

CAPÍTULO 2: DISEÑO Y OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS

2.1.- Introducción:

En este capítulo se describe el proceso de fabricación de las probetas necesarias para el ensayo de arrancamiento.

Se han fabricado dos tipos de probetas diferentes denominadas probetas ALCAS y GERM. Éstas difieren entre sí sólo en sus dimensiones, que se pueden ver en las figuras 2.1 y 2.2.

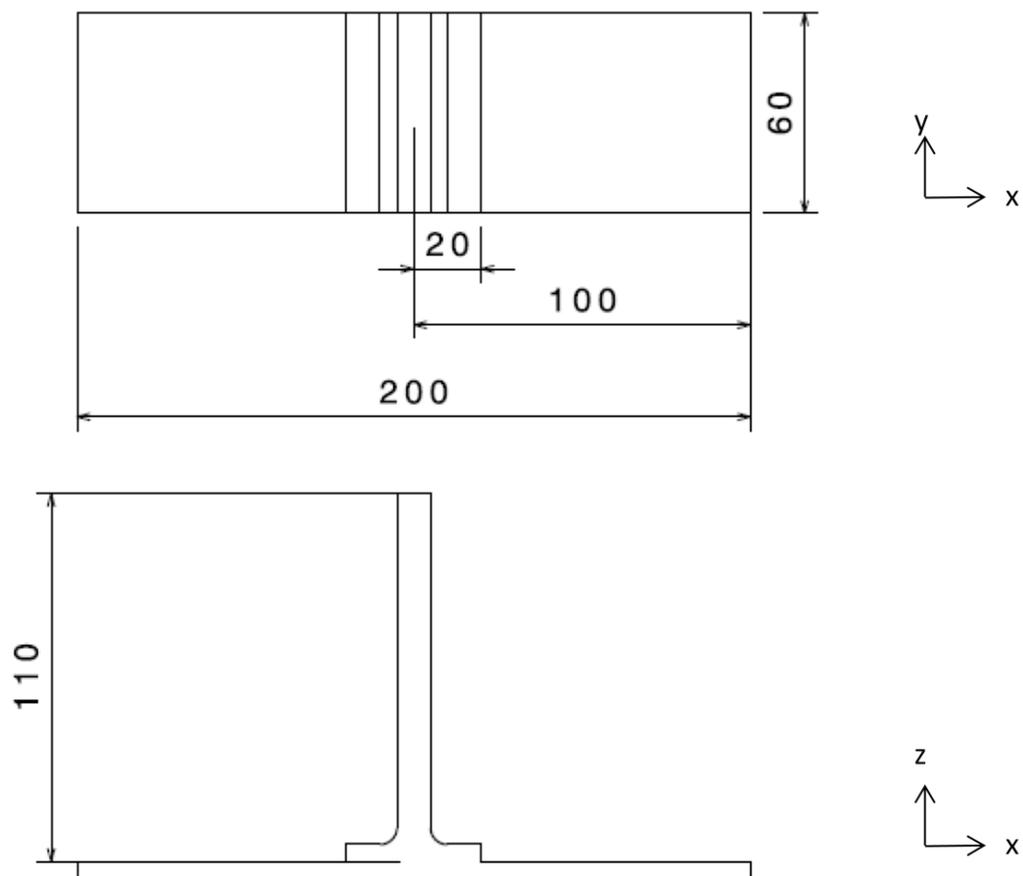


Fig.2.1. Dimensiones de las probetas tipo ALCAS. [Cotas en mm].

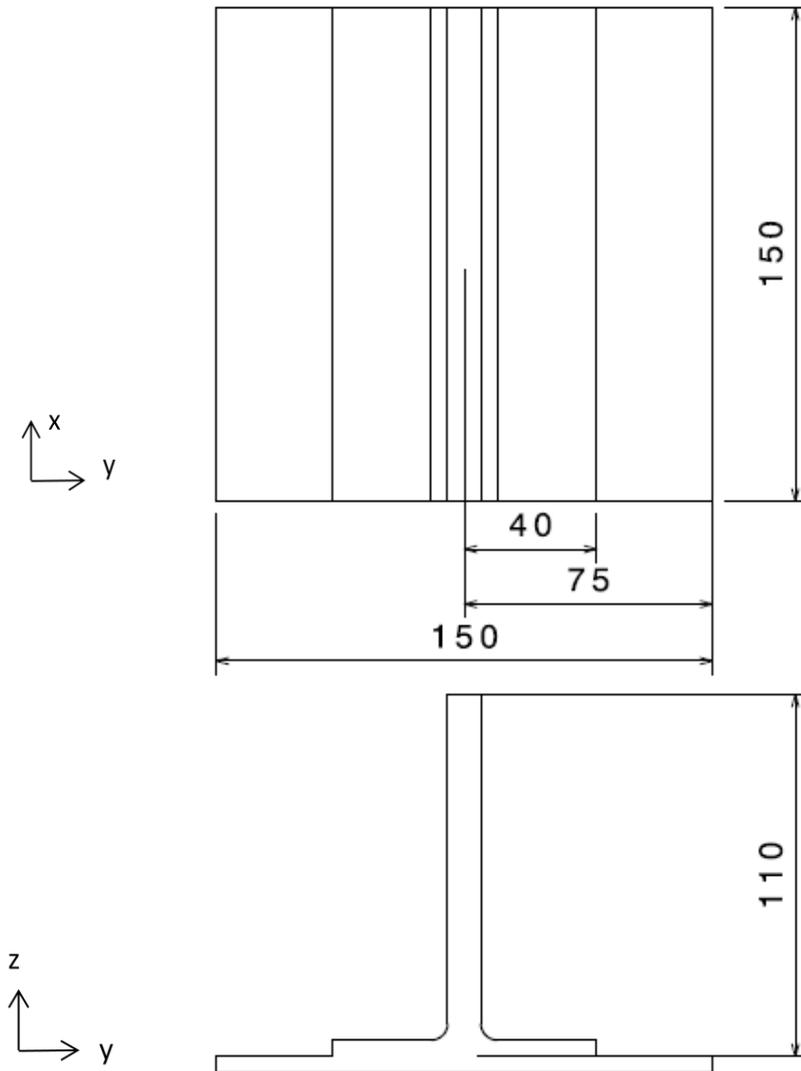


Fig.2.2. Dimensiones de las probetas tipo GERM. [Cotas en mm].

Se observa que las probetas están compuestas por dos partes claramente diferenciadas: la piel, que corresponde al panel inferior, y el rigidizador, que es de tipo “T”. La piel está compuesta por un laminado simétrico de 12 capas mientras que el rigidizador está compuesto por un laminado de 10 capas, que, al igual que en el caso de la piel, es también simétrico.

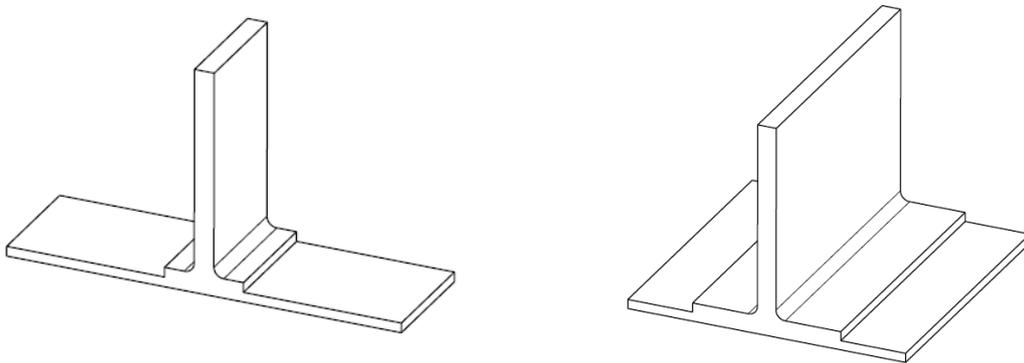


Fig.2. 3. Vista de las probetas ALCAS Y GERM.

Dentro de cada tipo de probeta (ALCAS y GERM) existen dos subtipos que difieren entre sí en la configuración del laminado.

En la tabla 2.1 se pueden ver las dos secuencias de apilado seleccionadas para la realización del ensayo.

	Tipo 1	Tipo 2
<i>Piel</i>	[45/-45/0/90/-45/45] _s	[45/90/-45/90/0/-45/0] _s
<i>Rigidizador</i>	[45/-45/0/-45/45] _s	[45/0/-45/0/90] _s

Tabla 2.1. Configuraciones de los laminados [*s*=simétrico].

La elección de estos laminados se ha hecho en base a trabajos de investigación previamente realizados por el Grupo de Elasticidad y Resistencia de Materiales de la Escuela Superior de Ingenieros de la Universidad de Sevilla, concretamente se ha tenido en cuenta la Tesis Fin de Máster titulada “Análisis Numérico del Comportamiento en Post-pandeo de Paneles rigidizados de Material Compuesto” realizada por José Reinoso Cuevas en Diciembre de 2008 [8].

Se fabricaron en total 10 probetas, con el objetivo de obtener unos resultados fiables en los ensayos. En concreto, se hicieron 6 probetas tipo ALCAS, siendo 3 del tipo 1 y 3 del tipo 2 y 4 probetas tipo GERM, siendo 2 del tipo 1 y 2 del tipo 2. La elección del número de probetas de cada tipo se hizo teniendo en cuenta las dimensiones de éstas, de forma que fuese posible fabricar todas las probetas del mismo tipo a la vez para posteriormente cortarlas.

En la tabla 2.2 se recoge un resumen del número de probetas de cada tipo fabricadas.

<i>Tipo de probeta</i>	<i>Número de probetas</i>
<i>ALCAS Tipo 1</i>	3
<i>ALCAS Tipo 2</i>	3
<i>GERM Tipo 1</i>	2
<i>GERM Tipo 2</i>	3

Tabla 2.2. Número de probetas de cada tipo a fabricar.

En cuanto al método de fabricación, se ha utilizado el método de apilado manual de preimpregnados con compactación con bolsa de vacío y curado en autoclave en todos los casos. Los detalles de este método de fabricación se especificarán en apartados posteriores.

2.2.- Proceso de fabricación de las probetas:

2.2.1.-Elección del tipo de unión entre la piel y el rigidizador:

Hubo que elegir entre dos tipos de uniones: unión co-curada o unión co-pegada. Las diferencias entre ambas tipologías de uniones se detallan a continuación.

Por un lado, en la unión co-pegada una de las partes a unir, en este caso sería la piel, ya ha sido previamente curada en autoclave en un ciclo térmico anterior, mientras que la otra parte se cura a la vez que se realiza la unión mediante el adhesivo.

Por otro lado, en la unión co-curada, sin embargo, se realiza todo el proceso en el mismo ciclo térmico, es decir, se curan y se pegan las dos partes de la probeta en el mismo ciclo de autoclave.

Para estos ensayos se decidió emplear la unión co-pegada ya que, a pesar de ser un procedimiento que requiere más tiempo de fabricación (son necesarios dos ciclos de curado por cada probeta), se consideró que es un proceso más controlable y que, por tanto, daría lugar a menos defectos de fabricación.

También es conveniente señalar que según estudios previos realizados sobre las diferencias entre ambas tipologías de uniones, no se aprecia ninguna influencia del tipo de unión en el comportamiento de la probeta durante el ensayo [11].

2.2.2.-Fabricación de la piel:

Primero se fabricaron los paneles sobre los que iban pegados los rigidizadores en forma de "T".

Estos se realizaron del mismo material que los rigidizadores, concretamente de un compuesto de fibra de carbono y resina epoxi cuyas propiedades son: $E_{11} = 166$ GPa; $E_{22} = 11$ GPa; $\nu_{12} = 0.3$ y $G_{12} = 4.6$ GPa.

Como se ha citado anteriormente, se fabricaron conjuntamente todas las probetas del mismo tipo, por ello, fue necesario fabricar los paneles de las dimensiones indicadas en la figura 2.4 y 2.5.

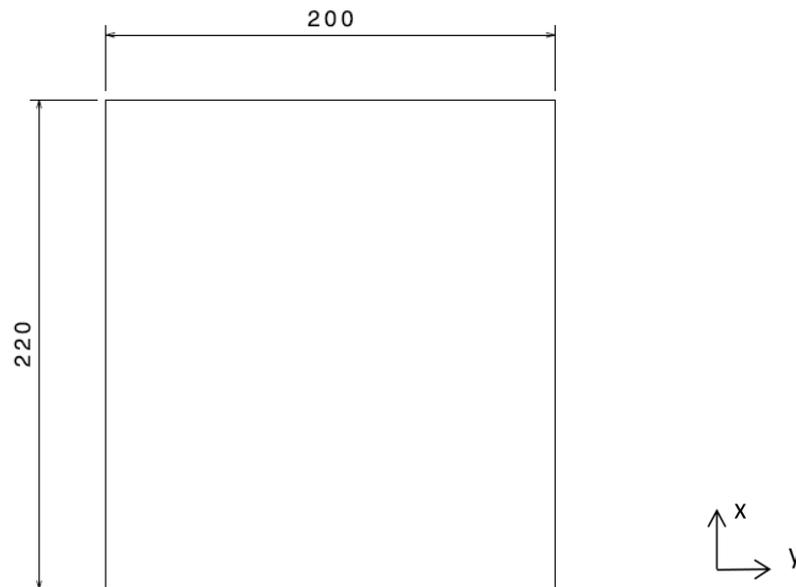


Fig.2.4. Dimensiones de los paneles tipo ALCAS a fabricar. [Cotas en mm].

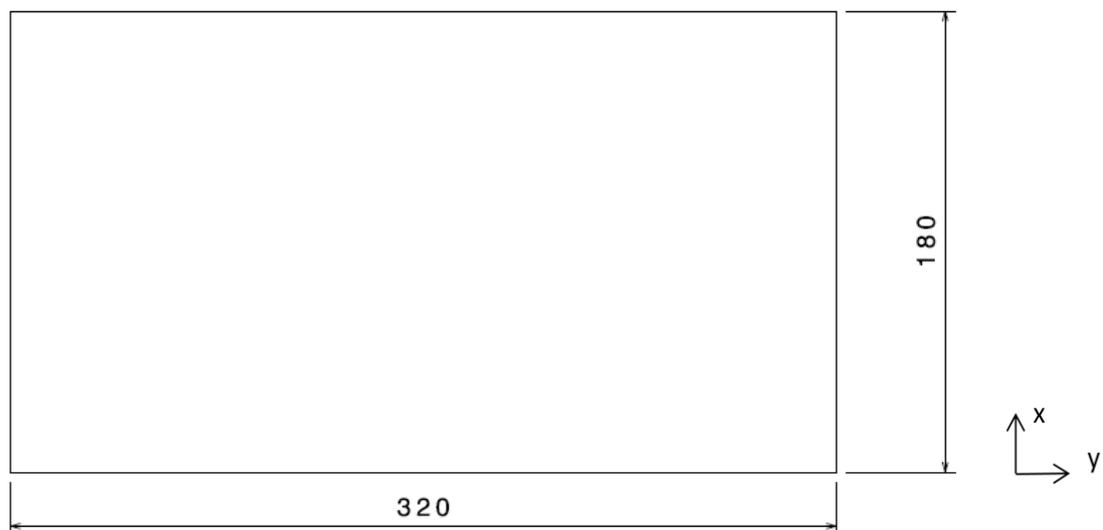


Fig.2.5. Dimensiones de los paneles tipo GERM a fabricar. [Cotas en mm].

Es necesario destacar que los paneles se sobredimensionaron ya que después de la fabricación hay que sanear el material para eliminar los defectos que aparecen en los bordes. También hay que tener en cuenta, que al cortar el material con la sierra de disco de diamante, ésta elimina 2 mm de panel en cada corte.

El proceso de fabricación de los paneles comenzó cortando las láminas de fibra de carbono con las dimensiones y orientación deseadas de un rollo de Prepreg de fibra de carbono previamente atemperado durante 24 horas. El corte se realizó con ayuda de un cúter e instrumentos de medición (regla, escuadra y cartabón).

En las figuras 2.6 y 2.7 se pueden ver las láminas de Prepreg cortadas.



Fig.2.6. y 2.7. Láminas de Prepreg cortadas.

Posteriormente, se apilaron las láminas previamente cortadas según el orden de apilado descrito en la Tabla 2.1 con ayuda de una espátula de nailon para compactar las láminas. En la figura 2.8 se observan las láminas apiladas.

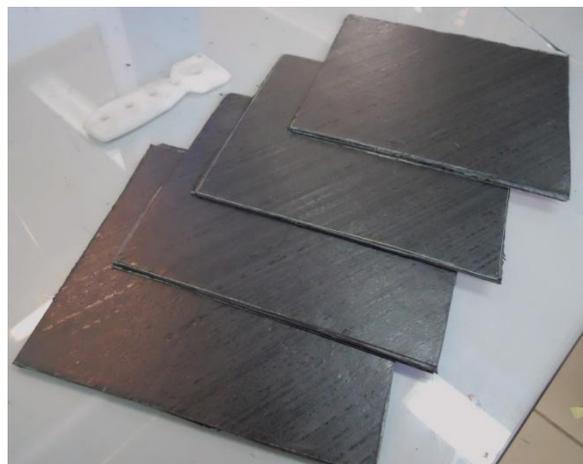


Fig.2.8. Paneles apilados antes de ser curados acompañados del útil de nailon utilizado.

Una vez realizado el apilado, se pegó en la capa superior una lámina de “peel-ply”. Este componente es una tela de nylon que sirve para crear rugosidad en la capa superior de la piel de forma que después la adhesión del rigidizador sea más fácil. En las figuras 2.9 y 2.10 se pueden ver los paneles apilados con al capa de “peel-ply”.

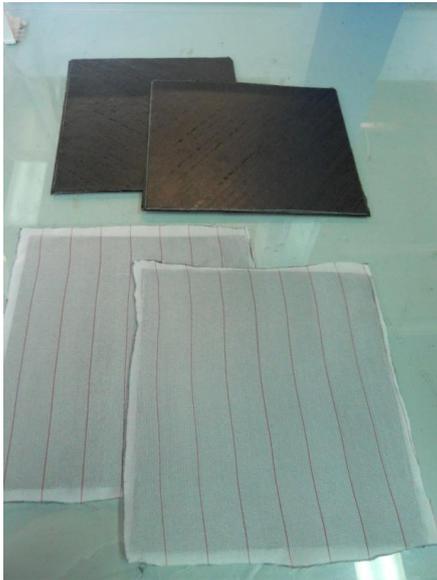


Fig.2.9. y 2.10. Paneles apilados con la capa de peel-ply en su cara superior.

En la siguiente etapa de fabricación, cuando estaban preparados todos los paneles con la lámina de “peel-ply” en su cara superior, se hizo una pre-compactación con una bolsa de vacío instalada en la mesa de trabajo antes de preparar la plancha de curado para el autoclave. Este proceso se puede ver en la figura 2.11.

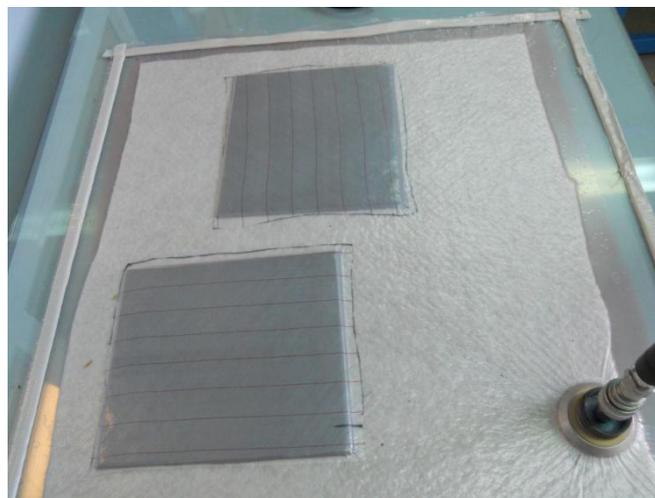


Fig.2.11. Pre-compactación de paneles en bolsa de vacío.

Una vez realizada la pre-compactación se procedió a preparar la plancha de curado para el autoclave. Para ello se comenzó cubriendo la plancha con una lámina de desmoldeante sujeto con cinta de alta temperatura sobre la que se pusieron los paneles. Éstos se rodearon con corcho adhesivo para evitar que la resina fluyese hacia fuera y apareciesen defectos en el material. En la figura 2.12 se pueden ver los paneles en la plancha de curado con el corcho alrededor.



Fig.2.12. Paneles rodeados de corcho en la plancha de curado.

Después se recubrió todo con una lámina de desmoldeante del mismo tipo que la anterior y sobre ella, se colocó el tejido aireador (Airwave®) que distribuye el vacío por toda la plancha. Además también se colocaron sobre el tejido aireador las dos tomas de vacío necesarias para el autoclave. Finalmente se puso una lámina de plástico de bolsa que se pegó a la plancha con cromato garantizándose así que no queda ningún hueco libre por el que pueda entrar el aire.

En la figura 2.13 se ve la plancha de curado preparada para el autoclave.



Fig.2.13. Plancha de curado preparada para el autoclave.

Una vez realizado este procedimiento, se comprobó que no entraba aire en la bolsa de vacío y se introdujo en el autoclave. El ciclo de curado que se ha utilizado en el autoclave dura 6 horas y tiene los parámetros que se detallan en la tabla 2.3. siguiendo las especificaciones del material. En la figura 2.14. se puede ver la evolución de la temperatura, la presión y el vacío durante el ciclo de curado.

Segmento	Inicio	1	2	3	4	5	6
Proceso	Comienzo	Operación					
Tiempo	0° 0'	45'	1'	30'	4h	30'	15'
Tª aire	30°	130°	130°	180°	180°	80°	25°
Presión (bar)	0	1.4	1.5	6	6	6	0
Vacío (bar)	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	-0.8	0

Tabla 2.3. Parámetros característicos del ciclo de curado.

Nota: El vacío se mide como una diferencia de presiones relativa respecto a la presión exterior.

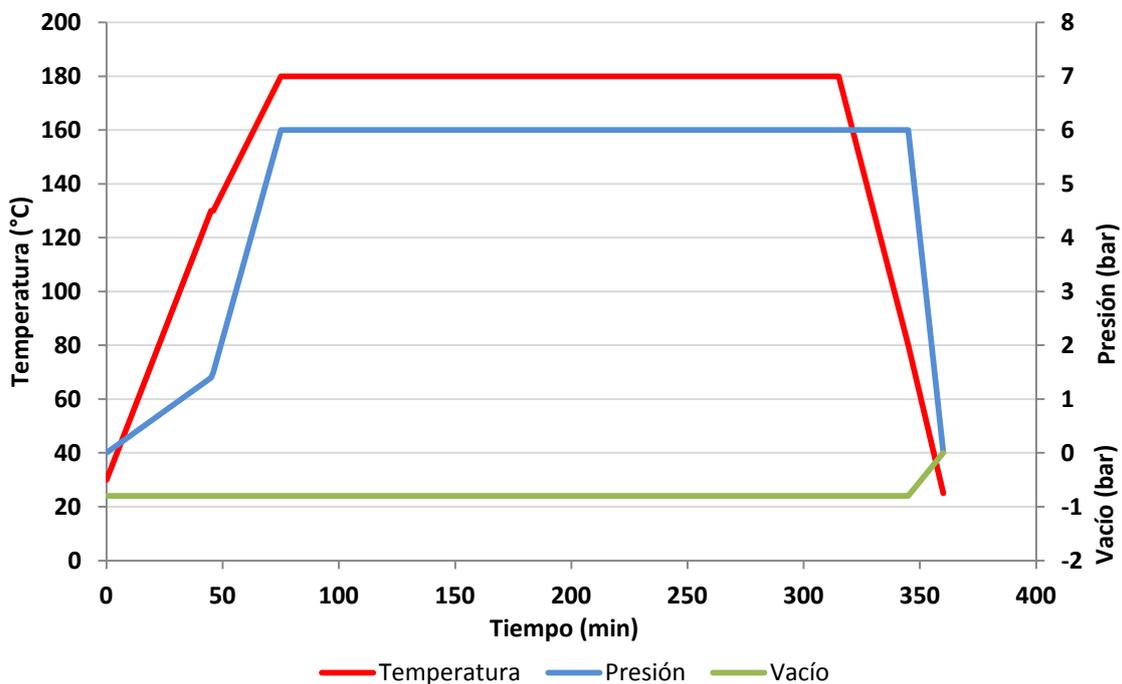


Fig.2.14. Evolución de los parámetros del ciclo de curado.

En la figura 2.15 se puede ver el autoclave utilizado para el proceso de curado.



Fig.2.15. Autoclave utilizado para el proceso de curado.

Tras el proceso de curado se cortaron los paneles para sanear el material y después se despegó la capa de “peel-ply” que se había puesto en la parte superior.

2.2.3.-Fabricación de los rigidizadores:

En primer lugar, para fabricar los rigidizadores fue necesario contar con dos moldes en forma de “L” que permitieron crear una “T” al unir las dos piezas. Para ello, se utilizaron dos moldes de acero con las dimensiones que aparecen en la figura 2.16.

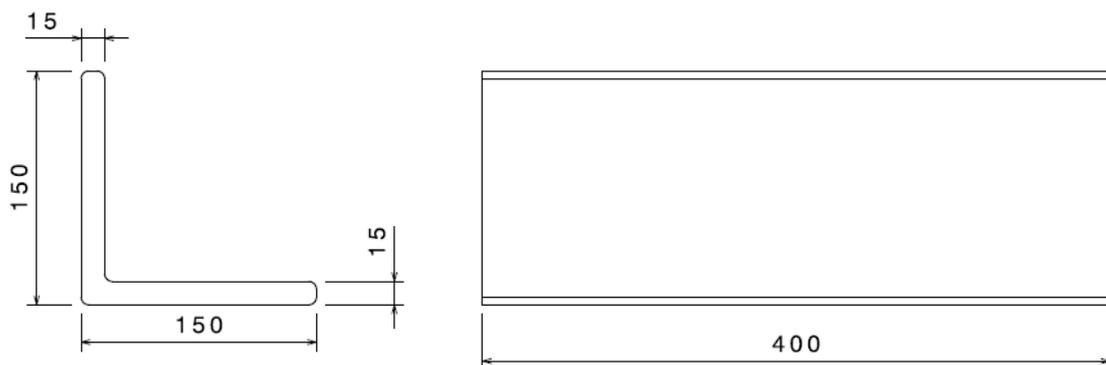


Fig.2.16. Dimensiones de los moldes de acero utilizados. [Cotas en mm].

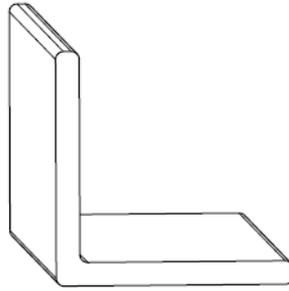


Fig.2.17. Esquema del tipo de molde utilizado.

Las dimensiones del molde son mayores que las dimensiones de una probeta para fabricar todas las probetas del mismo tipo al mismo tiempo.

Como se ha citado anteriormente, los rigidizadores se realizaron del mismo material compuesto de fibra de carbono y resina epoxi que la piel.

Además, en este caso también fue necesario sobredimensionar el tamaño de los rigidizadores a fabricar para tener el margen necesario para sanear el material y, posteriormente, cortar las probetas con la sierra de disco de diamante.

Las dimensiones de los rigidizadores fabricados se recogen en las figuras 2.18 y 2.19. En ella se puede ver que estos son más largos que los paneles en los que van pegados para garantizar que la posible aparición de defectos en el borde ocurra fuera de la unión con el panel y que, por tanto, se puedan eliminar sin problemas.

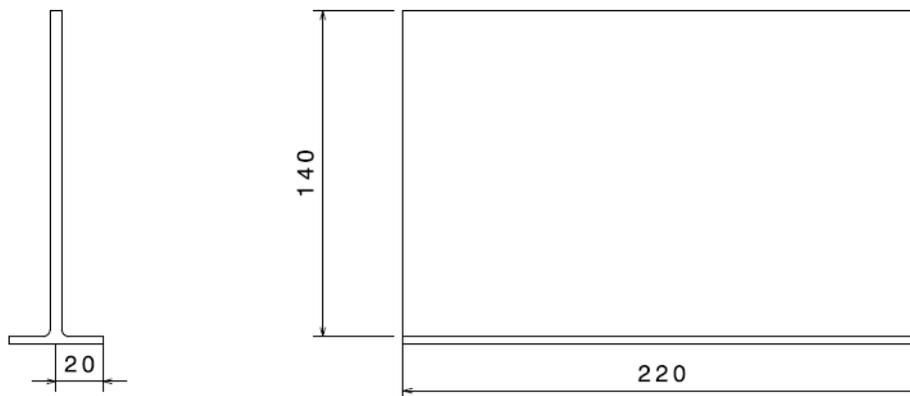


Fig.2.18. Dimensiones de los rigidizadores tipo ALCAS a fabricar.

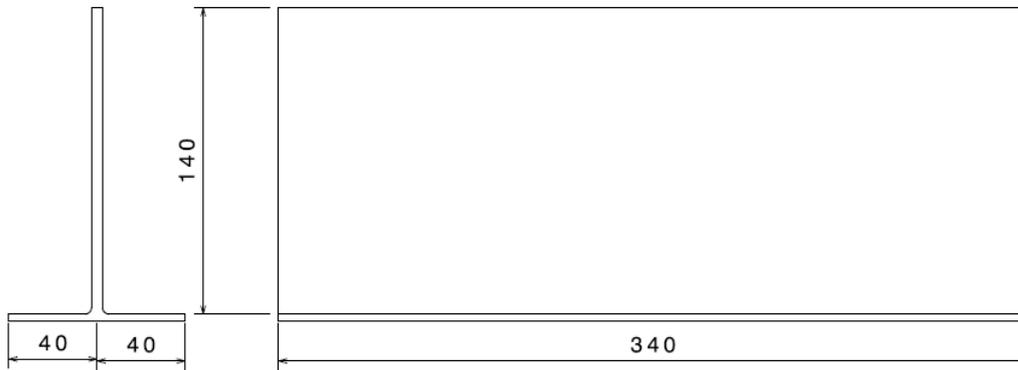


Fig.2.19. Dimensiones de los rigidizadores tipo GERM a fabricar.

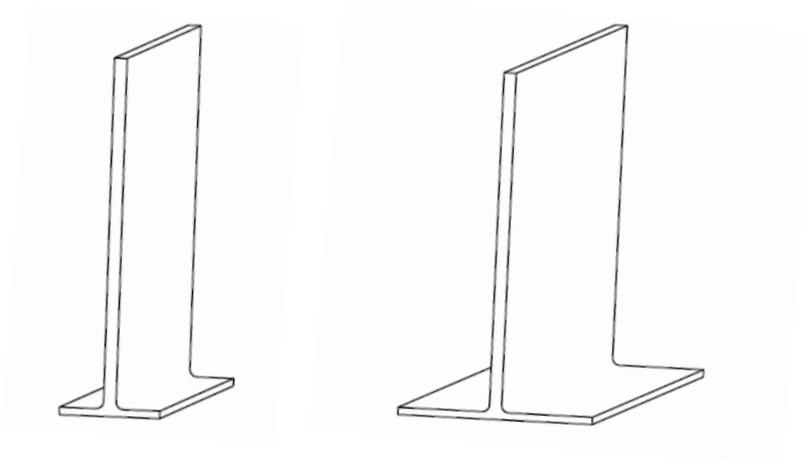


Fig. 2.20. Esquema de los rigidizadores tipo ALCAS y GERM respectivamente.

Al igual que en el caso de los paneles, el proceso comenzó cortando las láminas de material compuesto con las dimensiones y orientación deseada de un rollo de prepreg previamente atemperado durante 24 horas. El corte se realizó con ayuda de un cúter e instrumentos de medición (regla, escuadra y cartabón).

Una vez cortadas todas las láminas necesarias se procedió a cubrir los moldes de acero con desmoldeante para proteger al rigidizador. Posteriormente, se apilaron las láminas sobre el molde según la secuencia de apilado descrita en la tabla 2.1 con ayuda de una espátula de nailon y de un secador de aire caliente que ayuda a que las láminas de material cojan la forma de “L” y se adapten al molde. En la figura 2.21 se observan las láminas apiladas sobre el molde.

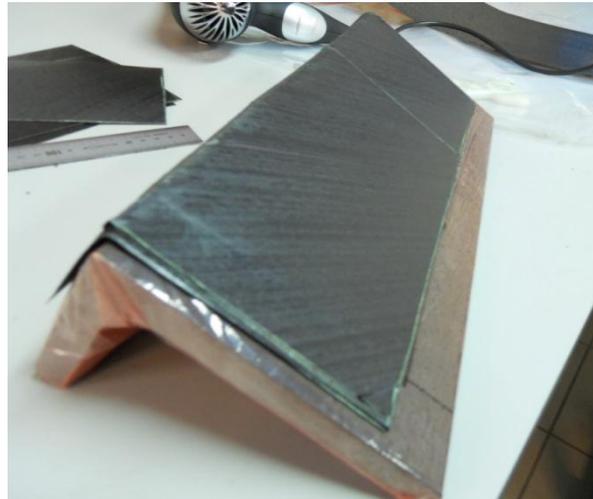


Fig.2.21. Rigidizador apilado sobre el molde de acero antes de ser compactado.

Una vez apilado el material, se pegó corcho adhesivo en los bordes en los que no había contacto con el otro panel (ver figura 2.22) para evitar que la resina fluyese hacia los lados.

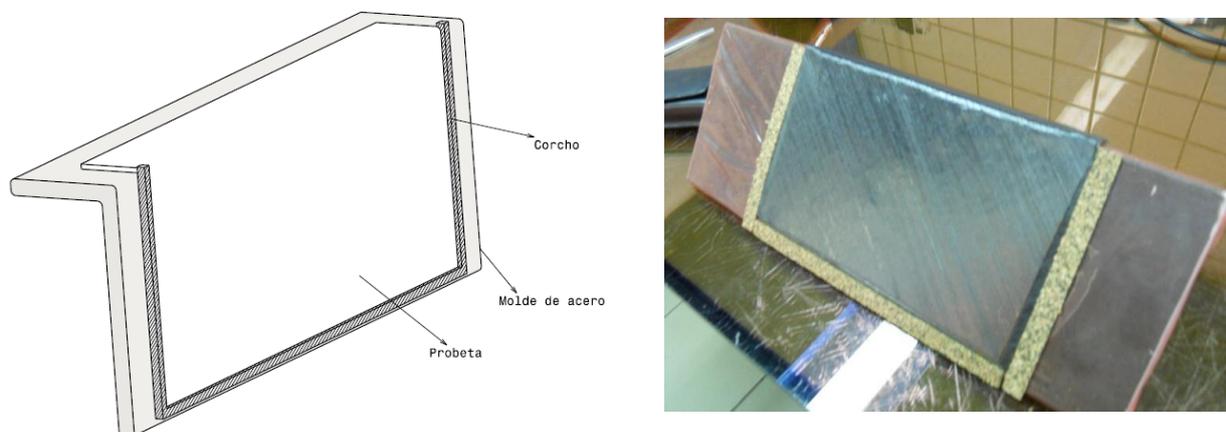


Fig.2.22. Esquema y foto de los bordes del rigidizador que necesitaron corcho.

Cuando ya estuvieron preparadas las dos “L” por separado según el procedimiento descrito anteriormente, se procedió a unir las con el panel que ya había sido previamente curado. En la figura 2.23 se puede ver el rigidizador y el panel antes de aplicar la bolsa de vacío.



Fig.2.23. Unión de los rigidizadores con el panel antes de aplicar la bolsa de vacío.

2.3.- Análisis de las posibles configuraciones de unión y curado:

Para realizar la unión de las dos partes de las probetas se han probado dos configuraciones distintas que difieren entre sí en la posición de los moldes en la bolsa de vacío durante el proceso de curado.

En ambas configuraciones, se ha realizado la unión con un adhesivo del tipo BMI cuya hoja de especificaciones se puede encontrar en el anexo 1.

Además, en ambos casos el ciclo de curado en el autoclave ha sido el mismo. En concreto, se ha seguido el ciclo de curado especificado en la tabla 2.3 y en la figura 2.14.

A continuación se exponen los detalles específicos de cada configuración ensayada.

2.3.1.-Configuración A:

Para esta configuración, una vez preparados individualmente los moldes en forma de “L”, se unieron y se apoyaron sobre la piel previamente curada a la que, con anterioridad, se le había pegado una tira del adhesivo anteriormente señalado en el lugar donde tenía que ir fijada la T, tal como se muestra en la figura 2.24.

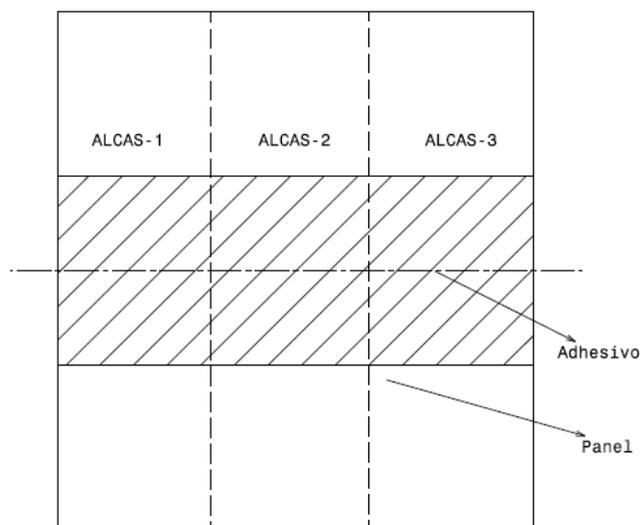


Fig.2.24. Zonas del panel en las que fue necesario pegar el adhesivo.

Por tanto, la configuración que se obtuvo antes de hacer la bolsa de vacío es como se muestra en la figuras 2.25 y 2.26.

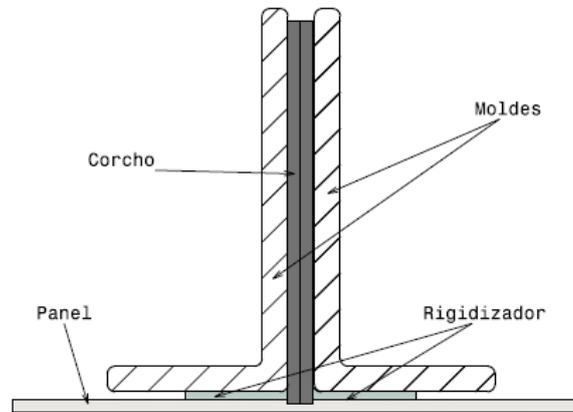


Fig.2.25. Perfil de la configuración de curado A.

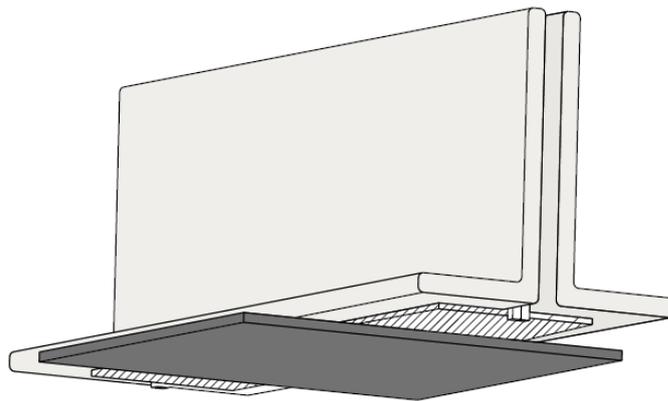


Fig.2.26. Vista general de la configuración de curado antes de aplicar la bolsa de vacío

La bolsa de vacío se hizo de tipo globo siguiendo los mismos pasos que los descritos para el caso de los paneles. Es decir, primero se cubrió todo con desmoldeante, luego se puso una capa de tejido aireador que distribuye el vacío y por último, se cerró la bolsa con plástico de cierre y cromato.

Una vez finalizado este proceso, se curó la probeta según el ciclo de autoclave descrito en la tabla 2.3 y en la figura 2.14.

La probeta que se obtuvo siguiendo este procedimiento de unión y curado se puede ver en la figura 2.27.



Fig.2.27. Probeta obtenida mediante la configuración de curado A

En la fotografía se observa que la probeta no resultó totalmente plana, sino que adquirió una curvatura debido a que las alas del rigidizador quedaron embebidas dentro del panel. En la figura 2.28 se puede ver este defecto con detalle.

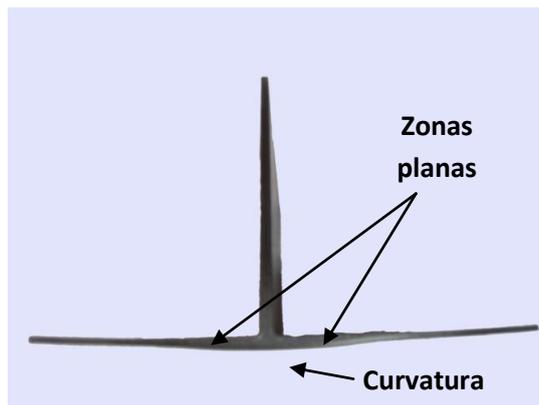


Fig.2.28. Perfil de la probeta obtenida con configuración de curado A

Este efecto no era deseable porque estas probetas no representaban bien la geometría local de las uniones reales. En la figura 2.29 se puede ver una comparación entre una probeta obtenida siguiendo este método y una probeta con las características deseadas.



Fig.2.29. Comparación entre efecto deseado (izquierda) y el obtenido (derecha)

Se cree que este defecto apareció debido a que en el ciclo de curado de los rigidizadores se sobrepasó la temperatura de transición vítrea de los paneles curados. Este hecho ocasionó un reblandecimiento de los paneles previamente curados y permitió que las alas del rigidizador se embebiesen en la estructura del panel, creando curvatura en la parte inferior de la probeta.

Además, hay que tener en cuenta que el elevado peso de los moldes de acero que estaban sobre el panel contribuyó a crear este defecto.

Teniendo en cuenta todos los problemas asociados a esta metodología se desechó ya que creaba defectos de fabricación no admisibles.

Por tanto, fue necesario buscar una configuración de curado alternativa que garantizase que las probetas quedasen planas después del curado.

2.3.2.-Configuración B:

El principal objetivo de esta configuración era conseguir que las probetas saliesen planas.

Para ello se usaron dos mejoras; la primera de ellas consistió en girar la configuración anterior, es decir, curar la probeta de forma que durante el ciclo de autoclave la piel quedase en la parte superior y no tuviese que soportar el peso de los moldes. Este cambio conllevó el uso de bloques de aluminio para sostener el molde durante el curado.

En las figura 2.30 y 2.31 se puede ver un esquema de la configuración de curado B.

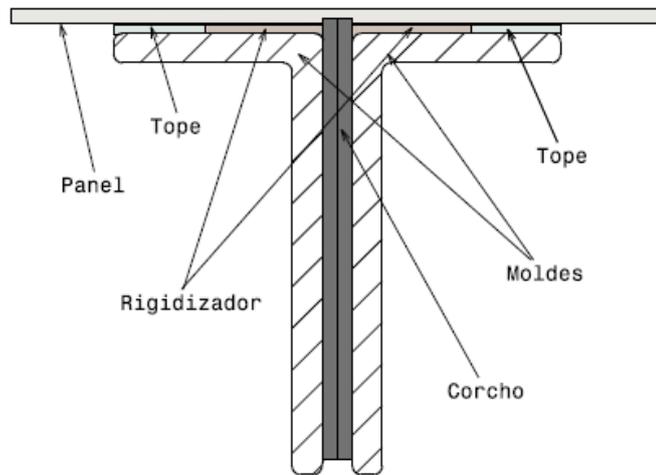


Fig.2.30. Perfil de la configuración de curado B.

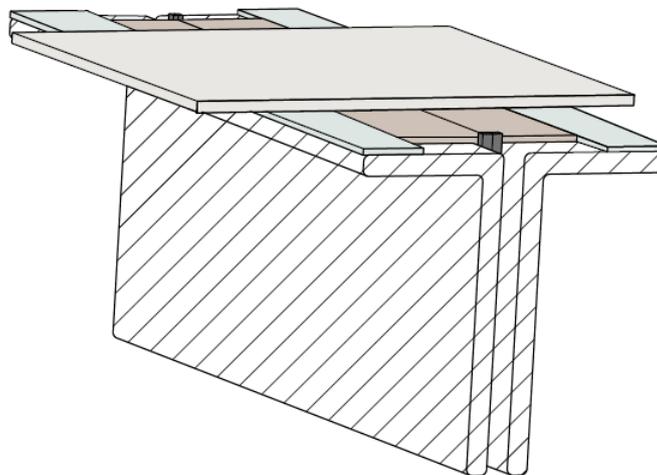


Fig.2.31. Vista general de la configuración de curado B antes de aplicar la bolsa de vacío.

Además, se usaron dos piezas de material compuesto rectangulares con las dimensiones que aparecen en la figura 2.32 que se curaron a la vez que el rigidizador.

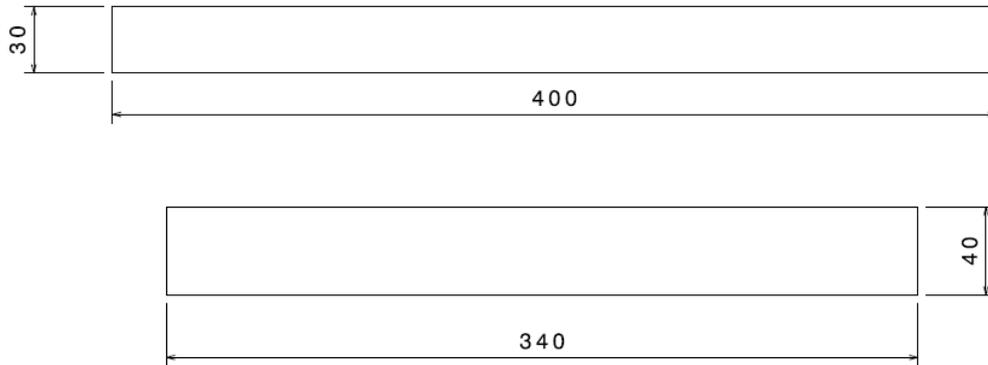


Fig.2.32. Dimensiones del material de sacrificio usado para probetas ALCAS (arriba) y GERM (abajo). [Cotas en mm].

Estas piezas tenían el mismo número de capas que el rigidizador y se situaron en el hueco que hay entre el molde y la parte de la piel en la que no había rigidizador para garantizar que este espacio quedaba cubierto y evitar que el panel se curvase por esta zona.

Para asegurar que en el proceso de curado estas piezas no quedaban adheridas a la probeta fue necesario envolverlas en desmoldeante de forma que luego se pudiesen despegar fácilmente del resto de la probeta.

En la figura 2.33 se pueden ver todos los elementos utilizados en esta configuración de curado antes de aplicar la bolsa de vacío.



Fig.2.33. Disposición de todos los elementos de la configuración B antes de aplicar la bolsa de vacío.

Para evitar huecos en la parte central de la unión entre la piel y el rigidizador, se pusieron tiras del mismo material que los rigidizadores en la unión de las dos partes de la “T” antes de pegarlo al panel. De esta forma, se construyó un “roving” del mismo material que las probetas.

En las figuras 2.34 y 2.35 se ve la zona donde iba pegado el “roving”.

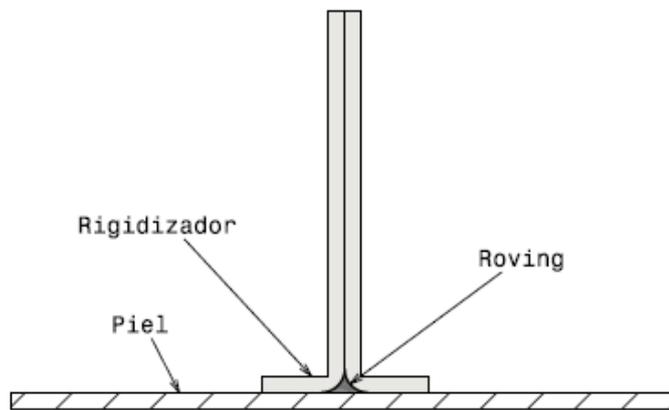


Fig.2.34. Esquema de la zona con roving.

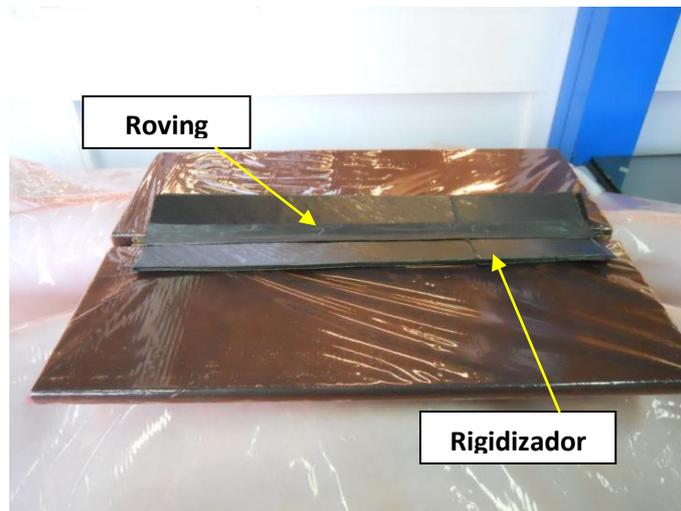


Fig.2.35. Vista de las tiras del roving antes de pegar la piel.

Una vez realizadas todas estas modificaciones se procedió a realizar la bolsa de vacío como en ocasiones anteriores, es decir, cubriéndolo todo primero con desmoldeante, luego con tejido aireador y por último cerrando la bolsa de plástico con cromato. Nótese que los bloques de aluminio que sujetaban al molde quedaron fuera de la bolsa de vacío.

En la figura 2.36 se puede ver la bolsa de vacío antes de ser introducida en el autoclave.



Fig.2.36. Bolsa de vacío antes de entrar en autoclave.

Una vez realizado el curado se estudió detenidamente la probeta obtenida y se observó que no aparecía ninguno de los defectos anteriormente señalados, tal como se puede ver en la figura 2.37, y por tanto, se decidió que este procedimiento sería el que se utilizase para todas las probetas.



Fig.2.37. Vista de la probeta tipo ALCAS obtenida.

2.4.- Probetas obtenidas:

Una vez obtenidas todas las probetas tras los cuatro ciclos de curado, se procedió al resanado y corte del material de forma que las probetas quedasen con sus dimensiones definitivas para el ensayo.

En las figuras 2.38, 2.39 y 2.40 se pueden ver las probetas después del proceso de corte y resanado.

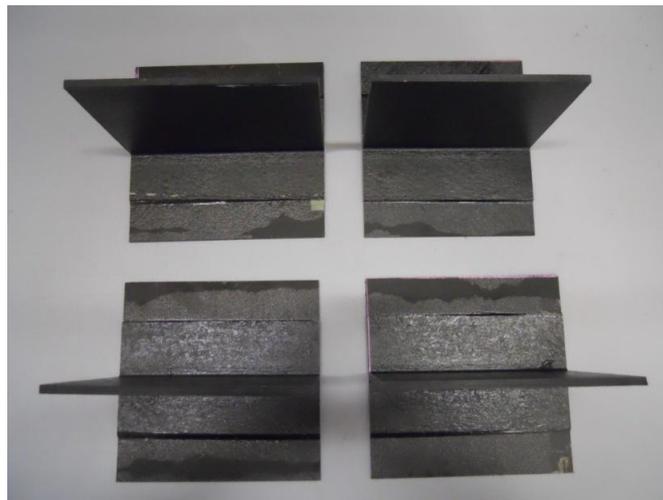


Fig.2.38. Probetas tipo GERM antes del ensayo.

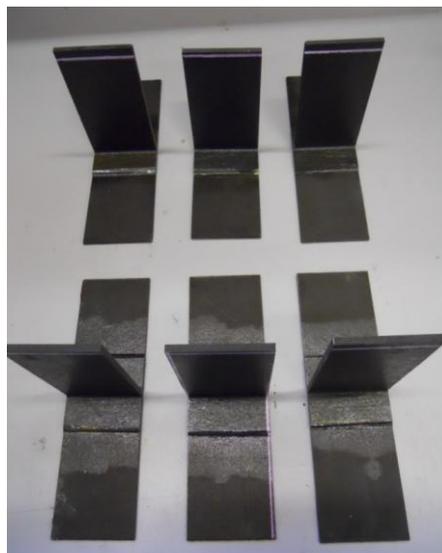


Fig.2.39. Probetas tipo ALCAS antes del ensayo.

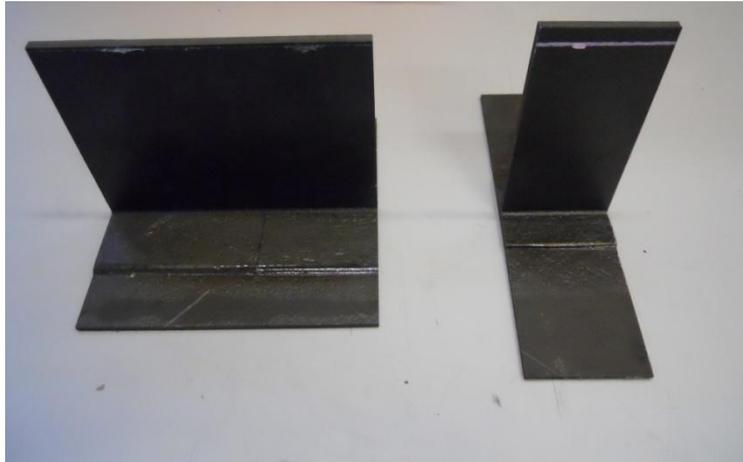


Fig.2.40. Comparación de tamaño entre probetas tipo.

2.5.- Resumen del proceso de fabricación:

En la figura 2.41 se muestra un resumen por pasos del proceso de fabricación seguido para todas las probetas.

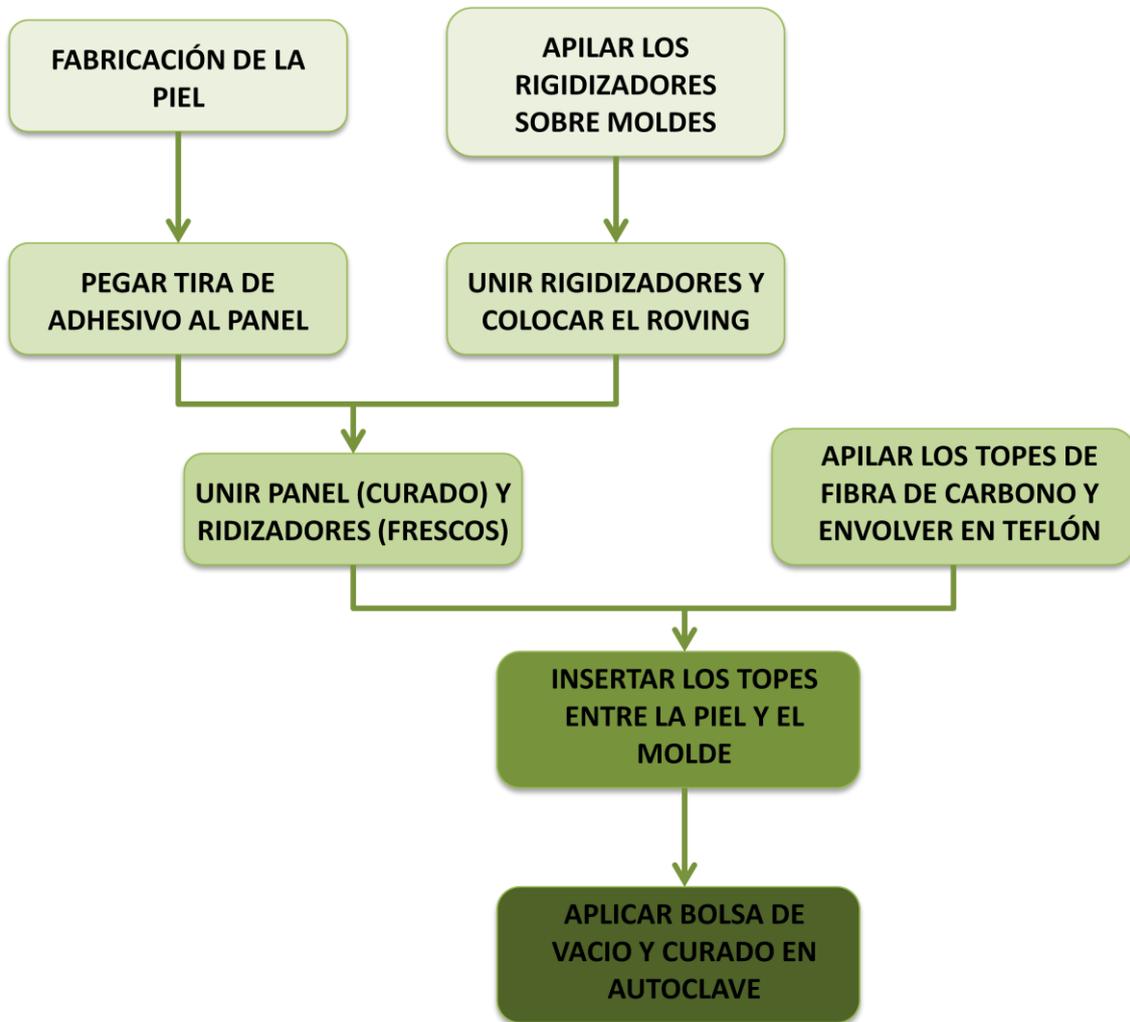


Fig.2.41. Esquema general del proceso de fabricación seguido.