

Capítulo 3

FABRICACIÓN DE LOS ESPECÍMENES

3.1 Introducción

En el presente capítulo se llevará a cabo una descripción del proceso seguido para la fabricación de los especímenes necesarios para la realización de los ensayos de fatiga y se describirán las características de los laminados realizados.

Además se presentarán las características de los materiales empleados, así como de los útiles necesarios para llevar a cabo cada uno de los subprocesos necesarios para la obtención de las probetas.

Como ya se ha comentado anteriormente se pretende estudiar el comportamiento a fatiga de laminados de tejido de fibra de carbono / resina epoxi en función de la orientación del refuerzo. Es por ello necesario realizar dos tipos diferentes de probetas: un primer tipo de probetas con la orientación del refuerzo en la dirección de la carga, esto es $0/90^\circ$ (para los ensayos on-axis); y un segundo tipo de probetas con la dirección del refuerzo a $45/-45^\circ$ con respecto a la dirección de la carga (para los ensayos off-axis). Es preciso señalar que, al tratarse de un tejido, el refuerzo fibroso se encuentra entrelazado en dos direcciones perpendiculares, por lo que realmente en las probetas a 0° el refuerzo también se encuentra en la dirección 90° ; asimismo en las probetas a 45° el refuerzo también se encuentra en la dirección -45° . En principio las características resistentes del tejido son iguales en ambas direcciones, por lo que serán tratadas indistintamente.

En los siguientes apartados se explicará detalladamente:

- Materiales empleados: material base para el ensayo (tejido pre-preg de fibra de carbono / resina epoxi) y materiales auxiliares para la fabricación de las probetas (fibra de vidrio para tacones y materiales necesarios en cada una de las fases de fabricación: adhesivos, cintas adhesivas, etc.). Se explicarán las características y propiedades de dichos materiales, su forma de suministro y las condiciones y recomendaciones necesarias para su uso.
- Dimensionamiento de los paneles a fabricar y número de probetas necesarias para los ensayos estáticos y dinámicos a realizar.
- Fases del proceso de fabricación: corte de las láminas de tejido, apilado de dichas láminas y curado en autoclave del laminado resultante. Se detallarán asimismo los útiles y herramientas necesarios para cada una de las fases.
- Preparación de las probetas: pegado de los tacones de fibra de vidrio y corte y preparación de las probetas.

3.2 Material

El material empleado y objeto de estudio del presente proyecto es un tejido de fibra de carbono pre-impregnado con resina epoxi. El fabricante de dicho tejido es *Hexcel Corporation* y su designación es: AW 193 PW/8552.

La forma de suministro del material es en un rollo de tejido, estando éste protegido por un film adhesivo de polietileno que evita que el material quede adherido y lo protege frente al desgaste hasta el momento necesario de su uso. En la imagen de la figura 3.1 podemos observar el citado rollo de tejido de fibra de carbono pre-impregnado.



Figura 3.1: Rollo de tejido pre-preg empleado en la fabricación de las probetas

3.2.1 Características del material

Fibra

- Designación: AS4,3K.
- Fabricante: Hexcel Carbon Fibers (USA).
- Configuración: Fibra de grafito, 3000 filamentos.
- Densidad: $1,78 \pm 0,05 \text{ g/cm}^3$.
- Longitud por unidad de peso: $4,67 \pm 0,23 \text{ m/g}$.

- Resistencia a tracción: 3100 MPa mínimo.
- Módulo elástico a tracción: 220-240 GPa
- Alargamiento a rotura: 1,28% mínimo.

Tejido

- Designación: AW 193 P.
- Configuración: Tafetán (no poroso).
- Urdidumbre: $4,5 \pm 0,2$ hilos/cm.
- Espesor nominal: 0,178 mm.
- Peso superficial: 193 ± 8 g/m².

Resina

- Designación: Hexcel 8552.
- Fabricante: Hexcel Composites (España).
- Naturaleza: Epoxi modificada, curado 180°.
- Densidad: 1,30 g/cm³.

Preimpregnado

- Designación: AW 193 PW/8552.
- Fabricante: Hexcel Composites (España).
- Configuración: tejido plano estilo 3K-70-PW (Plain Woven).
- Anchura: 1067 ± 25 mm.
- Papel soporte: Akrosil-Europe BL120g GL SILOX G1H/G7J.

3.2.2 Requisitos del material pre-impregnado

Como ya se ha comentado en el capítulo anterior, el proceso clave en el curado de la resina es la polimerización. Esta polimerización puede ocurrir a temperatura ambiente y aunque se trata de un proceso muy lento puede afectar a las propiedades nominales del tejido pre-preg. Se trata por tanto de lo que podemos denominar un “material vivo”. Es por eso que este tipo de material tiene unas condiciones especiales de almacenaje y tiempo de vida. Dichas condiciones se encuentran determinadas por el fabricante y se detallan a continuación:

- El tiempo máximo de almacenaje será de 1 año a -18°C máximo a partir de la fecha de fabricación. El material debe recibirse, como máximo, 2 meses después de su fecha de fabricación.
- El tiempo máximo de exposición al ambiente en la zona de apilado (“*lay up*”), en continuo o en intervalos acumulativos, será el siguiente
 - o 240 horas hasta terminar el apilado.
 - o 500 horas hasta el comienzo del ciclo de curado.

3.3 Fabricación de los laminados

3.3.1 Dimensionamiento de los paneles a fabricar

El objetivo a llevar a cabo es realizar dos tipos de probetas, un grupo de probetas con la orientación del refuerzo a 0/90° para los ensayos on-axis, y otro tipo de probetas con la orientación del refuerzo a 45/-45° para los ensayos off-axis. Se deberán fabricar, por tanto, dos tipos distintos de paneles.

El número de especímenes necesarios, sin tener en cuenta probetas fallidas durante los ensayos se ha establecido en 12 probetas para cada orientación y para cada frecuencia de ensayo. Por lo tanto necesitamos 24 probetas para ensayos on-axis y 24 probetas para ensayos off-axis. Este número nos garantiza tener resultados suficientes para cada nivel de carga y para cada frecuencia.

Las dimensiones de las probetas deben garantizar que se cumplen las recomendaciones de las siguientes normativas: *ASTM D 3039 (Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials)* [16] para los ensayos estáticos y *ASTM D 3479 (Standard test method for tension-tension fatigue of polymer matrix composite materials)* [17] para los ensayos dinámicos.

Debido a la similitud de recomendaciones en cuanto al dimensionamiento de las probetas según ambas normativas, se toma la decisión de dimensionar las probetas de igual forma para los ensayos estáticos y dinámicos. En la figura 3.2 tenemos las recomendaciones para la geometría de las probetas.

TABLE 1 Tensile Specimen Geometry Requirements

Parameter	Requirement
Coupon Requirements:	
shape	constant rectangular cross-section
minimum length	gripping + 2 times width + gage length
specimen width	as needed ^A
specimen width tolerance	±1 % of width
specimen thickness	as needed
specimen thickness tolerance	±4 % of thickness
specimen flatness	flat with light finger pressure
Tab Requirements (if used):	
tab material	as needed
fiber orientation (composite tabs)	as needed
tab thickness	as needed
tab thickness variation between tabs	±1 % tab thickness
tab bevel angle	5 to 90°, inclusive
tab step at bevel to specimen	feathered without damaging specimen

Figura 3.2: Requisitos en la geometría de las probetas [16].

El empleo de tacones es muy recomendable para evitar el deslizamiento de las probetas en la máquina de ensayos y para garantizar que la rotura se produce dentro de la zona libre de la probeta destinada para ello. La longitud de las mordazas de la máquina de ensayos es de 50 mm por lo que se toma la decisión de fabricar los tacones con esta longitud.

La longitud de las probetas será por tanto de 200 mm para garantizar que la zona libre donde se desea que se produzca la rotura del material sea de 100 mm.

Según los resultados de ensayos previos realizados con la misma máquina de ensayos para materiales compuestos de fibra de carbono, y siguiendo las recomendaciones de las normativas citadas, el ancho de las probetas debe encontrarse entre 10 y 15 mm. Se toma la decisión de que las probetas tendrán un ancho de 14 mm.

Los paneles a fabricar constarán de 6 láminas de tejido pre-impregnado, lo cual supone un espesor de aproximadamente 1,35 mm.

Por lo tanto, los especímenes a ensayar tendrán las dimensiones mostradas en la figura 3.3.

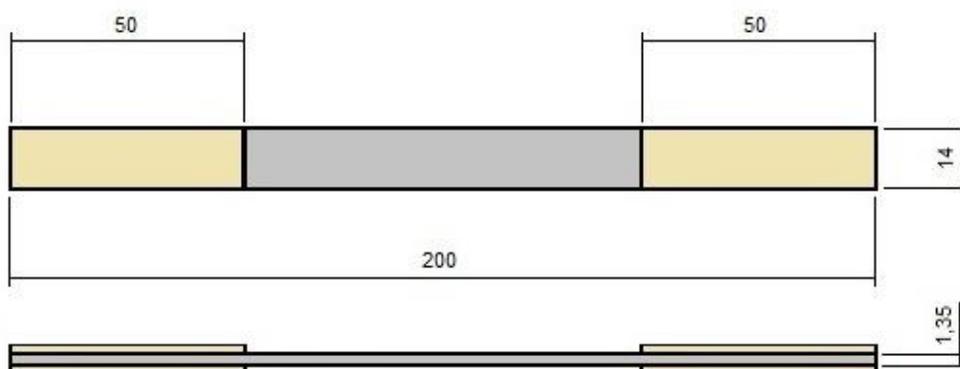


Figura 3.3: Dimensiones de las probetas a fabricar.

Para obtener estas probetas es necesario realizar paneles sobredimensionados, ya que debemos tener en cuenta el mecanizado necesario debido a los posibles defectos de borde que podemos encontrar tras el curado de los paneles. Por lo tanto los paneles a fabricar serán los siguientes:

- Dos paneles con orientación 0/90° de dimensiones 230 x 300 (mm) x 6 láminas.
- Dos paneles con orientación 45/-45° de dimensiones 230 x 300 (mm) x 6 láminas.

3.3.2 Fabricación de los paneles

Todos los procesos necesarios para la fabricación de los paneles de fibra de carbono han sido llevados a cabo en la Laboratorio de Elasticidad y Resistencia de Materiales (LERM) de la Escuela Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla. La fabricación de los paneles

consta principalmente de dos tareas: en primer lugar corte y apilado de las láminas y a continuación el curado del panel en autoclave.

3.3.2.1 Proceso de apilado

Tanto para el corte de las láminas como para su posterior apilado se emplearán métodos manuales. Como ya se ha comentado anteriormente, la manipulación del pre-preg de tejido de fibra de carbono debe llevarse a cabo bajo un control de temperatura y condiciones ambientales (contaminación, humedad y presión diferencial). Es por ello que las tareas de corte, manipulación y apilado de las láminas se llevarán a cabo en lo que habitualmente se conoce como *sala limpia*. Las condiciones ambientales de dicha sala se encuentran en todo momento controladas, y son las siguientes [18]:

- Con el objeto de evitar contaminaciones del exterior se mantendrá una sobrepresión mínima de 1mm de H₂O que será controlada mediante un medidor de presión diferencial. Asimismo una doble puerta de tipo esclusa será obligatoria en todas aquellas puertas con salida a calle directa.
- Se controlará la concentración de partículas (el menos mensualmente) en suspensión de un tamaño superior a 5 μ . La concentración de estas partículas no debe superar en ningún caso 50 partículas por litro de aire.
- Se dispondrá de un sistema de control - registro que asegure las condiciones ambientales en cuanto a temperatura y humedad se refiere de acuerdo con la figura 3.4. El tiempo máximo de permanencia de los materiales preimpregnados y adhesivos en condiciones límite de trabajo será de 24 horas en continuo o 36 horas en períodos acumulativos en un intervalo de 72 horas.

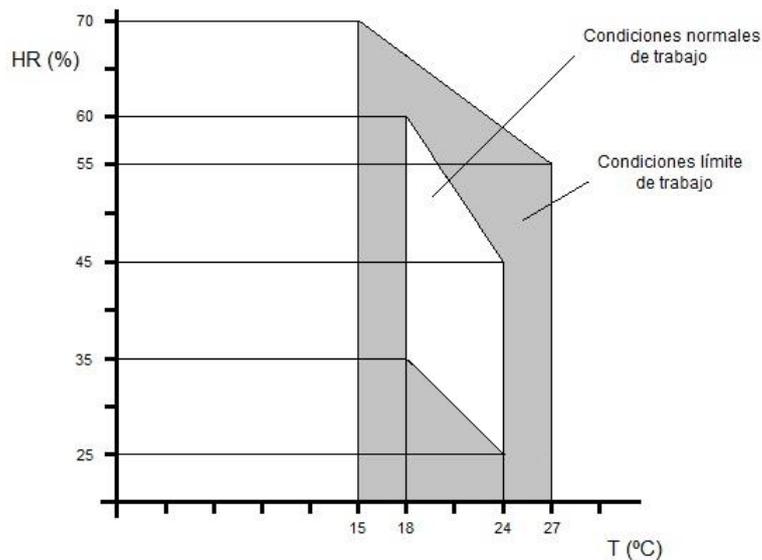


Figura 3.4: Condiciones de trabajo en *sala limpia*

El primer paso a llevar a cabo es el corte de las láminas de tejido. Es muy importante asegurar que la orientación del refuerzo es la correcta. Para ello se emplean instrumentos como regla y escuadra y se toma como referencia el orillo del tejido (en los rollos de tejido normalmente se encuentran señaladas las dos direcciones del refuerzo con unos hilos finos de un color distinto a la fibra de carbono). Este hilo situado en el extremo lateral del rollo nos sirve como referencia de la dirección del refuerzo. Gracias al papel protector del tejido podemos trazar sobre él las láminas a cortar empleando un marcador.

Se trazan y cortan 12 láminas con orientación 0° (90°) y otras 12 láminas con orientación 45° (-45°) con las medidas especificadas en la fase de diseño. Para realizar los cortes se emplea un cúter y una regla metálica sobre la que se desplaza la cuchilla asegurando la rectitud del corte. En la figura 3.5 podemos apreciar parte del proceso de trazado y un detalle del orillo del tejido.



Figura 3.5: Trazado de las láminas y detalle del orillo del rollo de pre-preg.

Una vez que todas las láminas se encuentran cortadas se procede a su apilado y compactación. En este proceso debemos asegurar dos condiciones: la correcta alineación de cada una de las láminas y la ausencia de burbujas de aire entre ellas. Para evitar que la primera lámina se quede adherida a la mesa de trabajo y se pueda deteriorar se mantiene la primera capa de papel protector. Sobre esta primera lámina, y ayudándonos de un tope en forma de escuadra a modo de molde, colocamos la segunda lámina. Manteniendo la capa de papel protector procedemos a compactar el conjunto ayudándonos de una espátula de nilón y presionando en la dirección del refuerzo. Retiramos la protección y apilamos y compactamos la siguiente lámina de tejido siguiendo las mismas directrices. Repetimos el proceso hasta completar las 6 láminas de las que consta cada panel. Para asegurar la correcta conservación del conjunto mantenemos la última capa de papel protector, tal y como hicimos con la primera. En la figura 3.6 podemos observar parte de este subproceso.



Figura 3.6: Proceso de apilado.

3.3.2.2 Proceso de curado en autoclave

Una vez que se encuentran las láminas de cada panel apiladas correctamente procedemos al curado de los laminados en el autoclave. Como ya se comentó en el apartado sobre materiales compuestos del capítulo 2, el curado implica la aplicación de calor y presión para que se produzca la polimerización de la resina. Al tratarse de paneles planos, se podría emplear una prensa de platos calientes, pero el curado en autoclave ofrece un mejor acabado con menor porosidad y un curado más uniforme de la resina. Sin embargo, el ciclo de curado en el autoclave presenta como desventaja un tiempo de proceso mayor. En la figura 3.7 podemos apreciar el esquema básico de un autoclave.

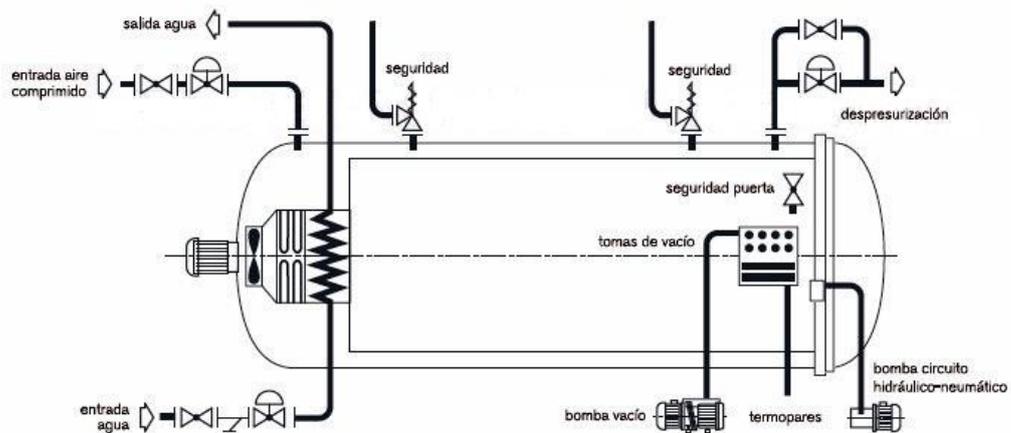


Figura 3.7: Esquema básico de un autoclave.

Para la correcta aplicación de la presión en el autoclave es necesario un proceso previo de preparación de lo que comúnmente se denomina *bolsa de vacío* en la que se introduce el laminado a curar. Dicha *bolsa de vacío* tiene una doble finalidad de vital importancia para el éxito del proceso de curado. Por un lado la *bolsa de vacío* posibilita la homogeneización del vacío en todos los puntos de la pieza a curar, eliminando el aire entre las capas del laminado. Además, dicha bolsa realiza la función de sellado hermético, impidiendo contacto alguno entre la pieza y el aire del interior del autoclave. Este punto es importante ya que este contacto podría desencadenar reacciones de oxidación peligrosas para la integridad de la pieza. A continuación se detalla el proceso de preparación de la *bolsa de vacío*.

Preparación de la bolsa de vacío

En primer lugar empleamos una plancha metálica como base para la *bolsa de vacío*, que a la vez sirve de soporte para introducir el conjunto en el autoclave. Dicha plancha es el molde de nuestro laminado, ya que se trata de un laminado plano. Sobre esta plancha colocamos una capa de teflón para evitar que el laminado quede adherido a ella durante el proceso de curado. Fijamos la capa de teflón con cinta adhesiva de alta temperatura. Es importante asegurar que no existan arrugas en la capa de teflón ya que estas pueden transmitirse al panel curado, lo cual es un foco de posibles defectos.



Figura 3.8: Preparación de la *bolsa de vacío*. Paso 1.

Sobre la capa de teflón posicionamos los paneles de material compuesto y colocamos unas tiras autoadhesivas de corcho que actúan como tope para evitar que la resina fluya fuera del panel durante el curado (figura 3.9). Sobre el panel colocamos otra capa de teflón para asegurar que el panel tampoco se adhiere a la parte superior de la bolsa.



Figura 3.9: Preparación de la *bolsa de vacío*. Paso 2.

A continuación colocamos una capa de material esponjoso denominado tejido aireador (*air weave*). Este tejido permite una mejor distribución del vacío en todo el conjunto de la bolsa. Además de dicha capa, colocamos una pequeña capa adicional en el lugar donde vamos a ubicar las tomas de vacío, tal como podemos apreciar en la figura 3.10.



Figura 3.10: Preparación de la *bolsa de vacío*. Paso 3.

Posteriormente procedemos al sellado de la bolsa. Para ello colocamos una capa de plástico de bolsa y la fijamos al conjunto empleando una cinta de cromato de cinc, especial

para el empleo a elevadas temperaturas y presiones. A continuación colocamos las tomas de vacío y procedemos a aplicar el vacío. En este punto del proceso es importante asegurar que no existen entradas de aire. Para ello nos ayudamos de una espátula y eliminamos cualquier posible arruga en el sellante que pudiera ser objeto de entrada de aire. Podemos apreciar este proceso en la figura 3.11:

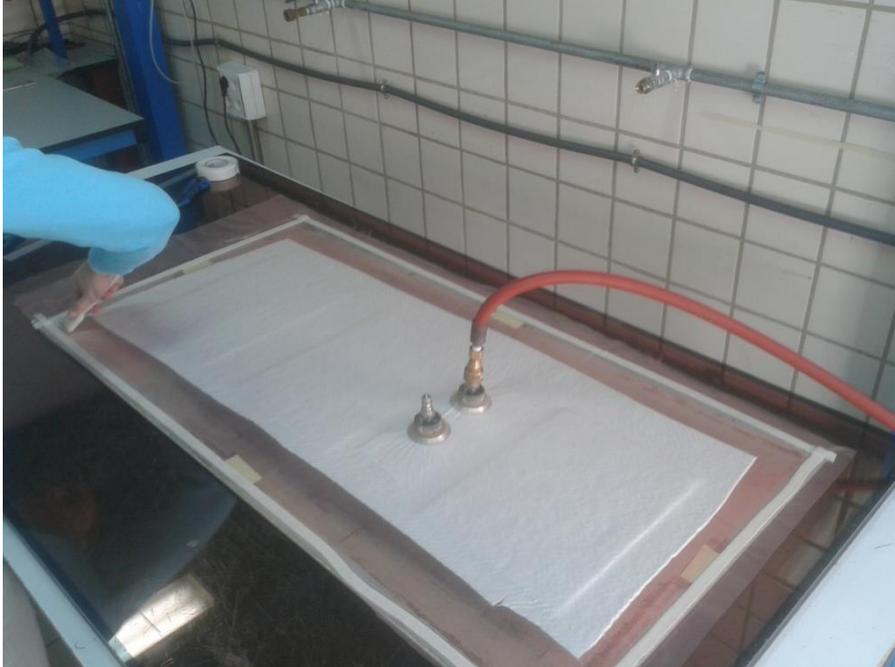


Figura 3.11: Preparación de la *bolsa de vacío*. Pasos 4 y 5.

Una vez que hemos comprobado que no se producen entradas de aire la bolsa de vacío se encuentra finalizada y lista para ser introducida en el autoclave. El resultado queda ilustrado en la figura 3.12:



Figura 3.12: *Bolsa de vacío* finalizada.

Curado en autoclave

Como ya ha sido comentado anteriormente el curado en autoclave es necesario para la polimerización de la resina epoxi. El autoclave es básicamente un dispositivo que consiste en una cámara presurizada donde se controla la temperatura y presión necesaria para el ciclo de curado. Para la obtención de los paneles por curado en autoclave, además de la cámara presurizada y los dispositivos de calentamiento y control de la temperatura, se necesita un sistema para la aplicación de vacío. Este es uno de los componentes más importantes en este tipo de autoclaves, ya que se encarga de la compactación del laminado, asegurando la calidad requerida en los paneles.

El ciclo de curado, es decir, la evolución temporal de temperatura y presión necesarias, depende únicamente de la resina empleada y su cantidad en el tejido pre-impregnado. Dicho ciclo viene determinado por el fabricante del material y consta de una rampa de subida de temperatura y presión, un tramo de mantenimiento de dichas variables, y por último un tramo de enfriamiento y despresurización. El ciclo teórico a aplicar queda definido como sigue:

- Vacío de la bolsa: aplicar vacío hasta una presión (dentro de la bolsa) entre 0.10 y 0.20 bares.
- Presión del autoclave: 6_{-0}^{+1} bar
- Velocidad de calentamiento: $1 - 3 \text{ }^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$
- Temperatura de curado: $100 \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$
- Tiempo de curado: $120 - 135 \text{ minutos}$
- Velocidad de enfriamiento: $3^{\circ}\text{C}/\text{minuto máx. hasta alcanzar } 60^{\circ}\text{C}$

Para introducir la bolsa de vacío en el interior del autoclave utilizamos una estructura auxiliar en forma de carro. A continuación conectamos las tomas de vacío y cerramos el autoclave, asegurando su cierre. Por último se programa el ciclo de curado y se procede a su ejecución. En las imágenes de la figura 3.13 podemos observar el proceso mencionado.



Figura 3.13: Colocación de la *bolsa de vacío* en el autoclave

Una vez que ha finalizado el ciclo dejamos que se enfríe el conjunto para poder retirarlo. Ya simplemente queda retirar el laminado de la bolsa de vacío y estará dispuesto para ser procesado.

CAPÍTULO 3. FABRICACIÓN DE LOS ESPECÍMENES.

Gracias al *software* propio del autoclave podemos obtener los datos reales del ciclo aplicado y comprobar si estos difieren de las indicaciones descritas anteriormente. El ciclo real aplicado en el autoclave se puede observar en la figura 3.14, pudiéndose comprobar que las condiciones de temperatura, presión y control de vacío se han aplicado de forma satisfactoria.

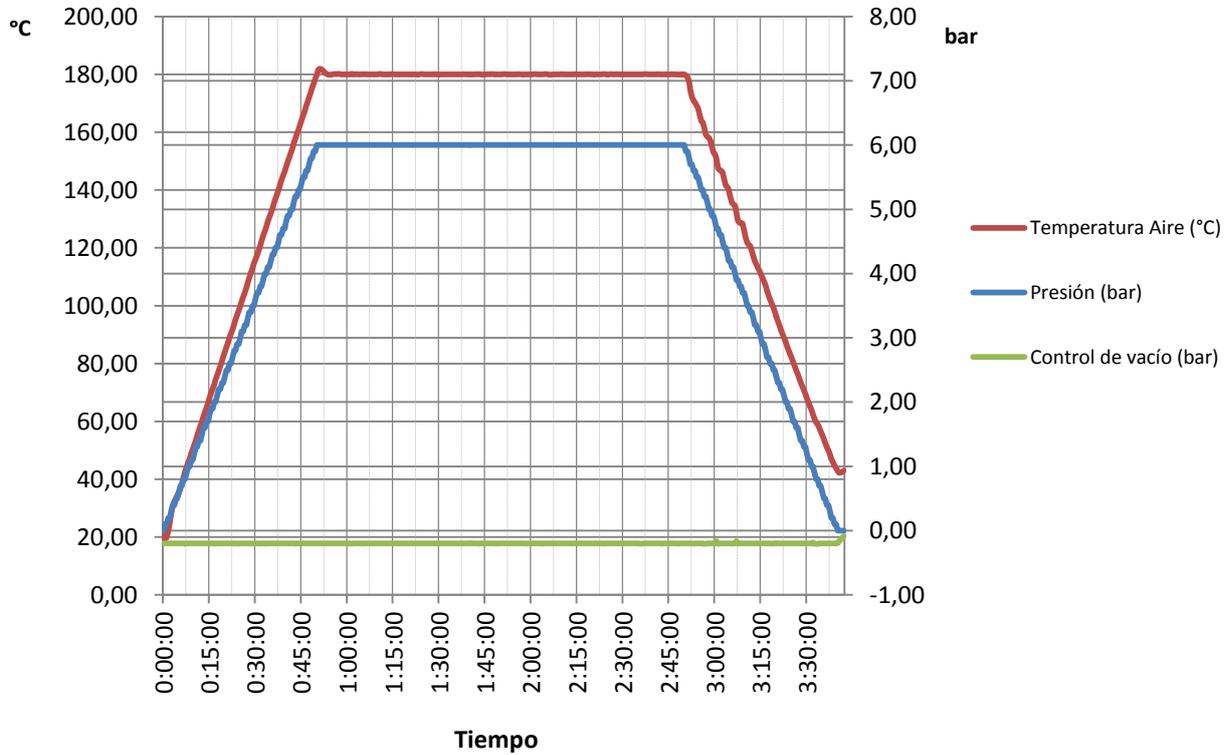


Figura 3.14: Ciclo real de curado aplicado en el autoclave.

3.4 Preparación de las probetas

Una vez que hemos obtenido los paneles tras su curado, estos deben ser procesados para obtener las probetas según el diseño desarrollado. Las tareas necesarias son las siguientes: pegado de tacones de fibra de vidrio a los paneles y corte de cada una de las probetas.

3.4.1 Pegado de tacones de fibra de vidrio

En primer lugar debemos eliminar las cintas de corcho colocadas en la fase previa al curado. Estas cintas, al estar impregnadas de resina proveniente de los laminados de material compuesto, han polimerizado quedando ambas superficies unidas, por lo que su despegue manual es dificultoso. Puesto que posteriormente los paneles serán mecanizados no necesitamos un preciso control dimensional de los bordes, por lo que para retirar las cintas de corcho podemos emplear simplemente un cúter.

Se colocarán tacones de fibra de vidrio a los cuatro paneles fabricados que ayudarán a la adherencia de las probetas con las mordazas y evitarán la posibilidad que la rotura de los especímenes se produzca en la zona de material que está agarrada por las mordazas de la máquina de ensayos. Los tacones podrían ser aplicados a cada probeta de forma individual, pero por precisión y rapidez del proceso se toma la determinación de aplicar dichos tacones sobre cada panel al completo y posteriormente mecanizar y obtener cada probeta con los tacones ya adheridos.

El primer paso a llevar a cabo es cortar los tacones de fibra de vidrio. Serán 8 tacones por cada panel, dos por cada cara y extremo del panel. Las dimensiones de dichos tacones serán las descritas en la fase de diseño con un pequeño margen de exceso ya que posteriormente el conjunto panel-tacones será mecanizado para obtener las probetas. Los paneles de fibra de vidrio se encuentran ya curados y preparados en el LERM, por lo que simplemente necesitamos cortarlos con las dimensiones requeridas. Para el corte de fibra de vidrio empleamos un disco de corte de polvo de diamante colocado sobre la máquina de corte, que podemos apreciar en la figura 3.15, ubicada en el taller del Laboratorio de Elasticidad y Resistencia de Materiales. Dicha máquina de corte será también empleada para cortar los paneles de fibra de carbono.



Figura 3.15: Máquina de corte.

Una vez tenemos los tacones cortados, debemos cortar las tiras de adhesivo con las mismas dimensiones que dichos tacones. El adhesivo empleado es un adhesivo con base epoxi, cuya denominación es Z-15429. En la figura 3.16 podemos observar el adhesivo empleado (cubierto por una película protectora) y el panel de fibra de vidrio.

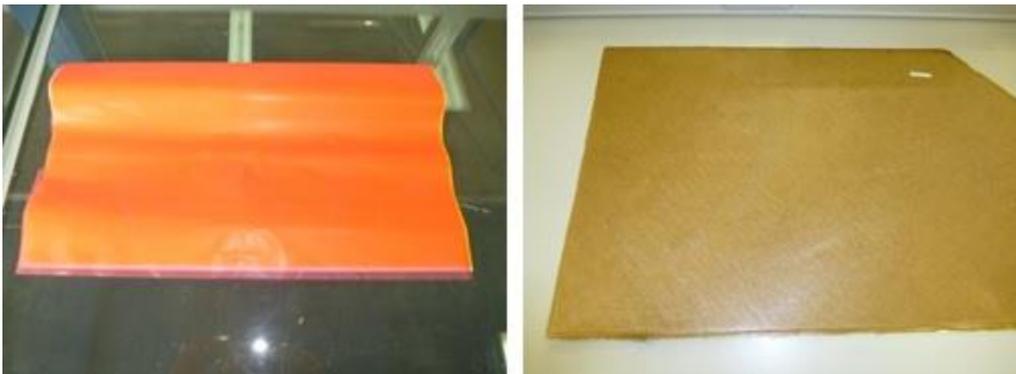


Figura 3.16: Adhesivo empleado y panel de fibra de vidrio para los tacones.

Con el objetivo de evitar que los tacones resbalen sobre el panel de fibra de carbono se debe lijar la superficie sobre la que se aplicará el adhesivo tanto en los tacos de fibra de vidrio como en el panel de fibra de carbono. Posteriormente, para eliminar los residuos resultantes del lijado, se deben limpiar todas las superficies con acetona. A continuación se colocan los tacos junto con las tiras de adhesivo en su lugar correspondiente como podemos apreciar en la figura 3.17.



Figura 3.17: Colocación de los tacones de fibra de vidrio.

Para que el adhesivo actúe correctamente quedando los tacones de fibra de vidrio adheridos al panel de tejido de fibra de carbono es preciso someterlo a presión y temperatura, es decir, el adhesivo debe ser curado. Para ello emplearemos una prensa de platos calientes. Dicho dispositivo consta de dos planchas de metal, una de ellas fija y la otra móvil, que ejercen presión al material a curar y que a su vez transmiten el calor por conducción gracias a las resistencias eléctricas que poseen en su interior. Esto permite que se pueda aplicar el ciclo de curado a través del control de la fuerza que ejercen las planchas y de la temperatura a la que éstas se encuentran. El ciclo de curado necesario para el adhesivo empleado es el siguiente:

- Rampa de subida: en un tiempo de 30 minutos, la presión debe pasar de 0 a 2,8 bar y la temperatura debe pasar de 25 a 115°C.
- Condiciones de curado: durante un tiempo de 90 minutos, la presión debe mantenerse a 2,8 bar y la temperatura debe permanecer a 115°C.
- Rampa de bajada: en un tiempo de 30 minutos, la presión debe pasar de 2,8 a 0 bar y la temperatura debe pasar de 115 a 25°C.

Puesto que en la prensa de platos calientes no se puede programar la presión, sino la fuerza ejercida por las planchas, es necesario traducir el valor recomendado de presión a aplicar, teniendo en cuenta para ello la superficie de los tacones.

En la figura 3.18 podemos apreciar el proceso de curado del adhesivo de cada panel por separado en la prensa de platos calientes y por último en la figura 3.19 tenemos el resultado obtenido.

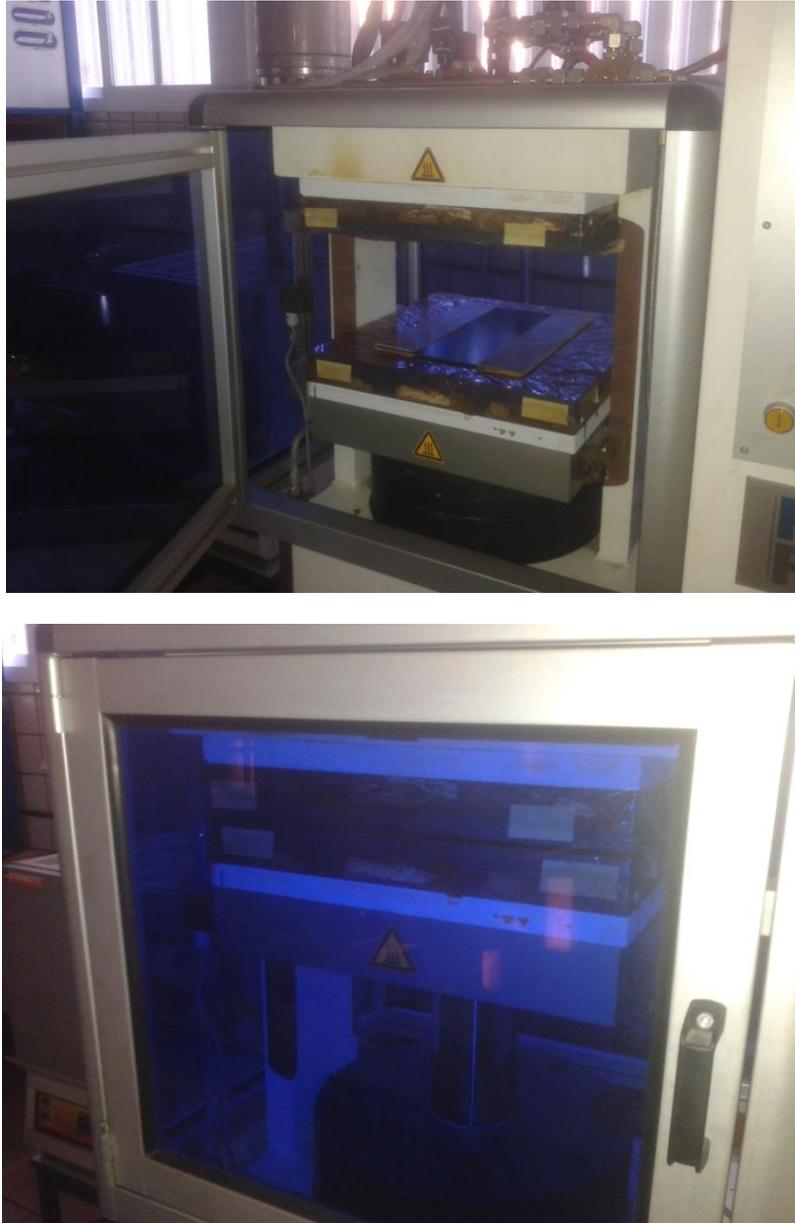


Figura 3.18: Curado del adhesivo de los tacones en prensa de platos calientes.



Figura 3.19: Resultado tras aplicación de los tacones de fibra de vidrio.

3.4.2 Corte de las probetas

Como podemos observar en la figura 3.19, el adhesivo ha rebosado por los bordes del panel. Esto no supone un excesivo problema ya que los bordes del panel van a ser mecanizados antes de proceder con el corte de las probetas. La máquina de corte a emplear es la definida anteriormente (figura 3.15) que consta de un disco de diamante y se encuentra refrigerada con agua para extraer el polvo originado. Para llevar a cabo un corte preciso la máquina de corte cuenta con un calibre y un tope desde el cual podemos medir con exactitud el ancho que se va a cortar para obtener las medidas deseadas. El resultado tras efectuar el corte es el siguiente; en la figura 3.20 podemos apreciar dos probetas del panel con orientación del refuerzo a $0/90^\circ$ y dos probetas del panel con orientación del refuerzo a $45/45^\circ$.

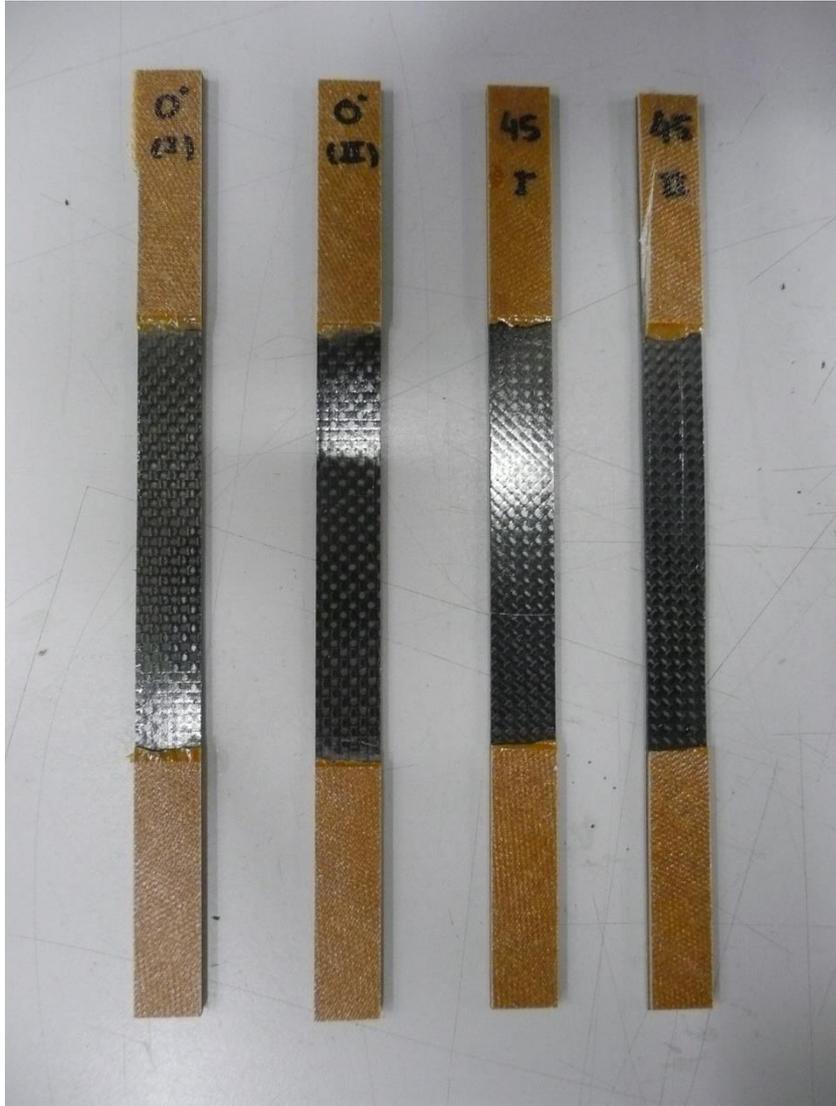


Figura 3.20: Probetas fabricadas con refuerzo a 0/90° y con refuerzo a 45/-45°.