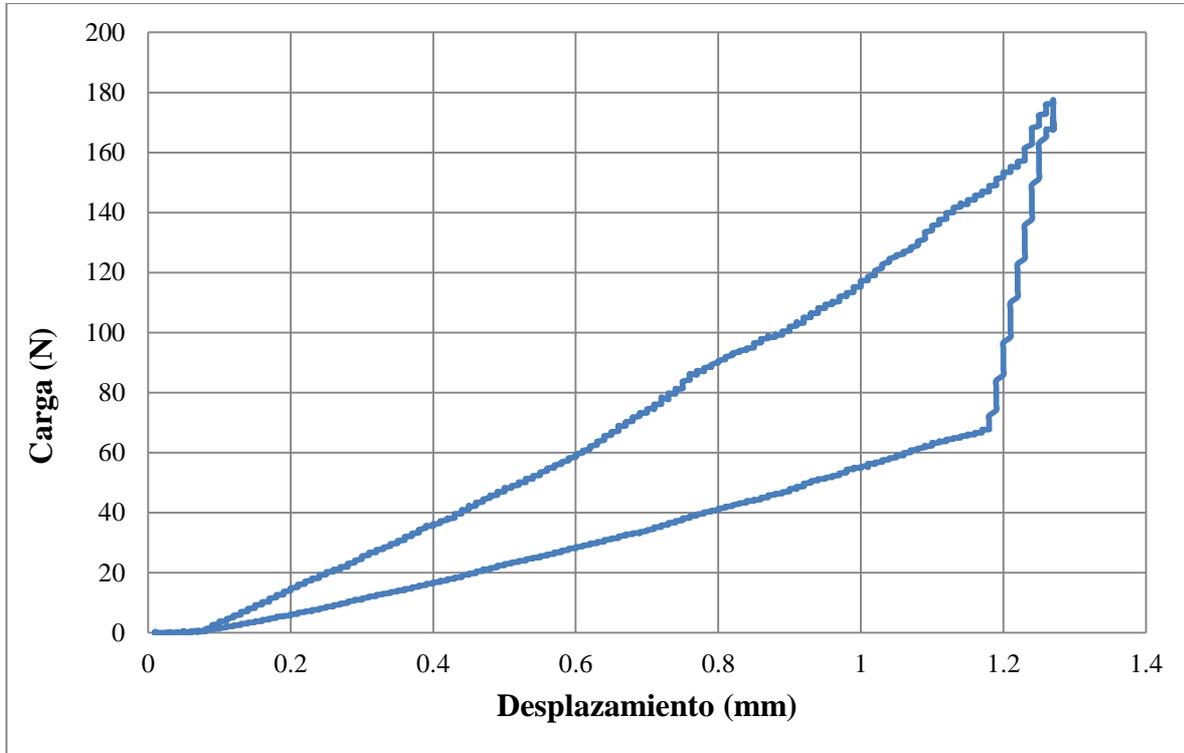


Figura 3.5. Ensayo con el acople corto fijado a la cruceta.

Como se puede ver en la gráfica, esta configuración producía mucha histéresis, lo cual es un problema de incertidumbre para calcular los momentos. Esto es debido a que para calcular los momentos tenemos que trabajar con un intervalo de fuerzas o carga que hace muy amplio cuando un ensayo tiene mucha histéresis. Esta histéresis es habitual en los ensayos donde el vástago de la máquina de tracción actúa a compresión.

Por lo tanto, se procedió a comprobar si ésta venía del rozamiento de los tornillos que mueven la cruceta hacia arriba y hacia abajo. Midiendo con un reloj comparador el desplazamiento vertical de la cruceta, coincide con el valor que a la máquina, por lo que la histéresis no puede venir de ahí. Tras estos resultados, se untó el rodillo cilíndrico con lubricante Molykote®, aunque tampoco redujo la histéresis, tal y como se muestra en la Figura 3.6, que muestra los resultados de este ensayo de carga-desplazamiento.

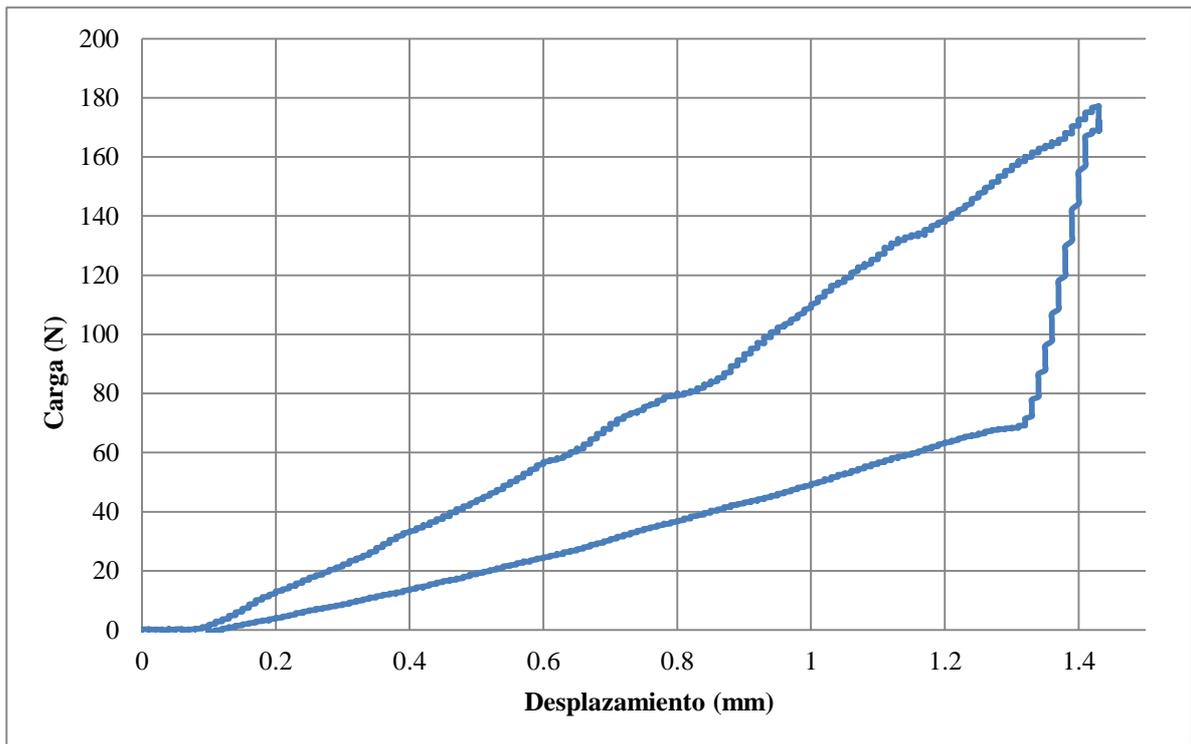


Figura 3.6. Ensayo con el acople corto fijado a la cruceta, aplicando lubricante.

Como la histéresis generada en el primer intento es demasiada, se dedujo que podría estar causada por rozamiento causado por las tensiones tangenciales producidas por el ángulo cambiante de la pieza, que hace que la dirección de la fuerza aplicada cambie con el tiempo. Como las tensiones tangenciales van con la derivada del deslizamiento, cuando se carga en el ensayo tienen una dirección, y cuando se descarga, la dirección contraria.

La histéresis tampoco venía del rozamiento con las piezas porque todo está rígido. En lugar de acoplar el útil directamente a la cruceta, se le añadió de por medio un acople cilíndrico bastante largo, como el mostrado en la Figura 3.7. Con este, aunque se aumentara notablemente el desplazamiento, se consiguió reducir la histéresis bastante, con lo que se deduce que variando la configuración de útiles que van en la parte superior, guiados por la cruceta, se cambia significativamente la forma de la curva del ensayo carga-desplazamiento. Sin embargo, debido a la longitud del cilindro cualquier mínimo cambio en la colocación de este significaba una diferencia considerable en el punto de aplicación de la carga del ensayo. Los resultados de esta prueba se reflejan en la Figura 3.8.



Figura 3.7. Disposición usada en los primeros ensayos con el acople cilíndrico largo.

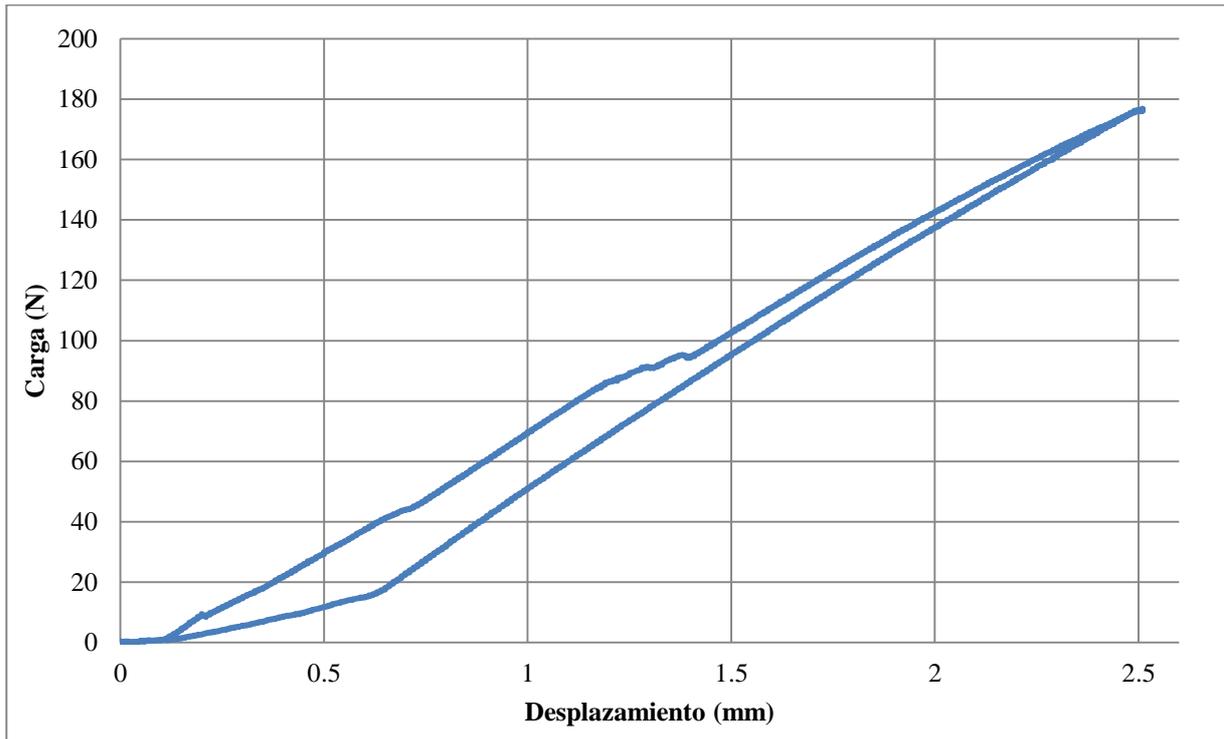


Figura 3.8. Resultados de un ensayo con el acople cilíndrico largo, donde se aprecia la baja histéresis.

El acople cilíndrico tenía bastante movimiento, por lo que había que ser cuidadoso en el montaje del ensayo, que tenía que tener en cada ensayo la misma distancia, a 20 mm del borde del cubo, tal y como se muestra en la Figura 3.9. En la práctica, se ralló el cubo a esta distancia de su extremo para no tener que medir cada vez que se colocara el cilindro. Viendo el buen resultado de la histéresis, se decidió hacer el primer ensayo a 180 °C con esta configuración. Como en el ensayo con el cilindro alargador se ha llegado a 18 kilogramos de fuerza y 2,5 mm de desplazamiento de la cruceta, usaremos estos valores como los límites para cuando ensaye a temperaturas altas, de manera que no deben superar ni esa fuerza calculada en frío ni ese desplazamiento. De ahí se deduce que por cada ensayo en caliente, debemos de haber hecho antes un ensayo en frío para calcular estos valores límite en el ensayo a alta temperatura.



Figura 3.9. Cilindro colocado en la posición correcta encima del cubo, a 20 milímetros del borde.

El fin de ensayar esta probeta en estas condiciones de alta temperatura, aún sin normalización, era ver si era posible cambiar el ángulo de un material compuesto de fibra de carbono con forma curva aplicando temperatura y fuerza, tal y como explicamos al principio de este trabajo. Estos ensayos en caliente, en el caso de esta probeta a valores del orden de la temperatura de curado del material, deben realizarse en las mismas condiciones que el ensayo a temperatura ambiente salvo, obviamente, por la temperatura. De igual manera, se decidió hacer un ensayo tras el ensayo a temperatura, esperando a que se enfríe el útil, y con las mismas condiciones que el primero de los tres ensayos, para ver de esta manera cómo afecta el ensayo a alta temperatura (y de ángulo en caso de que se demostrara al medirlo que ha cambiado) al comportamiento del material.

3.3.2. Primer ensayo a alta temperatura

El ensayo en temperatura que se decidió llevar a cabo consistía en los siguientes pasos:

1. Deslizar el horno hacia la máquina de ensayos, gracias a unos raíles, y colocar todos los cierres en su sitio, además de poner lana de roca, un gran aislante, en las zonas donde el calor pueda subir, como la zona por donde entra el utillaje superior (agarrado a la cruceta) en el horno.
2. Colocar un termopar, un instrumento que mide la temperatura a través de un cable, que mida la temperatura de la placa. Para ello, se realizó un pequeño taladro en el cubo del útil para buscar un punto donde agarrar el cable del termopar y que estuviese cerca de la probeta.
3. Calentar el horno hasta que la temperatura del termopar sea la deseada, en este caso, una temperatura de 180 °C.
4. Aplicar una carga de 1kg y detener la máquina para observar si cambia o no la fuerza aplicada en la pieza. Si la fuerza sigue variando, ello significa que la pieza aún no ha alcanzado la temperatura del horno, ya que su temperatura estaría variando y esta variación causaría deformaciones térmicas que hacen que aumente la carga. Tras 5 minutos sin variar la carga, se retira la carga y volvemos a la posición inicial.
5. Poner a cero el valor de la carga y el desplazamiento, tal y como en el ensayo a temperatura ambiente.
6. Configurar las variables que queremos que nos guarde el programa. En este caso se selecciona, además de la carga y el desplazamiento de la cruceta, el tiempo.
7. Procedemos con el ensayo en cuestión de la siguiente manera:
 - 7.1. Cargamos hasta llegar a uno de los dos valores límites, ya sea el de 18 kg de carga o el del desplazamiento obtenido a temperatura ambiente para esos 18 kg de carga.
 - 7.2. Paramos el movimiento de la cruceta, fijando el desplazamiento y cambiamos a la gráfica de carga-tiempo. Si se produce el efecto deseado, las deformaciones viscosas harán que se relajen las tensiones, por lo que la carga aplicada bajará. En dicho caso, esperamos hasta que observemos que la carga tiende a un valor constante.
 - 7.3. Cuando lleve un tiempo alrededor de ese valor constante, descargamos y cambiamos la vista al gráfico de carga-desplazamiento.

El ensayo a temperatura se realizó de acuerdo con este proceso, y los resultados con esta probeta (P2) fueron los representados en las Figuras 3.10, 3.11 y 3.12.

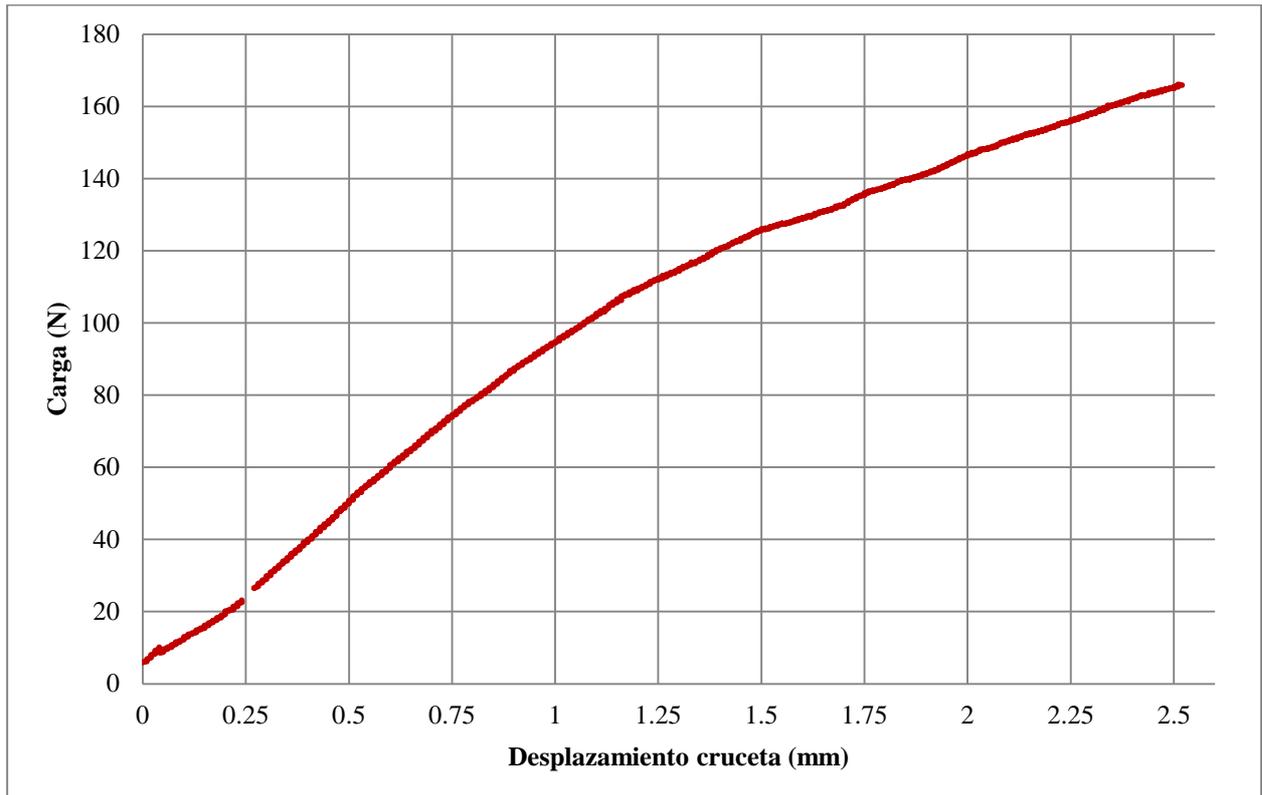


Figura 3.10. Curva carga-desplazamiento a 180 °C para la probeta 2, donde se aprecia la curvatura asociada a la variación del contacto entre rodillo y cubo.

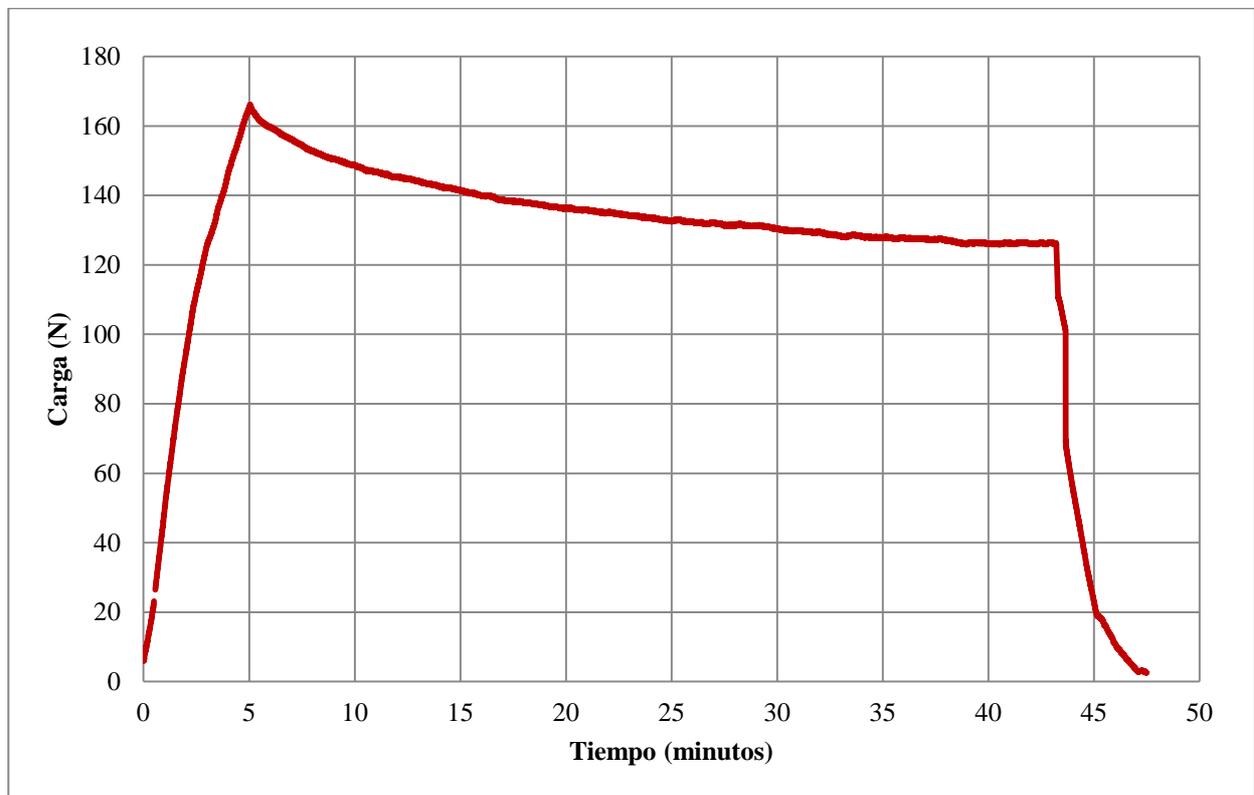


Figura 3.11. Curva carga-tiempo a 180 °C para la probeta 2 desde que se inicia el ensayo. Desde que se detuvo la carga a los 5 minutos y se descargó, a los 43 minutos, la posición de la cruceta se mantiene fija.

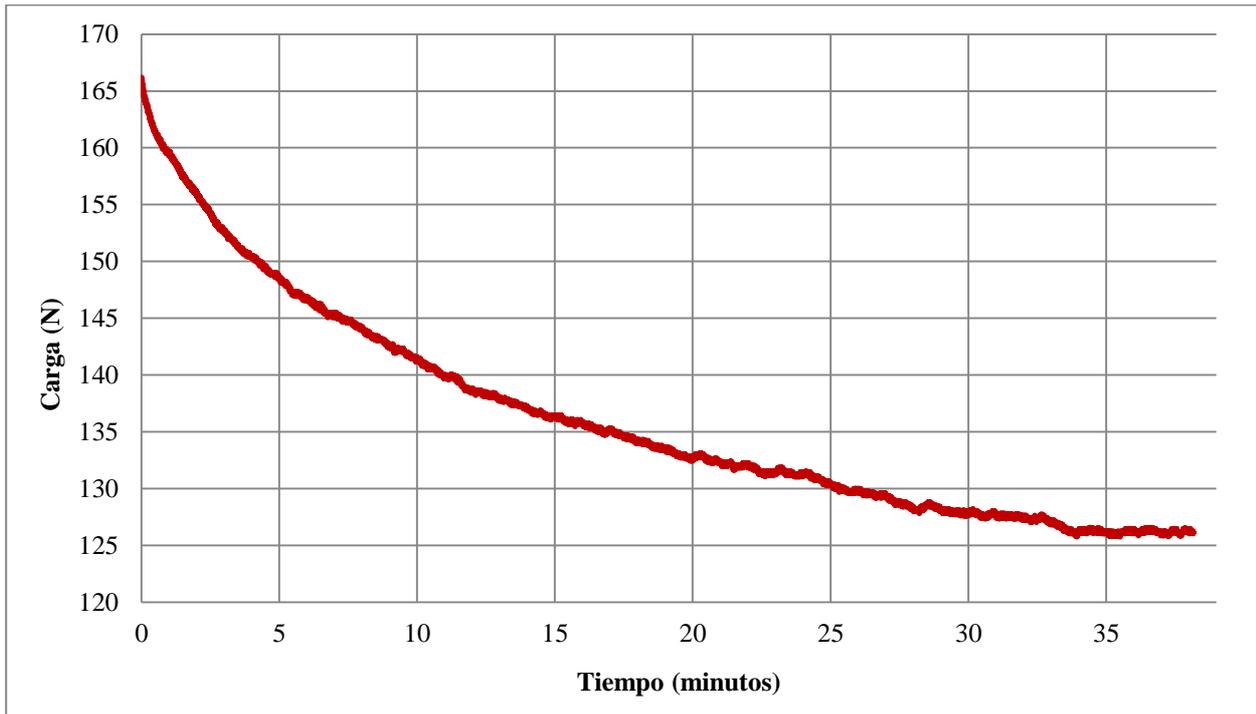


Figura 3.12. Detalle de la curva carga-tiempo a 180 °C para la probeta 2, a partir del momento para el cual mantenemos constante el desplazamiento. Se puede observar cómo la carga aplicada en la probeta comienza a bajar hasta que llega a un valor constante.

Tras estos resultados, acordes con el comportamiento deseado, se dejó enfriar la pieza fuera del horno y se sacó del útil. Esta pieza no es ensayada tras el ensayo a alta temperatura debido a ser la primera, que serviría para confirmar si se había conseguido modificar el ángulo. Y efectivamente, los resultados fueron satisfactorios, observándose una modificación en el ángulo de la probeta.



Figura 3.13. Diferencia de ángulo visible entre la probeta referencia y la probeta 2 superpuestas.

Tal y como se ve en la Figura 3.12, el ángulo cambió (un total de 1,97 grados respecto del molde), lo que condujo a pensar que uniformizando el proceso con los criterios antes vistos, y estudiando varias temperaturas, podremos conseguir datos relevantes para nuestro estudio.

Es muy importante esperar a comenzar el ensayo hasta que la temperatura de la probeta sea estable. En caso de que la probeta ensayada aún no hubiese alcanzado la temperatura deseada, como fue el caso de la

probeta 3 (P3), estaría sometida a un gradiente de temperaturas que deformaría la probeta, con lo cual, la fluencia del material (que produce un descenso de la carga) se produce junto con el calentamiento (que supone un aumento de la carga) observándose un comportamiento como el que se representa gráficamente en la Figura 3.13.

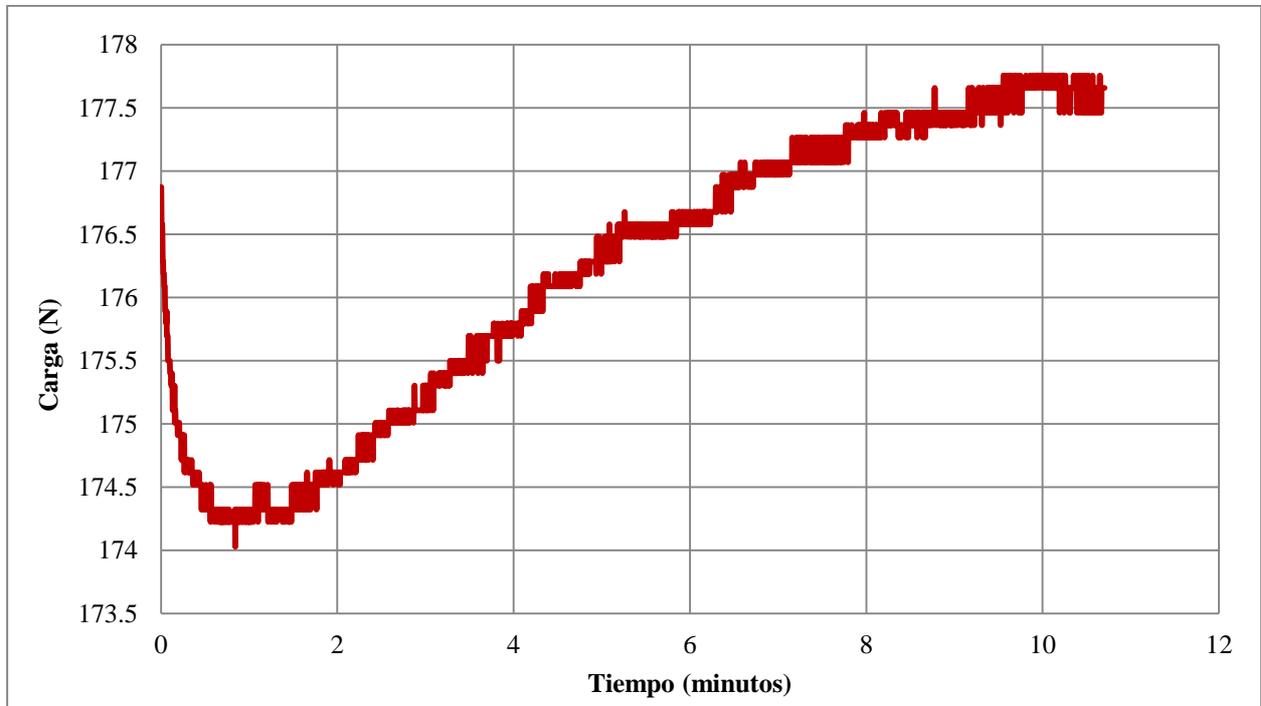


Figura 3.14. Curva carga-tiempo para la probeta 3, ensayada a 150 °C, donde se observa cómo en lugar de tender a un valor constante por lo bajo, sube debido a que aún seguía deformándose debido al gradiente térmico.

Aun así, esta probeta también sufrió un cambio de ángulo, aunque mucho más pequeño, 0,52°, tal y como podemos ver en la Figura 3.14.



Figura 3.15. Diferencia de ángulo, aunque mínima, visible entre la probeta referencia y la probeta 3.

Tras varios ensayos, se decidió colocar otro acople cilíndrico, esta vez más corto, para reducir el desplazamiento del punto de aplicación de la carga. Aunque como primera idea se piense en apretar los

útiles al máximo, no es tal que así, ya que tiene que haber juego en la máquina para redirigir el momento en caso de que se curve.

Por lo tanto, la distribución óptima fue la de colocar por la parte pegada a la cruceta de la máquina de ensayos un acople cilíndrico no tan largo, con un útil con un rodillo que tiene permitido rodar en su extremo, y por la parte fijada a un punto fijo de la máquina el útil diseñado a medida para el ensayo. Esta distribución es la plasmada en la Figura 3.15, y es la que se usará en los ensayos uniformizados que se detallarán en el siguiente punto.



Figura 3.16. Configuración elegida finalmente para los ensayos uniformizados.

4 ENSAYOS

En este capítulo se detallarán los diferentes ensayos uniformizados que se llevaron a cabo en este proyecto. En todas las probetas consideradas se llevaron a cabo tres ensayos que se ejecutaron de manera similar modificando en algunos casos la carga o la temperatura aplicadas, para determinar el efecto de la variación de estos parámetros en los resultados. El primero es un ensayo en frío, a temperatura ambiente. El segundo, un ensayo en caliente, como el realizado en la probeta 2 anteriormente. El tercer ensayo es otro ensayo a temperatura ambiente, ya con el ángulo cambiado. Los tres ensayos se hacen consecutivamente sin desmontar la probeta del útil para no correr el riesgo de que cambie de posición aunque sea lo mínimo. Además, tras estos ensayos, se analizó el cambio de ángulo y la microestructura de las probetas. Empezaremos describiendo los resultados de los ensayos.

Dado que las probetas se ensayaron a diferentes temperaturas y se mantuvo el desplazamiento a distintos valores de la carga aplicada, a cada una de ellas se le dará un nombre que permita identificarla fácilmente. Este nombre irá compuesto de la temperatura a la que se ha ensayado, indicada con una T seguida del número de la probeta, entre 1 y 11, indicado con una P. Para diferenciar la fuerza a la que se detuvo el desplazamiento en las probetas ensayadas a 180 °C, se coloca el valor en newtons de esta fuerza tras la letra F, y seguida de una N. Por ejemplo, la probeta T180-F100N--P10 es la probeta 10, que ha sido ensayada a 180 °C y que se detuvo el desplazamiento de la cruceta cuando la carga llegó a 100 newtons. El número de probetas ensayadas de manera uniforme es de nueve, ya que las probetas 2 y 3 se ensayaron sin estos patrones. Por lo tanto, los resultados de estas probetas serán los que se describirán a continuación.

4.1 Resultados de los ensayos

En esta sección se muestran en gráficas los resultados obtenidos en los ensayos uniformizados. Se representarán tres variables diferentes en estas gráficas: la carga, el desplazamiento y el tiempo. Para las gráficas de carga-desplazamiento, el desplazamiento estará referido al desplazamiento vertical de la cruceta. Comenzaremos por el primero de los tres ensayos de los que se llevan a cabo para una misma probeta.

4.1.1 Ensayos a temperatura ambiente

Para caracterizar el material y comprobar que todas las probetas son análogas y están colocadas idénticamente en el útil, se debe realizar este ensayo, explicado anteriormente. En él, se alcanzará una carga de 18 kilos, equivalente a unos 180 newtons, el cual llegará a un desplazamiento determinado, que marcará el desplazamiento máximo al que la probeta debería de llegar. En el caso de todas las probetas, este desplazamiento máximo se encontraba entre los 1.55 y 1.62 N, lo que asegura que todas las probetas tuvieran un comportamiento muy parecido entre ellas. En este ensayo la línea no es totalmente recta ya que el ángulo va cambiando a medida que la cruceta va bajando, por lo que la rigidez del conjunto pieza-útil va cambiando al flectar la probeta durante el ensayo.

Todos los ensayos a temperatura ambiente (25 °C) se consideraron válidos dado que muestran comportamientos muy parecidos. Los resultados del ensayo, tanto la carga como la descarga a temperatura ambiente de cada una de las probetas, se representan conjuntamente para todas las probetas a continuación en las Figuras 4.1 y 4.2.

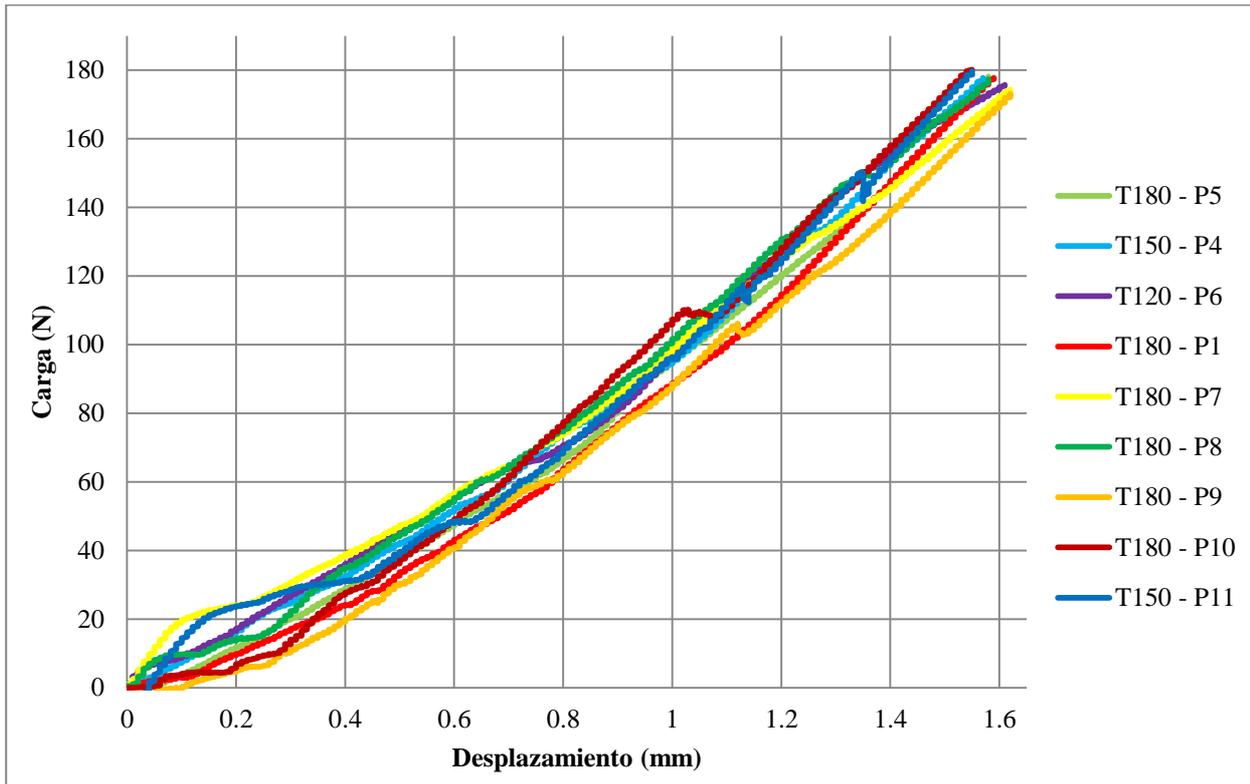


Figura 4.1. Curva carga-desplazamiento aplicando carga a temperatura ambiente para todas las probetas ensayadas de manera uniforme.

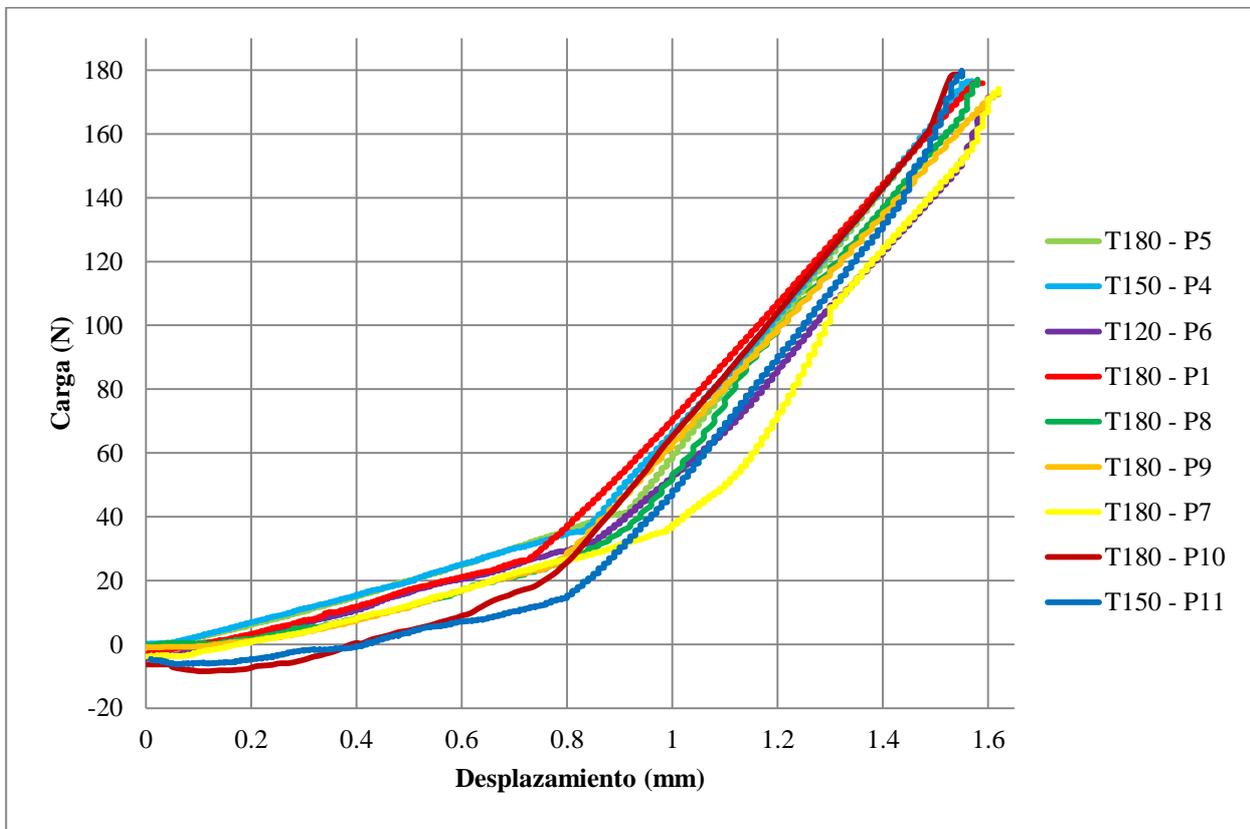


Figura 4.2. Curva carga-desplazamiento descargando a temperatura ambiente para todas las probetas ensayadas de manera uniforme.

4.1.2 Ensayos a alta temperatura

Estos ensayos fueron realizados a tres temperaturas constantes diferentes, y más tarde, dado el interés especial en las temperaturas altas, se realizaron ensayos a la máxima temperatura manteniendo la posición constante, tras alcanzar diferentes valores de carga, tal y como se muestra en la Tabla 4.1. Los primeros ensayos a temperatura que se llevaron a cabo fueron los de P4, P5 y P6. En ellos, se quería ver la relación de la temperatura con las diferentes curvas de relajación carga-tiempo a partir del momento en el que mantenemos un desplazamiento constante. Tras sacar varias conclusiones, se realizaron más ensayos a 180 °C fijando la probeta a un desplazamiento a partir de una carga determinada, que varía según el ensayo. Además, se repitieron varios ensayos para verificar el comportamiento que se tuvo en ensayos previos, lo que condujo a descartar algunos ensayos respecto de otros.

Es preciso mencionar que 180° es la temperatura de curado de la resina de la fibra de carbono, además de que 150° ronda la temperatura de transición vítrea del polímero. Son temperaturas destacables que pueden hacer que las curvas que veremos a continuación no tengan un comportamiento intuitivo.

Tabla 4.1. Temperatura y carga fijada para cada ensayo en su ensayo a alta temperatura.

	P1	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
Temperatura	180°	150°	180°	120°	180°	180°	180°	180°	150°
Carga máxima	140 N	160 N	120 N	160 N	100 N	120 N	100 N	140 N	170 N

Para empezar, se mostrará el ensayo de carga para cada una de las probetas comparándolas, como hicimos anteriormente, esta vez para el ensayo de carga en caliente, representado en la Figura 4.3. También se representó, el ensayo de carga en caliente para las probetas calentadas hasta 180 °C para comprobar si todas ellas se comportaban de la misma manera, parando a diferentes cargas para diferentes probetas.

Más tarde, se representarán gráficamente ensayos referidos al momento en el que el desplazamiento se fija como constante, los cuales se mostrarán en las Figuras 4.5 y Figura 4.6.

En el primero de ellos, se representa la carga dividida por la carga inicial respecto del tiempo, de manera que así conseguimos adimensionalizar el eje vertical. Además, el tiempo aparece como la resta del tiempo transcurrido menos el valor del tiempo en el momento en el que fijo el desplazamiento. De esta manera, podemos comparar todas las probetas con criterio.

En el segundo de estos ensayos representa la carga a la que se detuvo la cruceta menos la carga en cada instante, respecto del tiempo. De esta manera, sin adimensionalizar el eje vertical, se puede obtener una medida precisa de lo que cada ensayo ha relajado a lo largo del tiempo cuantificado en unidades de carga.

Dado que se hicieron 6 ensayos a 180°, conviene también comparar en una gráfica aparte estos ensayos para analizar el efecto de la carga inicial en las diferentes probetas ensayadas a esta temperatura. Estas gráficas se muestran en la Figura 4.7 y Figura 4.8.

En todos estos ensayos se coloca, además, una probeta de control sin carga aplicada para controlar que no se produzcan deformaciones permanentes por efectos químicos debidos a la alta temperatura.

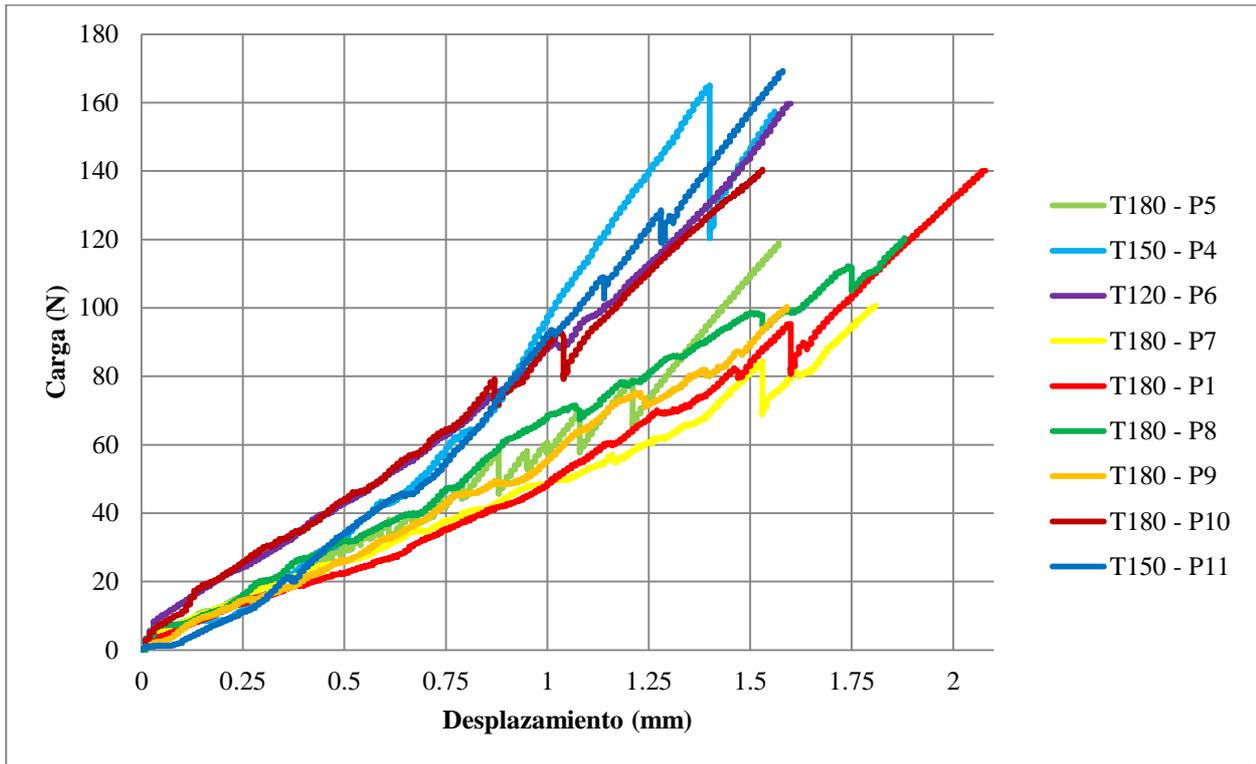


Figura 4.3. Curva carga-desplazamiento aplicando carga a alta temperatura para todas las probetas ensayadas de manera uniforme.

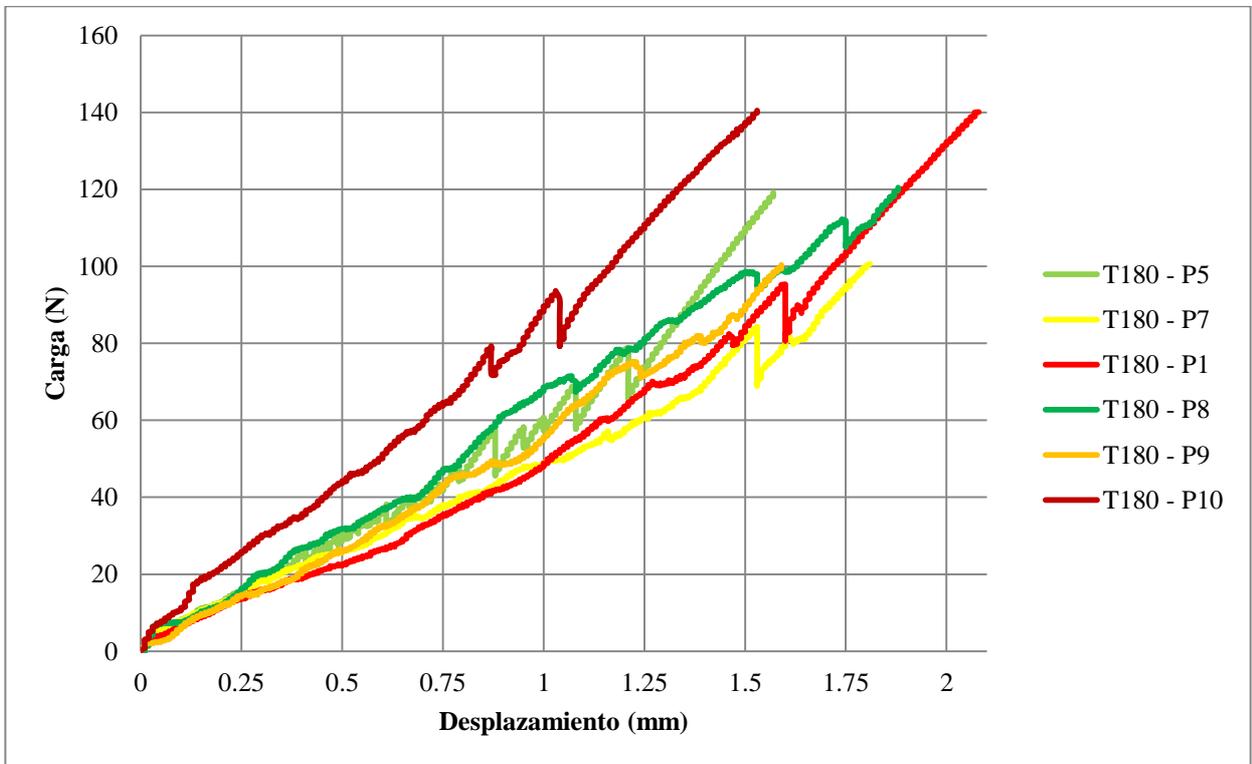


Figura 4.4. Curva carga-desplazamiento aplicando carga a temperatura ambiente para las probetas ensayadas a 180 °C tras el ensayo a alta temperatura.

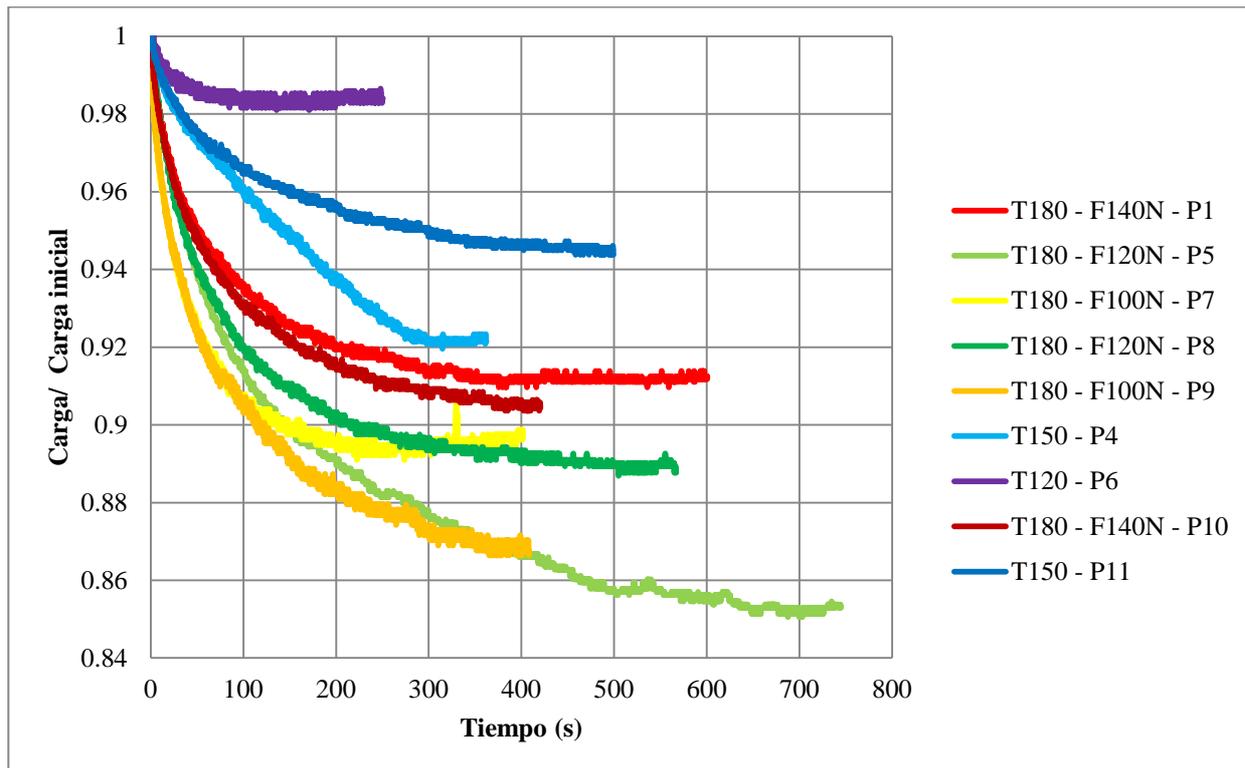


Figura 4.5. Carga entre carga inicial respecto del tiempo para todas las probetas con ensayo uniforme en el tramo para el cual se mantiene el desplazamiento de la cruceta constante.

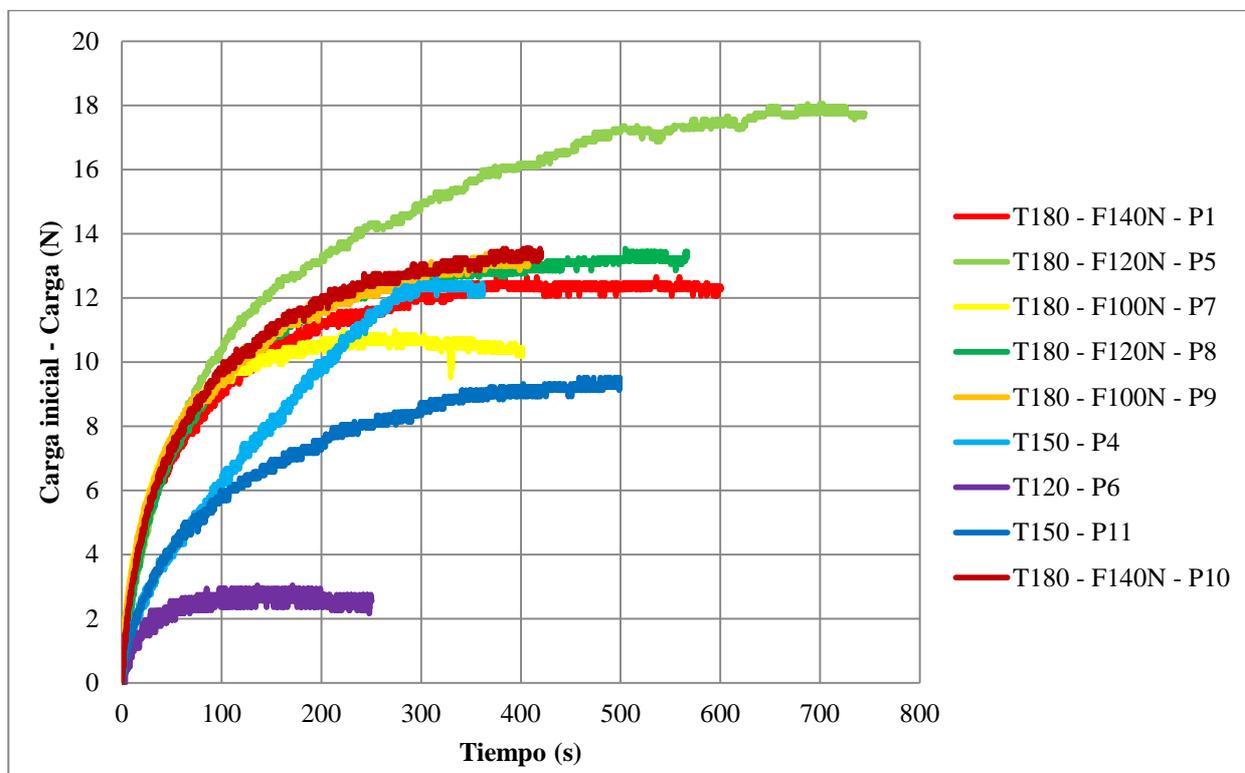


Figura 4.6. Diferencia entre la carga inicial y la carga respecto del tiempo para todas las probetas con ensayo uniforme en el tramo para el cual se mantiene el desplazamiento de la cruceta constante.

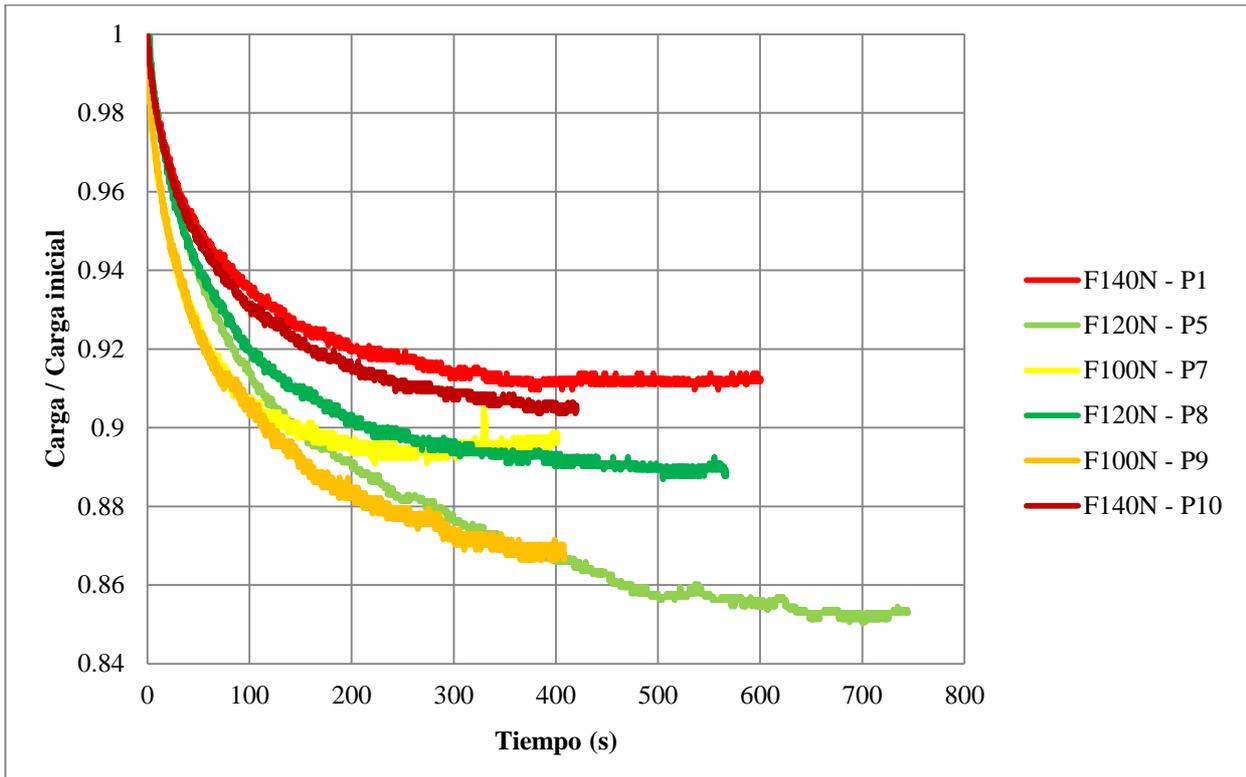


Figura 4.7. Carga entre carga inicial respecto del tiempo para las probetas ensayadas a 180 °C en el tramo para el cual se mantiene el desplazamiento de la cruceta constante.

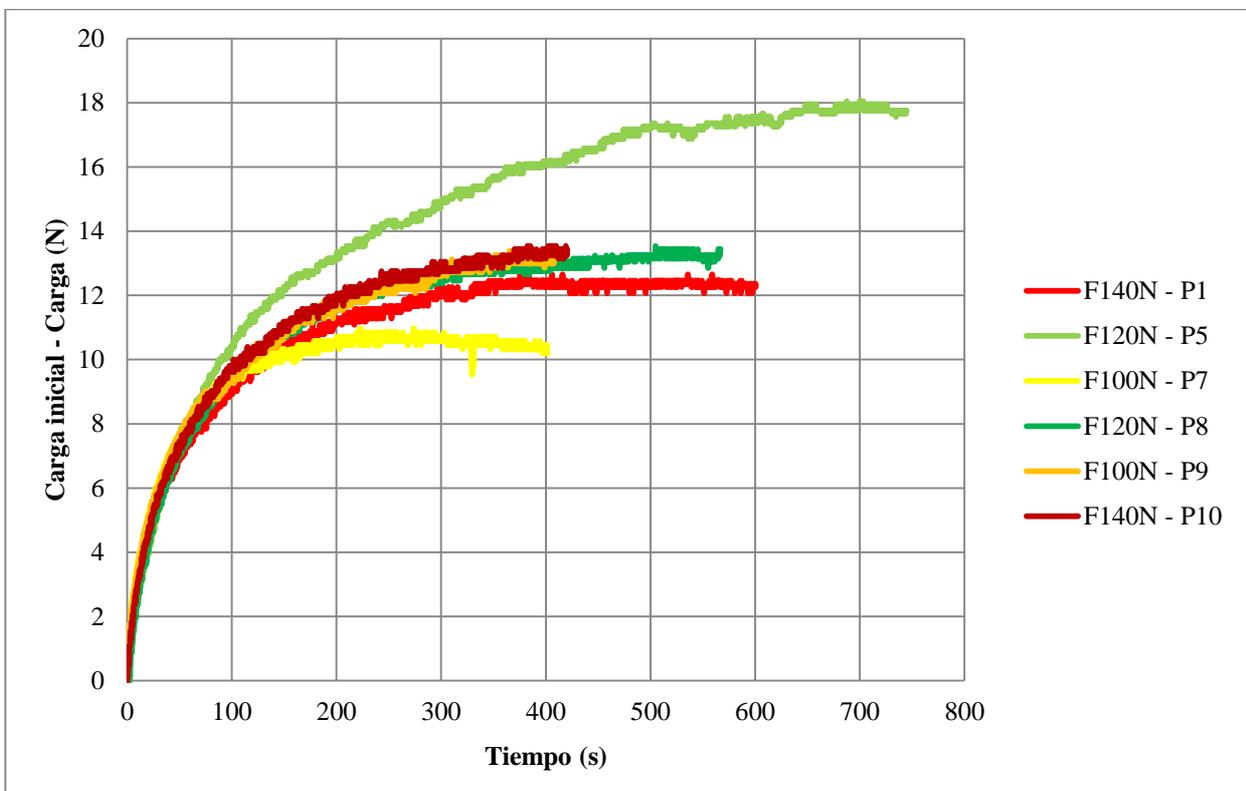


Figura 4.8. Diferencia entre la carga inicial y la carga respecto del tiempo para las probetas ensayadas a 180 °C en el tramo para el cual se mantiene el desplazamiento de la cruceta constante.

4.1.3 Ensayos a temperatura ambiente posteriores

Por último, se exponen también los ensayos de carga y descarga a temperatura ambiente de las probetas tras los ensayos a temperatura, con los ángulos ya modificados, en la Figura 4.9 y la Figura 4.10.

Todas las conclusiones acerca de las gráficas de los tres ensayos se comentarán más adelante.

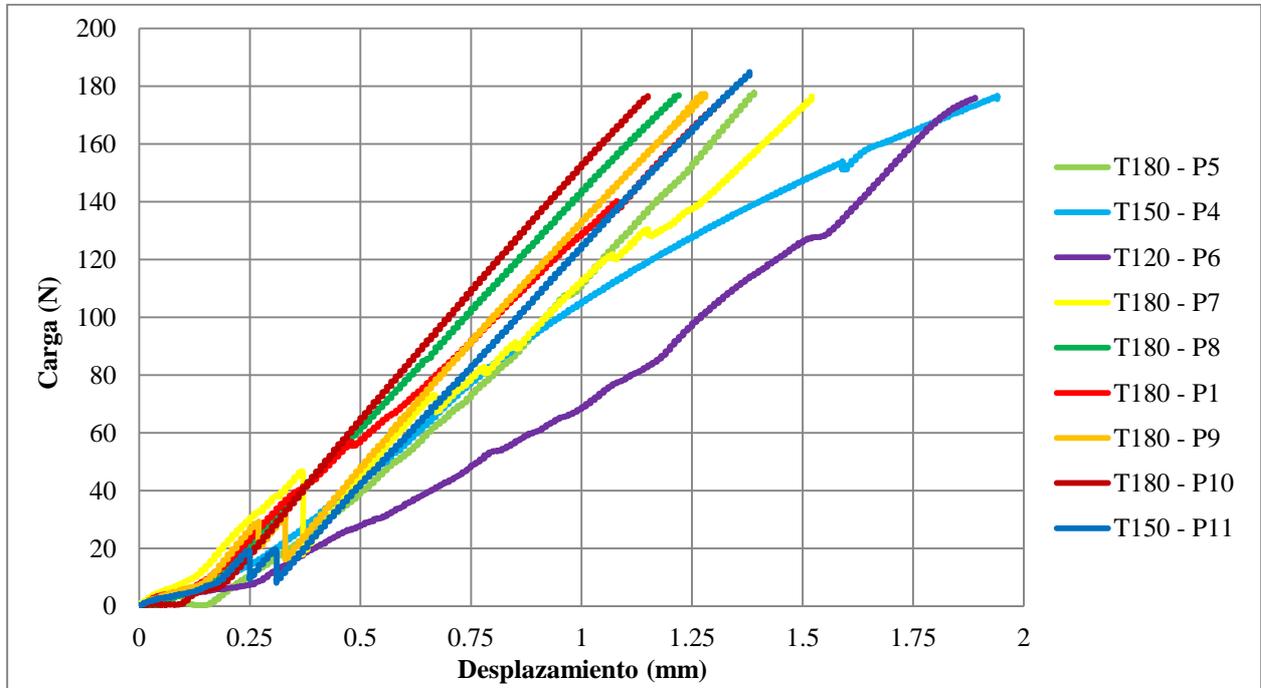


Figura 4.9. Curva carga-desplazamiento aplicando carga a temperatura ambiente para todas las probetas ensayadas de manera uniforme tras el ensayo a alta temperatura.

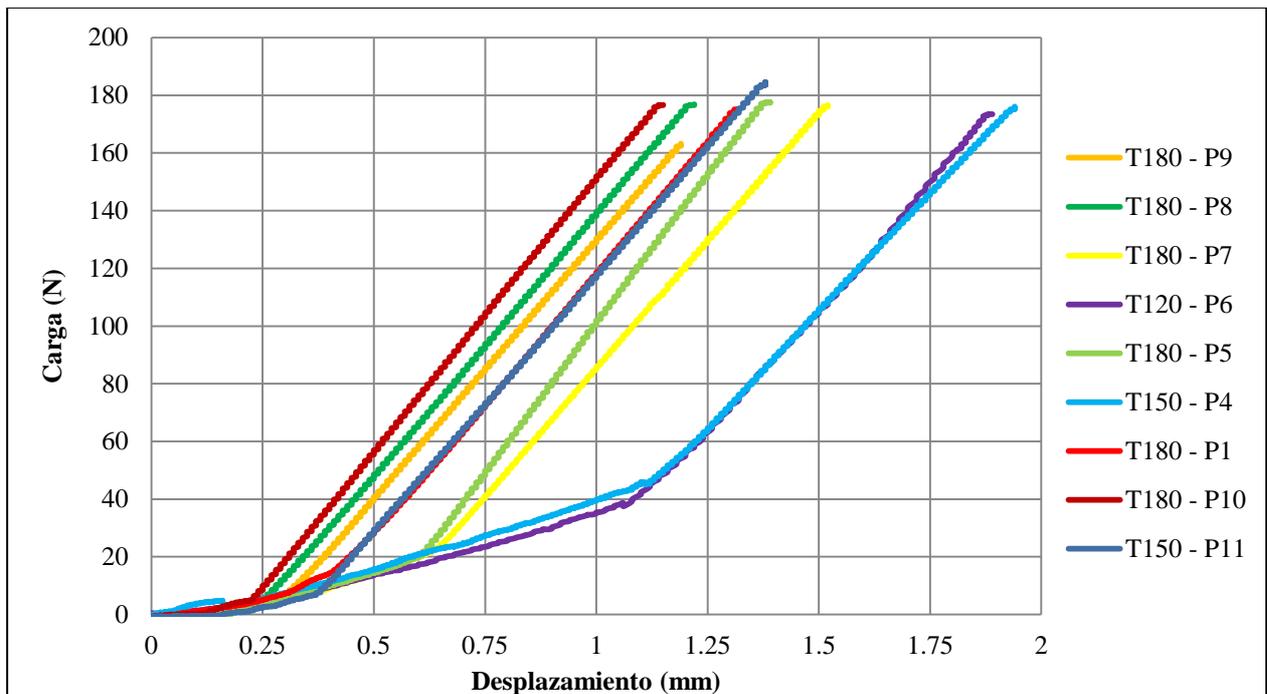


Figura 4.10. Curva carga-desplazamiento descargando a temperatura ambiente para todas las probetas ensayadas de manera uniforme tras el ensayo a alta temperatura.

4.2 Observación de las gráficas

Prestando atención a los datos de la gráfica se llega a conclusiones interesantes. Se comenzará hablando sobre algunos de los detalles notables de las curvas, para más tarde comparar los diferentes resultados para la misma gráfica.

4.2.1 Detalles característicos de las curvas.

Como se ha comentado antes, hay ciertos rasgos en las curvas de los ensayos que se repiten para los mismos fenómenos.

- En los ensayos de carga y de descarga se aprecia cierta suavidad cerca del origen de coordenadas. Esta falta de rectitud en los tramos iniciales de la curva se debe a la falta completa de contacto del rodillo con el cubo del útil. Cuando el rodillo tiene apoyo un extremo, aporta carga, pero en el tránsito de apoyar toda la recta de contacto la curva se aplana, ya que este desplazamiento de la cruceta está siendo utilizado no para aportar carga, sino para que el útil se coloque en su posición correcta.
- Otro de los factores a tener en cuenta es el salto que se produce en la carga de algunas probetas. Las bajadas espontáneas de carga se pueden deber a una micro rotura del material, que provoca que la pieza necesite menos fuerza para recorrer el mismo desplazamiento, o incluso al deslizamiento del material respecto del útil.
- La falta de rectitud de algunas probetas es común en los ensayos de carga, a temperatura ambiente antes de deformar la probeta y en los de alta temperatura. Esto es debido a que como el ángulo va cambiando a medida que la cruceta va bajando, el momento va variando, ya que la carga aplicada va variando su distancia respecto de la curva de la pieza. Como la fuerza que aplico tiene un ángulo respecto de la normal del plano de la pieza, hay una componente horizontal que me va sumando o restando momento al total.
- Un detalle destacable también es la tolerancia de la máquina. Estamos usando una célula de carga de 500 kg para ensayar a un máximo de 18 kg, por lo que la máquina, para cargas muy pequeñas, va pintando una línea que cubre intervalos de 0,3 N sin poder dar un valor concreto, de manera que se mueve entre estos valores describiendo una trayectoria que en las gráficas es visiblemente más gruesa.
- Como ya se comentó antes, en las figuras en las que se pinta el tiempo en el eje horizontal y se trata la variable carga en el vertical, una subida de la carga indica que la probeta está sufriendo deformaciones térmicas y que, por tanto, la temperatura del horno no es aún constante. Estos ensayos no pueden darse por buenos si la subida de carga es notable.

4.2.2 Comparación de los diferentes ensayos

En este apartado se comentarán la similitud que guardan las gráficas con las diferentes temperaturas y cargas.

4.2.2.1 Resultados de los ensayos a temperatura ambiente

Como hemos podido observar en las gráficas, no cabe duda de que los ensayos de carga y descarga a temperatura ambiente que se realizan en primer lugar sin deformación de la probeta tienen una pendiente parecida, pasan por los mismos intervalos de valores y se parecen mucho los unos con los otros, por lo que se considera que la uniformización del ensayo es satisfactoria.

4.2.2.2 Resultados de los ensayos a alta temperatura

En los ensayos con temperatura, ya empezamos a ver cambios notables entre unas probetas y otras. En todos los ensayos a 180 °C, menos en uno (el de la probeta 10) la rigidez ha bajado al cargar la probeta. Esto era previsible, ya que la alta temperatura ablanda la resina. En los ensayos a temperaturas más bajas, los de 120 °C y 150 °C, se puede apreciar una pendiente significativamente mayor, incluso para el caso de 120 °C, cercana a la curva del ensayo a temperatura ambiente.

Por otra parte, aunque la probeta 1, la probeta 7 y la probeta 10 tengan caídas para una misma carga, la probeta 5 sufrió muchas oscilaciones a lo largo de su desplazamiento que no dan mucha confianza sobre las condiciones en las que se ha producido la relajación. Además, estas caídas no son comparables con la caída de la probeta 4, que se produce justo antes de llegar al valor de desplazamiento al que se quería parar el desplazamiento en los primeros ensayos. Esta irregularidad estaba muy probablemente provocada por una rotura laminar, y provoca que las curvas de la probeta 4 tengan un comportamiento extraño.

La gráfica de descarga en caliente no tenía mucho sentido representarla, ya que no daría valores comparables al partir cada una de un punto completamente diferente, y al no aportar información que no pueda obtenerse de otras gráficas.

Sin duda, las gráficas más interesantes de analizar son las gráficas de las curvas de relajación respecto del tiempo. Todas las curvas tienen una forma similar, menos la curva de la Probeta 4, que tiene una tendencia demasiado rectilínea durante los primeros 4 minutos de ensayo. Esta probeta, como ya dio problemas anteriormente, no se tendrá tanto en cuenta como la probeta 11, que describe curvas más suaves para las mismas condiciones de ensayo.

Asimismo, la probeta 7 ganó carga en la etapa de relajación, lo que no es bueno por lo antes explicado: estaba teniendo deformaciones térmicas. Por ello, consideraremos para las comparaciones de cada ensayo en temperatura a su análoga, la probeta 9.

En una visión más general, podemos observar que las probetas que se ensayan a mayor temperatura relajan más carga que las probetas que se ensayan a menor temperatura. A su vez, estas probetas que relajan a mayor temperatura presentan una diferencia de ángulo mucha mayor con respecto al ángulo de referencia (previo al ensayo con temperatura) que la diferencia angular en las demás.

Además, para una misma temperatura (180 °C) y diferentes cargas, podemos observar cómo hay una tendencia clara a que las piezas a las que se le impuso un desplazamiento asociado a una fuerza menor relajan más que las piezas a las que se les fijó un desplazamiento asociado a una fuerza mayor. Además, el gráfico de la diferencia de cargas para las probetas ensayadas a 180°C muestra cómo la carga que se relaja tiende a un valor cercano a los 12 N.

Por último, cabe resaltar que la probeta de control, probeta 6, no sufrió deformaciones térmicas en ninguno de los ciclos, por lo que se puede llegar a la conclusión de que no hay que considerar deformaciones residuales exclusivamente por razones térmicas en las probetas que están siendo ensayadas dentro del horno.

4.2.2.3 Resultados de los ensayos a temperatura ambiente posteriores

Como se observa en las gráficas, todas las curvas de probetas ensayadas a 180 °C tienen un comportamiento similar, aunque llegan a deformaciones muy distintas unas de otras a 180 N. Las curvas de probetas ensayadas a menor temperatura tienen un comportamiento diferente, similar en el caso de las probetas 4 (ensayada a 150°) y 6 (ensayada a 120°), y muy diferente en la probeta 11 (ensayada a 150°)

4.3 Comparación de los ángulos

En este apartado se mostrarán en diferentes figuras la variación angular sufrida por la probeta. Las medidas realizadas empleando Adobe Photoshop® [14], se muestran ordenadas en la Tabla 4.2. Se puede apreciar la poca diferencia que hay entre la variación angular de las probetas ensayadas a 150 °C y a 120 °C hasta el punto de que una de las probetas ensayadas a 150 °C coincide con la medida del ángulo de la probeta ensayada a 120 °C.

También es destacable lo parecidos que salen todos los ángulos de las probetas ensayadas a 180 °C a pesar que unos hayan relajado más que otros y hayan estado a diferentes desplazamientos partiendo de distintas cargas.

Tabla 4.2. Comparación del ángulo anterior al ángulo girado en las probetas ensayadas para la temperatura y carga a la que se ensayó cada probeta.

	Ref.	P1	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11
Ángulo en grados	122,62	121,19	121,93	121,35	122,06	121,20	121,26	121,49	121,41	122,06
Diferencia en grados	-	1,43	0,69	1,27	0,56	1,42	1,36	1,13	1,21	0,56
Temperat.	-	180°	150°	180°	120°	180°	180°	180°	180°	150°
Carga máxima	-	140 N	160 N	120 N	160 N	100 N	120 N	100 N	140 N	170 N

El ángulo variado se puede mostrar gráficamente superponiendo una imagen de la probeta referencia con una de la probeta que quisiera representar, tal y como se representa en la Figura 4.11.

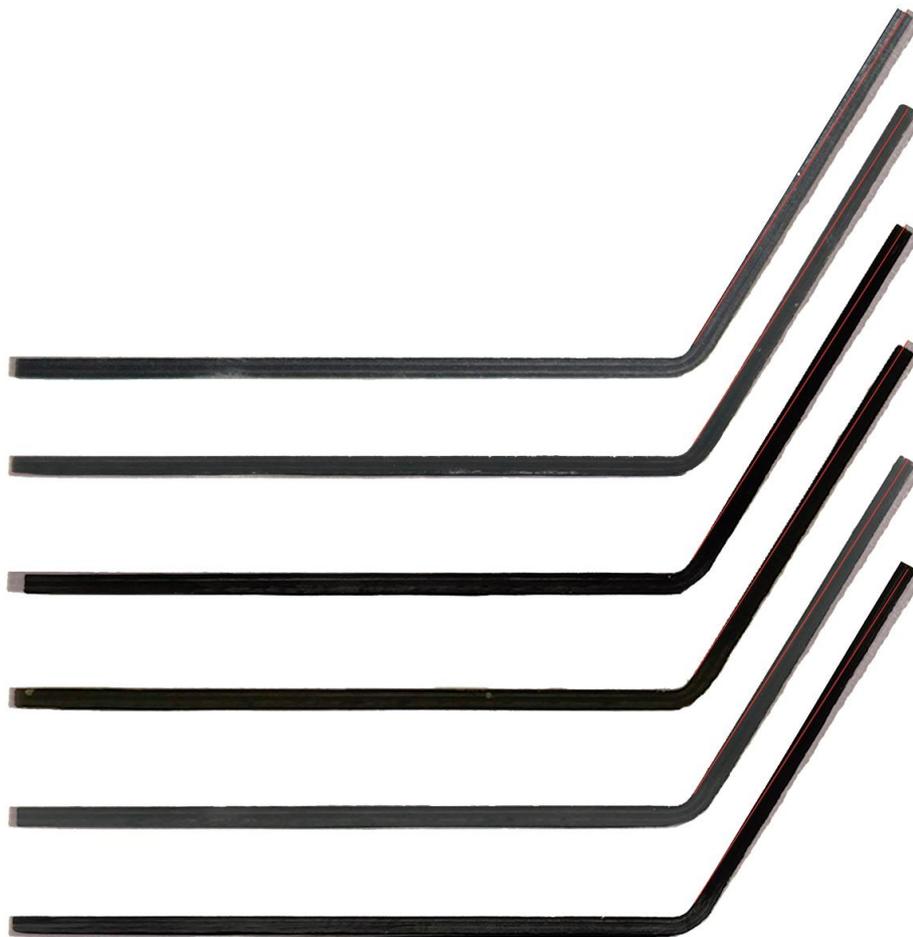


Figura 4.11. Cambio del ángulo en las probetas ensayadas a 180 °C. De arriba y abajo, probeta 5, probeta 7, probeta 8, probeta 9, probeta 10 y probeta 1. La línea roja representa la línea por la que debería de pasar la probeta si no se hubiese girado.

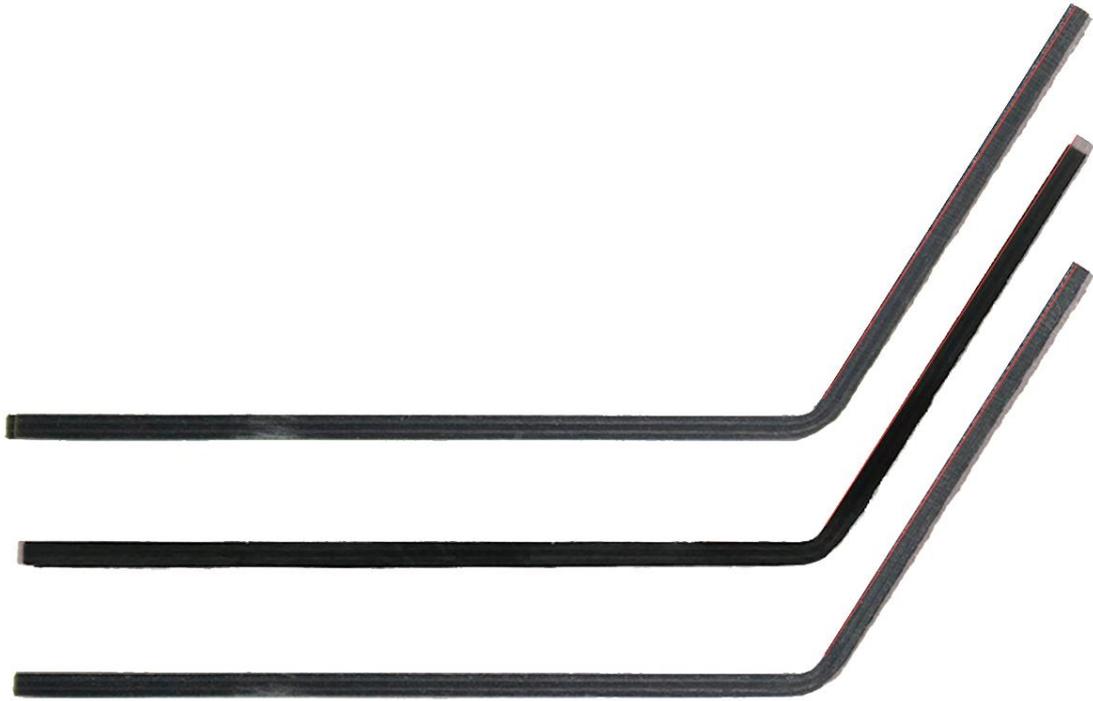


Figura 4.12. Cambio del ángulo en las probetas ensayadas a 150 y 120 °C. De arriba abajo, probeta 4, probeta 11 y probeta 6.

5 MICROGRAFÍAS

Dado que se han observado caídas bruscas de la carga en algunas probetas, es necesario determinar si se han producido roturas durante el ensayo. Para ello, se usará un microscopio óptico para sacar micrografías a diferentes aumentos y así examinar los detalles que no se pueden ver a simple vista. Para poder analizar las micrografías en el microscopio, primero es necesario llevar a cabo un proceso de lijado y pulido, para que la luz del microscopio óptico se refleje perfectamente y se pueda ver la imagen nítida.

5.1 Proceso de lijado y pulido

Este proceso se llevó a cabo en una sala de lijado y pulido del Laboratorio de Elasticidad y Resistencia de Materiales, con la máquina Saphir 520. En cada paso se usa una lámina diferente que recortará más o menos material dependiendo del tamaño de las partículas que hay en ella. Estas láminas, que se muestran en la Figura 5.1, se llaman paños y se colocan de manera magnética en el soporte de la máquina. En ningún paso hay que apretar la pieza contra el paño con mucha fuerza; de hecho se recomienda pulir con una fuerza de 40 N, sobre 4 kilos.



Figura 5.1. Diferentes paños usados en el lijado y pulido de las probetas. De izquierda a derecha, en orden de uso para los pasos del 1 al 4.

Es muy importante asegurarse de que se sitúa la cara de la probeta totalmente paralela al plano del paño y no se mueva durante el pulido. Antes de comenzar este proceso hay que asegurarse de llevar bata y guantes de látex. Una vez encendida la máquina, se siguen los siguientes pasos:

1. El primer paso consiste en pasar la pieza por una lija de Carburo de Silicio ($\text{SiC}\#320$) que se lubrica con agua. Se abre el grifo de agua, mojando el centro del paño, y se ajusta la máquina para que gire a 300 rev/min. Este primer paso dura 5 minutos y se le aplica una vez a cada probeta.

2. El segundo paso consiste en un lijado fino, un paño de diamante, que usa como lubricante uno de los botes conectados a la máquina, el bote número 2, que corresponde al lubricante MD Largo 9, con diamantes de $9 \mu\text{m}$ de tamaño. Se mantiene pulsado el botón de este bote para echar una cantidad suficiente, para que sea esparcido por todo el paño con las manos llevando puesto los guantes de látex. Se ajustan 150 rev/min y se pulsa el botón del bote 2 para que periódicamente la máquina suelte gotas de lubricante durante el proceso. Este paso dura 6 minutos.
3. El tercer paso sería también un lijado, más fino más fina, que usa como lubricante el bote número 1, que es MD Dac 3, con diamantes de $3 \mu\text{m}$ de tamaño. Se esparce de la misma manera que el anterior, se mantienen las 150 rev/min y, por la misma razón de antes, se presiona esta vez el botón del bote 1. En este paso se lija la pieza durante 5 minutos.
4. El último paso consiste en un pulido para el que se usa un paño de diamante más fino para un acabado perfecto, y usa como lubricante MD Nap B1, con diamantes de $1 \mu\text{m}$ de tamaño. Al igual que en los otros dos ensayos anteriores, se mantienen las 150 rev/min y se presiona el botón del lubricante que en este caso es el botón número 3.

Es muy importante que entre paso y paso se limpie la probeta con agua para que partículas del lubricante de un paso no estén en las de otro. En la Tabla 5.1 se resumen todos los procesos.

Tabla 5.1. Descripción de los diferentes pasos a seguir para el pulido de las probetas.

	Paso 1	Paso 2	Paso 3	Paso 4
Paño	Lija de SiC	Paño 9 micras	Paño 3 micras	Paño 1 micra
Lubricante	Agua	Bote 2	Bote 1	Bote 3
Velocidad	300 rev/min	150 rev/min	150 rev/min	150 rev/min
Tiempo	5 minutos	6 minutos	5 minutos	5 minutos

5.2 Obtención de las micrografías

Antes de poder ver las micrografías en el microscopio, es necesario eliminar todo resto de lubricante que pueda tener, por lo que se limpia exhaustivamente con agua y se seca con un papel absorbente. Una vez eliminada toda el agua de la muestra, se coloca en el microscopio. Para poder visualizar a tiempo real lo que el microscopio ve, primero hay que encender el microscopio y el ordenador. El software que se usa se llama Perfect Image®, y para poder ver a tiempo real lo que se ve en el microscopio, tan solo hay que presionar en la esquina superior izquierda donde dice “Adquisición”.

Para capturar imágenes hay que situarse a la parte derecha y presionar el botón “Capturar”. A continuación, hace falta moverse al menú “Imágenes” y guardar las imágenes que hemos capturado.

5.3 Visualización de micrografías

A continuación, mostraremos algunas micrografías destacables que explican algunos de las irregularidades de las gráficas vistas anteriormente.

Una de las irregularidades que dijimos que podría estar ligada a rotura era la del descenso brusco de la curva durante la el ensayo carga-desplazamiento. Como vimos, este descenso brusco era notable en la probeta 4. Y efectivamente, este raro comportamiento puede estar asociado a una rotura doble y otra simple de las láminas de 90° centrales, como se muestra en la Figura 5.2.

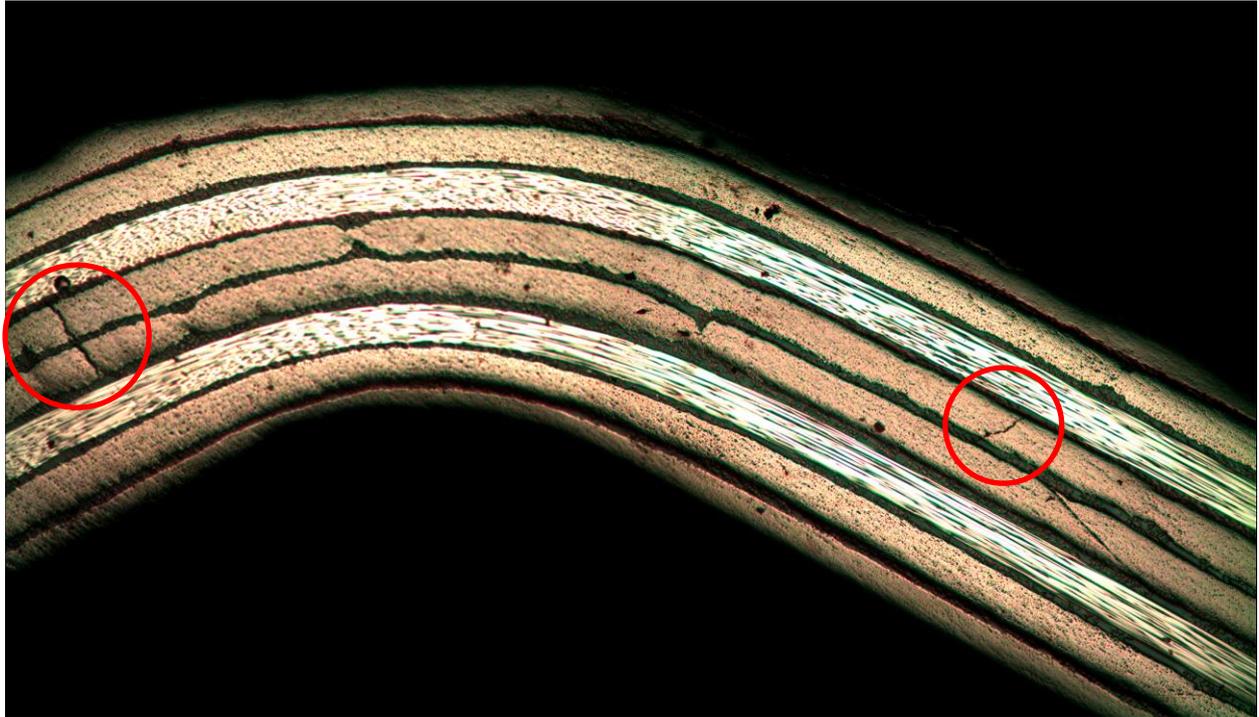


Figura 5.2. Detalle de las roturas producidas en las láminas de 90 grados de la probeta 4.

Esta rotura en las capas de 90 grados, puede ser la causa de que en la relajación la probeta tenía un comportamiento tan diferente del resto al principio. Si la rotura está asociada a la caída de carga observada en la gráfica, se ha producido a 1,4 milímetros de desplazamiento de la cruceta y a un poco más de 160 N.

El raro comportamiento que demostró la probeta 5 durante su carga en caliente también puede ser causado por fallos observables en su micrografía. Como podemos ver en la Figura 5.4, en la zona de compresión, la curva interior de la pieza, se formaron grietas que no están cerradas, posibles causantes del zigzagueo producido en esta curva del ensayo. Además, también tenía algunas láminas con grietas en la dirección del laminado, lo cual son grietas por compresión.

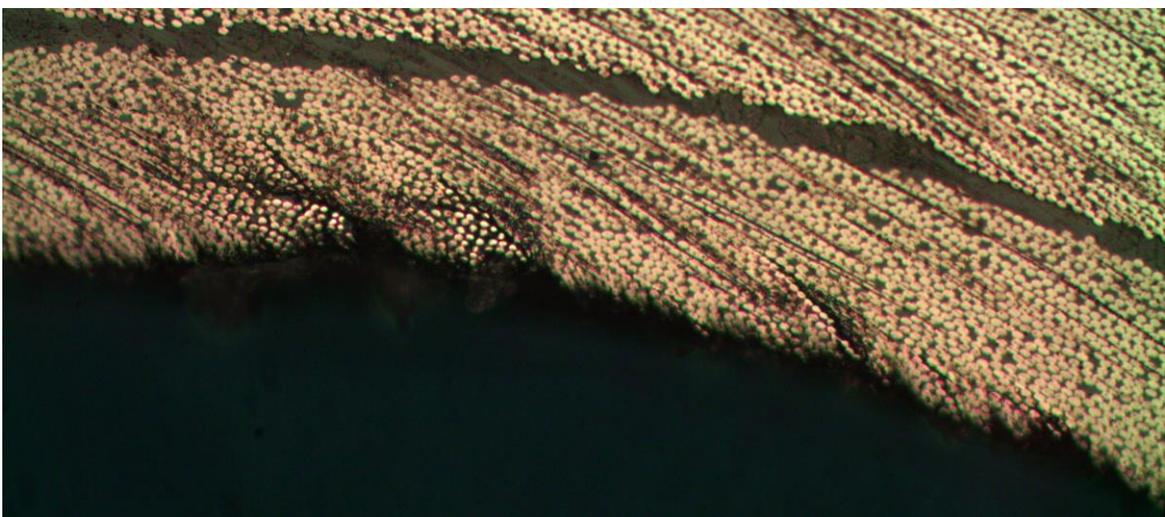


Figura 5.3. Detalle de las roturas producidas por compresión en la probeta 5.

Además, tras visualizar la micrografía de la probeta 2, ensayada de manera no uniforme se descubrieron numerosas roturas y fallos, dado que le fijamos el desplazamiento hasta a 2,52 mm, que consideraba interesante exponer en este apartado. Se puede apreciar en la Figura 5.5.

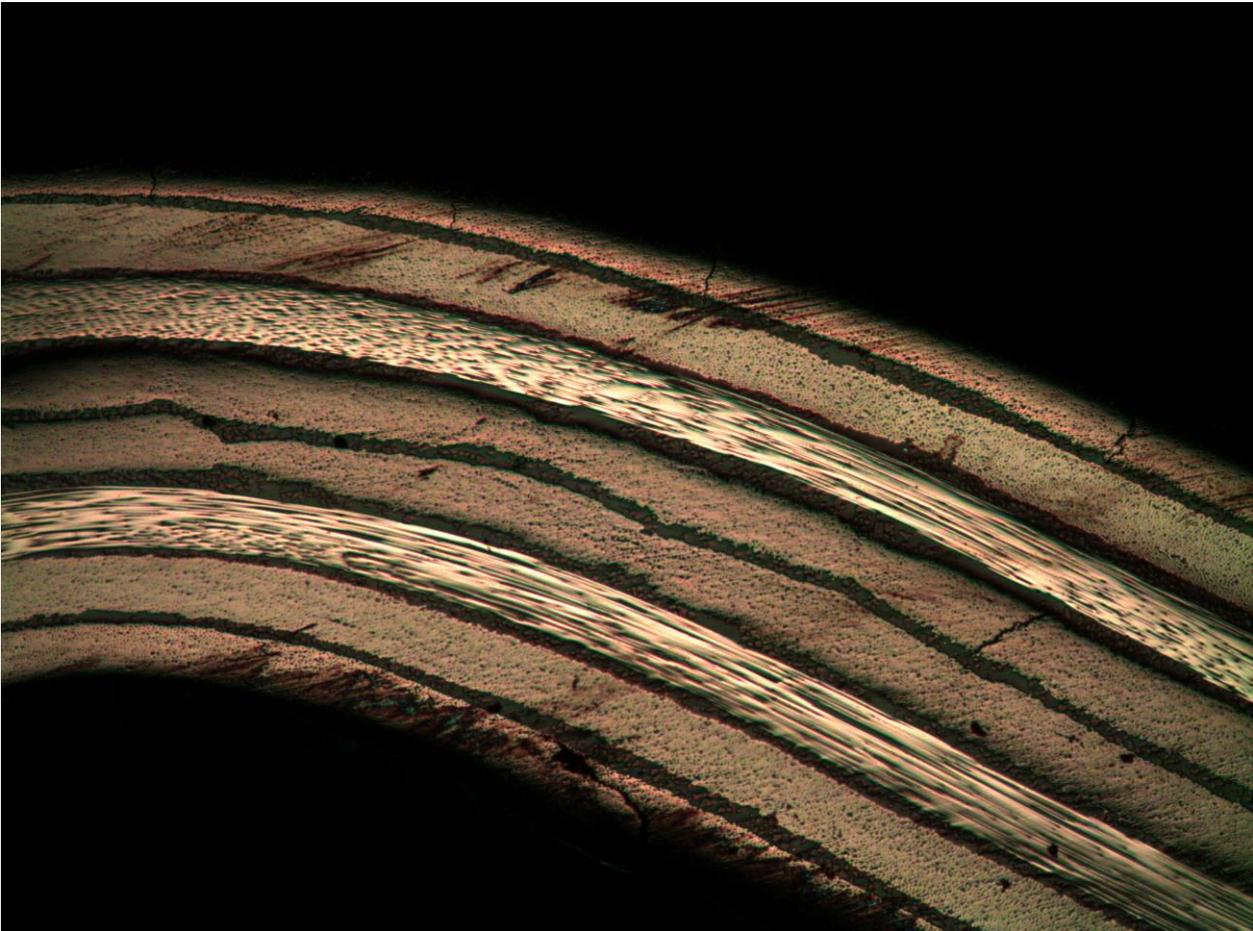


Figura 5.4. Detalle de los numerosos defectos en las capas interior, intermedia, y exterior de la probeta 2 tras ser ensayada de manera no uniforme.

En el resto de las probetas no se han encontrado roturas destacables, por lo que cualquier bajada que se hubiera mostrado en la gráfica no estaría causada por ninguna rotura.

6 CONCLUSIONES

Para concluir este trabajo, merece la pena mencionar en primer lugar, como primera conclusión, la importancia de uniformizar los ensayos y de repetirlos todos exactamente igual para obtener resultados comparables. Depender de tantas variables no es bueno, y menos cuando algunas de ellas son difíciles de tener en cuenta, como pueden ser que se calienten las herramientas y al dilatar se mueva lo más mínimo, pero lo justo para que el ensayo varíe un poco. La configuración de útiles que se use es, como se ha visto, el mayor condicionante que se tiene.

Una de las conclusiones más importantes que sacamos del estudio, y la cual era el objetivo de éste, es que sí es posible modificar el ángulo de una zona de detalle de un rigidizador en omega fabricado en material compuesto. Se ha llegado a valores que rondan el grado y medio de diferencia de ángulo. Teniendo en cuenta que este es el orden de magnitud de las diferencias de ángulo que crea el spring-back, se comprueba que es posible realizar un tratamiento térmico bajo presión adecuada para reducir las tolerancias y evitar problemas durante el ensamblaje.

Otra conclusión importante es la dependencia de la temperatura del ensayo en la curva de relajamiento de carga. A mayor temperatura de ensayo, las probetas relajan más carga que las probetas que se ensayan a menor temperatura. Las probetas ensayadas a 180 °C tienen a relajar algo más de 12 N, las ensayadas a 150 °C, alrededor de 10 N, y las ensayadas a 120 °C, tan solo 2 N.

Sigue siendo una incógnita, sin embargo, cómo las probetas ensayadas a 150 °C, que consiguen relajar mucho más que la probeta ensayada a 120 °C, y sin embargo tener un ángulo final tan parecido entre ellas. Tal vez, como 150 es un valor que ronda la temperatura de transición vítrea de la resina del material, haya fenómenos adicionales que no estemos considerando.

Además, se ha visto cómo para una misma temperatura y diferentes cargas hay una tendencia que aumenta al subir la temperatura. A las piezas que se les impuso un desplazamiento determinado a una fuerza menor relajan más que las piezas a las que se le fijó un desplazamiento a una fuerza mayor. Esto puede ser engañoso, ya que, sabiendo que la carga que relajan las piezas a la misma temperatura tiende a un valor, como para cada ensayo la fuerza a la cual se fija el desplazamiento (fuerza inicial) es diferente, las que partan de cargas mayores tendrán una tendencia menor.

REFERENCIAS

- [1] F. París, J. Cañas, J. Marín y A. Barroso, «Introducción al análisis y diseño con materiales compuestos». *Sección de Publicaciones*, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Universidad de Sevilla.
- [2] F. H. Henninger, «Beitrag zur Entwicklung neuartiger Fertigungsverfahren zur Herstellung von Bauteilen aus kontinuierlichen faserverstärkten Thermoplasten». *Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern*, Kaiserslautern, Fachbereich für Maschinenbau und Verfahrenstechnik (2005).
- [3] M. Hartmann, «A Comprehensive Approach to Carbon Composites Technology: Simulation of process induced deformations (spring-back). *Symposium on the occasion of the 5th anniversary of the Institute for Carbon Composites*. Research Campus Garching, September 11th - 12th (2014).
- [4] Mohd Nazreen bin Mohd Nasir, Mh Adam Seman, Laurent Mezeix, Yulfian Aminanda, Ahmad Rivai and Karim M. Ali, «Effect of the corner angle on spring-back deformation for unidirectional L-shaped laminate composites manufactured through autoclave processing». *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, Vol. 11, No. 1, January 2016, Department of Mechanical Engineering, International Islamic University Malaysia (IIUM), Kuala Lumpur, Malaysia Faculty of Mechanical Engineering, Universiti Teknikal Malaysia Melaka (UTeM), Durian Tunggal, Melaka, Malaysia Aerospace Malaysia Innovation Centre (AMIC), Cyberjaya, Malaysia (2016), 315-318.
- [5] A. Salomi, T. Garstka, K. Potter, A. Greco, A. Maffezzoli, «Spring-in angle as molding distortion for thermoplastic matrix composite». *Composites Science and Technology*, Vol. 68, Issue 14 (2008), 3047-3054.
- [6] B. Engel, J. Brühmann, «Mechanisms and sources of spring-in and spring-back of fiber reinforced thermoplastics». *Shaping the Future by Engineering*, University of Siegen, Chair in forming technology, Paul-Bonatz-Straße 9-11, 57076 Siegen. Vol. 58 (2014), Art. 3.3.18.
- [7] Z. Padovec, V. Stavrovský, H. Chlup, M. Růžička, «Springforward phenomenon of angular sections of composite materials - analytical, numerical and experimental approach», *Bulletin of Mechanics* 7 (26) (2011), pp. 31–36.
- [8] Z. Padovec, V. Stavrovský, H. Chlup, M. Růžička, «Springforward phenomenon of angular sections of composite materials. Analytical, numerical and experimental approach», *Proceedings of the 16th International Conference on Composite Structures*, Porto, University of Porto (2011), pp. 1–2.
- [9] P. Han, J. Butterfield, M. Price, A. Murphy, M. Mullan, «Part form prediction methods for carbon fibre reinforced thermoplastic composite materials». *Proceedings of the 18th International Conference on Composite Materials (ICCM-18)*, Jeju Island, Korea (2011).
- [10] B. Engel, J. Brühmann, «Spring-in characteristics of thermoplastic composites with glass fiber fabric reinforcement». *Proceedings of the 19th International Conference on Composite Materials (ICCM-19)*, Montréal, Canada (2013).
- [11] Z. Padovec, V. Stavrovský, «Springback analysis of thermoplastic composite plates». *Applied and Computational Mechanics* 6, Department of Mechanics, Mechatronics and Biomechanics, CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering, Technická 4, 166 07, Prague, Czech Republic (2012), pp. 25–34.

[12] <https://www.aemac.org/glosario/>, consultado el 9 de junio de 2019.

[13] J. R. Campo, «Estudio de la influencia del estado reológico de los componentes durante el pegado en paneles rigidizados», *Trabajo de Fin de Grado*, Universidad de Sevilla

[14] https://www.hexcel.com/user_area/content_media/raw/HexPly_M21_global_DataSheet.pdf, enlace consultado el 23 de Mayo de 2019.

[15] Adobe Photoshop® CC 2018 Versión de Adobe Photoshop®: 19.1.4

[16] J. M. González, «Study of the Unfolding of Curved Composite Laminates», *PhD Thesis*, Universidad de Sevilla.