

CAPÍTULO 4

FABRICACIÓN Y PREPARACIÓN DE ESPECÍMENES

4.1.- INTRODUCCIÓN.

El presente proyecto consiste, como bien es sabido, en la realización de ensayos en configuración de flexión para probar a fatiga en tracción-compresión tejidos de material compuesto de fibra de Carbono y matriz Epoxi.

En un tejido de material compuesto las fibras se encuentran dispuestas perpendicularmente entre ellas. La tipología de probetas necesaria es rectangular y de tal forma que las fibras estén orientadas a 0º y a 90º respectivamente de la dirección principal longitudinal, es decir, del largo de la probeta.

La referencia del material a emplear es **Z19760**:

- La **fibra** existente en este material tiene como designación **AS4,3K**, y es una fibra de grafito que consta de alrededor de 3000 filamentos, con densidad de 1,78 +- 0.05 gr/cm³, resistencia a tracción 3100 MPa mínimo, módulo elástico entre 220 y 240 Gpa y límite inferior del alargamiento a rotura de 1,28%.

- El **tejido** es designado como **AW193P**, con trama y urdimbre con 4,5+-0,2 hilos/cm, espesor nominal igual a 0,178 mm y peso superficial de 193+-8 gr/m².

- La **resina** es **Hexcel 8552**, de densidad 1,30 gr/cm³.

Más características del material así como propiedades físicas, químicas y mecánicas del laminado pueden encontrarse en la ficha técnica.

En la figura 4.1 podemos ver el prepreg dispuesto para llevar a cabo el corte de las láminas.



Figura 4.1: Muestra del prepreg sobre el que se realizó el corte de las capas del laminado.

En este apartado serán descritos todos los pasos en el proceso de fabricación de los especímenes, desde la construcción del laminado al curado de éstos y al corte y a la preparación de las probetas.

4.2.- FASE DE DISEÑO DEL PROCESO DE FABRICACIÓN.

Hay que tener en cuenta que el objetivo principal es encontrar unos resultados fiables y coherentes, y por tanto el número de probetas debe ser tal que cuando la dispersión sea excesivamente alta puedan ensayarse algunas más para una mayor validez. En principio deberían bastar 8 probetas para cada tipo de ensayo de fatiga, tanto para el caso articulado como para el empotrado.

Lo que se pensó en primer lugar era hacer un panel de 23 cm x 30 cm, y extraer un total de 20 probetas de dimensiones 1 cm x 20 cm. La mitad serían destinadas a ensayos de flexión y la otra mitad, quizás, a ensayos de tracción-compresión axial. A los pocos días se pensó que sería más apropiado realizar los dos tipos de ensayo de flexión comentados, con lo cual se descartaría el ensayo axial. Hay que destacar que en el curado se pueden originar rebabas debido al rebose de la resina, por lo que no está de más sobredimensionar la superficie útil para luego eliminar zonas defectuosas.

Con respecto al ancho de las probetas, se llegó a la conclusión, como hemos indicado anteriormente, que debería ser el mayor permitido por la distancia entre los tornillos de los apoyos. Esto con el fin de que la carga última fuera la mayor posible y adaptarnos mejor al elevado rango de la máquina de ensayos dinámicos (100 KN). Por tanto se estimó conveniente un ancho de 25 mm.

El espesor en su origen iba a ser el correspondiente a 8 láminas, pero se decidió finalmente que sería propicio añadir algunas más. Se colocaron al final un total de 11, que dio un espesor medio del laminado una vez curado de 2.30 mm. Con esto se conseguiría una mayor carga última y al mismo tiempo asegurar la probeta en el proceso de manipulación previo al ensayo.

Con respecto a la longitud, que se había pensado que fuera de 200 mm, también hubo cambios. La distancia entre apoyos sería de 50 mm, como ya hemos indicado, por lo que una longitud de 100 mm sería suficiente. Realmente el parámetro determinante era la distancia entre apoyos, no lo largo que fuera el espécimen.

Del primer panel se sacaron un total de 18 probetas. Al ser necesario un mayor número, ya que se pensó así mismo en hacer ensayos simples de flexión en tres puntos para comparar las gráficas, se realizaría posteriormente otro panel.

4.3.- FASE DE FABRICACIÓN DEL LAMINADO.

4.3.1.- Panel nº 1.

Se empezaron a cortar piezas de prepreg con las dimensiones indicadas, 23 cm x 30 cm. Hubo que tener cuidado con las zonas más arrugadas del rollo, que daban lugar a grandes desviaciones en la disposición de las fibras. Una vez cortadas se llevaría a cabo el apilado de las láminas. Se les iba quitando sucesivamente la capa protectora adherida y se les iba pegando la lámina posterior. Una vez pegada cada lámina se aplicaba presión con una espátula para eliminar el mayor número posible de poros de aire existentes. Al tratarse de un tejido y de láminas rectangulares no hubo demasiada complicación a la hora de apilar, aunque se buscó que los bordes coincidieran en el mayor grado posible.



Figura 4.2: Eliminación de la capa protectora adhesiva durante el proceso de apilado.

Este procedimiento se llevó a cabo a una temperatura de 23°C. El material se encontraba en el congelador a -18°C, donde el tiempo de almacenaje máximo es de 1 año. Del congelador hay que sacarlo y dejarlo un rato fuera a temperatura ambiente antes de manipularlo. Suele aguantar sin perder propiedades alrededor de 10 días fuera.

El lugar donde se fabricó el laminado es conocido como “sala limpia”, y es una habitación con control de temperatura, presión y número de partículas. Las condiciones ambientales de dicha sala se encuentran en todo momento controladas y son las siguientes [17]:

- Con el objeto de evitar contaminaciones del exterior se mantendrá una sobrepresión mínima 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 (al menos mensualmente) en suspensión de un tamaño superior a 5μ . 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 4.3. 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 periodos acumulativos en un intervalo de 72 horas.

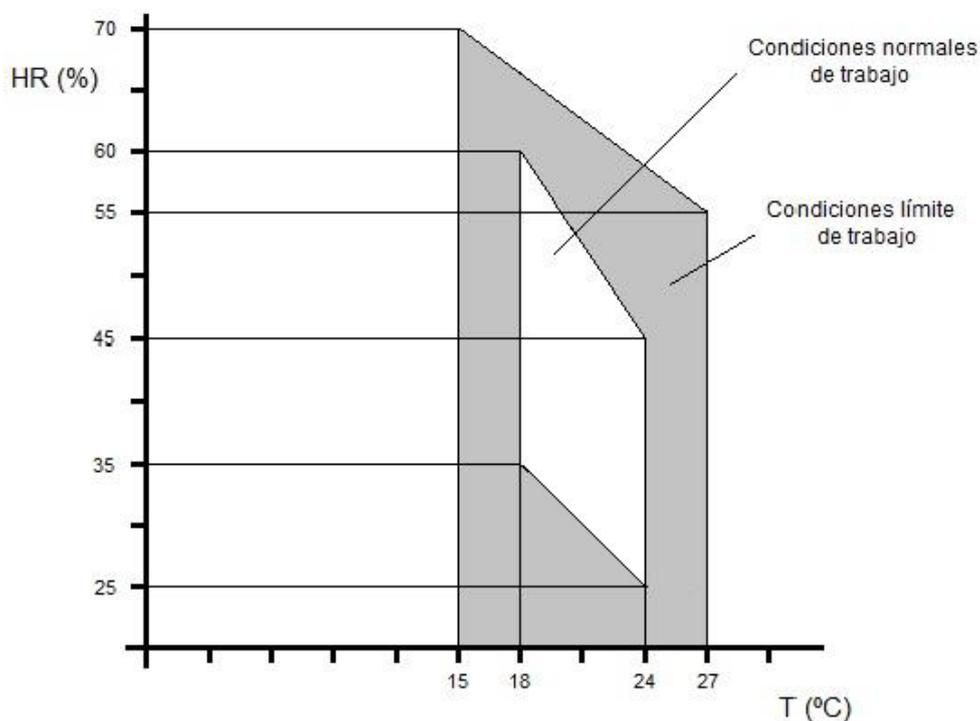


Figura 4.3: Condiciones normales y límites de trabajo en términos de humedad relativa y temperatura.

El siguiente paso fue la construcción de una bolsa de vacío. Ésta tiene una gran importancia, ya que permite un estado homogéneo de vacío o bajas presiones en toda la pieza y aparte hace función protectora al impedir el contacto con el exterior y con el ambiente del autoclave. Hay que tener en cuenta que se podrían desencadenar reacciones de oxidación de gran volatilidad y peligrosidad.

Para realizar la bolsa se parte de una plancha de metal sobre la que se coloca una fina capa de teflón. Luego se ponen encima los laminados, que son rodeados en todo su perímetro por unos bordes de corcho que evitan que la resina pueda escaparse en el proceso de curado. Si se desprendiera más resina de la cuenta podría haber un desequilibrio entre las proporciones de fibra y matriz y el material podría deteriorarse.

El corcho es vendido por el fabricante en finas tiras de unos pocos centímetros de ancho en las que una de las caras lleva adhesivo junto a una capa protectora. Estas cintas absorben la resina que se desprende en los primeros momentos del curado. Esta forma una película impermeable que se opone a la resina restante que intenta escapar hacia el exterior.

Seguidamente se colocó más teflón fino encima del laminado ya sellado con corcho, como podemos apreciar en la figura 4.4.



Figura 4.4: Laminado sellado con corcho y con otra fina capa de teflón dispuesta encima.

Posteriormente se situó encima una capa de un material esponjoso conocido como “*air wave*”, sobre el cual se colocan las sondas donde se conectan los conductos de la bomba de vacío. Así el vacío se distribuye de forma equitativa por todas las zonas del material poroso, y por tanto del laminado.

Para realizar el sellado final se cubrió todo con una capa de teflón grueso. Ésta fue fuertemente fijada en los bordes mediante cromato, una sustancia de alto índice de pegajosidad. Se colocó por todo el perímetro para evitar que no saliera aire al exterior más que por el conducto de vacío. Una vez realizado el conjunto se conectó la sonda al conducto y se encendió la bomba para cerciorarnos de que estaba bien sellado y de que no habría fugas de aire en el autoclave.

En la figura 4.5 vemos la bolsa de vacío ya construida con las sondas.



Figura 4.5: Bolsa de vacío ya lista para ser introducida en el autoclave.

Antes de poder introducir la bolsa en el autoclave hubimos de esperar casi dos semanas, y cuando nos dispusimos a hacerlo tuvimos que comprobar que el material continuaba en buen estado, ya que había aire dentro, e hicimos de nuevo la prueba de vacío experimental. Afortunadamente todo marchó correctamente y pudimos continuar con el proceso de curado.

4.3.2.- Panel nº 2.

Después de obtener el panel ya comentado y notar que el número de probetas que se obtendrían no eran suficientes, se llevó a cabo un segundo laminado, ya que también habría que hacer ensayos simples de flexión en tres puntos. Las dimensiones de las capas serían las

mismas que en el caso anterior. En la realización de éste se apilaron por error un número de diez láminas en lugar de once. Esto fue debido a que no se recordaba exactamente cuántas telas se habían dispuesto al realizar el primer panel.

En otro panel realizado en el laboratorio el espesor era de 1.5 mm de espesor y se habían dispuesto 6 láminas del mismo material, con lo que cada lámina tendría un espesor de 0.25 mm aproximadamente. Como el primero tenía un espesor entre 2.3 mm y 2.4 mm, se pensó que serían 10, y al curar se midió un espesor de 2,1 mm. Finalmente se concluyó que este error no era de importancia, pues la comparación entre los diferentes tipos de ensayo se haría en términos de tensión frente a número de ciclos, y por tanto el espesor no influiría apenas.

4.4.- FASE DE CURADO.

4.4.1.- Panel nº 1.

El proceso de polimerización para consolidar el material del primer panel se realizó en el autoclave. Se trata de una cámara presurizada donde se controlan presión y temperatura necesarias para el ciclo. Se puede observar, en la figura 4.6, nuestro material ya introducido en la máquina.



Figura 4.6: Imagen del autoclave con la bolsa de vacío con los paneles en su interior.

Para obtener la pieza curada en autoclave, además de la cámara presurizada y los dispositivos de calentamiento para alcanzar una temperatura determinada, es necesario un sistema de aplicación de vacío que permita la compactación del laminado y asegure la calidad deseada en la pieza. Además es imprescindible un sistema de control de los parámetros que asegure que las condiciones son las adecuadas durante el proceso.

El ciclo teórico que se programó fue el siguiente:

- **Subida:** temperatura de 25°C a 180°C y presión de 0 a 6 bar en 52 minutos.
- **Condiciones de curado:** temperatura a 180°C y presión a 6 bar durante 2 horas.
- **Bajada:** la temperatura baja hasta 40 °C y la presión vuelve a 0 bar.

Las condiciones de vacío deben mantenerse constantes durante todo el proceso, ligeramente por debajo de 0 bar.

Durante la aplicación del ciclo se fueron almacenando en EXCEL valores de las principales variables cada 30 segundos. Con éstos se realizó la gráfica correspondiente que se presenta en la figura 4.7, donde se observa la evolución de la temperatura, la presión y el vacío durante el ciclo de autoclave. Podemos ver que existen pequeñas irregularidades con respecto a lo que sería el ciclo ideal, pero es normal que haya estas desviaciones.

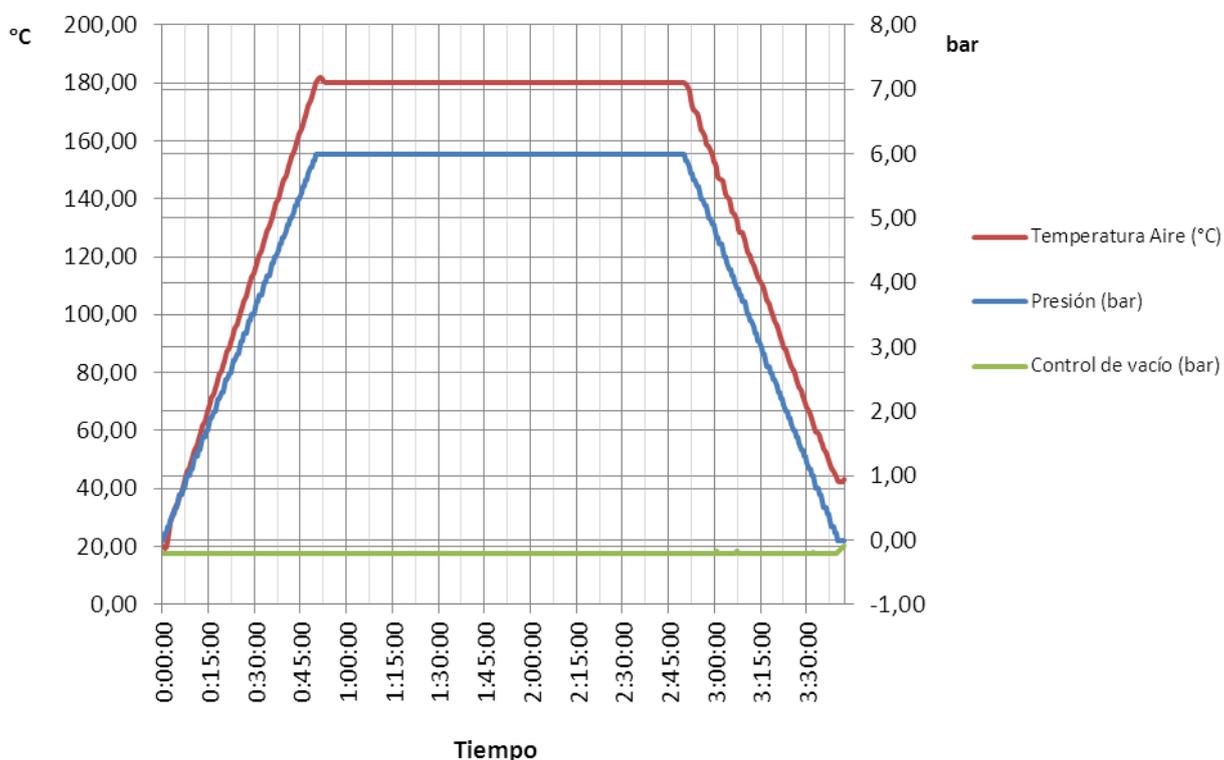


Figura 4.7: Gráfica que muestra la evolución de las principales variables en el autoclave.

4.4.2.- Panel nº 2.

Para el curado del segundo panel, al tratarse sólo de una unidad (puesto que la primera vez se introdujeron en el autoclave varios paneles que había que curar), las dimensiones posibilitaron emplear la prensa de platos calientes. Se trata de dos planchas de metal, una fija y otra móvil, entre las cuales se coloca el laminado ejerciendo presión sobre él. La temperatura se aplica por conducción a través de unas resistencias eléctricas. De esta forma el ciclo de curado se controla a través de la temperatura y de la fuerza ejercida por las planchas, calculada mediante el producto de la presión por el área de laminado.

Con la prensa se obtienen igualmente buenos resultados y se abarata el coste del proceso, ya que la energía es mucho menor que la necesaria para poner en funcionamiento el autoclave.

Según la normativa, el curado del material Carbono- Epoxi Z-19.760 (AS4, 3K / 8552), debe realizarse con el siguiente ciclo:

- **Subida:** Fuerza de 10 a 25.08 KN y temperatura de 25 a 180 °C en un tiempo de 52 minutos, ya que la subida es a 3°C/ min.

-**Condiciones de curado:** Fuerza a 25.08 KN y temperatura a 180 °C durante 2 horas y 10 minutos.

-**Bajada:** Fuerza de 25.08 a 0 KN y temperatura de 180 a 25 °C en un tiempo de 52 minutos.

En la prensa de platos calientes sólo pueden programarse temperatura y fuerza en determinados puntos, por tanto la condición de presión debía sustituirse por una fuerza. La temperatura de curado había de ser 180 °C tal y como aparecía en la normativa. Al mismo tiempo la fuerza fue calculada mediante la siguiente fórmula:

$$F = 3 + P \text{ (Mpa)} * A \text{ (mm)} / 1000. \quad (5)$$

Donde:

$$A = 23 * 30 \text{ cm}^2 = 69000 \text{ mm}^2.$$

$$P = 3.2 \text{ bar} = 0.32 \text{ Mpa}.$$

En la siguiente fotografía de la figura 4.8 del panel recién sacado de la prensa se puede apreciar la falta de rectitud debido al exceso de resina, que fluye hacia los bordes como consecuencia de la presión y allí solidifica.



Figura 4.8: Aspecto que ofrecía el segundo panel al ser sacado de la prensa tras el proceso de curado.

4.5.- FASE DE PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS.

Cuando se hubieron enfriado los laminados se procedió a recortar ligeramente los bordes para acabar con las desviaciones dimensionales producidas por el rebose de la resina. Seguidamente se llevó a cabo el corte de las probetas con las dimensiones indicadas, 100 mm de largo y 25 mm de ancho. La máquina de corte se muestra en la fotografía de la figura 4.9.



Figura 4.9: Máquina empleada en el corte de las probetas.

El proceso de corte tuvo lugar en el taller, empleando la máquina habilitada para ello. Ésta consiste en un disco giratorio de corte con refrigeración por agua. Lo primero que debía hacerse era calibrar la máquina. Para ello se jugaría con el calibre y el soporte transversal, cuyo desplazamiento era controlado por una rueda lateral. Se usarían de prueba restos que se encontraran por el taller, y se daría el visto bueno cuando estas piezas presentaran las dimensiones adecuadas.

Se extrajeron un total de 18 probetas del primer panel y 20 del segundo. El pegado de tacones no fue necesario aquí, ya que el objetivo de éstos es hacer la sujeción de las mordazas lo más fuerte posible al realizar ensayos de tracción longitudinal. En ensayos de flexión no tiene sentido usar tacones.

Algunas de las probetas resultantes fueron las que se observan en la fotografía de la figura 4.10.



Figura 4.10: Algunas de las probetas que se procederían a ensayar.