



**Proyecto: INDUMAT –Desarrollo de procesos de transformación para industrializar nuevos materiales.**

### Resultados del proyecto

**Programa:**

**Nº EXPEDIENTE : IMDEEA/2015/6**

**PROGRAMA: I+D PROPIA**

## INDICE

1- Procesos sobre Solid Surface	3
2- Procesos sobre tableros aligerados	22
3- Especificaciones de proceso	39

## 1- Procesos sobre Solid Surface

### 1.1- Termo-conformado a temperatura ambiente

Se comienza calentando una pieza de 60x60 cm en las estufa a 180°C durante 15 minutos, se extrae la pieza utilizando guantes y se coloca sobre el molde semiesférico. Se sujeta y se aplica vacío (-70 KPa).



Figura 1- Pieza de solid en el molde antes de aplicar vacío

La pieza no se deforma de manera perceptible, por lo que se realiza la prueba a 200°C y 15 minutos, consiguiendo una ligera deformación, y repitiendo a 230°C y 15 minutos se aumenta apenas la deformación.

Se decide aumentar el tiempo a la máxima temperatura para tratar de conseguir una deformación apreciable, por lo que se mantiene una pieza a 230°C durante 30 minutos. En este caso sí que se produce una deformación observable a simple vista, pero insuficiente para obtener la figura deseada.



Figura 2- Medición de la deformación máxima conseguida con molde semiesférico

Aumentando aún más el tiempo de calentamiento hasta 40 minutos a 230°C para conseguir un mayor reblandecimiento del material, se produce la rotura del mismo antes de que se deforme lo suficiente para adquirir la figura del molde. Esta prueba se repite varias veces, obteniendo el mismo resultado.



Figura 3- Rotura del material al alcanzar la deformación máxima

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla

Temperatura	Tiempo (min)	Deformación (mm)
180°C	15	0
	30	3
	40	14
	50	20
200°C	15	3
	30	16
	40	28
	50	40
230°C	15	5
	30	22
	40	45
		rotura del material

Representando gráficamente el resultado obtenido se aprecia claramente el comportamiento del proceso:

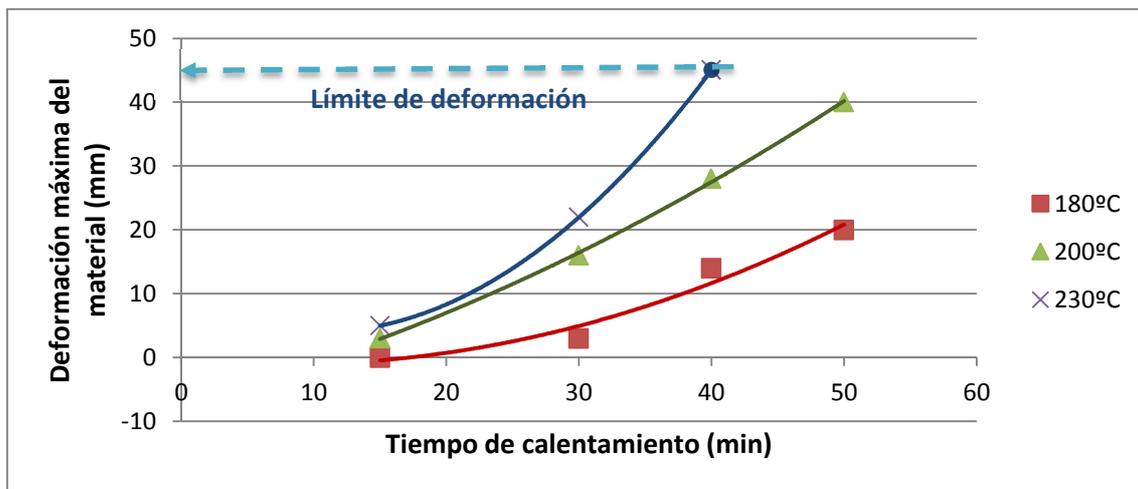


Figura 4 – Deformación de las placas de solid en molde de vacío

Se concluye que **la hipótesis de partida no era correcta**, y el comportamiento del material en las condiciones que se establecieron para el proceso no permite alargamientos del 66% como se estimaba inicialmente.

## 1.2- Termo-conformado a alta temperatura

**Se formula una nueva hipótesis:** la deformación que se quiere conseguir podría realizarse si se mantiene la pieza a una temperatura dada (entre 190°C y 230°C) durante el proceso de termo-conformado.

Debido a la dificultad y coste de modificar el prototipo del proceso para que trabaje a alta temperatura, se opta por realizar pruebas de laboratorio sobre muestras del material para establecer su comportamiento bajo carga y a alta temperatura constante.

Para verificar experimentalmente el alargamiento máximo admisible a las temperaturas de trabajo, se diseña una batería de pruebas a realizar en un ambiente a temperatura constante, como una estufa.

Las pruebas consisten en calentar una probeta de Solid Surface de 240 mm<sup>2</sup> de sección y 210 mm de longitud hasta una temperatura de T°C. Seguidamente, dentro de una estufa a la misma temperatura, se sujeta la probeta y se carga con un peso de P kg, y se mide la deformación de la probeta con la carga mantenida y a temperatura constante.

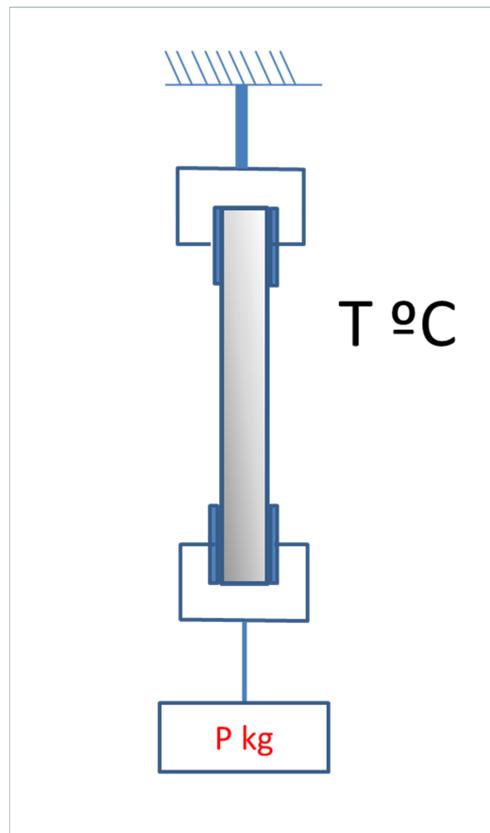


Figura 5- Prueba de deformación bajo carga a T constante

En total se ensayan 38 probetas utilizando dos cargas ( $P = 1,3 \text{ kg}$  y  $P = 2,6 \text{ kg}$ ) a tres temperaturas diferentes ( $190^\circ\text{C}$ ,  $211^\circ\text{C}$  y  $222^\circ\text{C}$ ).

Los resultados conseguidos se muestran en la tabla y en los gráficos siguientes.

ALARGAMIENTO BAJO CARGA CONSTANTE Y CALOR									
Longitud de las muestras		210 mm							
Sección		240 mm <sup>2</sup>							
		Alargamiento (mm)							
Carga (kg)	Temperatura	Tiempo (min)	A1	A2	A3	A4	A5	Promedio	
1,3	190	5	0,2	0,3	0,2	0,1	0,2	0,2	0,2
1,3	190	8	1,1	1,1	1,2	1	0,9	1,06	
1,3	190	10	2,1	2,1	2	1,9	2,3	2,08	
1,3	190	12	2,8	2,6	2,5	2,9	3	2,76	
1,3	190	15	3,5	3,4	3,3	3,6	3,6	3,48	
1,3	190	18	3,7	3,6	3,6	3,8	3,7	3,68	
1,3	190	20	4	3,9	3,8	4,1	4	3,96	
1,3	211	5	0,7	0,5	0,9	0,6	0,8	0,7	
1,3	211	8	2,4	2,3	2,2	2,6	2,5	2,4	
1,3	211	10	3,9	3,7	3,8	3,8	3,9	3,82	
1,3	211	12	4,1	4,2	4,1	4	4,1	4,1	
1,3	211	15	5,1	5	5	4,9	5,2	5,04	
1,3	211	18	5,5	5,3	5,4	5,6	5,5	5,46	
1,3	211	20	6	5,9	6,2	6,1	6	6,04	
1,3	222	5	1,2	1,1	1,2	1,2	1,2	1,18	
1,3	222	8	3,1	3	3	2,9	3,1	3,02	
1,3	222	10	5	4,9	4,8	5,2	5	4,98	
1,3	222	12	6,1	6,1	6	6,3	5,9	6,08	
1,3	222	15	Rotura	Rotura	Rotura	Rotura	Rotura	Rotura	
2,6	190	5	0,8	0,9	0,7	0,9	1	0,86	
2,6	190	8	1,7	1,5	1,6	1,8	1,7	1,66	
2,6	190	10	2,9	2,9	3,1	3	3	2,98	
2,6	190	12	4,1	3,9	4,2	4	4,1	4,06	
2,6	190	15	5,1	4,9	5	5,1	5,1	5,04	
2,6	190	18	5,2	5,1	5,3	5,3	5,4	5,26	
2,6	190	20	5,2	5,2	5,3	5,4	5,4	5,3	
2,6	211	5	1,2	1,3	0,9	1,2	1,1	1,14	
2,6	211	8	2,6	2,5	2,7	2,6	2,5	2,58	
2,6	211	10	4,8	4,7	4,8	5	5,1	4,88	
2,6	211	12	5,4	5,5	5,3	5,3	5,4	5,38	
2,6	211	15	6	5,9	6,1	6	6,1	6,02	
2,6	211	18	6,2	6,1	6,1	6,2	6,3	6,18	
2,6	211	20	6,5	6,4	6,5	6,5	6,5	6,48	
2,6	222	5	2,1	1,9	2	2,1	2,1	2,04	
2,6	222	8	3,9	3,9	4	4,1	3,8	3,94	
2,6	222	10	5,9	6	6,2	5,9	6,1	6,02	
2,6	222	12	6,3	6,4	6,3	6,3	6,2	6,3	
2,6	222	15	Rotura	Rotura	Rotura	Rotura	Rotura	Rotura	

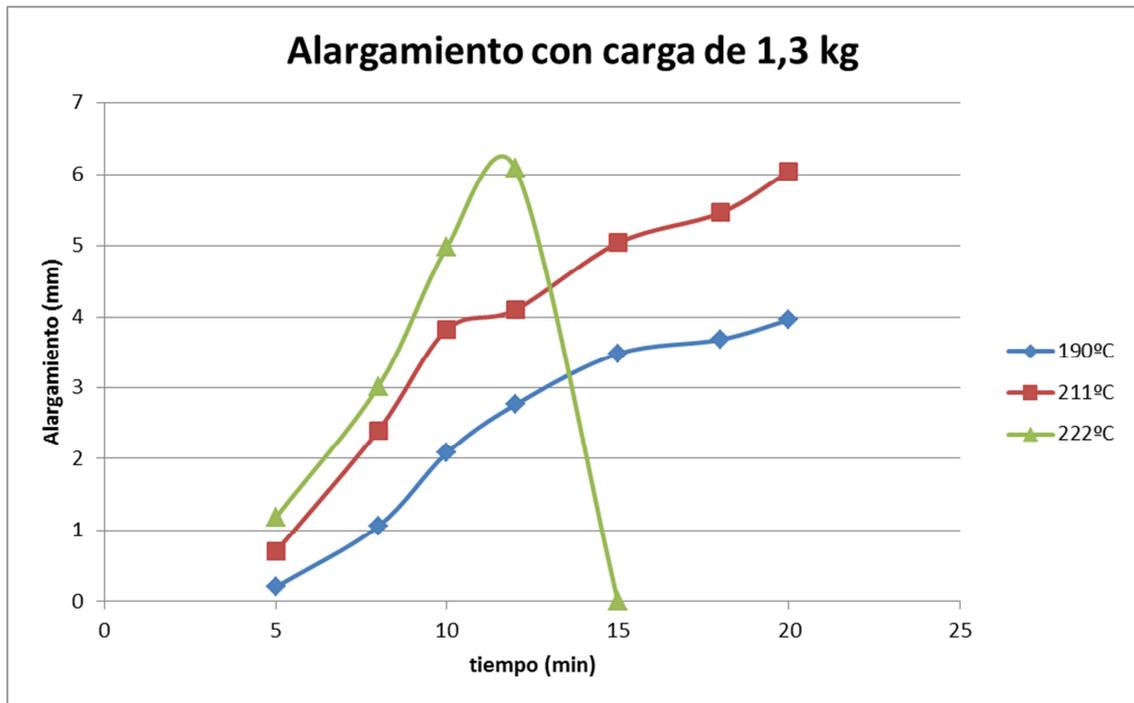


Figura 6- Alargamiento bajo carga constante de 1,3 kg a diferentes temperaturas

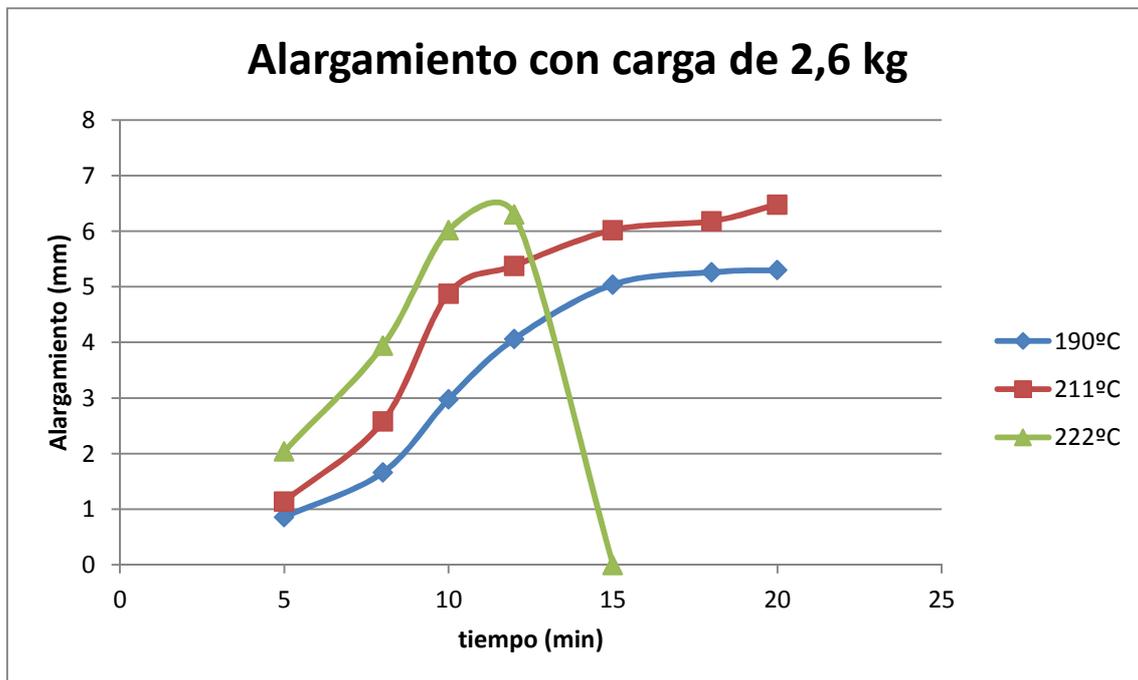


Figura 7- Alargamiento bajo carga constante de 2,6 kg a diferentes temperaturas

Como puede apreciarse, en ningún caso se llega a deformaciones superiores a 6,4 mm, ya que la probeta rompe.

De este experimento se pueden obtener las siguientes conclusiones:

- 1- El alargamiento máximo bajo carga, incluso a temperaturas elevadas constantes, no supera el 3%. Por tanto la nueva hipótesis también es falsa y el material definitivamente no es adecuado para procesos con deformaciones que impliquen una pérdida de espesor significativa.
- 2- El proceso adecuado para curvar el material no puede modificar el espesor de la pieza salvo deformaciones pequeñas (reducciones del espesor inferiores a .....), por lo que deben utilizarse sistemas que permitan la deformación libre del material, tal y como se realiza actualmente utilizando prensas de membrana.
- 3- La mejora del proceso actual debe intentarse manteniendo el procedimiento de curvado. Dado que los tiempos de proceso son los siguientes:
  - calentamiento de la plancha: de 15 a 19 minutos, a una temperatura de 160°C-170°C
  - moldeado en prensa y enfriamiento fuera de prensa: entre 7 + 7 minutos, y 40 minutos en total según fabricantes.

**se plantea una tercera hipótesis: el proceso puede reducirse a 15 minutos en total mediante calentamiento a mayor temperatura y enfriamiento forzado por aire.**

### **1.3- Termo-conformado en prensa de membrana**

Para comprobar esta nueva hipótesis se debe verificar la relación entre el tiempo y la temperatura de calentamiento, y la deformación máxima que experimenta una pieza de solid sin que existan restricciones a su curvado, es decir que curve sin modificaciones de espesor.

Tomando como referencias el *ensayo de carga de la norma ISO 19712-2, Ap-7, y el ensayo de temperatura de deflexión bajo carga de la norma ASTM D 648*, se diseña un experimento que consiste en determinar la deflexión por flexión producida bajo carga constante, sobre probetas sometidas a diferentes temperaturas y tiempos de exposición.

La carga y la geometría de la pieza se determinan mediante un ensayo de resistencia a la flexión de la muestra a temperatura ambiente, decidiéndose que deben utilizarse probetas rectangulares de 400 mm de largo, 20 mm de ancho y 12 mm de espesor. Las probetas se colocan sobre un dispositivo de ensayo de flexión con dos puntos de apoyo separados 300 mm y la carga de aplicación sobre su punto central es de 5 N, de forma que la carga corresponde al 1 % de la carga de rotura.

El dispositivo de flexión se coloca en una estufa de desecación y una vez alcanzada la temperatura de ensayo se coloca la probeta y la carga, y se mantiene el montaje durante 15 min, 30 min, 45 min y 60 min utilizando probetas individuales para cada tiempo de exposición (figuras 8 y 9).



Figura 8 – Montaje de ensayo



Figura 9 – Probeta flexionada bajo carga

Una vez transcurrido el tiempo de exposición, las probetas se descargan y en caliente se mide la curvatura con una precisión de 0,1mm, mediante un calibre digital y una regla de referencia.

Las temperaturas de ensayo son 140°C, 160°C, 180°C y 200°C. Se ensayan un total de 20 probetas.

Temperatura	Tiempo (min)	Deformación (mm)			
		Def1	Def2	Def3	Promedio
140°C	7,0	0,0	1,2	0,8	0,7
	15,0	16,1	15,7	14,9	15,6
	30,0	30,2	28,5	30,7	29,8
	45,0	45,1	43,8	44,2	44,4
	60,0	56,4	57,1	55,2	56,2
160°C	7,0	3,8	4,6	4,1	4,2
	15,0	19,8	17,9	18,9	18,9
	30,0	40,9	42,1	40,2	41,1
	45,0	72,1	71,1	69,8	71,0
	60,0	118,8	116,6	117,4	117,6
180°C	7,0	8,9	9,4	10,2	9,5
	15,0	30,4	31,4	30,5	30,8
	30,0	120,4	121,1	122,0	121,2
	45,0	colapsa			
	60,0				
200°C	7,0	40,3	42,0	39,4	40,6
	15,0	119,5	121,6	122,0	121,0
	30,0	colapsa			
	45,0				
	60,0				

Los resultados son los mostrados en el gráfico siguiente.

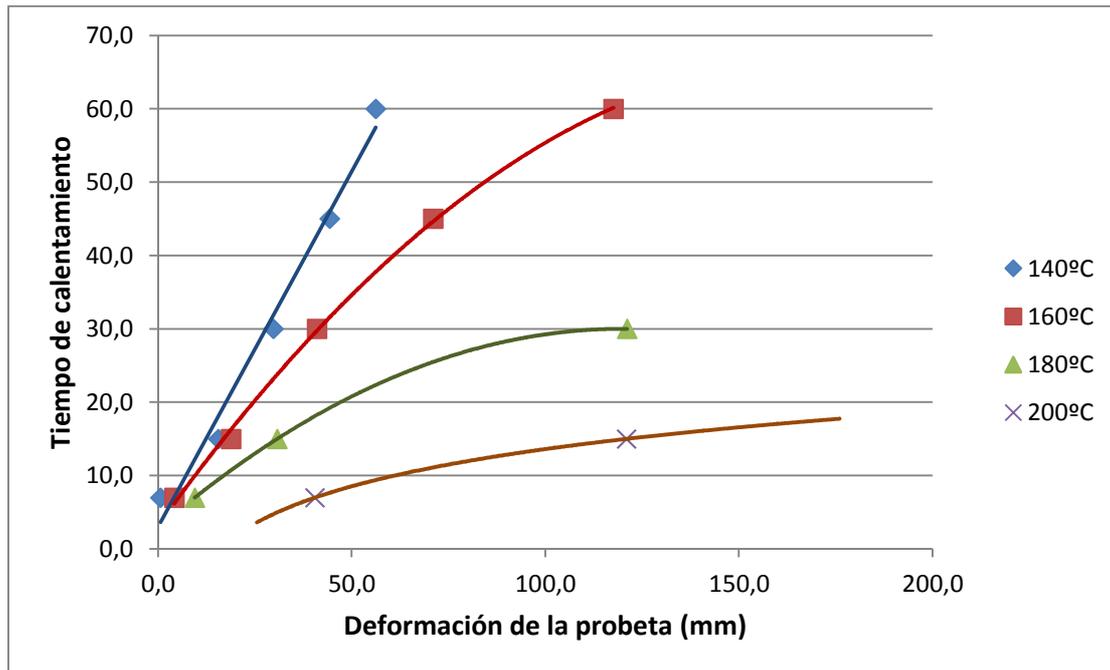


Figura 10 – Deformación del material sin restricciones (flexión libre)

A 180°C y 200°C no se pudieron medir las deflexiones tras 30 min y 15 min respectivamente, ya que las probetas curvaban tanto que se caían del soporte.

A la vista de las curvas a diferentes temperaturas y del comportamiento del material en cuanto a deformación, se puede concluir que la deformación equivalente que se consigue calentando el solid a 160°C durante 15 minutos, se puede conseguir calentándolo a 180°C durante 10 minutos, o a 200°C durante 5 minutos.

Para evaluar la temperatura superficial a la cual, tras su deformación en caliente, el material es lo suficientemente rígido como para poder manejarlo sin que pierda la forma, se diseña un nuevo experimento.

Se preparan muestras rectangulares de 300 mm de largo, 50 mm de anchura y 12 mm de espesor, se calientan hasta 200 °C y se doblan en forma de “U” tal y como se indican en la figura 11 mediante un útil adecuado. De esta forma se consigue un radio de curvatura interno de 36 mm, lo cual implica una deformación muy importante.



Figura 11 – Deformación del solid tras calentamiento a 200°C

Se mide la temperatura superficial de las piezas con un termómetro de infrarrojos modelo 63 de la marca FLUKE con una precisión de  $\pm 1^\circ\text{C}$ .



Figura 12 – Medición de la temperatura superficial

A intervalos de  $5^\circ\text{C}$  de enfriamiento se retiran las piezas del sistema, con el fin de determinar la temperatura de manipulación, a la cual las piezas mantienen su geometría tras liberarlas del montaje. Esta temperatura resulta ser de  $105^\circ\text{C}$ .

La velocidad de enfriamiento sin ventilación forzada se obtuvo en 2014, y quedó reflejada en el Entregable 2.1 (figura 13).

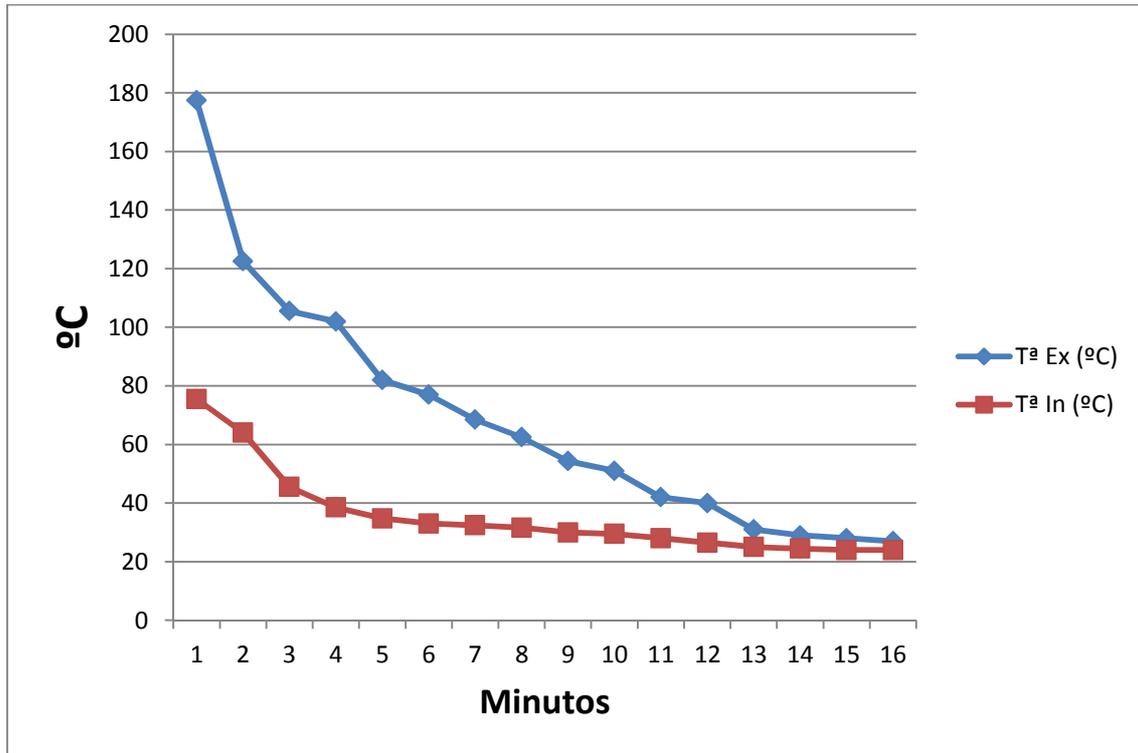


Figura 13- Promedio de variación de las temperaturas exterior e interior en una placa de Solid (Velocidad de enfriamiento)

Se realiza la medición de la velocidad de enfriamiento con ventilación forzada mediante un ventilador sobre cinco probetas de Solid calentado a 200°C, obteniéndose el resultado mostrado en la figura 14.

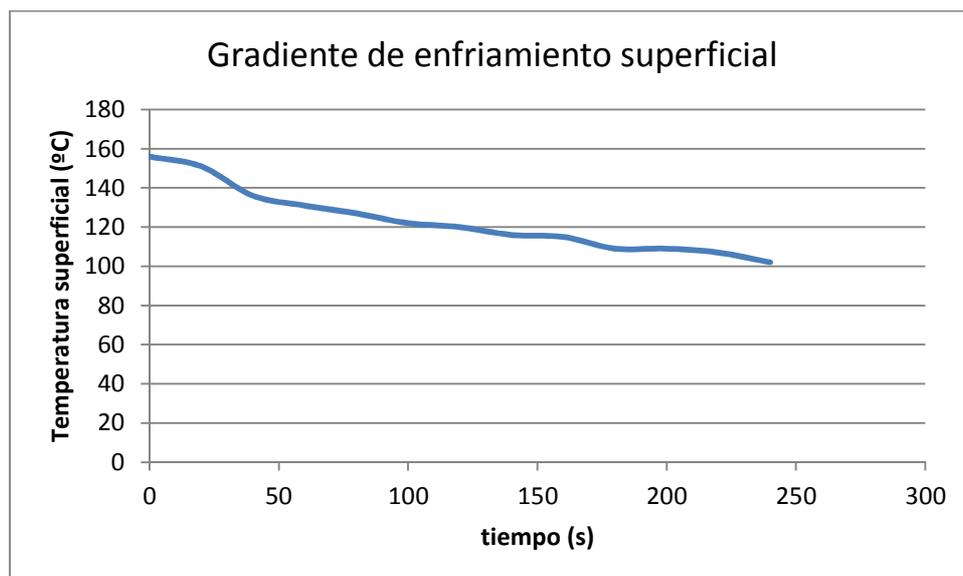


Figura 14- Gradiente de enfriamiento superficial con ventilación forzada

A partir de los resultados obtenidos, sí que se puede validar la tercera hipótesis planteada ya que el proceso de podría realizar del modo siguiente:

<b>Proceso habitual</b>	<b>Nuevo proceso</b>
Calentamiento de la plancha a 160°C – 170°C, durante un intervalo de tiempo de 15 a 19 minutos, dependiendo del espesor de la placa.	Calentamiento de la placa a 200°C durante 5 minutos.
Introducción en la prensa de membrana, sobre el molde, y aplicación de vacío durante un mínimo de 7 minutos y un máximo de 40 minutos (incluyendo enfriamiento)	Introducción en la prensa de membrana, sobre el molde, aplicación del vacío y refrigeración forzada con un ventilador durante 3 minutos.
Extracción de la pieza ya conformada de la prensa y reposo durante 7 minutos hasta que se pueda manipular sin riesgo de deformación.	
<b>TIEMPO TOTAL: Entre 29 y 59 minutos</b>	<b>TIEMPO TOTAL: 8 minutos</b>

Para validar experimentalmente este resultado, se ha construido una prensa de membrana de sobremesa y se han realizado pruebas con piezas reales a pequeña escala (figuras 15 y 16).



Figura 15- Prototipo de prensa de membrana de sobremesa con bomba de vacío

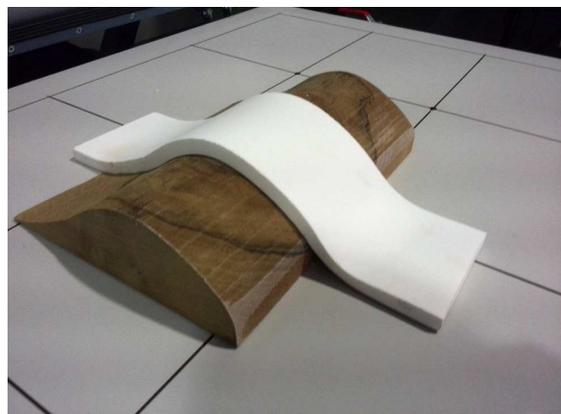


Figura 16- Pieza de solid curvada en la prensa de membrana

Se realizaron pruebas con un molde cuadrado con ángulo de curvatura de 90° y radio de curvatura de varios milímetros. En este caso el problema que apareció es que las piezas se rompían cuando adoptaban la forma del molde, ya que el radio de curvatura era demasiado pequeño y las piezas eran sometidas a una tensión excesiva al plegar 90°.

Se decidió repetir las pruebas utilizando un molde con curvas más suavizadas, con un ángulo de curvatura de 130° y radio de curvatura del orden de 10 centímetros. **En este caso se obtuvieron resultados positivos con tiempos de calentamiento de 9 minutos a 220°C.** Si la pieza se calentaba menos tiempo (8 minutos por ejemplo), no adquiriría la plasticidad suficiente para adoptar la forma del molde y se rompía al aumentar el vacío.

El tiempo de enfriamiento con ventilación forzada para que la temperatura superficial de las piezas descendiese a 100°C fue de 2 minutos. Este tiempo de enfriamiento tan bajo tiene sentido, porque se midió la temperatura superficial de las piezas que se calentaban 9 minutos a 220°C y resultó ser de 120°C. Según la curva de la figura 14, son necesarios unos 150 segundos para pasar de 120°C a 100°C.



Figura 17- Medición de la temperatura superficial de la pieza curvada

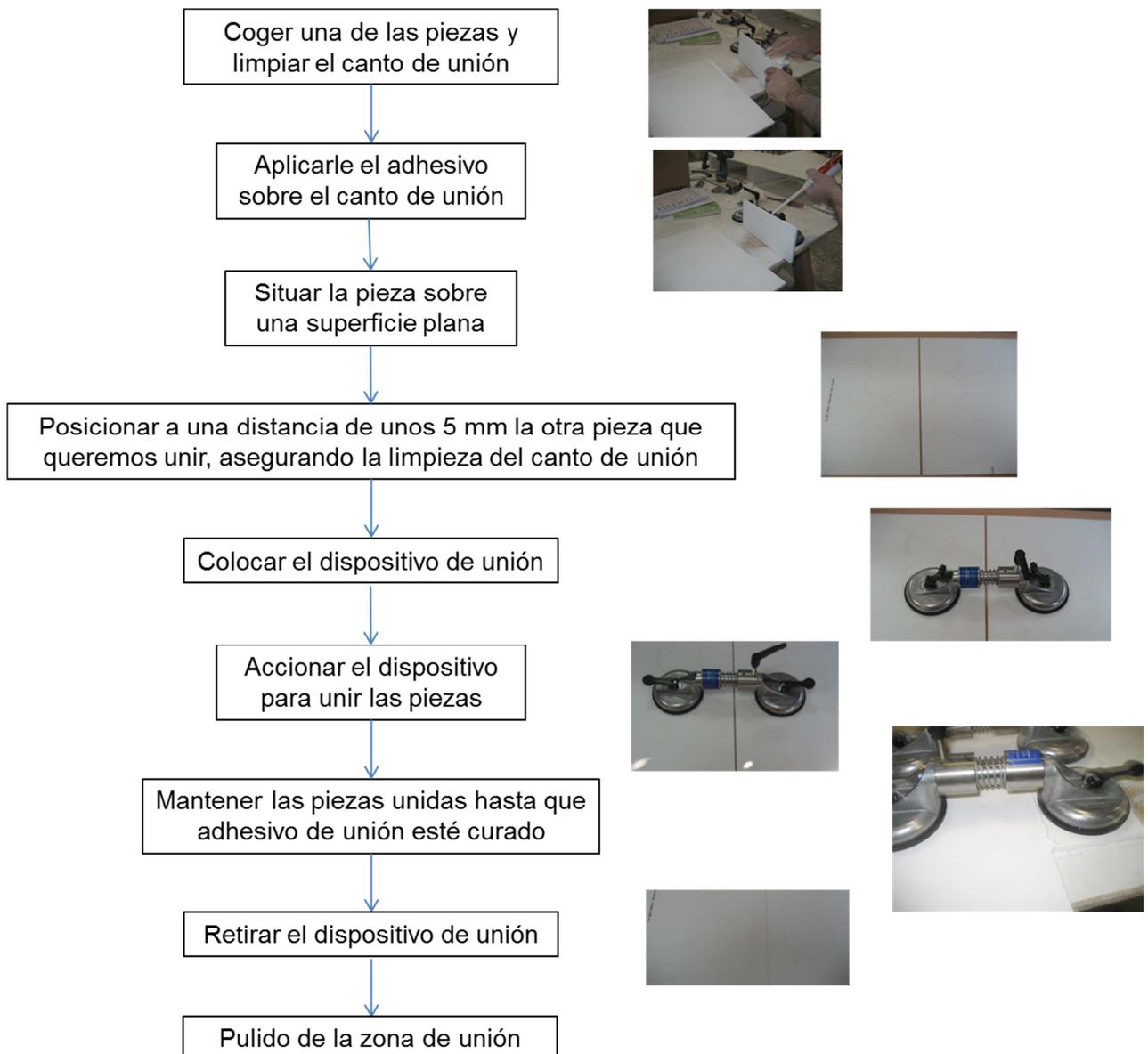
Por consiguiente, se valida la tercera hipótesis: el proceso puede reducirse a 15 minutos en total mediante calentamiento a mayor temperatura y enfriamiento forzado por aire. En realidad se podría reducir un poco más, pero es mejor mantener ese margen de seguridad.

## 1.4- Unión a testa

Se comienza a realizar pruebas de unión entre dos piezas de 200 mm con un solo dispositivo, y seguidamente se realiza sobre dos piezas de 500 mm con dos dispositivos conjuntamente.

El recorrido que tienen las ventosas es de unos 5,9 mm con lo que si la pieza tiene una separación superior a esa distancia no se consigue que el cierre sea el correcto. Por ello, las piezas se deben situar a una distancia un poco inferior, 5,8 mm, al recorrido total del dispositivo para asegurar que sobre los cantos a unir se genera la suficiente presión, garantizando que la unión se óptima.

Para hacer las pruebas se sigue el siguiente procedimiento:



Al realizarse las pruebas se han detectado dos aspectos a tener en cuenta:

- Limpieza de las superficies. Se requiere limpiar la zona donde se tiene que colocar la ventosa, para asegurar su correcta fijación. En una de las pruebas la limpieza no era suficiente y se produjo un deslizamiento de la ventosa sobre la pieza, lo que impidió una correcta unión.
- Sobrante de adhesivo. Al ejercer presión el adhesivo tiende a rebosar; en la parte superior no hay ningún problema, pero en cambio el adhesivo que sale por la parte inferior tiende a pegarse en la mesa de trabajo dificultando luego el despegue de la pieza.

Para evitar que el banco de trabajo se pueda manchar con el adhesivo, se deben utilizar unos suplementos para evitar que la zona de unión esté en contacto con la mesa (véanse figuras 17 y 18)

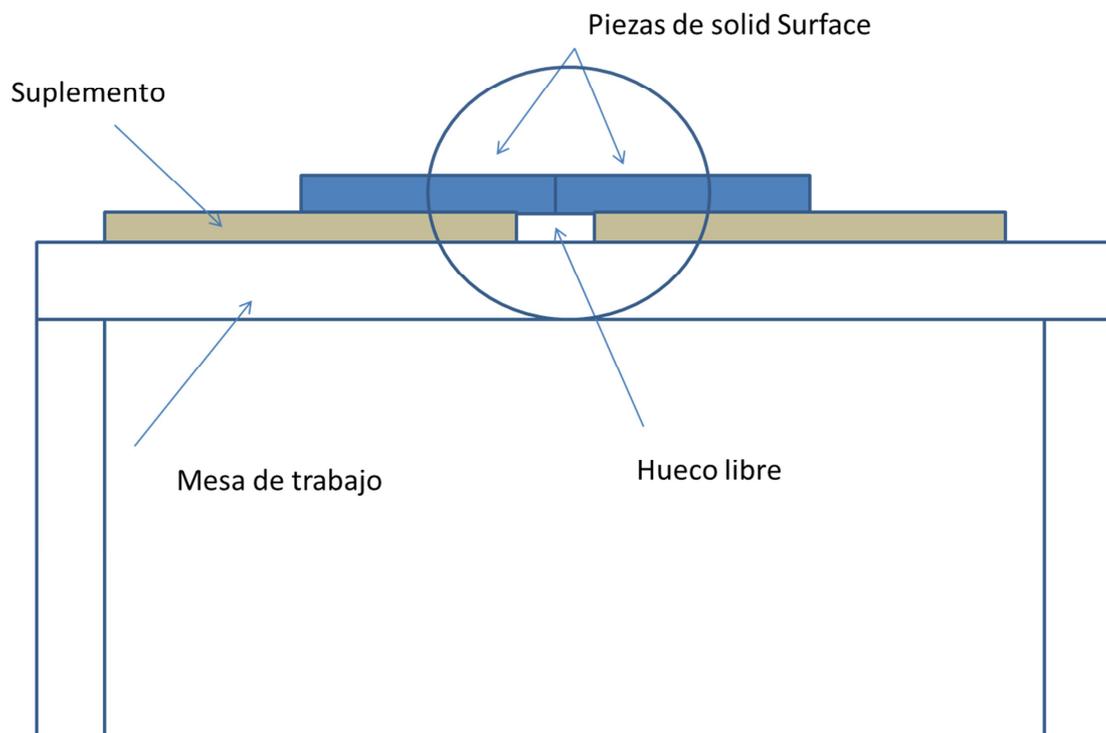


Figura 17 – Suplementos para la unión a testa de piezas planas

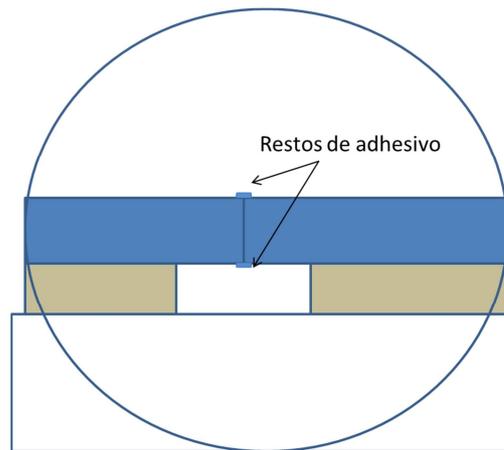


Figura 18 – Rebosamiento del excedente de adhesivo

De esta forma el posible exceso de adhesivo se secará sobre las piezas, eliminándose posteriormente con el pulido de las superficies.

Las piezas de 200 x 200 mm quedan perfectamente unidas con un solo dispositivo.



Figura 19 – Unión de placas de 200 mm con un solo dispositivo

En las piezas de 500 x 500 mm, utilizando un solo dispositivo se podría conseguir una buena unión, aunque dado el tamaño y peso de las piezas es recomendable utilizar dos dispositivos de ventosas con lo que se consigue que las piezas queden perfectamente unidas.

Al trabajar con dos ventosas se dificulta la operación, ya que accionar el mecanismo para la unión de las piezas en los dos dispositivos simultáneamente es más complicado, ya que se deben accionar los dos mecanismos a la vez.

El dispositivo de unión tiene una dimensión total de 350 mm, con lo que la dimensión de las dos piezas a unir, tienen que tener al menos esa dimensión de largo, el ancho no sería un problema, lo único es que requeriría un mayor número de dispositivos de unión, aproximadamente uno por cada 400 mm.

Para que la ventosa se adhiera a la pieza requiere que tenga al menos 118 mm, con lo que la pieza más pequeña de las que tengamos que unir tiene que contar con esta medida, en caso contrario no será posible utilizar este dispositivo de unión, sería necesario diseñar un dispositivo más pequeño.

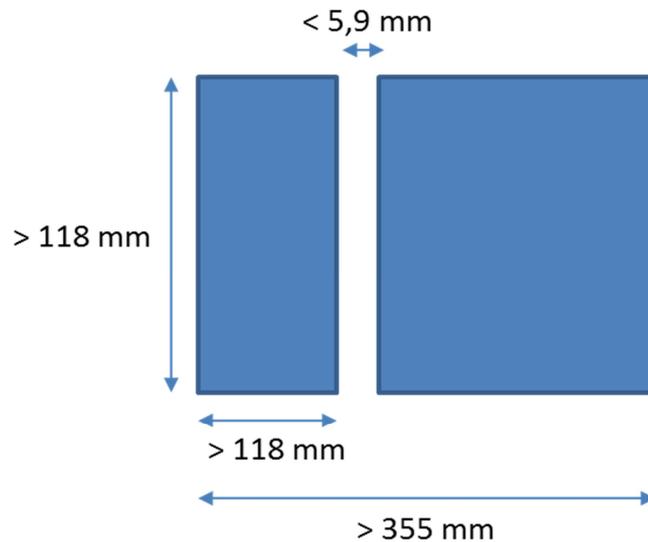


Figura 20 – Dimensiones mínimas de las piezas a unir

Al realizar las pruebas con piezas de 9 mm de espesor, las placas pueden tener una pequeña curvatura, con lo que es necesario ejercer presión para que el alineado de los cantos sea el adecuado (figura 21).

Esto se podría resolver también por dispositivos que tuviera suficiente peso como para mantener la planicidad de las superficies.



Figura 21 – Montaje utilizado para mantener las superficies planas en caso de espesores de 9 mm

En cuanto al tiempo empleado, se han encontrado diferencias significativas al utilizar uno o dos dispositivos simultáneamente. El cronometraje realizado en la secuencia

- 1- Limpieza de cara y canto
- 2- Aplicación de adhesivo
- 3- Posicionar las placas a unir a 5 mm de distancia
- 4- Posicionar el dispositivo y accionar las ventosas
- 5- Accionar el sistema de aproximación hasta juntar las placas

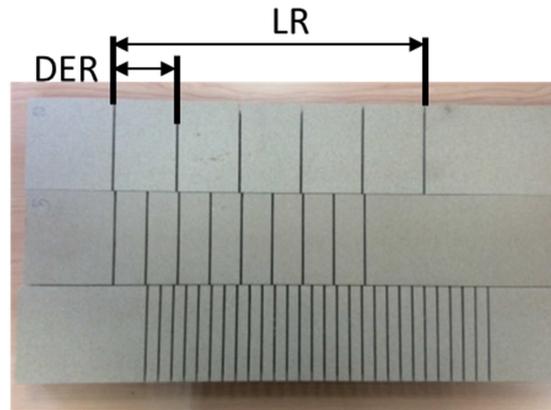
da los siguientes resultados:

- Utilizando un sólo dispositivo: 130 segundos
- Utilizando dos dispositivos simultáneamente: 190 segundos

Por tanto, **el proceso original se puede reducir de 35-40 minutos a menos de 25 minutos, incluyendo los 20 minutos de secado.**

## 2- Procesos sobre tableros aligerados

La primera tarea a realizar ha sido **la validación de los resultados teóricos obtenidos en 2015**. Recordando dichos resultados, se disponía de relaciones entre el espesor de los tableros (E), la distancia entre ranuras (DER), la longitud ranurada (LR), el radio de curvatura (R) y el ángulo de curvatura (A).



Distancia entre ranuras y Longitud Ranurada

Figura 22- Variables significativas en un tablero alveolar curvado

Dada la dificultad de establecer una relación universal entre todas estas variables, y considerando que el ángulo de curvatura y el radio de curvatura están a su vez relacionados, para verificar la validez de estas relaciones se ha considerado oportuno obtener una única ecuación que ligue el radio de curvatura R con DER y LR.

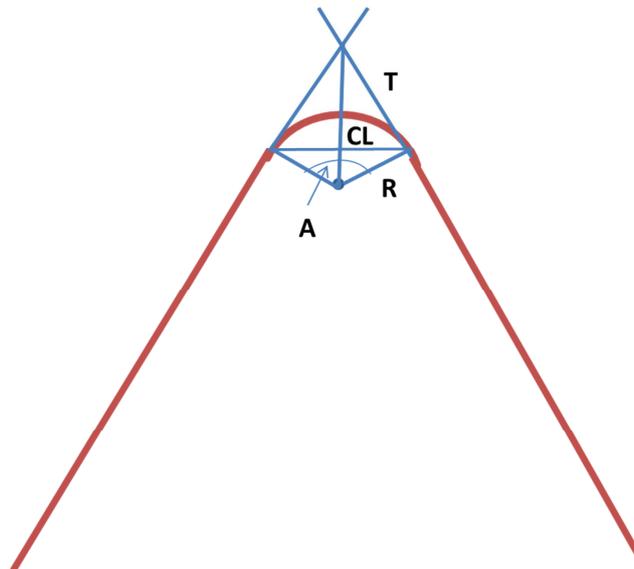


Figura 23 – Variables significativas en una pieza curvada

En una pieza curvada real, mediante proyección o trazado de la curva, resulta sencillo medir la distancia T y la distancia CL (cuerda larga). Los valores que definen la curva son su radio R y el ángulo de curvatura A.

Para no complicar la resolución del problema, se ha considerado que el espesor del tablero no es significativo, y a partir de la batería de pruebas realizadas, se ha obtenido la siguiente ecuación para tableros de 50 mm:

$$R = -25'23 + 12'33 \text{ DER} + 0'59 \text{ LR} \quad (R^2 = 0'97)$$

Volviendo a repetir el proceso considerando sólo el espesor de 25 mm, se obtiene la siguiente ecuación:

$$R = -11'06 + 6'06 \text{ DER} + 0,28 \text{ LR} \quad (R^2 = 0'98)$$

Aplicando nuevamente el análisis multivariante con PSPP para el ángulo de curvatura, las ecuaciones que se obtienen son:

- Tablero de 50 mm

$$A = 37'17 - 3'36 \text{ DER} + 0'48 \text{ LR} \quad (R^2 = 0'95)$$

- Tablero de 25 mm

$$A = 88'31 - 6'65 \text{ DER} + 0,64 \text{ LR} \quad (R^2 = 0'85)$$

## 2.1- Resistencia de piezas curvadas

Para comprobar la resistencia del encolado en las ranuras de los listones de tablero curvados previamente, se dispone de muestras de listones de tablero curvados con diferentes radios de curvatura (diferentes longitudes de ranurado y distancia entre ranuras), y con aplicación de chapa de mdf y papel sobre la superficie curva para dar más resistencia a la curva.



Figura 24- Ejemplo de dos piezas curvadas

Las muestras que se han utilizado se describen seguidamente

Nº	Descripción	Imagen
1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Longitud ranurado: 60 cm</li> <li>• Distancia entre ranuras: 15 cm</li> <li>• Superficie sin rechapado</li> </ul>	
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Longitud ranurado: 30 cm</li> <li>• Distancia entre ranuras: 15 cm</li> <li>• Superficie sin rechapado</li> </ul>	
2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Longitud ranurado: 60 cm</li> <li>• Distancia entre ranuras: 5 cm</li> <li>• Superficie con chapa mdf</li> </ul>	

5	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Longitud ranurado: 30 cm</li> <li>• Distancia entre ranuras: 5 cm</li> <li>• Superficie con chapa mdf</li> </ul>	
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Longitud ranurado: 60 cm</li> <li>• Distancia entre ranuras: 10 cm</li> <li>• Superficie con papel pegado</li> </ul>	
6	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Longitud ranurado: 30 cm</li> <li>• Distancia entre ranuras: 2 cm</li> <li>• Superficie sin rechapado</li> </ul>	
7	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Longitud ranurado: 60 cm</li> <li>• Distancia entre ranuras: 2 cm</li> <li>• Superficie sin rechapado</li> </ul>	

Se ha realizado una prueba similar a un ensayo a flexión de una viga empotrada. El tablero se ha fijado con mordazas a una mesa y en el extremo del tablero se ha aplicado una fuerza perpendicular al tablero medida con un dinamómetro.



Figura 25- Montaje con dinamómetro y gancho



Figura 26- Montaje con dinamómetro y empujador

Para las muestras 3 y 4, se realizó la prueba dos veces: Pruebas A y B.

- En la prueba A (3A y 4A), el agarre se realiza en una superficie alejada de la curva.
- En la prueba B (3B y 4B), el agarre se realiza en una superficie próxima a la curva.

A continuación se muestra una tabla con los resultados obtenidos de las pruebas.

	DIMENSIONES			MONTAJE		RESULTADOS			Tipo de rotura
	L(cm)	b(cm)	h(cm)	L - garra(cm)	Dist carga(cm)	Carga Rotura (kg)	Mb (kg-cm)	Promedio Momento rotura(kg-cm)	
1	100	9,5	2,5	79,5	79,5	3,7	-294,15	-294	1 Se rompe la ranura ya abierta
2	100	9,5	2,5	62	62	10,7	-663,4	-663	2 Se rompe la ranura más cercana a la base
3A	100	9,5	2,5	79,5	79,5	7,2	-572,4	-572	3 Se deforma el tablero no ranurado en la base
3B	100	9,5	2,5	43	43	28,2	-1212,6	-1213	2 Se rompe la ranura más cercana a la base
4A	100	9,5	2,5	79,5	79,5	7	-556,5	-557	3 Se deforma el tablero no ranurado en la base
4B	100	9,5	2,5	50	50	17,6	-880	-880	2 Se rompe la ranura más cercana a la base
5	100	9,5	2,5	79,5	79,5	8,3	-659,85	-660	3 Se deforma el tablero no ranurado en la base
6	100	9,5	2,5	79,5	79,5	2,5	-198,75	-199	4 Se abre por la mitad el tablero
7	100	9,5	2,5	70	70	6,5	-455	-455	4 Se abre por la mitad el tablero

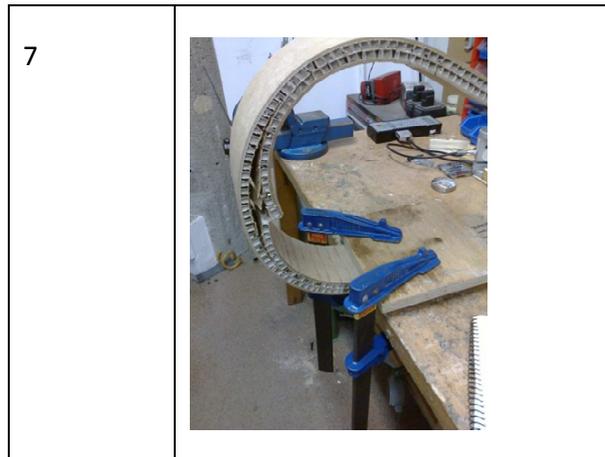
- Cuando la deformación se produce en el tablero recto se han obtenido valores entre 557-660 kg-cm.
- Cuando la deformación se produce en las ranuras encoladas se han obtenido valores entre 663 -1213 kg-cm

Por tanto, se demuestra que la parte más débil del tablero curvado no es la propia curva, por lo que la funcionalidad de la pieza curvada no depende de la resistencia de la curva sino de la resistencia intrínseca del tablero.

El resultado visual de las pruebas es el siguiente:

Prueba	Imagen
1	
2	
3A	
3B	

4A	
4B	
5	
6	



## CONCLUSIONES.

- Si el anclaje se realiza sobre una superficie alejada de la curva, se deforma el tablero recto y no la curva.
- Si el anclaje se realiza cerca de la curva, la fuerza para romper la ranura es mayor que la de romper el tablero recto. La propia resistencia del tablero es peor que la del encolado de las ranuras
- La aplicación de la chapa de MDF no mejora la resistencia de la curva. En cambio la pieza con papel si mejora notablemente su resistencia en la curva, frente a los listones que no llevaban nada.
- La resistencia de las ranuras encoladas a flexión alcanza un valor mínimo de 600 kg.cm, similar a la resistencia del propio tablero, Por tanto la funcionalidad de las piezas curvadas no depende propiamente de la curva sino de la resistencia del tablero.

## 2.2- Prototipos de mobiliario con elementos curvados

Se han diseñado y construido tres tipos de muebles con elementos curvados, ensamblados de forma tradicional, para comprobar si estas piezas soportan los esfuerzos habituales a los que está sometido cualquier mueble.

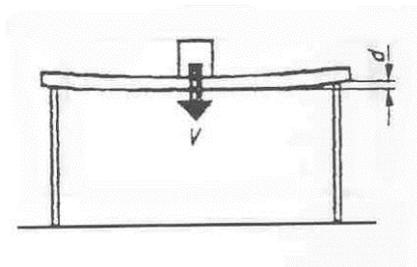


Figura 27- Imágenes de los muebles contenedores y el escritorio infantil

El diseño del producto es muy básico, como es fácil de apreciar, ya que se trataba de evaluar simplemente la funcionalidad y resistencia de los elementos curvados.

Para ello se realizaron ensayos de carga estática y fatiga sobre ambos tipos de elementos, tal y como indica la normativa existente. En el caso del escritorio se aplica la Norma *UNE EN 1730:2013 Mobiliario doméstico. Mesas. Método de ensayo para la determinación de la resistencia, la durabilidad y la estabilidad*. Concretamente se aplica el ensayo de carga estática vertical:

Se aplica una fuerza vertical descendente de 1000 N manteniendo la carga 10 veces durante 10 seg, sobre los puntos más desfavorables de la superficie de la mesa pero nunca a menos de 100 mm, de los bordes.





Tras la finalización del ensayo no se observan desperfectos ni roturas en los componentes de la mesa ni pérdida de servicio.

Figura 28- Ensayo de carga estática sobre la tapa de la mesa

En el caso del taburete se aplica la Norma *UNE-EN 12520:2010 Mobiliario. Resistencia, durabilidad y seguridad. Requisitos para asientos de uso doméstico*. Concretamente se aplica el ensayo de carga estática vertical sobre el asiento:

Se aplica sobre el asiento una fuerza de 1300 N, en sentido descendente en un punto, a 80 mm del borde frontal de la estructura, 10 veces.

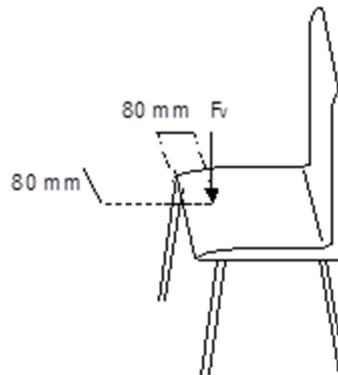




Figura 29- Ensayo de carga estática sobre el taburete

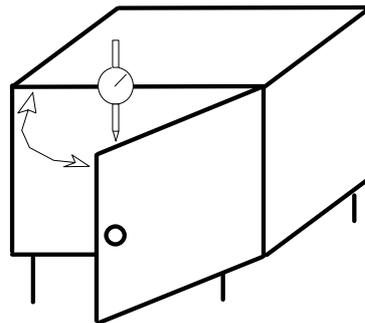
Tras finalizar el ensayo no se han observado deformaciones permanentes, ni roturas en componentes del asiento y la estructura que puedan afectar a la seguridad del usuario.

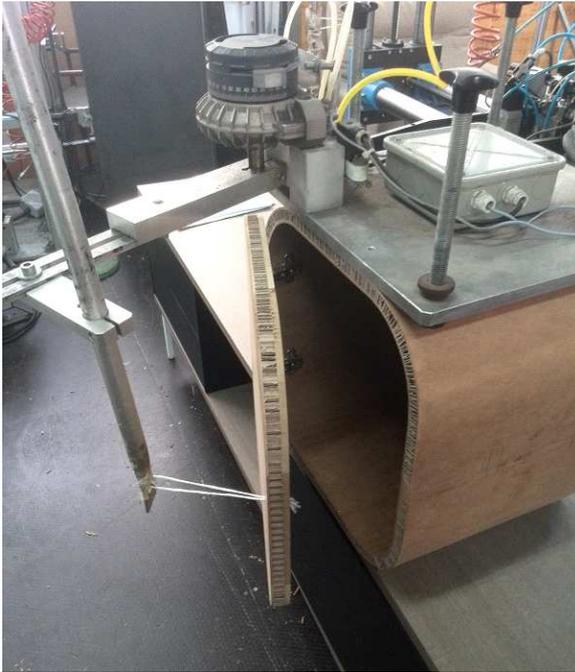
La muestra mantiene su funcionalidad.

En el caso del mueble contenedor se aplica la Norma *UNE 11016 Armarios y muebles similares. Métodos de ensayo para determinar la resistencia estructural*. Concretamente se aplica el ensayo de fatiga de puertas giratorias.

Abrir y cerrar una de las puertas mediante un dispositivo neumático adecuado, desde su posición de cierre total hasta que falten 50 mm., para su apertura, con una cadencia no superior a 6 ciclos por minuto.

El ensayo se repite un número de ciclos igual a 30.000 => (nivel 3 uso doméstico)





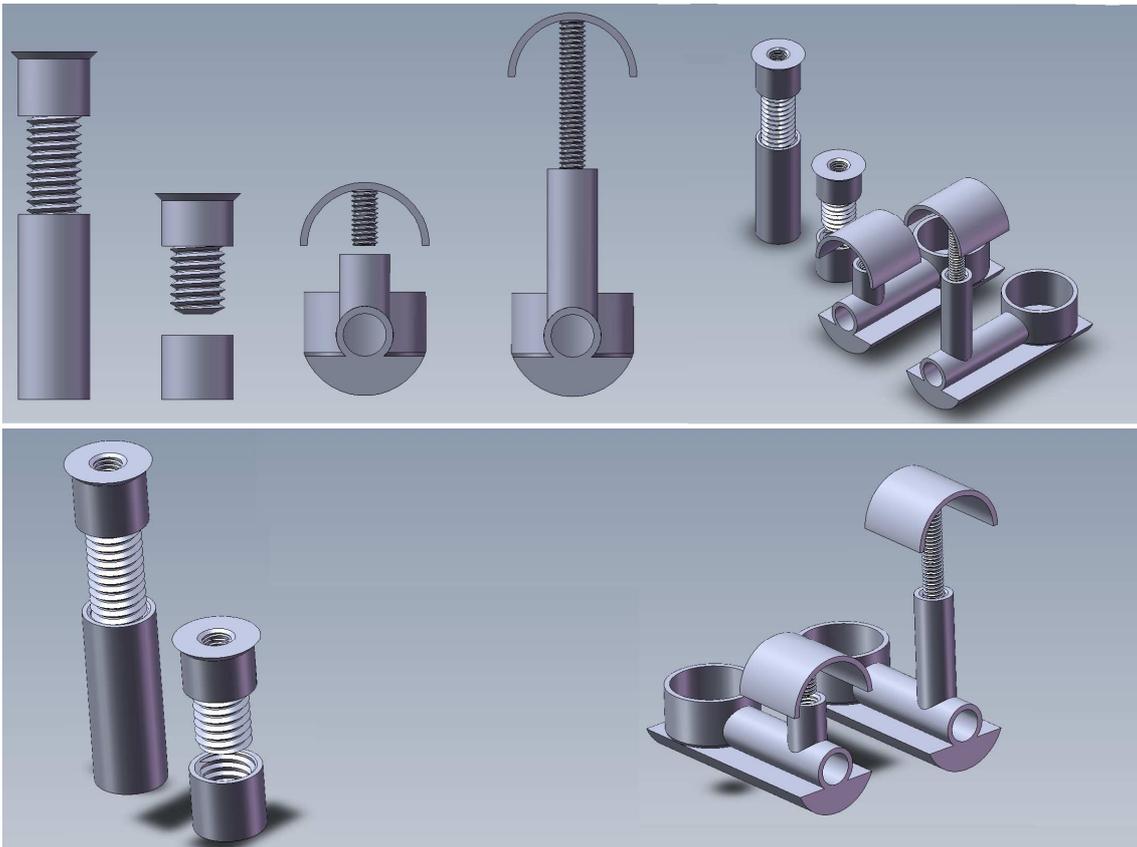
Al finalizar el ensayo no se observan deformaciones ni roturas que afecten al funcionamiento correcto de la puerta.

Figura 30- Ensayo de fatiga de puertas

### 2.3 Inserción de herraje en tableros alveolares

Se desarrollaron cuatro prototipos de herrajes para tableros alveolares mediante una impresora 3D.

En la figura siguiente se muestran las imágenes renderizadas de los herrajes diseñados.



Finalmente se construyeron prototipos de plástico en ABS, según muestran las fotografías.



Figura 31- Prototipos de los herrajes construidos mediante impresión 3D

Para valorar la adecuación del herraje a la funcionalidad perseguida y su resistencia una vez insertado en el tablero, se realiza un ensayo similar al de arranque de tornillos según la *Norma UNE 56851 Método de ensayo de puertas. Ensayo de arranque de tornillos* (figura 32). El valor medio del esfuerzo, para esta aplicación en la que el tornillo se inserta directamente sobre la madera o material de que se trate, debe estar entre 550N y 1.000N, dependiendo del destino de la puerta.

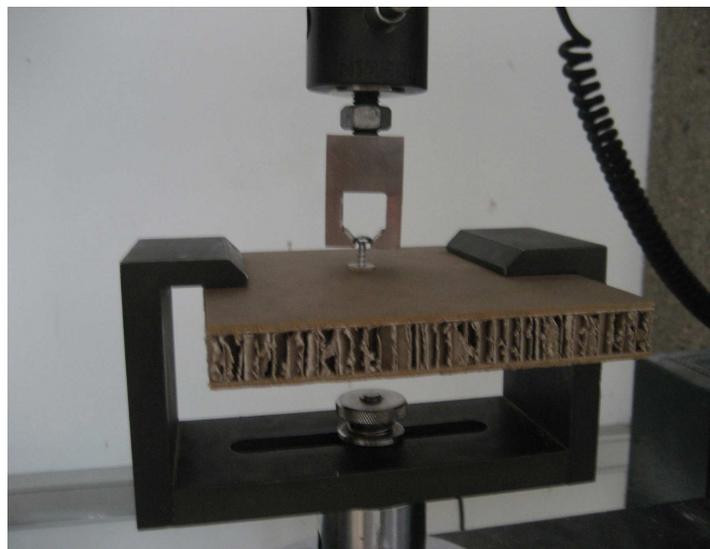
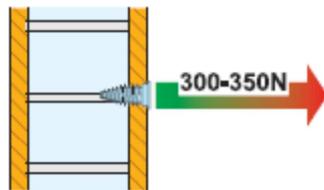


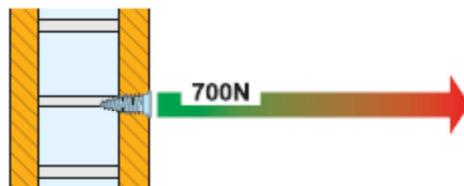
Figura 32- Ensayo de arranque de tornillos

En este caso no se trata de evaluar la misma función, sino una funcionalidad de carácter general para cualquier tipo de mobiliario, por lo que la referencia que se toma es la de un tornillo especial (figura 33) y un taco químico de Hafele (figura 34).

• **Valores de extracción**



Tablero de material ligero con capa exterior de tablero fino 4 mm



Tablero de material ligero con capa exterior de tablero fino 8 mm



Tablero de aglomerado

Figura 33- Tornillo especial Variante HC - Hafele

• **Valores de extracción**



Figura 34- Taco químico Aerofix 100

Se realizaron dos pruebas ya que sólo se dispone de unas pocas muestras, una prueba sin aplicar cola antes de insertar el herraje y otra prueba aplicando en el agujero un poco de cola de poliuretano de secado rápido, antes de insertar el taco. El espesor del tablero es de 3 mm.

Los resultados fueron:

- Taco sin cola: 126 N
- Taco con cola: 380 N

Al ensayarse únicamente una muestra de cada tipo, el resultado es una aproximación aunque da un orden de magnitud razonablemente bueno. En cualquier caso y para garantizar buenos resultados, la utilización de este tipo de taco requiere infiltrar unas gotas de adhesivo en el agujero antes de insertar el taco. Para mejorar la resistencia al arranque se debe modificar un poco el diseño del taco, aumentando el tamaño de las aletas.

Aunque no se ha solicitado formalmente un presupuesto para fabricar los moldes requeridos para hacer el taco de forma industrial, se puede aproximar un coste unitario del taco considerando el coste del material (que pesa 2,5 g aproximadamente). El precio de compra podría oscilar entre 0,3 y 0,6 € por unidad, que resulta mucho menor que el de un taco químico con características resistentes similares.

Además, la novedad de este tipo de herraje es que permite ajustarse al grueso de tablero, con variaciones de 10 mm en el taco pequeño (entre 25 y 35 mm de grueso) o 20 mm con el taco grande (tableros entre 40 y 60 mm).

El herraje para la unión de tableros mediante excéntricas, siempre que se utilice adhesivo en su inserción, soporta bien esfuerzos perpendiculares al cuerpo principal, pero en la dirección del tornillo de ensamble la resistencia es similar a la del taco (350 N). En este caso el rediseño pasaría por añadir una excéntrica del espesor del tablero.



Figura 35- Inserción de excéntrica para ensamble de tableros

Conclusión de las pruebas realizadas:

- Con el diseño actual, los tacos de longitud variable pueden funcionar en muebles que no sean sometidos a grandes esfuerzos, por ejemplo el mobiliario doméstico. Mejorando el diseño, podrían utilizarse en cualquier tipo de mobiliario.

- Los tacos diseñados serían bastante más económicos que las soluciones actuales, siempre que se llegase a una fase de industrialización y los consumos fueran elevados.
- El herraje tipo excéntrica, en su diseño actual, no funciona bien a tracción. Aunque la carga que soporta (encolado) es similar a la del taco, por el tipo de esfuerzo a que está sometido esta resistencia debería ser muy superior. Se debe rediseñar el conjunto completo para asegurar su funcionalidad, rediseño que no ha podido realizarse en el marco del proyecto.

## 3- Especificaciones de proceso

### 3.1- Curvado de solid surface

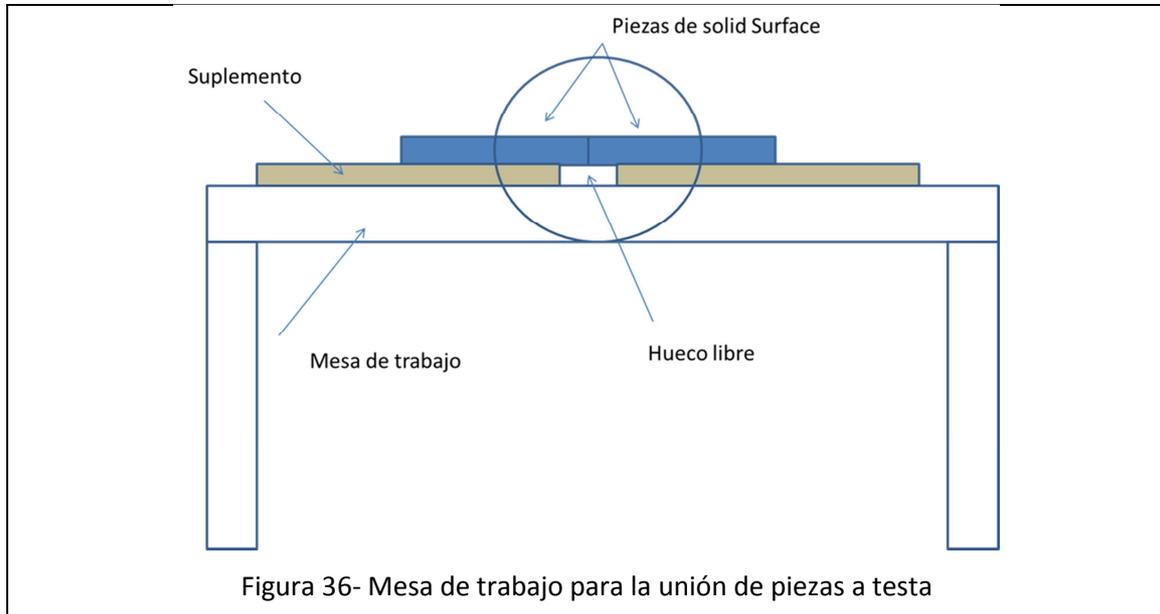
Las especificaciones del proceso considerado son las siguientes:

Proceso de curvado en prensa	Especificaciones del proceso
Corte y mecanizado de la plancha según diseño	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Velocidad lineal de corte/fresado: 10-15 m/min</li> <li>- Velocidad de giro de herramienta: 8.000-12.000 rpm</li> <li>- Herramientas de corte HSS o de mayor calidad.</li> </ul>
Calentamiento de la pieza	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Temperatura calentamiento: 200°C</li> <li>- Tiempo: 5 min</li> </ul>
Manipulación de la pieza	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Temperatura superficial: 200°C</li> <li>- Fácilmente deformable</li> <li>- Tiempo de manipulación: menor de 20 seg.</li> </ul>
Depositar en molde y aplicación de vacío	Presión de vacío: -70 a -90 kPa Membrana resistente a 240°C
Enfriamiento de la pieza	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Circulación forzada de aire frío sobre el exterior de la membrana.</li> <li>- Tiempo de enfriamiento forzado: 3 min</li> </ul>
Extracción de la pieza	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Temperatura superficial: 100°C</li> <li>- Pieza rígida pero delicada</li> <li>- Tiempo de enfriamiento: 12 min</li> </ul>

### 3.2- Encolado a testa de solid Surface

Las especificaciones del proceso considerado son las siguientes:

Proceso de unión de piezas a testa	Especificaciones del proceso
<p><b>Limpieza de la superficie y canto</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Rodillo/cepillo de limpieza, o aspiración del polvo</li> </ul>
<p><b>Aplicación de adhesivo</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilizar la boquilla aplicadora proporcionada por el fabricante del adhesivo</li> </ul>
<p><b>Posicionado de las piezas</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Superficie plana y limpia con mesa de trabajo con suplementos (Figura 36)</li> <li>- Uso de un manipulador de vacío para peso de pieza superior a 20 kg</li> </ul>
<p><b>Confrontar piezas, aplicar dispositivos y unir a presión</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- La separación entre las piezas debe ser inferior a 5 mm. Se debe verificar que ambas piezas están paralelas mediante una galga de 5 mm.</li> <li>- En caso de piezas menores de 300 mm, utilizar un dispositivo aislado.</li> <li>- En caso de piezas mayores de 300 mm, utilizar la estructura con varios dispositivos solidarios, accionados mediante aire comprimido</li> </ul>
<p><b>Curado del adhesivo</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mantener la presión durante 20 minutos, o el tiempo recomendado por el fabricante.</li> </ul>
<p><b>Retirada de la pieza</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Uso de un manipulador de vacío para peso de pieza superior a 20 kg</li> </ul>



Para resolver el problema del sincronismo en la aproximación de las placas cuando se utiliza más de un dispositivo, y que además puede agilizar el proceso en caso de una producción elevada de piezas encoladas a testa, se debe construir un dispositivo para realizar el paso 5 (ver figura 37), integrando varios dispositivos en una estructura ligera ubicada sobre la superficie de trabajo, de forma que una vez confrontadas las piezas a unir, se bajase la estructura completa y se accionase todo el conjunto mediante aire comprimido.

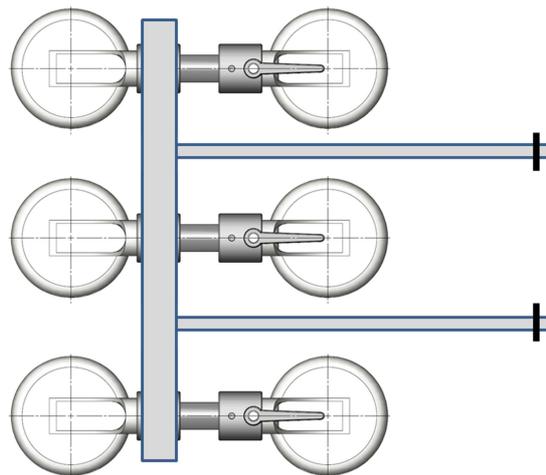


Figura 37- Estructura con tres dispositivos solidarios y accionados con aire comprimido para garantizar la calidad y agilizar el proceso

### 3.3- Canteado de tableros con alma aligerada

Las especificaciones del proceso considerado son las siguientes:

Proceso de canteado de tableros aligerados	Especificaciones del proceso
<div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 10px; text-align: center;"> <b>Corte de la pieza a la medida deseada</b> </div>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Velocidad lineal de corte: 40 m/min</li> <li>- Velocidad de giro de herramienta: 10.000-12.000 rpm</li> <li>- Herramientas de corte HSS.</li> <li>- Precisión: <math>\pm 0,5</math> mm</li> </ul>
<div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 10px; text-align: center;"> <b>Ranurado del canto</b> </div>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Velocidad lineal de corte: 40 m/min</li> <li>- Velocidad de giro de herramienta: 10.000-12.000 rpm</li> <li>- Fresa para ranurar. Ancho de corte igual al grueso del tablero menos 6 mm.</li> <li>- Tolerancia de espesor: <math>\pm 0,1</math> mm</li> <li>- Tolerancia de profundidad: <math>\pm 0,5</math> mm</li> <li>- En cada pasada de fresa no profundizar más de 5 mm.</li> </ul>
<div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 10px; text-align: center;"> <b>Cortar y moldurar listones</b> </div>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Tolerancia de espesor: (-0,1/ +0) mm</li> <li>- Tolerancia de profundidad: <math>\pm 0,5</math> mm</li> <li>- Tolerancia de longitud: <math>\pm 0,5</math> mm</li> </ul>
<div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 10px; text-align: center;"> <b>Encolar y prensar listones en los cantos</b> </div>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilizar adhesivo de AcPV</li> <li>- Aplicar presión horizontal y vertical sobre los cantos durante 3 minutos al menos.</li> <li>- Tiempo de secado antes de uso: 2 horas</li> </ul>

El canteado de tableros aligerados, debe considerar los siguientes aspectos críticos:

- el espesor del tablero aligerado a cantear puede ser cualquiera, pero se debe dejar un espesor mínimo de tres milímetros en cada cara (ver figura 4);

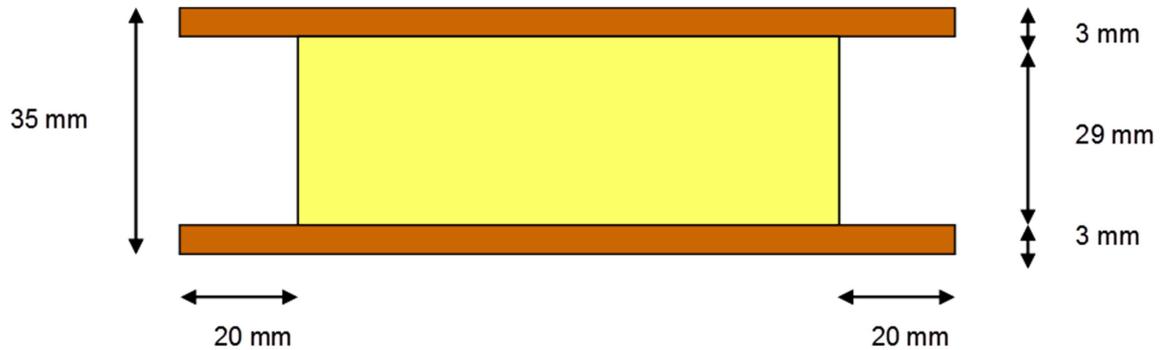


Figura 38- Espesor mínimo de las caras tras el procesado

- el relleno del tablero aligerado puede ser cualquiera, por lo que el sistema de vaciado y concretamente la herramienta a utilizar debe tener en cuenta esta particularidad.

### 3.4- Curvado de tableros alveolares

Las especificaciones del proceso considerado son las siguientes:

Proceso de curvado de tablero alveolar	Especificaciones del proceso
<div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; text-align: center;"> <b>Corte a medida de la pieza (ancho y largo)</b> </div>	- Velocidad lineal de corte: 40 m/min - Velocidad de giro de herramienta: 10.000-12.000 rpm - Herramientas de corte HSS. - Precisión: $\pm 0,5$ mm
<div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; text-align: center;"> <b>Determinar DER y LR</b> </div>	- Marcar centro de la curva según indicaciones del plano de la pieza - Aplicar ecuaciones siguientes (R en cm, A en grados; resultados en cm): Espesor 50 mm: $LR = 1,56A + 0,43R - 47,28$ $DER = 4,31 + 0,06R - 0,07A$ Espesor 25 mm:

	$LR = -80'39 + 1'19 R + 1'08 A$ $DER = 5'54 + 0'11 R - 0'05 A$
<p><b>Ranurar tablero</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Si el espesor de pared es igual o superior a 5 mm:             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Profundidad de corte: Grueso del tablero - Espesor de pared + 1 mm.</li> <li>- Tolerancia de profundidad de corte: <math>\pm 0,5</math> mm</li> </ul> </li> <li>- Si el espesor de pared es inferior a 5 mm:             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Profundidad de corte: Grueso del tablero - Espesor de pared</li> <li>- Tolerancia de profundidad de corte: +0 mm / -0,2 mm</li> </ul> </li> <li>- Tolerancia de DER: <math>\pm 1</math> mm</li> <li>- Tolerancia de LR: <math>\pm 5</math> mm</li> </ul>
<p><b>Aplicar cola y mantener la forma de la curva</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilizar adhesivo de AcPV</li> <li>- Mantener en la plantilla durante 30 minutos al menos.</li> <li>- Tiempo de secado antes de uso: 2 horas</li> </ul>
<p><b>Aplicar papel kraft si fuese necesario incrementar resistencia</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Gramaje papel: 200 gr</li> <li>- Encolar con AcPV.</li> <li>- Tiempo de secado antes de uso: 2 horas</li> </ul>
<p><b>Lijar y barnizar según diseño</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Lija: 150 a 180</li> <li>- Aplicar capa de fondo transparente previo al barnizado, si procede.</li> </ul>



Figura 40- Plantilla con topes regulables

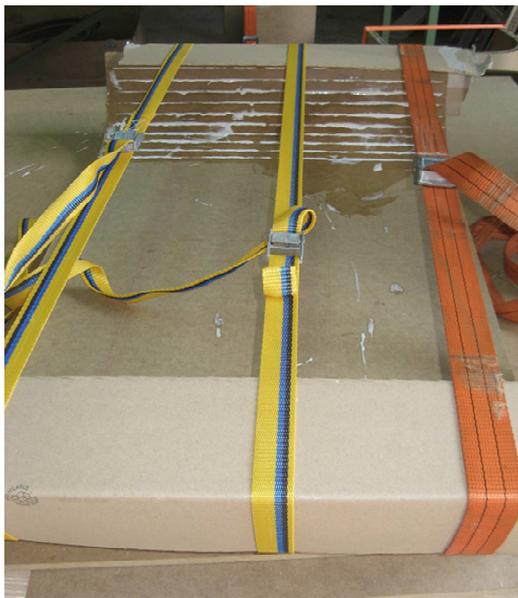


Figura 41- Conformado mediante cintas ajustables (izquierda) o sargentos de enmarcar (derecha)

### 3.5- Inserción de herrajes en tablero alveolar

Las especificaciones del proceso considerado son las siguientes:

Proceso de inserción de herrajes	Especificaciones del proceso
<div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; text-align: center;"> <b>Marcado de la posición de los taladros</b> </div>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilizar un punzón afilado. Posiciones indicadas en el plano de la pieza</li> </ul>
<div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; text-align: center;"> <b>Taladrar agujeros</b> </div>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Utilizar brocas con accesorio para avellanado, de diámetros 10 mm o 14 mm.</li> <li>- Agujerear sólo una de las caras del tablero, con precaución.</li> </ul>
<div style="border: 1px solid black; border-radius: 10px; padding: 5px; text-align: center;"> <b>Insertar herrajes</b> </div>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Introducir unas gotas de cola (AcPV) en el agujero.</li> <li>- Introducir el herraje y expandirlo hasta que ocupe el espacio entre las caras del tablero.</li> </ul>



Figura 42- Posición correcta del herraje insertado