



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

Máster Universitario en Diseño y Fabricación Integrada
Asistidos por Computador

T E S I S D E M Á S T E R

DESARROLLO DE SISTEMA DE BAJO
COSTE PARA TERMOCONFORMADO POR
VACÍO DE LÁMINAS PLÁSTICAS

Presentada por
Carlos Belmonte Picazo

Dirigida por
Manuel Martínez Torán y
Miguel Fernández Vicente

Valencia, Septiembre de 2012

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi director de tesis, Dr. D. Manuel Martínez Torán la oportunidad de desarrollar esta tesina en las instalaciones del Instituto de Diseño y Fabricación (IDF) poniendo a mi disposición todo su equipamiento y a D. Miguel Fernández Vicente su apoyo, su implicación y el tiempo dedicado a lo largo de estos meses.

También quiero agradecerle a mi familia su apoyo incondicional y su motivación a lo largo de mi carrera profesional, por que sin ellos jamás hubiera llegado hasta aquí.

Por último, quiero darle las gracias a María José Martínez Botella por quererme como soy, por entenderme y por estar conmigo cuando más la he necesitado.

Gracias a todos.

Contenidos

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 · Introducción	3
1.2 · Concepto y origen del termoconformado	4
1.3 · Objetivos generales	5
2. ESTADO DEL ARTE	7
2.1 · ¿Qué hay desarrollado?	9
2.1.1 · Thermoforming machine.	9
2.1.2 · The Phlatformer.	10
2.1.3 · Hobby Vacuum Former 12"x12".	11
2.1.4 · Vacuum Forming Table.	12
2.1.5 · Hobby-Vac.	13
2.1.6 · Proto-Form.	13
2.2 · Propuesta previa.	14
2.2.1 · Conjunto.	14
2.2.2 · Subconjunto estructura.	15
2.2.3 · Subconjunto calefactor.	17
2.2.4 · Subconjunto sistema eléctrico.	18
2.2.5 · Subconjunto mesa de vacío.	19
3. CONTENIDO TEÓRICO	23
3.1 · Propiedades de los termoplásticos y sus efectos en el proceso de termoconformado.	25
3.1.1 · Absorción de humedad.	25
3.1.2 · Comportamiento a fricción del material durante el termoconformado.	26
3.1.3 · Contracción y retracción de los termoplásticos.	27
3.1.4 · Orientaciones.	29
3.1.5 · Cargas electroestáticas en materiales termoplásticos.	32
3.1.6 · Comportamiento de los termoplásticos durante el calentamiento.	32
3.1.6.1 · Influencia del periodo de calentamiento.	32
3.1.6.2 · Expansión y alabeo.	33
3.1.6.3 · Rangos de temperatura para el conformado.	35
3.1.7 · Estiramiento del material termoplástico.	35
3.1.8 · Definición de detalles en el producto final.	36
3.1.9 · Comportamiento de los termoplásticos durante el enfriamiento.	38

Contenidos

3.2 · Vacío.	46
3.2.1 · Equipos de vacío.	46
3.2.2 · Tanques de vacío.	47
3.2.3 · Aplicación de las fuerzas de vacío.	47
3.3 · Bajo coste y “open hardware”	48
3.3.1 · Bajo coste.	48
3.3.2 · Open Hardware.	48
3.4 · Materiales y maquinaria utilizados en sistemas de bajo coste.	49
4. SOLUCIÓN PROPUESTA	53
4.1 · Diseño conceptual.	55
4.1.1 · Diseño conceptual 1.	55
4.1.2 · Diseño conceptual 2.	56
4.1.3 · Diseño conceptual 3.	56
4.2 · Diseño propuesto.	58
4.3 · Despiece por función.	60
4.3.1 · Subconjunto mesa de vacío.	60
4.3.2 · Subconjunto estructura.	61
4.3.3 · Subconjunto calefacción.	63
4.3.4 · Subconjunto sistema eléctrico.	64
4.3.5 · Subconjunto soportes de lámina.	65
4.4 · Termoplásticos más utilizados.	66
4.5 · Recomendaciones: problemas y soluciones en el termoconformado.	68
5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO	75
6. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS.	79

1. INTRODUCCIÓN

1.1 · Introducción.

En el presente contexto de crisis en el cual las personas cada vez disponen de menos recursos económicos empieza a ser habitual que una gran parte de la población se sume al movimiento ético-práctico denominado “*hágalo usted mismo*” (*Do It Yourself*).

Dicho movimiento consiste en la práctica de la fabricación o reparación de cosas u objetos por uno mismo, favoreciendo a la economía personal, el entretenimiento y el aprendizaje al mismo tiempo.

Al haberse constituido como un recurso de ocio, añadiendo valor a la exclusividad del producto, hay cada vez más adeptos a este movimiento social que no solo se dedica a crear productos para uno mismo, si no que además es muy promocionado como estrategia para dar salida a otros productos que podrían dejar de venderse o para ampliar los mercados de ciertos artículos.

Para facilitar esta práctica en la que en ocasiones se requiere de maquinaria muy específica, los usuarios más creativos están desarrollando cada vez más productos de bajo coste que facilitan los procesos de fabricación con un precio mínimo, como es el caso de pequeñas máquinas CNC, cortadoras láser, impresoras 3D o máquinas termoconformadoras.

Por otro lado y sin perder relación, se puede hablar sobre el término “*software open source*” [1, p.9], que es un fenómeno social que está en auge y que consiste en la distribución de software abierto y generalmente gratuito, pudiendo ser éste modificado por los usuarios para mejorarlo y redistribuirlo nuevamente.

De esta misma manera, nos encontramos con los productos “*open hardware*”, que al igual que el “*software open source*”, consisten en compartir y distribuir la información necesaria para reproducir o mejorar un proyecto terminado (lista de materiales, croquis, archivos de diseño, instrucciones, etc.), aunque en este caso, en lugar de ser algo intangible como puede ser el código de un programa, se basa en un objeto físico.

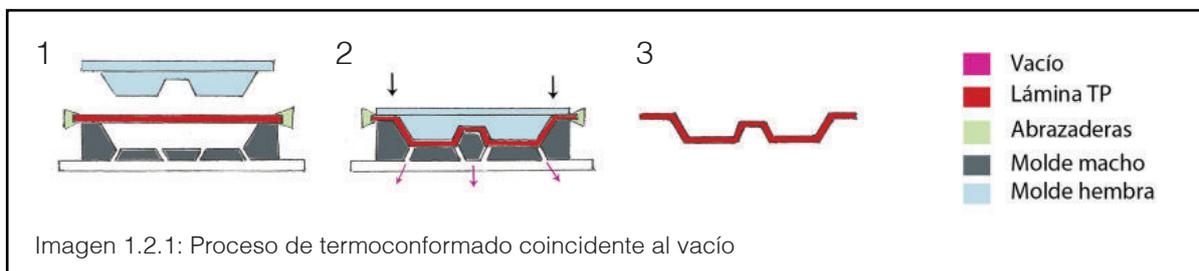
En la presente tesina se pretende desarrollar un sistema de bajo coste para termoconformar láminas de plástico teniendo en cuenta el movimiento “*hágalo usted mismo*” y el fenómeno “*open hardware*”, de tal manera que como resultado surja un producto económico y accesible para cualquier persona que requiera de este proceso.

1. Introducción

1.2 · Termoconformado: concepto y origen.

- *Termoconformado, ¿qué es?:*

Termoconformado es un término genérico que abarca muchas técnicas para la producción de artículos útiles mediante láminas planas de termoplásticos. En su concepto básico, el termoconformado es simplemente el drapeado manual de una lámina ablandada temporalmente (aplicándole calor) sobre una herramienta o molde de forma simple.



- *Historia:*

La queratina, que es un componente propio del caparazón de la tortuga, fue probablemente el primer material para termoconformar [2,3]. La queratina también se puede encontrar en los cuernos y en las pezuñas de los animales y ésta puede ser ablandada por inmersión en agua o aceite hirviendo. Este elemento reblandecido se mantenía manualmente sobre una forma dada utilizada como molde y hasta su enfriamiento. La celulosa natural, elemento principal en la corteza de los árboles, era utilizada de una manera similar por los nativos americanos.

Aunque otros experimentaron con celulosa natural en los años 1800, a J. W. Hyatt se le atribuyó ser el primero en reconocer el potencial comercial del homopolisacárido, al cual llamó "celuloide".

Sin embargo, el conformado moderno no comenzó hasta la década de los años 30 del pasado siglo, poco antes, durante y poco después de la segunda guerra mundial, con mayores desarrollos en dos áreas importantes.

Por un lado, la investigación química en resinas termoplásticas condujo a la comercialización de PVC flexible extrusionado o FPVC, CA, PS y el desarrollo de células de fundición de PMMA. Por otro lado, la continúa adaptación del proceso, que se logró con la invención de la extrusora de tornillo y la termoconformadora alimentada por rollo.

La industria del envasado termoconformado se adoptó como un proceso básico en la década de 1940 hasta tal punto que este tipo de envasado se convirtió en el embalaje significativo de la década de 1950 [4].

En 1970, la demanda de envases de alimentos, para porciones, horneables y vasos desechables dúctiles, estimuló el desarrollo de espumas de PS, CPET y PP para procesos de conformado por presión. La producción de cabinas de ducha, bañeras, camisas de refrigerador, letreros luminosos para franquicias de comida rápida, etc., consiguió la aprobación definitiva para el uso de plásticos termoconformados de una manera industrial.

1.3 · Objetivos generales.

El objetivo principal es desarrollar un sistema de bajo coste para termoconformar láminas de plástico que pueda ser utilizado tanto a nivel personal como profesional.

Dado que la adquisición de este tipo de máquina generalmente resulta inasequible para la mayoría de los usuarios, se pretende que el importe máximo en concepto de materiales para su producción sea aproximadamente de 250 euros.

El conjunto de la máquina debe ensamblarse de manera simple con los mínimos elementos para conseguir un producto eficiente y robusto, evitando en la medida de lo posible los componentes metálicos.

Se fabricará un prototipo con el que se realizarán diversos experimentos para validar el diseño tanto formal como funcionalmente. La fabricación se realizará a través del laboratorio de fabricación "FABLAB VLC".

Debido a la importancia del "open hardware" en cuanto a carácter retroactivo en lo que a nuevas versiones y mejoras se refiere, una vez finalizado el proyecto se compartirá en la red toda la información necesaria para que cualquiera pueda descargarla, modificarla y producirse su propia máquina.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 · ¿Qué hay desarrollado?.

Realizando una búsqueda en la red podemos encontrar sistemas funcionales de todo tipo que resuelven el proceso de termoconformado. Existe un amplio catálogo disponible en el que podemos encontrar ejemplos e ideas para producirnos nuestra propia máquina de manera rápida, económica y artesanal, artículos “open hardware” que generalmente requieren la ayuda de máquinas herramientas para su producción o productos ya diseñados y manufacturados bajo pedido a bajo coste.

A continuación se muestran los productos que actualmente se ofertan y que he considerado más representativos y de mayor calidad:

2.1.1 · *Thermoforming Machine* [5]:

Diseñada por Roman Jurt, usuario del portal “Thingiverse” (www.thingiverse.com, comunidad web en la que se comparten diseños digitales). Subió a la red imágenes de su prototipo físico y los planos en diversos formatos.



Imagen 2.1.1: Máquina diseñada por Roman Jurt completamente ensamblada

Esta máquina requiere de dos ensamblajes que cuentan con un total de 33 elementos cortados mediante láser. El ensamblaje se realiza conectando las diversas partes y fijándolas mediante pegamento. En este diseño, el movimiento de conformado lo realiza el cajón de vacío, ya que éste se desplaza en dirección vertical al presionar los tubos laterales en dirección opuesta al estar ambos elementos unidos mediante una cinta y usar algo similar a una polea. El sistema de calefacción se basa en un *grill eléctrico* estándar montado en la zona superior de la estructura más alta. El cajón de vacío está formado por diversos elementos. Esto hace que sea necesario sellar todos los laterales al ensamblarlo para garantizar el vacío en la superficie superior. Como generalmente en todas las máquinas de este tipo, el vacío se genera mediante un aspirador doméstico.

El creador opina que la máquina funciona bastante bien pero que existen diversas mejoras que deberían realizarse, como es el caso del marco que debe sujetar la lámina

2. Estado del arte

termoplástica, que al no explicarse en la web y no intuirse mediante las imágenes, no termina de quedar claro el método de sujeción. Por lo demás salta a la vista que es un diseño trabajado, y aunque su producción es bastante asequible, considero que posee elementos en exceso.

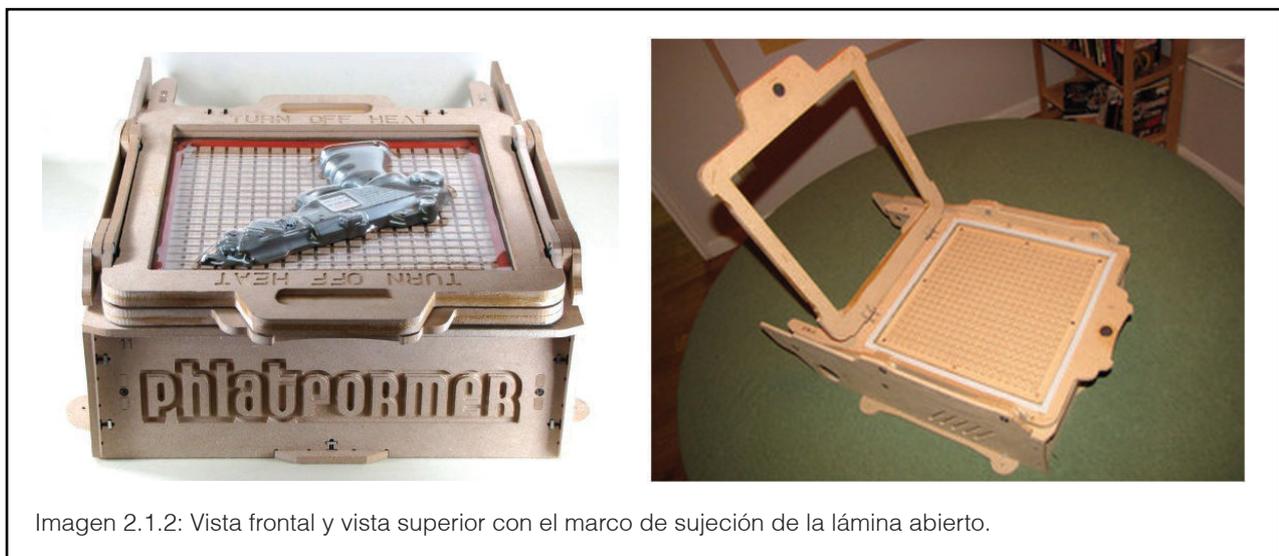
2.1.2 · The Phlatformer:

Diseñada y distribuida por el equipo Platboyz LLC desde su página web [6]. Gracias a la calidad del diseño y su funcionamiento esta máquina se ganó su espacio en la revista digital *Make* [7].

Su estructura es visiblemente estable, con zonas reforzadas mediante la unión de diversas láminas para aumentar el grosor de pared. El diseño, a mi parecer es estéticamente muy agradable. Para la unión de los diferentes elementos utiliza anclajes metálicos, aumentando así la robustez del ensamblaje. Dispone de un marco doble para sujetar la lámina de manera eficaz. La superficie útil para el conformado es suficiente para este tipo de máquinas (10 pulgadas = 254 mm de lado), las cuales suelen ser de tamaño reducido.

Sin embargo, pese a ser un producto de calidad existen varios defectos. Por un lado, no dispone de sistema de calefacción ni de alojamiento para éste, de tal manera que cada usuario deberá encontrar su método para tal propósito. El ensamblaje (instrucciones incluidas) puede resultar bastante complejo debido al alto número de elementos que requiere y la unión entre éstos. Al requerir de tantas uniones entre sus elementos, el cajón de vacío en concreto necesita que se sellen todos sus laterales para que el vacío generado en el cajón por un aspirador doméstico no se pierda.

Por último y no menos importante, cabe destacar su precio. Desde la web ofrecen todos los elementos necesarios para montar esta máquina por 299 dólares, siendo este un precio muy elevado en relación con los costes del material (DM) .



2. Estado del arte

2.1.3 · Hobby Vacuum Former 12"x12":

Este producto está fabricado y distribuido por la empresa americana WidgetWork Unlimited [8]. Básicamente consta de dos partes: por un lado nos ofrecen un cajón de madera con la superficie superior perforada para realizar el conformado por vacío y dos marcos de aluminio para sujetar la lámina termoplástica. Incluye manual de instrucciones, lista de materiales aptos y una guía para diseñar tus propios moldes. Además la propia empresa vende y distribuye consumibles y accesorios.



Como se aprecia en la imagen superior, los laterales del cajón de vacío están unidos mediante clavos o tachuelas, lo que produce una sensación de baja calidad. En la parte posterior se ubican dos escuadras que hacen de tope y de guía al insertar los marcos con la lámina caliente lista para conformar. Los marcos de aluminio fijan la lámina termoplástica entre ellos ejerciendo presión con la utilización de pinzas sujetapapeles, es decir, un sistema bastante económico.

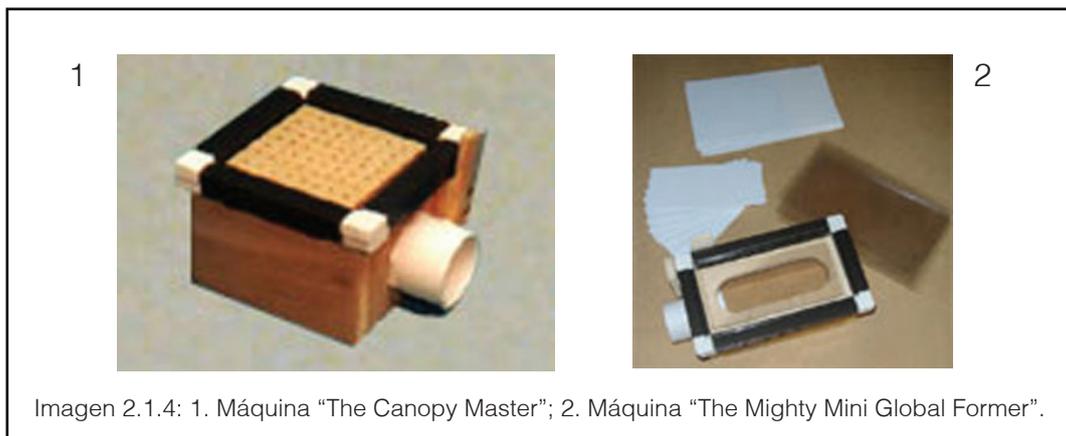
El vacío se produce nuevamente utilizando un aspirador doméstico, que como se observa en el vídeo explicativo de su página web y tal y como ellos recomiendan, es suficiente para conformar un artículo de 6 pulgadas (152'4 mm) de altura. La superficie útil o de vacío de esta máquina en concreto es de 9 ³/₄ pulgadas (247'65 mm) de lado, pero esta empresa dispone de tres modelos más con medidas diferentes (12"x18", 18"x18" y 24"x24").

Pese a ser unas máquinas simples y válidas para el termoconformado sus precios son algo excesivos teniendo en cuenta que el material empleado para su fabricación es bastante económico. El modelo más pequeño y descrito en este apartado se comercializa por 149'95 dólares, mientras que el de mayor tamaño alcanza 289'95 dólares.

2. Estado del arte

2.1.4 · Vacuum Forming Table:

De la misma manera que WidgetWork Unlimited, la empresa Warmplastic [9] nos ofrece un producto similar, basado en un cajón de madera con la superficie superior perforada para realizar el conformado por vacío y dos marcos de aluminio para sujetar la lámina termoplástica. Desde su web además de la máquina únicamente podremos adquirir consumibles.



Aunque ellos garantizan su efectividad, a simple vista produce una sensación de baja calidad. En ningún momento se define cómo es el sistema de fijación de la lámina termoplástica, simplemente ofrecen las dos escuadras. El vacío se produce nuevamente utilizando un aspirador doméstico que irá conectado al tubo saliente del cajón.

Disponen de 6 modelos diferentes. Desde el más pequeño llamado "*The Canopy Master*", con una superficie útil de 3 1/2 pulgadas de lado (88'9 x 88'9 mm) al más grande, llamado "*The Zeppelin Master*", que tiene una superficie útil de 11x16 pulgadas (27'94 x 40'64 mm).

El más llamativo es su versión "The Mighty Mini Global Former". Este cajón de vacío dispone de varios tableros: uno con perforaciones para el conformado mediante moldes con un área de trabajo de 2 3/4 x 6 pulgadas (70x150 mm) y diez tablas ranuradas diferentes para poder producir pequeñas cúpulas, semiesferas y otras formas singulares.

Si bien se ha comentado que los productos de esta empresa son similares a los de WidgetWork Unlimited, la principal diferencia se halla en sus precios, ya que el modelo más pequeño se comercializa por 74 dólares, el de mayor tamaño por 167 dólares y el especial por 179 dólares, que además incluye 36 láminas de diversos materiales y espesores.

2. Estado del arte

2.1.5 · Hobby-Vac:

La empresa Workshop Publishing lo que se nos ofrece no es la máquina en sí, sino los planos y la lista del material necesario para poder reproducirla.

El proceso es similar al de las anteriores, termoconformando por vacío, pero además el diseño incluye la zona de calefacción.

El conformado se realiza mediante el giro del soporte de la lámina.

La superficie útil del cajón de vacío es de 100x160mm y la altura máxima de conformado de 152'5mm.

Pero en este caso el material ofrecido no es gratuito, ya que por la descarga de los planos hay que abonar 29'95 dólares, por descargarlo y recibir un CD-ROM con los mismo archivos 39'95 dólares y, si además queremos que nos envíen el sistema de calefacción propuesto por ellos 65 dólares. Estiman el precio final de la máquina en 300 dólares.

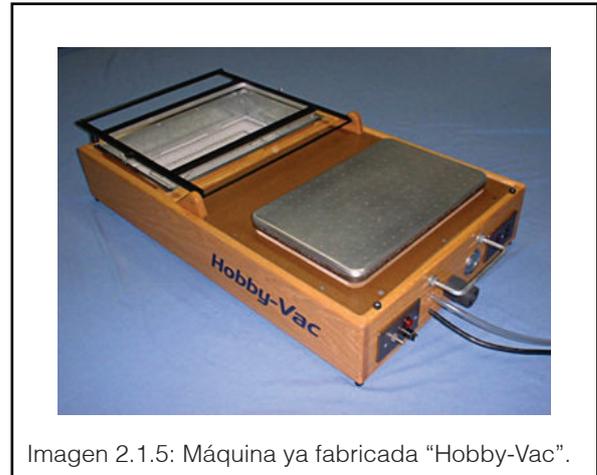


Imagen 2.1.5: Máquina ya fabricada "Hobby-Vac".

2.1.6 · Proto-Form:

Diseñada también por Workshop Publishing, mediante el mismo sistema que con la máquina "Hobby-Vac", nuevamente nos ofrecen la compra de los archivos con los planos, recomendaciones en el proceso y la lista de materiales necesarios.

Para realizar el termoconformado en este caso hay que desplazar el soporte de la lámina en dirección vertical.

Este diseño es más grande, por lo que se pueden termoconformar piezas de mayor tamaño (su superficie útil según su página web es de 1143x533'4mm).

Para realizar la descarga de los archivos hay que abonar 65 dólares, por descargarlo y recibir un CD-ROM con los mismo archivos 75 dólares, mientras que en este caso dejan de ofrecer el sistema de calefacción y no existe ningún comentario en el que se estiman el precio final de la máquina.



Imagen 2.1.6: Máquina ya fabricada "Proto-Form".

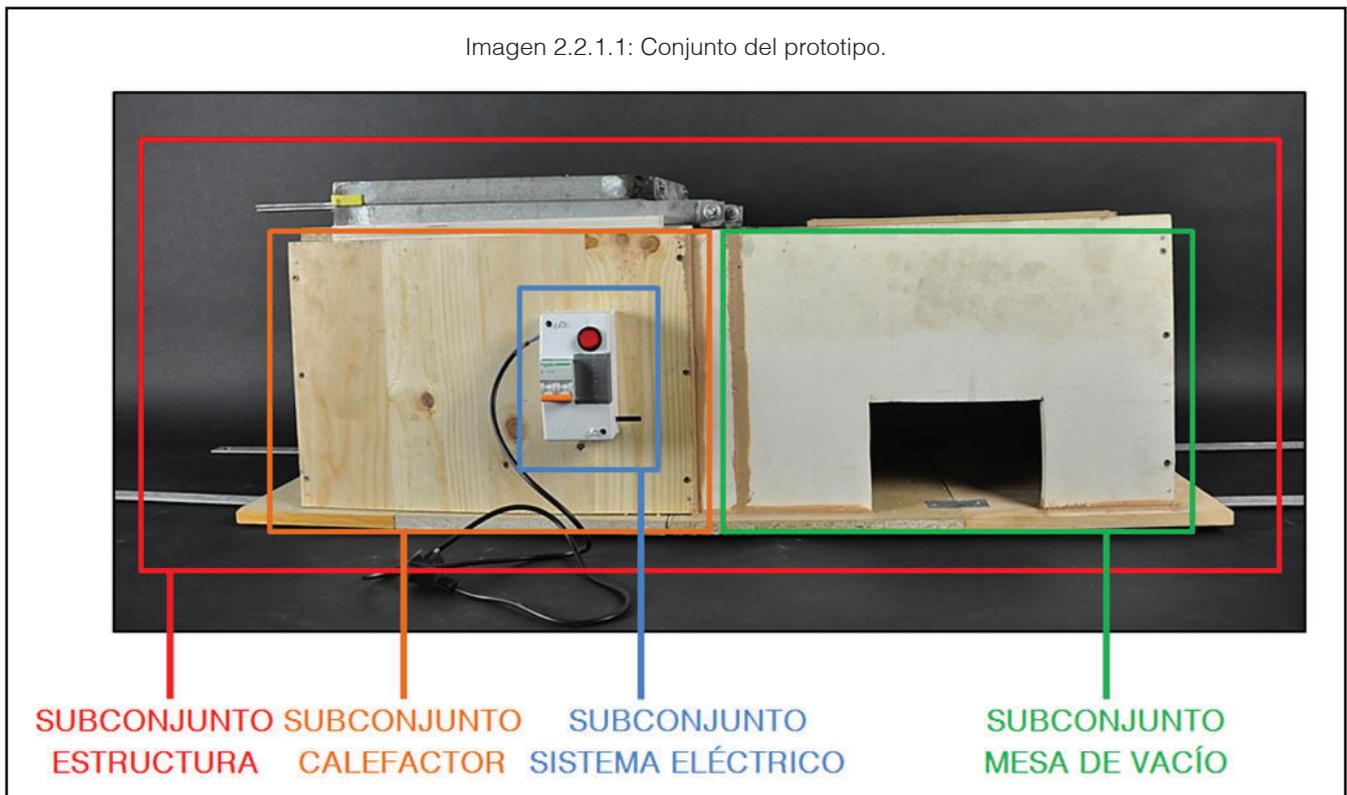
2. Estado del arte

2.2 · Propuesta previa.

En el siguiente apartado se analizará formal y funcionalmente el prototipo realizado para la asignatura Prototipado Rápido del Master en Diseño y Fabricación Asistida Integrado por Computador CAD – CAM - CIM. Para ello, en primer lugar se hará una descomposición en subconjuntos partiendo del conjunto general.

2.2.1 · Conjunto.

Imagen 2.2.1.1: Conjunto del prototipo.

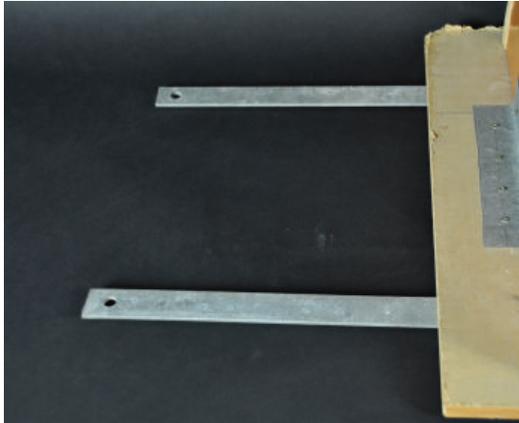


Como se muestra en la imagen 2.2.1.1, el conjunto de la máquina se ha dividido en cuatro subconjuntos según su función en el proceso de termoconformado, siendo éstos:

- Subconjunto estructura.
- Subconjunto calefactor.
- Subconjunto sistema eléctrico.
- Subconjunto mesa de vacío.

2.2.2 · Subconjunto estructura.

Imagen 2.2.2.1: Agarraderas.



A primera vista se observa que el prototipo dispone en sus extremos de unas agarraderas (imagen 2.2.2.1). Estas agarraderas son una extensión de una estructura de pletina de acero soldada. La estructura soporta todo el volumen de la máquina y permite consolidar la base, que está construida con fragmentos de madera sobrante unido todo por trozos de chapa y tornillos autoroscantes. Estas agarraderas aun siendo ineficazmente largas permiten su transporte, pero también aumentan el peso de la máquina, que finalmente fue algo elevado en su conjunto.

En el centro de la máquina hay unos tabloncillos (imagen 2.2.2.2) que separan el “subconjunto calefactor” del “subconjunto mesa de vacío”. Estos tabloncillos tienen como única función principal soportar el pandeo en la superficie producido al elevar el prototipo apoyándose sobre ellos los dos subconjuntos anteriores. Como se observa su unión es muy débil, ya que únicamente están unidos mediante presión y silicona.

El sistema de giro de la estructura metálica que pinza el plástico (figura 2.2.2.3) está realizado mediante dos pletinas de chapa galvanizada doblada que abrazan los dos cajones del “subconjunto calefactor” y “subconjunto mesa de vacío”, que a su vez están ancladas a éstos por tachas. Esta unión junto con los tabloncillos del centro fijados (figura 2.2.2.2) provoca que la estructura no se pueda desmontar, o en el caso de soltarse una tuerca mediante la que está fijada a la chapa mecánicamente no sea fácil recuperar y reponer.

Imagen 2.2.2.2: Tabloncillos centrales.



Imagen 2.2.2.3: Sistema de giro.

2. Estado del arte

Las diversas partes de la estructura se unieron mediante soldadura eléctrica (imagen 2.2.2.5) pero utilizando utensilios básicos para su realización (mesa de soldadura y utillajes improvisados), provocando que al producirse las deformaciones como consecuencia del calor existan zonas en las que el acople entre ambas partes no sea completamente fino y sea necesario recurrir de una cinta especial para aislar (figura 2.2.2.4).



Imagen 2.2.2.4: Cinta especial para aislar.



Figura 2.2.2.5: Soldaduras en la estructura

Para que pince bien el plástico dependiendo del espesor que se requiera se tuvo que hacer unos agujeros colisos (imagen 2.2.2.6) en una de las dos partes de la estructura metálica, de tal forma que al unirle las bisagras mecánicamente se pudiera obtener la separación necesaria. Esto origina que el ajuste general sea peor, por lo que se realizaron unos taladros en las manetas del soporte teóricamente en su mejor posición facilitando el centrado mediante unos tornillos con tuerca y arandela que unen y presionan ambas partes (imagen 2.2.2.7).



Imagen 2.2.2.6: Agujeros colisos.



Figura 2.2.2.7: Taladros en las manetas

Se puede apreciar que todas las uniones entre los tablonces de madera (de diferentes tipos) se han efectuado mediante tornillos autoroscantes (imagen 2.2.2.8) produciendo en alguna ocasión su apertura interna teniendo que reforzar esas zonas mediante silicona, sobre todo en la zona del “subconjunto mesa de vacío”. Madera sobrante unido todo por trozos de chapa y tornillos autoroscantes. Estas agarraderas aun siendo ineficazmente largas permiten su transporte, pero también aumentan el peso de la máquina, que finalmente fue algo elevado en su conjunto.

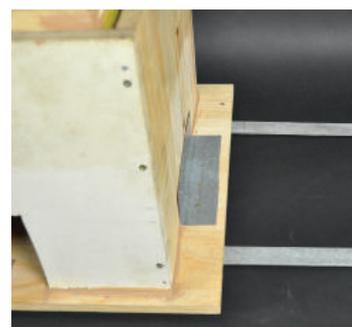


Figura 2.2.2.8: Uniones.

2. Estado del arte

2.2.3 · Subconjunto calefactor.

Como su nombre indica, su función es la de calentar la lámina de plástico. Este subconjunto (imagen 2.2.3.1) está compuesto por un cajón de madera en cuyo interior hay alojado otro cajón de chapa galvanizada doblada y remachada. Entre ambos posee como aislante térmico láminas de lana de roca. En el interior del cajón de chapa hay un soporte del mismo material que alza las dos resistencias cerámicas acercándolas a la lámina plástica (imagen 2.2.3.2), ya que en este caso existe un sobredimensionamiento de la zona calefactora.



Imagen 2.2.3.1: Subconjunto calefactor.



Figura 2.2.3.2: Resistencias cerámicas

Reduciendo dicho sobredimensionamiento se podría reducir el tiempo de calentamiento de la lámina. También hay que prestar especial atención en la manera en la que se retiene el calor en la cámara producida mientras se calienta la lámina, y es que para ello se tuvo que implementar al diseño final unos retales de madera a medida en el perímetro (imagen 2.2.3.3) que evitase que el calor escapara.

Debido a la separación entre el cajón interior y el exterior (imagen 2.2.3.4), en el cual acopla la estructura metálica con el plástico, provoca que los laterales de la lámina a termoconformar no alcancen la temperatura necesaria para cambiar su estado a gomelástico y éstas se convierten en zonas inutilizables en el proceso.

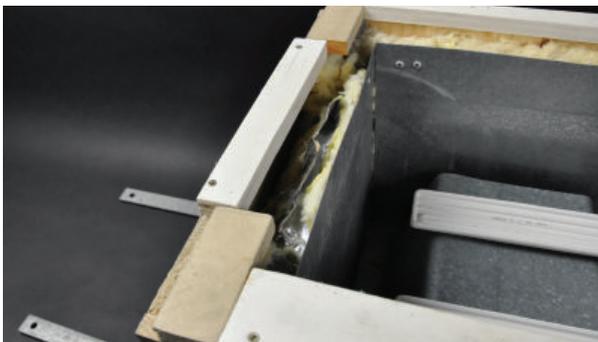


Imagen 2.2.3.3: Retales de madera.



Figura 2.2.3.4: Separación entre estructuras

2. Estado del arte

2.2.4 · Subconjunto sistema eléctrico.

El circuito eléctrico propuesto para su funcionamiento es básico y correcto (imagen 2.2.4.1). Para que la corriente circule en primer lugar hay que dejar activo un magnetotérmico protector, A continuación hay que presionar un pulsador de enclavamiento y mediante una resistencia variable (potenciómetro) regulamos la intensidad en las resistencias cerámicas.

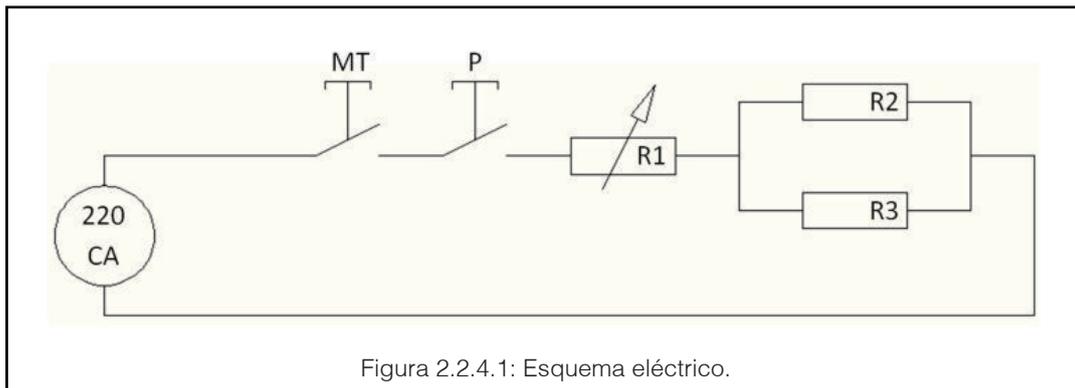


Figura 2.2.4.1: Esquema eléctrico.

La caja de conexiones (imagen 2.2.4.2) es de tipo comercial para dos magnetotérmicos. Para alojar todo el circuito se tuvo que modificar, realizándole diversas perforaciones. El cable de alimentación no queda bien anclado en el interior de la caja y si se estirase accidentalmente posiblemente se producirá una avería. El hueco del magnetotérmico sobrante se tapó con cinta americana, desfavoreciendo estéticamente al conjunto. La caja se unió al tablero lateral mediante tornillos autoroscantes. El cableado que llega hasta las resistencias cerámicas (imagen 2.2.4.3) pasa por un orificio en el lateral y es aislado de la alta temperatura mediante una porción de lana de roca. Esto a pesar de ser eficaz es demasiado burdo estéticamente.



Figura 2.2.4.2: Caja de conexiones.



Figura 2.2.4.3: Cableado protegido.

2. Estado del arte

2.2.5 · Subconjunto mesa de vacío.

Como anteriormente se ha dicho, el volumen general del prototipo es excesivo y por este motivo, el cajón de vacío se tuvo que reducir, quedando un volumen interior inutilizado (imagen 2.2.5.1). El orificio por el que se acopla la boquilla del aspirador (imagen 2.2.5.2) se encuentra en el interior de la estructura, y teniendo en cuenta la obertura lateral para acceder (imagen 2.2.5.3), todo esto entorpece el proceso de montaje.



Imagen 2.2.5.1: Volumen interior inutilizado.

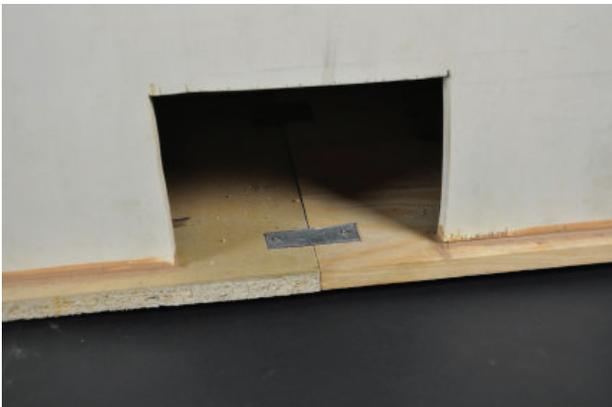


Figura 2.2.5.3: Obertura lateral.



Figura 2.2.5.2: Orificio para aspirador

El interior del cajón está sellado mayormente por silicona (material presente en todo el prototipo debido a los remiendos por errores), pero además tiene aplicadas diversas capas de látex, haciendo que el cajón sea completamente estanco. Al aplicar estas capas de látex, el diámetro del orificio se reduce un poco, pero de manera significativa, ya que la inserción del tubo del aspirador es bastante compleja.

En la parte superior, por un error de diseño y coordinación la superficie de la base ranurada y perforada no coincidía con el marco de la estructura metálica (imagen 2.2.5.4), es decir, donde cae la lámina plástica al realizar el giro. Por este motivo se rellenaron de

2. Estado del arte

silicona las ranuras y los orificios que se quedaban inútiles al no poder efectuar el vacío en el volumen cerrado. Al realizar la primera prueba, se obtuvo otro error de diseño. La estructura metálica está soldada con sus laterales de manera transversal. Al realizar el giro, la estructura apoya en la superficie de vacío, pero la lámina plástica pinzada en ésta se queda separada de dicha superficie una distancia igual a la altura de la pletina de la estructura (imágenes 2.2.5.5 y 2.2.5.6). Por este motivo hubo que improvisar una nueva superficie más elevada.



Imagen 2.2.5.4: Superficie no coincidente.

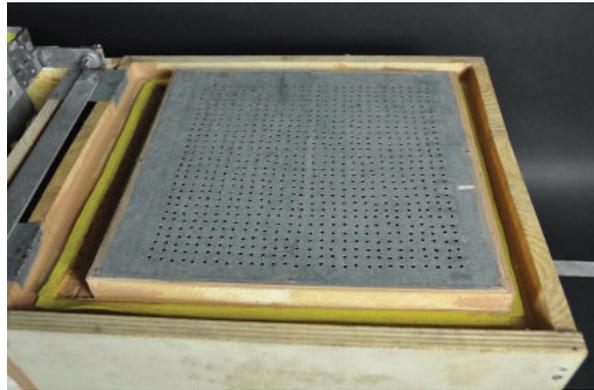


Imagen 2.2.5.5: Superficie elevada.



Imagen 2.2.5.6: Estructura apoyando en la superficie.

3. CONTENIDO TEÓRICO

3. Contenido teórico

3.1 · Propiedades de los termoplásticos y sus efectos en el proceso de termoconformado.

3.1.1 · Absorción de humedad [10].

Algunas láminas termoplásticas son higroscópicas, es decir, absorben humedad cuando el material básico es higroscópico, o si los aditivos añadidos son higroscópicos tales como el talco, carbono o algunos pigmentos particulares. Durante el proceso es posible que la humedad sea absorbida por el material plástico o retenida en la superficie predominante. Por ejemplo, los termoplásticos ABS, ASA, CA, CdA, CAB, PMMA extruido, PC, APET, PSU, PES y sobre todo la poliamida, están clasificados como plásticos higroscópicos.

Los materiales higroscópicos para utilizar en el termoconformado se entregan normalmente en envases herméticamente cerrados que generalmente solo se abren para el proceso, ya que éstos reabsorben la humedad poco después del contacto con el aire. Pese a todo, no existen medios sencillos para determinar el contenido de humedad que poseen los materiales. Esto provoca que cuando los termoplásticos se calientan durante el proceso de termoconformado se formen burbujas en la superficie (imagen 3.1.1).

Estos materiales por lo tanto siempre se procesan en estado seco, es decir, directamente desde el envase hermético o inmediatamente después del secado. Si comparamos el PC y el ABS, dependiendo del grado del material y con una humedad relativa normal del 60% al 70%, la lámina de PC puede permanecer en la atmósfera desde media hora hasta 5 horas antes del termoconformado, mientras que el ABS puede permanecer sin protección durante 2 o 3 días. Si las condiciones del fabricante no están disponibles, las condiciones adecuadas para el presecado se pueden encontrar en la tabla 3.3. El secado de las láminas se realiza en hornos con circulación de aire. Las láminas se colocan en posición vertical, con espacios entre ellas, por lo que el aire caliente puede circular libremente a través de ambas superficies.

Este proceso sin embargo es menos usual en láminas formadas en rollo. Los rollos húmedos requieren de varios días de secado. Una vez secos deberán ser envasados herméticamente en una película de PE si no va a ser procesado justo después del secado.



3. Contenido teórico

3.1.2 · Comportamiento a fricción del material durante el termoconformado.

El comportamiento a fricción de los plásticos se convierte en un problema durante el termoconformado cuando hay un movimiento de deslizamiento entre el material y la herramienta de termoconformado o matriz. Esto puede suceder con herramientas para el formado tanto en negativo como en positivo y durante el preestiramiento con un troquel en el momento en el que la lámina entra en contacto con la herramienta durante el proceso.

Si hay muy poca fricción como con matrices revestidas o fabricadas en PTFE por ejemplo, el material que está siendo procesado se desliza a través del área de contacto muy fácilmente. Esto demuestra particularmente algunas desventajas cuando se trata de empujar el material plástico contra la cara inferior de la herramienta en negativo haciendo imposible el proceso si el material se desliza con demasiada facilidad por la matriz y provocando que la sección inferior de la lámina siempre sea demasiado delgada.

En la cara de la herramienta, la fricción está influenciada por:

- El material de la herramienta para termoconformar.
- La temperatura del área de contacto.
- La rugosidad de la superficie.

En la cara del material para termoconformar, la fricción está influenciada por:

- El tipo de material de la cara de contacto.
- Tratamiento superficial y condición (con o sin antibloqueos).
- La temperatura del material a termoconformar durante el contacto.

Consejos para la aplicación práctica:

- Aumentar la rugosidad ligeramente mediante chorro de arena o de forma manual para garantizar un mejor deslizamiento de los materiales a termoconformar. Sólo las esquinas en las herramientas en positivo pueden o deben ser pulidas dejándolas con un acabado de espejo, permitiendo que el material calentado se deslice a través con relativa facilidad.

- La temperatura de la herramienta juega un papel muy importante en el momento en que la lámina está siendo termoconformada, ya que ésta tiene una fuerte tendencia a adherirse a la herramienta. La fricción se puede reducir al disminuir la temperatura de la herramienta.

- Con materiales para el termoconformado con tendencia a la adherencia, tales como materiales formados por múltiples capas, la capa de contacto requiere una temperatura más baja que la del soporte principal. El ABS / PMMA de dos capas no presentan

3. Contenido teórico

problemas, ya que el ABS y el PMMA tienen temperaturas de termoconformado similares. Los problemas surgen con láminas de SB / PE de dos capas, cuando es necesario un estiramiento previo mediante un útil. Esto es particularmente malo, ya que para el termoconformado por vacío de SB (PS-HI) se requiere por lo menos 160°C. A esa temperatura, el PE y algunos estratos de sellado especiales son bastante pegajosos y es probable que se produzca adherencia con el molde.

¿Cuál es la respuesta práctica al “pegado” en casos difíciles?

- El material termoconformado debe de estar a una temperatura fría, tanto como sea posible.
- Aplicar menos calor en el lado pegajoso.
- Si los lados pegajosos mantienen contacto con la herramienta, hay que mantener ésta tan fría sea posible como viable.
- Si el lado adhesivo hace contacto con el troquel de preestiraje, las matrices o moldes utilizados deben ser de PTFE o de aluminio recubierto de PTFE.
- Se recomienda utilizar antibloqueos en materiales revestidos (por ejemplo el PET).

Termoconformado es un término genérico que abarca muchas técnicas para la producción de artículos útiles mediante láminas planas de termoplásticos. En su concepto básico, el termoconformado es simplemente el drapeado manual de una lámina ablandada temporalmente (aplicándole calor) sobre una herramienta o molde de forma simple.

3.1.3 · Contracción y retracción de los termoplásticos.

En el termoconformado, la contracción o retracción significa el cambio dimensional de una lámina termoplástica que se somete a través de la influencia de calor sin aplicar ninguna tensión mecánica adicional. Es conveniente llevar a cabo un ensayo de contracción / retracción en el material a procesar antes de realizar el termoconformado. A continuación se muestran unas pautas [11]:

- Utilizar una lámina de aproximadamente 200mm x 200mm medidas con precisión. La dirección de extrusión se marca con una flecha y la dirección del corte se anota.
- Se calienta un horno a la temperatura necesaria para calentar la lámina termoplástica que vaya a ser termoconformada.
- La lámina se inserta en el horno.
- El tiempo de calentado de la lámina debe ser de al menos 30 minutos, con un periodo adicional de 5 minutos por milímetro de espesor de la lámina.

3. Contenido teórico

• Cuando está fría se vuelve a medir la lámina. La contracción se determina como sigue:

$$\text{Contracción en \%} = \frac{(\text{Dimensión antes del test} - \text{Dimensión después del test}) \cdot 100}{\text{Dimensión después del test}}$$

Con el fin de determinar anisotropías se recomienda establecer la contracción longitudinal y transversal. En el caso de que surjan problemas en el calentado, tales como arrugas, desgarros en el marco de sujeción o la contracción severa en relación con el calentamiento por contacto, etc., sería conveniente una comparación entre la vieja lámina y la nueva. Los diferentes parámetros de procesado de los dos materiales presentan valores de contracción diferentes y comportamientos diferentes, y por lo tanto, lo mismo ocurrirá durante el termoconformado.

Debido a la contracción del artículo termoconformado hay que comprender la diferencia en las mediciones del artículo en comparación con el molde herramienta. Las principales diferencias están entre la contracción en el proceso (VS), post-contracción (NS) y contracción total (GS). La contracción en el proceso se calcula de la siguiente manera:

$$VS \text{ en \%} = \frac{(\text{Dimensión de la hta.} - \text{Dimensión del modelo}) \cdot 100}{\text{Dimensión de la hta.}}$$

La dimensión del molde herramienta y el artículo se deben establecer de acuerdo con los procedimientos estándar, es decir, 24 horas después del termoconformado a una temperatura de 23°C.

Sujeto a las condiciones de procesado, con algunos plásticos las post contracciones (NS) se pueden observar a temperatura ambiente después de un tiempo. La contracción total (GS) se calcula de la siguiente manera:

$$GS = VS + NS$$

Por ejemplo, una lámina amorfa de ABS/PVC puede estar contrayéndose hasta 5 días. Debe ser conocido el comportamiento de la contracción y la secuencia de procesamiento acordado entre el proveedor y el cliente, ya que pueden aparecer fluctuaciones en las cargas (dependiendo de la calidad del material).

Un problema añadido y en particular es la determinación de las dimensiones de la matriz troqueladora de una línea de termoconformado. Las dimensiones de los bordes de corte se deben determinar con precisión, ya que la contracción no se completa inmediatamente después del termoconformado y dichos bordes están todavía calientes durante

3. Contenido teórico

el recorte. En parte es una ventaja si las secciones individuales del troquel de corte se pueden ajustar por separado.

En la tabla 3.3. se pueden encontrar los valores de contracción para diferentes plásticos, aunque estos valores solo sirven como referencia. Para valores de plásticos con gran dispersión es aconsejable determinar los valores de contracción correctos antes de realizar el termoconformado ya sea mediante la consulta con el fabricante del material o realizando pruebas internas. Los valores exactos de contracción sólo se pueden determinar mediante ensayos en los moldes herramientas correspondientes al artículo a producir. Para moldes con especificaciones más altas de tolerancia dimensional se deben producir y determinar la contracción en las áreas individuales del molde prototipo. Los factores de interés más importantes respecto a la contracción son los siguientes:

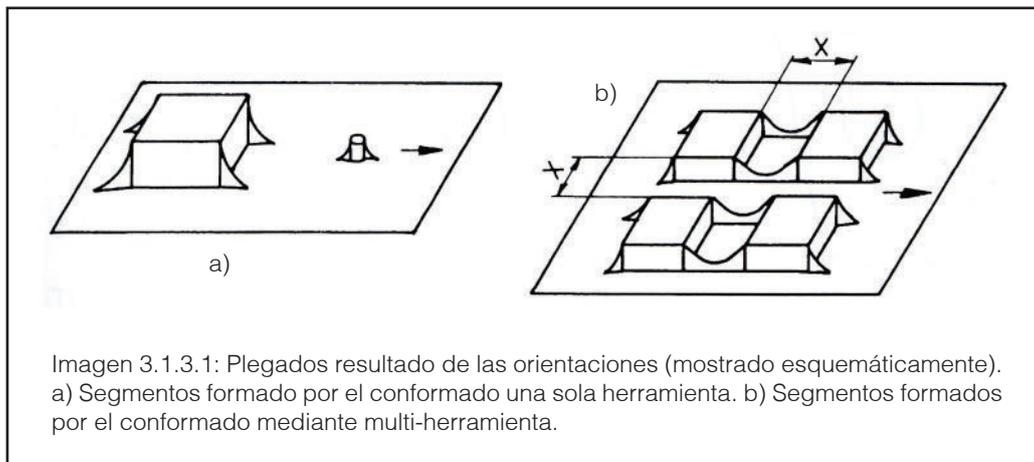
- Se deben tener en cuenta los plásticos con fluctuaciones en las cargas.
- Una velocidad de enfriamiento rápida produce una contracción de procesado menor.
- La temperatura de desmoldeo alta (es decir, cuando el modelo se desmoldea en un estado muy caliente) provoca una mayor contracción que con una herramienta más fría.
- El fuerte estiramiento produce una menor contracción en muchos casos.
- Las condiciones de producción del material a utilizar: con un mismo granulado en diferentes extrusora a diferentes parámetros puede generar materiales diferentes en cuanto al comportamiento de la contracción.
- Los artículos realizados mediante formado positivo en general sufren la contracción de forma significativa que los formados en negativo.
- Aun realizando el proceso con los mismos materiales y las mismas condiciones las fluctuaciones de la contracción pueden llegar a un máximo del $\pm 10\%$.

3.1.4 · Orientaciones.

El ensayo de contracción también genera información respecto a las orientaciones de las macromoléculas de los materiales. Si el material muestra orientaciones muy elevadas, en la dirección de extrusión por ejemplo, esto afectará desfavorablemente y generará arrugas (figura 3.1.3.1).

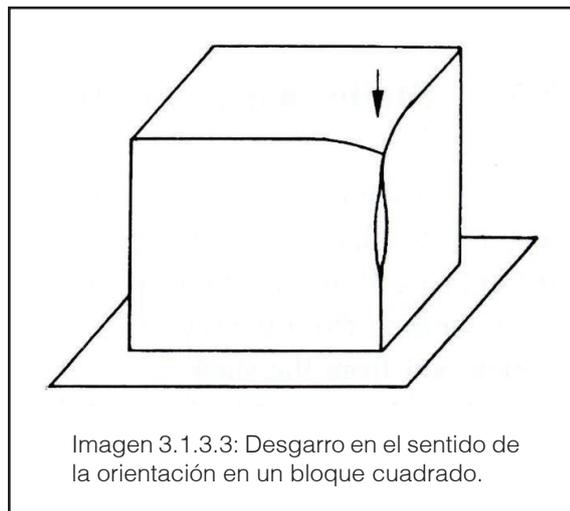
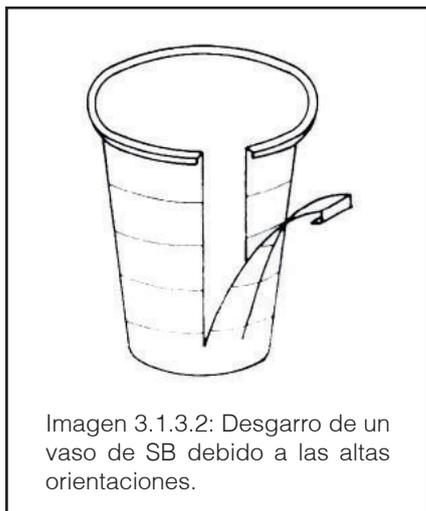
Utilizando láminas multi-impresas en segmentos de igual distancia longitudinal y transversalmente producirá considerablemente pliegues más pronunciados en la dirección de extrusión que en la dirección transversal (imagen 3.1.3.1.a). Con el termoconformado hay una orientación adicional de las macromoléculas que aumenta con el aumento del estiramiento.

3. Contenido teórico



La imagen 3.1.3.2 muestra un vaso termoconformado en HIPS (SB) que se puede cortar fácilmente en tiras longitudinales. La propia tira es muy fuerte en la dirección longitudinal debido a que está altamente orientada de esa manera.

La alta orientación durante el termoconformado reduce enormemente la fuerza vertical hacia la dirección del estiramiento, produciéndose así el desgarro paralelo a la dirección de estiramiento (imagen 3.1.3.3), por eso, hay que tener en cuenta que los materiales plásticos son muy fuertes en la dirección de orientación (por ejemplo cuerdas o cintas de embalaje) pero bastante débiles en la dirección perpendicular.



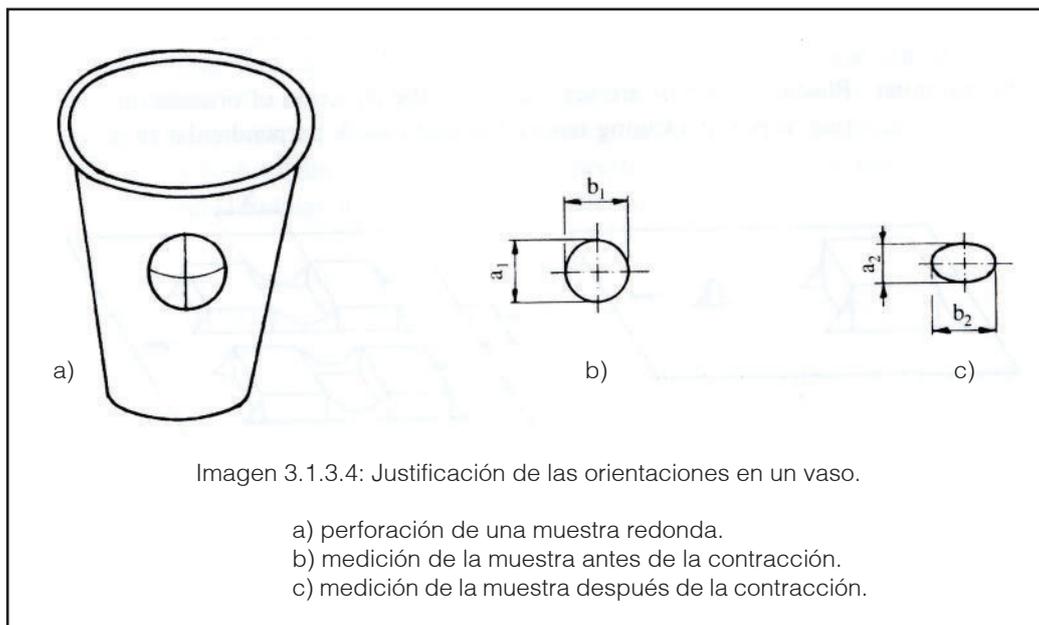
Las orientaciones en el artículo final se fundamentan en:

- En ensayo de contracción.
- Perforando muestras de una tirada termoconformada (imagen 3.1.3.4a), entonces se realiza la medición de A1 y B1 (imagen 3.1.3.4b). Una vez medida la porción de material se introduce en un horno (ver condiciones en el apartado “contracción y re-

3. Contenido teórico

tracción de los termoplásticos”) y se calienta. Después de la contracción, se determinan las dimensiones A_2 y B_2 (imagen 3.1.3.4c) y el porcentaje de contracción si es necesario. Se considera una orientación muy alta si $A_2 \ll B_2$.

Hay que tener en cuenta que en estas investigaciones es aconsejable llevar a cabo la prueba de contracción en el material sin termoconformar, por lo que las orientaciones pueden ser percibidas previamente.



3.1.5 · Cargas electroestáticas en materiales termoplásticos.

Exceptuando los materiales conductores de electricidad, tales como los rellenos de carbono, galvanizados y metalizados o aquellos que incorporan agentes antiestáticos, los materiales termoplásticos pueden cargarse electroestáticamente durante:

- El desenrollado de la bobina.
- La retirada del montón de láminas.
- El tirado de la película protectora de las láminas.
- La calefacción.
- El enfriamiento.

La consecuencia negativa de las cargas electroestáticas en el material es que algunas partículas de tamaño razonable, tales como plásticos visibles o virutas de fresado son atraídas por el material cargado electroestáticamente. Esto da como resultado el rechazo de la lámina en moldes de gran calidad. Para prevenir este problema o al menos reducir

3. Contenido teórico

se puede realizar lo siguiente [12, 13]:

- Llevar a cavo cualquier trabajo de mecanizado en una habitación separada.
- Dirigir chorros de aire ionizado contra la superficie del material a termoconformar.
- Cepillar el material a termoconformar con un cepillo conectado a tierra.

Las piezas moldeadas atraen el polvo después del proceso de termoconformado si no se ha tenido en cuenta lo anterior y se ha realizado con materiales no antiestáticos. Una solución simple pero eficaz a corto plazo consiste en lavar el producto con agua y detergente líquido.

3.1.6 · Comportamiento de los térmoplásticos durante el calentamiento.

A la hora de realizar el calentamiento de los termoplásticos existen varios factores que son importantes:

- El periodo de calentamiento.
- La expansión y el alabeo.
- La resistencia del material a la temperatura de conformado.
- Rango de temperaturas para el conformado.
- Gradiente de temperatura en el espesor del material.

3.1.6.1 · Influencia del periodo de calentamiento.

El tipo de sistema de calentamiento instalado afecta en el proceso. Usando una misma configuración en una máquina termoconformadora, el proceso de calentamiento de la lámina está sujeto al grado del plástico (PS, PVC, PS, etc.), el color y el espesor de la lámina.

El periodo de calentamiento aumenta desproporcionalmente con el espesor del material de formación, ya que los plásticos son malos conductores térmicos. En teoría el menor tiempo de calentamiento se consigue cuando las superficies de ambas caras son sometidas a la resistencia térmica máxima para la totalidad del proceso de calefacción sin dañar el material.

En la práctica, se comienza con la energía calorífica máxima disponible y a continuación se reduce gradualmente la entrada de calor. Si después del calentamiento o durante el termoconformado la temperatura del material está por debajo de la temperatura mínima de termoconformado el proceso se vuelve imposible o se produce con un acabado

3. Contenido teórico

de muy baja calidad.

Por otro lado, la temperatura en el interior del material hasta ahora no se puede medir sin destruirlo, requiriéndose por lo tanto alta experiencia en el proceso para configurar correctamente los parámetros de calefacción.

Hay que tener en cuenta que un material con una diferencia de temperatura pequeña sobre su sección transversal, calentado lentamente, es más fácil de moldear y el producto final poseerá mejores propiedades mecánicas. Una lámina calentada a temperaturas dañinas para su termoconformado poseerá peores propiedades mecánicas y peor distribución de espesor en sus paredes.

Mediante un largo tiempo de calefacción se puede calentar de manera unilateral una lámina de hasta aproximadamente 2'5mm de espesor. A partir de este espesor es conveniente calentar ambos lados.

3.1.6.2 · Expansión y alabeo.

Para determinar el alabeo cuando se calienta el material termoplástico en una máquina de termoconformado se debe conocer el "coeficiente de expansión térmica lineal" (ver tabla 3.3). La expansión de los plásticos es aproximadamente lineal y se puede calcular con la ayuda del coeficiente antes mencionado de la siguiente manera:

$$\text{Expansión lineal a través de la calefacción} \rightarrow \Delta l = l_1 \cdot \lambda \cdot (T_2 - T_1)$$

Donde:

Δl es la expansión térmica en mm, l_1 es la longitud o dimensión en mm en la temperatura T_1 , λ es el coeficiente de expansión térmica línea, T_1 es la temperatura de inicio, normalmente la temperatura ambiente, y T_2 es la temperatura de finalización del periodo de calentamiento. Cabe decir que la ecuación antes mencionada sólo es válida para la temperatura de operación cuando en el proceso de termoconformado se utilizan bajas temperaturas.

Por otro lado, el alabeo se puede calcular de manera simplificada como:

$$\text{Alabeo} \rightarrow f = 0.62 \cdot \sqrt{b_1 \cdot \Delta b}$$

Donde:

f es el alabeo en mm, b_1 el ancho del marco que sujeta la lámina durante el proceso y Δb es la expansión lineal de la lámina calculada para la diferencia de temperaturas T_2-T_1 mencionadas anteriormente.

Se debe saber que los esfuerzos inherentes en el material no se tienen en cuenta al

3. Contenido teórico

calcular el alabeo mediante la anterior ecuación.

Al calentar material termoplástico en una máquina de termoconformado, mientras el material alcanza la temperatura de conformado ocurre lo siguiente:

- La lámina termoplástica se expande hasta que se alcanza la temperatura de reblandecimiento.

- Al superar la temperatura de reblandecimiento (temperatura de transición vítrea) las tensiones internas se liberan. Las láminas altamente orientadas de OPS o LDPE por ejemplo, comienzan a extenderse en el marco de sujeción. Otros materiales como por ejemplo el PP o PVC se mantienen en expansión hasta llegar a la temperatura de conformado.

- Cuando se realiza el calentamiento con placas de contacto, la expansión puede causar cambios en la presión de contacto, pudiendo producir vetas adheridas en la superficie de la lámina.

- Cuando el calentamiento se realiza mediante calefacción por radiación pueden suceder dos problemas:

- Si la lámina se alabea demasiado, a la expansión causada por su propio peso debe añadirse la expansión térmica. Esto produce el riesgo de que la lámina se caliente de manera insuficiente por su alejamiento de la calefacción y pueda dañarse térmicamente. La producción de artículos con PP de bajo espesor es extremadamente difícil ya que la lámina tiende a hundirse en la máquina de termoconformado.

- Al calentar el material se pueden producir ondulaciones en la superficie que está en contacto directo con el aire. Si estas ondulaciones son muy pronunciadas las temperaturas superficiales entre las crestas y los valles pueden diferir y esto puede provocar un efecto negativo en la calidad de las piezas moldeadas.

Teniendo en cuenta lo anterior, se puede decir que no es posible realizar un cálculo del alabeo práctico para materiales que se alabean de forma severa.

En cuanto a la expansión térmica y el alabeo, el usuario debe saber lo siguiente:

- El alabeo es una función de los materiales plásticos y la temperatura de conformado.

- Si se utiliza PP y es posible, se debe utilizar una lámina que contenga al menos un 10% de PE reduciendo considerablemente el alabeo, ya que éstas son láminas de alta contracción.

3. Contenido teórico

3.1.6.3 · Rangos de temperatura para el conformado.

Los rangos de temperatura para el conformado están determinados por:

- La temperatura más baja a la que el material puede ser moldeado con una definición de detalle suficiente.
- La temperatura más alta en la que el material no está siendo dañado térmicamente. El daño se puede distinguir al producirse un cambio de color en la superficie, un brillo extremo, burbujas, desgarro de la superficie o que el material deje de ser procesable.

A continuación se muestra un ejemplo del rango de temperatura de conformado para una lámina de HIPS de 80mm de lado:

- Temperatura de conformado por presión: 120°C a 150°C (200°C)
- Temperatura de conformado por vacío: 165°C (140°C) a 190°C (200°C)

En la tabla 3.3 se pueden observar algunos valores de referencia para las temperaturas de conformado.

El objetivo principal durante el proceso de calentamiento de la lámina es obtener el calor de manera uniforme en la superficie.

3.1.7 · Estiramiento del material termoplástico.

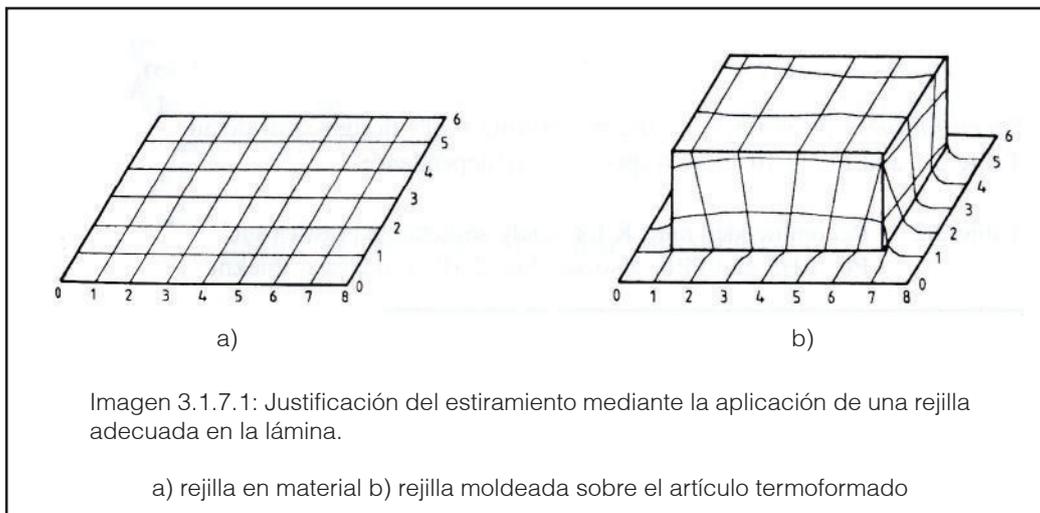
Cada material termoplástico posee un rango de temperaturas en el que puede ser estirado severamente. Dentro de este intervalo óptimo de temperaturas es cuando se debe aplicar la fuerza mínima necesaria sobre la lámina para realizar la conformación. Si con esta fuerza mínima y necesaria no se consigue realizar el conformado se tendrá que aplicar más calor sobre la superficie de la lámina con el fin de obtener la definición de detalle requerido. De no ser así esto podría producir que la lámina no termine de moldearse debido a que la temperatura de estiramiento no está en su rango óptimo.

Este puede ser el caso de un cajón para refrigerador termoconformado al vacío con un radio de menos de 6mm en la zona del borde o el termoconformado por presión de vasos con un radio de fondo inferior a 1'5mm.

Cuanto mayor sean las especificaciones del producto más nos alejaremos del estiramiento óptimo. Esto hace que la distribución del espesor de pared comience a entrar un rango "peligroso" mostrando zonas delgadas en las paredes debido al estiramiento severo.

Tras el termoconformado el producto final se puede evaluar aplicando una red en la lámina (imagen 3.1.6.1).

3. Contenido teórico

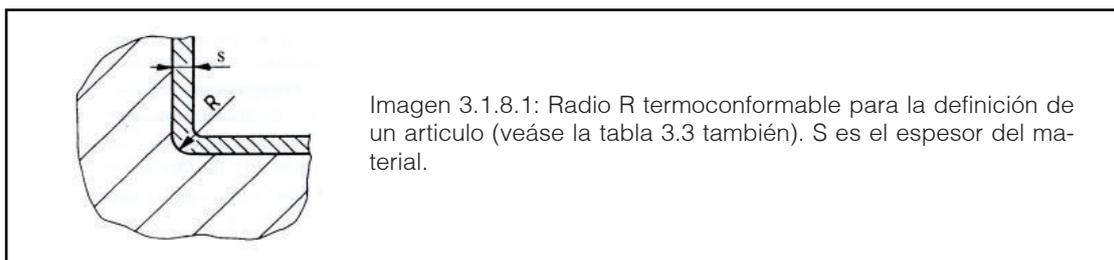


3.1.8 · Definición de detalles en el producto final.

Por definición de detalles en el producto final se entiende como la precisión con la que los contornos de la herramienta se reproducen en la lámina termoplástica. Los criterios son principalmente los radios pequeños y las estructuras superficiales en los lados de contacto de la herramienta. La definición de detalles está sujeta a muchos factores:

- El material plástico.
- Espesor de la lámina.
- Temperatura de conformado en todo el espesor de la lámina.
- Fuerza de conformado con sistemas de presión o vacío.
- Temperatura de la herramienta o molde.
- Relación de estiramiento.

El HIPS, PP, PE, ABS y PE son plásticos que se pueden termoconformar con mucha definición de detalle. El PC, APET y algunos PVC dependiendo de su grado sólo pueden termoconformarse bajo ciertas condiciones.



3. Contenido teórico

El espesor de la lámina también determina la definición de detalle en relación con la herramienta de termoconformado. La tabla 3.1 y la imagen 3.1.8.1 muestran la respectiva interdependencia.

	Zona de estiramiento *		
	Bajo (<2:1)	Medio (2 a 3)	Alto (>3:1)
Radio R en mm recomendado	>0.5·s	>(0.5 a 1)·s	>1.5·s

* *Corresponde a la reducción en el espesor.*

Tabla 3.1: Radio R recomendado para plásticos fácilmente estirables, tales como HIPS, PP, PE, ABS y PPE.

Cuanto mayor sea la temperatura de conformado seleccionada mejor es la definición de detalle. Las únicas excepciones son los plásticos que comienzan a cristalizar durante el calentamiento, tales como el APET y el CPET. Con espesores superiores a 4mm se debe prestar atención en conseguir que el material esté bien caliente si se pretende conseguir una buena definición de detalle. Si fuera necesario se debe reducir la intensidad de calefacción y aumentar el periodo de calentamiento.

De la misma manera, cuanto mayor sea la fuerza de conformado también será mejor la definición de detalle. Hay que tener en cuenta que para muchos materiales plásticos en relación a la máquina y la fuerza que proporciona (por ejemplo en el termoconformado al vacío) ésta puede ser insuficiente, pudiéndose compensar aumentando la temperatura de conformado.

Esto también se aplica a estiramientos del área que ascienden aproximadamente a 4:1, o en termoconformados con relaciones de altura:ancho de hasta 1:2. En estiramientos grandes en conjunción con una temperatura del material muy elevada, conseguir un espesor de pared uniforme se complica.

También podemos aumentar la definición de detalle cuanto mayor sea la temperatura de la herramienta o molde. En un termoconformado a presión el que la lámina posea una temperatura baja se puede compensar con una mayor presión de conformado. Esto se aplica particularmente en láminas finas de OPS por ejemplo, donde una herramienta demasiado fría hace que sea imposible lograr una buena definición de detalle.

Si la lámina se ha de conformar en una superficie o estructura que contengan componentes de ingeniería a añadir al producto final, la herramienta o molde debe alcanzar casi la temperatura de transición vítrea del material.

Otra forma de conseguir una mejor definición de detalle es utilizando una buena herramienta de ventilación.

Sin embargo y como es evidente, al realizar un estiramiento general muy elevado se hace más desfavorable conseguir un nivel de detalle alto. En el termoconformado, el

3. Contenido teórico

material plástico conserva una cierta elasticidad residual, es decir, no es completamente de plástico y por lo tanto actúa como una superficie de goma. Por lo tanto, para realizar termoconformados con mucha definición de detalle y un estiramiento general muy elevado se debe aumentar la fuerza de conformado.

3.1.9 · Comportamiento de los termoplásticos durante el enfriamiento.

Una vez que el proceso de calentamiento se completa en la máquina de termoconformado, por ejemplo después de desconectar la fuente de calor en una máquina de una sola estación, o cuando el material se transporta a otra estación para conformarse, la lámina plástica comienza a enfriarse. Sin embargo, todavía debe mantener su temperatura de conformación necesaria al inicio del proceso del termoconformado.

En la práctica, esto se traduce en que el periodo entre el final del calentamiento de la lámina y el inicio del conformado debe ser lo más corto posible, es decir, la lámina debe permanecer en el tiempo necesario lo más caliente posible. Sin embargo, algunos plásticos no se pueden calentar demasiado por encima de su temperatura de conformado, ya que de lo contrario podría dañarse y su procesabilidad dejaría de estar asegurada.

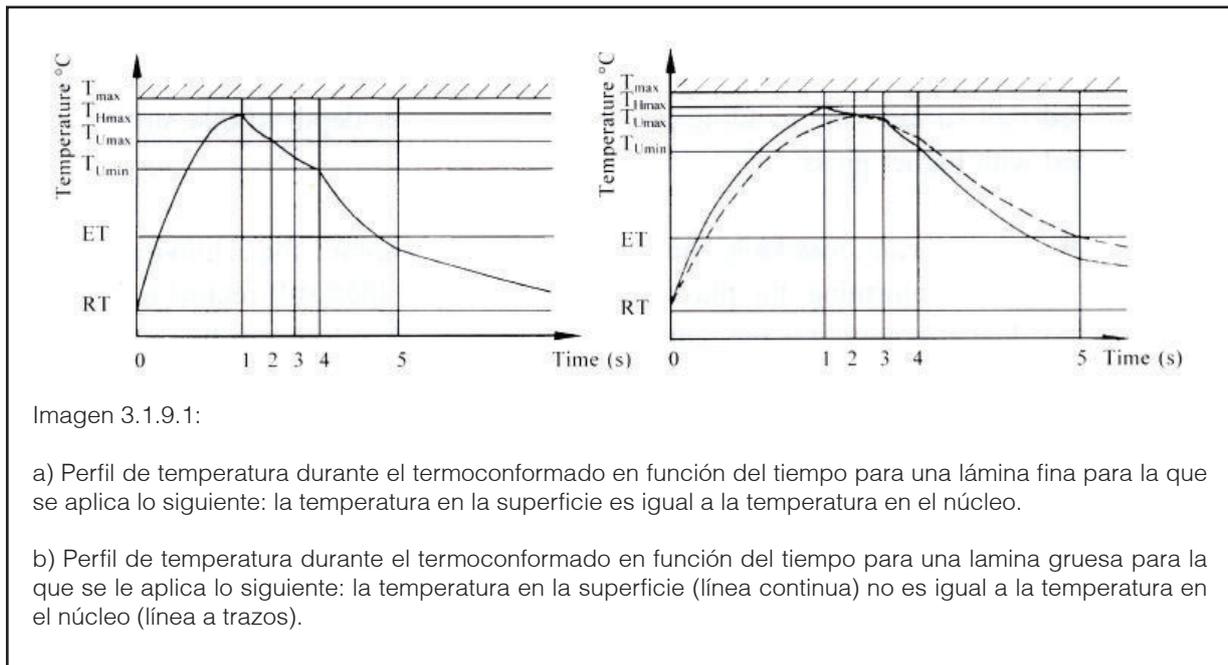
Tan pronto como sea posible, se debe eliminar la fuente de calor en las máquinas de una sola estación. Además, el transporte de la lámina al calentarse independientemente en una máquina de diversas estaciones, se debe hacer a gran velocidad. Al inicio del proceso de termoconformado hay que tener en cuenta que el enfriamiento sucede durante el estirado, por los soplos o succiones y parcialmente por el contacto de la lámina con otros elementos de la máquina.

En el momento en el momento en el que se inicia el conformado por vacío o por presión la refrigeración es intensiva debido al contacto de la lámina con la herramienta o molde. Conforme aumenta la superficie de contacto aumenta la intensidad de enfriamiento. Durante el proceso de conformado, que puede durar solo unas décimas de segundo en una lámina fina o, puede durar hasta varios segundos en una lámina más gruesa, hay que asegurarse que la lámina debe permanecer lo suficientemente caliente para producir un buen moldeo.

El tiempo oportuno de enfriamiento sólo comienza con el fin de conformar. En un diagrama esquemático (imagen 3.1.9.1a) se muestra el perfil de temperatura durante el termoconformado de una lámina fina en función del tiempo.

En este caso, empleando una lámina fina, la temperatura aplicada superficial = temperatura en el núcleo. En el segundo caso (figura 3.1.9.1b), utilizando una lámina más gruesa, como se muestra en su perfil de temperatura, la temperatura de la superficie no es igual a la del núcleo.

3. Contenido teórico



Donde:

RT = temperatura ambiente, ET = temperatura de reblandecimiento (temperatura de transición vítrea T_g), TU = temperatura de conformado, TH_{max} = calentamiento máximo de la lámina, T_{max} = calor máximo al que puede estar expuesto la lámina.

1 = fin del periodo de calentamiento, 2 = inicio del conformado (pre-estiramiento, inflado,...), 3 = continuación del conformado, 4 = lámina en completo contacto con la herramienta o molde, 4-5 = tiempo de enfriamiento, 5 = desmoldeo.

En el termoconformado, el tiempo de enfriamiento se da en función de los siguientes factores:

- El grado del plástico.
- Espesor del material tras el estiramiento.
- Temperatura de conformado.
- Temperatura de desmoldeo.
- Material de la herramienta o molde.
- Temperatura de la herramienta o molde.
- Intensidad de contacto entre la lámina y la herramienta o molde.
- Refrigeración de las áreas del artículo que no tengan contacto con la herramienta debido al aire u otros medios.

3. Contenido teórico

Debido a los diferentes valores de calor específico (capacidad del calor específico), el grado del plástico tiene una gran influencia en la capacidad de enfriamiento. El HIPS tiene un valor de calor específico de $0.361 \text{ Wh} / (\text{kg} \cdot \text{K})$ o $1.3 \text{ kJ} / (\text{kg} \cdot \text{K})$ mientras que, por otro lado, el PP tiene un valor $0.555 \text{ Wh} / (\text{kg} \cdot \text{K})$ o $2.0 \text{ kJ} / (\text{kg} \cdot \text{K})$, lo que significa que el PP tiene que disipar el calor durante el enfriamiento 1.5 veces más comparándolo con el HIPS. La diferencia en la conductividad térmica de los plásticos, como se ha podido entender, juega un papel muy importante en el proceso.

Si el tiempo de enfriamiento del material de referencia HIPS es conocido (t_R), se puede calcular el tiempo de enfriamiento de un material plástico diferente (t_x) de espesores idénticos de la siguiente manera:

$$\text{Tiempo de enfriamiento } t_x = t_R \cdot \text{factor del material para el tiempo de enfriamiento}$$

Donde:

t_R = Tiempo de enfriamiento del material de referencia (HIPS).

t_x = Tiempo de enfriamiento de un material plástico diferente.

El factor del material se puede encontrar en la tabla 3.3.

El espesor final del material conformado tras el estiramiento es muy importante respecto a la conductividad del calor, que es directamente proporcional al área de contacto. Esto significa, que cuanto más se estira el material mayor será el área y más pequeño el espesor, acortando el tiempo de enfriamiento.

Hay que tener en cuenta que el proceso de refrigeración sólo termina cuando al menos la parte estirada en todo su espesor se ha enfriado lo suficiente para que el artículo se pueda desmoldear. Como se ha comentado, en láminas gruesas no se puede medir la temperatura del núcleo en la práctica, con lo que se debe tomar como referencia la deformación de la lámina, es decir, el tiempo de enfriamiento hasta que ésta deja de deformarse.

Cuanto mayor es la temperatura de conformación requerida, mayor será el calor que se deberá extraer durante el enfriamiento y más largo el periodo. Esta es la razón por la que las máquinas de termoconformado a presión pueden ejecutar ciclos más cortos que los utilizados en el termoconformado por vacío.

En la mayoría de los casos, la temperatura de desmoldeo es sólo ligeramente inferior a la temperatura de transición vítrea. Cuanto más rígido está el producto en el momento de ser desmoldeado mas largo es el tiempo de enfriamiento.

Cuanto mejor sea la conductividad térmica del material de la herramienta o molde, más corto es el tiempo de enfriamiento. Así, por ejemplo, tenemos que la relación de tiempos de enfriamiento entre las herramientas de resina epoxi, de aluminio y de aluminio térmicamente equilibrado es de 18 : 12 : 7 respectivamente.

3. Contenido teórico

Como ejemplo, vamos a suponer que el tiempo de enfriamiento de una pieza termoconformada de 3mm de espesor, realizada en una lámina de HIPS gruesa con relación 1:2 en cuanto a su estiramiento y producida con una herramienta o molde de resina epoxi es de 54 segundos. Si empleáramos una herramienta de aluminio equilibrado térmicamente, el tiempo de enfriamiento entonces sería:

$$t_{K Al} = 54 \cdot \frac{7}{18} = 21 \text{ segundos.}$$

En las máquinas alimentadas automáticamente mediante rollos de material, las herramientas o algunos segmentos de éstas se producen mediante una aleación de cobre-berilio cuya conductividad térmica, mejorada en comparación con el aluminio, permite reducir entre un 15% - 20% el tiempo de enfriamiento en láminas finas de hasta 0'5mm.

Una temperatura baja de la herramienta o molde para termoconformado necesita un tiempo de enfriamiento más corto, pero esta temperatura no se puede reducir de manera arbitraria. La temperatura mínima de la herramienta está determinada por:

- El material plástico.
- La rugosidad de impresión requerida.
- El espesor del material oculto: con el aumento del espesor de pared, el riesgo de deformación también aumenta si el modelo no se puede enfriar bilateralmente y a la misma velocidad. En otras palabras: las láminas más gruesas necesitan temperaturas más altas en la herramienta.
- La forma del producto: un producto moldeado axialmente simétrico se puede desmoldear en un estado más caliente que otro con paredes laterales rectas.

Si el contacto entre la lámina y la herramienta es malo, el aire puede quedarse atrapado entre y el tiempo de enfriamiento puede aumentar. El mal contacto puede ocurrir cuando la superficie de la herramienta es demasiado lisa o contiene pocos canales de ventilación. Si el producto conformado resulta deforme, es debido a que el contacto con la herramienta en esos puntos ha sido pobre.

Durante el proceso de enfriamiento, el enfriamiento de la cara de la lámina en contacto con la superficie de la herramienta, en general, será más eficiente que la que no toca. Aunque como se ha explicado, lo preferible sería que ambas caras se enfriaran uniformemente.

3. Contenido teórico

	Libre	Con aire	Pulverizado con aire y agua	Contacto con aluminio
Valor de transferencia de calor en $W/(m^2 \cdot K)$	5.7	57	570	→ infinito

Tabla 3.2: Valores para la transferencia de calor de materia para materiales termoconformados usando diferentes métodos de enfriamiento.

La mejora en la refrigeración por aire se logra:

- Intensificando el flujo de aire.
- Dirigiendo el flujo del aire a puntos concretos de gran espesor.
- Descargando el aire tan cerca del artículo tan cerca como sea posible.
- Adicionándole agua a la corriente de aire.
- Empleando aire frío.

Aun así hay que tener en cuenta que el aire apenas tiene efecto de enfriamiento. Por ejemplo, en una máquina alimentada automáticamente que utiliza herramientas relativamente frías, en ciclos cortos de un máximo de 3 segundos: la diferencia entre usar aire para el enfriamiento y el enfriamiento por contacto es tan pequeña que el uso de aire frío no muestra ninguna reducción apreciable en el tiempo de enfriamiento.

3. Contenido teórico

Tabla 3.3: Propiedades de los termoplásticos y condiciones para el termoconformado (guía de valores).

Tabla para el Termoconformado (guía de valores)	Abreviación	Densidad	Resistencia a la tracción	Módulo elástico	Transparencia óptica	Expansión térmica lineal	Calor específico	Temperatura de servicio a largo plazo		Temperatura de transformación	Intervalo de fusión de cristalizado	Presecado de la lámina 1.5-2 hl/mm	Temperatura de transformación medida en la superficie	
								min	máx				Aire comp.	Vacío
								°C	°C				°C	°C
Termoplásticos	-	g/cm ³	N/mm ²	N/mm ²	+ / -	10 ⁻⁶ /°C	kJ/kg-K	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C
<i>Poliestireno estándar</i>	PS	1.05	55	3350	+	75	1.3	-10	+70	80	-	-	120-150	165-190
<i>Poliestireno endurecido</i>	SB	1.05	32	2150	- (+)	70	1.3	-40	+70	80	-	-	120-160	150-200
<i>Estireno butadieno estireno</i>	SBS	1.03	31	1800	+	90	1.3	-20	+70	90	-	-	115-125	140-170
<i>Poliestireno orientado</i>	OPS	1.05	57	3200	+	70	1.3	-60	+79	99	-	-	115	115
<i>Acrolitrino butadieno estireno</i>	ABS	1.05	50	2500	+	90	1.3	-45	+85	100	-	75	130-160	160-220
<i>Acrolitrino estireno acrilato</i>	ASA	1.07	36	2050	-	95	1.3	-40	+75	90	-	85	120-160	160-190
<i>Estireno acrolitrino</i>	SAN	1.08	73	3700	+	80	1.3	-20	+80	95	-	-	135-170	165-190
<i>Cloruro de polivinilo, rígido</i>	PVC-U	1.39	58	2900	+	75	0.9		+65	90	-	-	120-140	155-200
<i>Polietileno de alta densidad</i>	HDPE	0.95	28	1100	-	200	2.4	-50	+95	105	125+15	-	140-170	170-200
<i>Polipropileno</i>	PP	0.92	30	1200	- (+)	150	2.0	0 (-30)	+110	140	158+10	-	150-165	160-200
<i>Metraquilato de polimetilo, extr.</i>	PMMA _{ex}	1.18	72	3300	+	70	1.47	-40	+70	95	-	70	140-160	160-190
<i>Metraquilato de polimetilo, fund.</i>	PMMA _c	1.18	80	3300	+	70	1.47	-40	+80	100	-	-	140-170	170-200
<i>Poliacetal</i>	POM	1.41	66	3000	-	100	1.5	-40	+100	120	165+10	-	145-170	170-180
<i>Policarbonato</i>	PC	1.2	61	2300	+	65	1.17	-100	+130	150	-	100	150-180	180-220
<i>Poliéster carbonato</i>	PAR	1.2	66	2300	+	72	1.1	-40	+145	170	-	110	180-210	210-235
<i>Éter de polifenileno</i>	PPO	1.08	55	2450	-	70	1.4	-30	+80	120	-	-	180-230	200-250
<i>Poliamida 12</i>	PA12	1.02	60	1600	-	150	1.6	-70	+80	150	175+10	80	160-180	170-180
<i>Tereftalato de polietileno amorfo</i>	PETG	1.27	49	1720	+	51	1.1		+63	82	-	-	100-120	110-180
<i>Tereftalato de polietileno amorfo</i>	APET	1.34	30	2200	+	80	1.05	-40	+70	86	-	65	100-120	110-120
<i>Tereftalato de polietileno cristalino</i>	CPET	1.37	47	2600	-	70	1.1	-20	+220	86	255+3	-	130-145	---
<i>Polisulfona</i>	PSU	1.24	80	2650	+	56	1.3	-70	+150	178	-	120	210-230	220-250
<i>Poliéter sulfona</i>	PES	1.37	80	3000	+	55	1.1		+180	220	-	180	230-270	265-290
<i>Sulfuro de polifenileno</i>	PPS	1.62	125	12000	-	29			+240	260	280+8	-	260-270	250-275
<i>Poliacrolitrilo</i>	A/MA/B	1.15	56	3450	+	66	2.0	-200	+70	88	-	-	135-150	160-220
<i>Acetato celulósico</i>	CA	1.28	37	1800	+	110	1.6	-40	+80	98	-	65	145-170	165-180
<i>Diacetato celulósico</i>	CdA	1.27	40	1000	+			-20	+80	70	-	60	115-130	120-140
<i>Celulosa aceto butirato</i>	CAB	1.18	26	1600	+	120	1.6	-40	+60	120	-	90	140-170	170-200
<i>Fluoruro de polivinilideno</i>	PVDF	1.78	43	1500	-	120	0.96	-40	+120	150	170+8	-	170-200	170-240
<i>Polieterimida</i>	PEI	1.27	105	2800	-	56			+170	215	-	75	230-290	240-330
<i>PET elastómero</i>	TPE	1.17	28	55	-			-50	+105	108	-	-	---	135-143

3. Contenido teórico

Abreviación	Factor del material para tiempo de calentamiento (1)	Factor del material para tiempo de enfriamiento (1)	Temperatura óptima de la herramienta					Material del soporte de la lámina					Ventilación (2)				Procesamiento de contracción (3)
								1 = madera laminada 2 = fieltro 3 = POM 4= PA6GGK 5 = espuma sintáctica (5) 6 = talco-PU 7 = Pertinax					Vacío		Presión		
			UA	RV	RD	RDM	HSA / FS	UA	RV	RD	RDM	HSA /FS	Agujero perforado	Hendidura	Agujero perforado	Hendidura	
°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	°C	mm	mm	mm	mm	%		
-	-	-	80	___	15	15	___	1,2,6,7	___	2,5 (5)	2,5 (5)	___	0'8	0'5	0'6	0'3	0'5
PS	1.3	0.97	80	___	15	15	___	1,2,6,7	___	2,5 (5)	2,5 (5)	___	0'8	0'5	0'6	0'3	0'5
SB	1	1	70	25	20	15	---/15	1,2,6,7	1,2,5,6	2,5	2,5	2,5	0'8	0'5	0'6	0'3	0'5
SBS	1	1	50	25	20	15	40/20	1,2,3,6,7	1,3,5	3,5	3,5	3,5	0'8	0'4	0'6	0'3	0'5
OPS	1	0.7	65	___	65	40	___	2,5	___	2,5	2,5	___	0'8	0'6	0'6	0'4	0'5
ABS	1.3	1.3	85	35	20	15	---/15	1,2,4,6,7	1,2,4,5	2,5	2,5	2,5	0'8	0'5	0'6	0'3	0'6-0'7
ASA	1.3	1.3	85	---	20	15	---	1,2,4,6,7	---	2,5	2,5	---	0'8	0'5	0'6	0'3	0'3-0'7
SAN	1.6	1.12	85	---	---	---	---	1,2,4,6,7	---	---	---	---	0'8	0'5	0'6	0'3	0'4-0'7
PVC-U	1.7	2.55	80	25	20	15	35/15	1,2,6,7	1,2,5,7	2,5	2,5	2,5	0'8	0'5	0'6	0'3	0'4-0'5
HDPE	2.5	2.5	100	50	35	20	---	1,4,6,7	1,4,5,7	4,5	4,5	---	0'6	0'3	0'4	0'2	1'2-7'0
PP	2.1	2.1	90	25 (4)	25	15	---/15	1,3,4,6,7	3,4,5,7 (4)	3,4,5	3,4,5	3,4,5	0'6	0'3	0'3	0'2	1'5-1'8
PMMAex	1.5	1.5	85	---	25	---	---	1,2,4,6,7	---	5	---	---	0'8	0'6	0'8	0'5	0'5-0'8
PMMAc	1.6	1.6	90	___	___	___	___	1,2,4,6,7	___	___	___	___	1'0	0'8	0'6	0'3	0'5-0'8
POM	3.7	1.85	100	---	---	---	---	1,2,4,6,7	---	---	---	---	0'6	0'4	0'4	0'2	1'5-2'5
PC	1.5	0.9	130	___	125	---	---	1,2,6,7	___	5	---	---	0'6	0'5	0'6	0'3	0'9-1'1
PAR	2.6	2.21	130	---	---	---	---	1,2,6,7	---	---	---	---	0'8	0'5	0'6	0'3	0'8
PPO	1.8	1.44	120	---	---	---	---	1,2,4,6,7	---	---	---	---	0'8	0'5	0'6	0'3	0'5-0'7
PA12	2.5	2	70	---	---	---	---	1,2,4,6,7	---	---	---	---	0'8	0'5	0'6	0'3	1'2-1'8
PETG	1.25	0.88	60	35	20	15	35/20	1,2,3,6,7	1,2,3,5	3,5	3,5	3,5	0'8	0'4	0'6	0'3	0'4-0'5
APET	1.25	0.88	60	35	20	15	35/20	1,2,3,6,7	1,2,3,5	3,5	3,5	3,5	0'8	0'4	0'6	0'3	0'4-0'5
CPET	___	___	___	___	170/60	___	___	___	___	5	___	___	___	___	0'6	0'4	0'5-2'0
PSU	2.9	2.32	145	___	---	---	---	1,2,4,6,7	___	---	---	---	0'8	0'5	0'6	0'3	0'5-0'7
PES	---	---	150	___	---	---	---	1,2,4,6,7	___	---	---	---	0'8	0'6	0'6	0'3	0'6
PPS	3.5	0.87	140	___	---	---	---	1,2,4,6,7	___	---	---	---	0'6	0'3	0'4	0'2	0'7
A/MA/B	1.3	1.69	65	35	20	15	35/15	1,2,4,6,7	1,2,5	2,5	2,5	2,5	0'8	0'4	0'6	0'3	0'2-0'5
CA	1.5	1.5	70	---	---	---	---	1,2,5,6,7	---	---	---	---	0'8	0'5	0'6	0'3	0'4-0'8
CdA	---	---	60	---	20	---	---	1,2,5	---	5	---	---	0'8	0'4	0'6	0'3	0'2-0'3
CAB	1.5	1.5	80	___	---	---	---	1,2,4,6,7	---	---	---	---	0'8	0'5	0'4	0'2	0'4-0'8
PVDF	3	3	130	___	---	---	---	1,2,4,7	___	---	---	---	0'8	0'5	0'6	0'3	0'9-3'2
PEI	2.7	0.62	150	___	---	---	---	1,2,4,7	___	---	---	---	0'8	0'5	0'6	0'3	0'6-0'8
TPE	1.5	1.5	90	---	---	---	---	1,2,5,7	---	---	---	---	0'6	0'5	___	1'25	1'25

3. Contenido teórico

LEYENDA

(1) Para superficies de formado (SF) y detalles en artículos muy característicos x1.5.

(2) Para SF y detalles en artículos muy característicos con aproximadamente el 30% de valores bajos; para temperaturas muy bajas que forman aproximadamente el 25% de los

$$\text{Procesamiento de contracción} = \frac{\text{longitud de la hta.} - \text{longitud de la embutición}}{\text{longitud de la hta.}} \cdot 100$$

(3)

Mediciones tomadas después de 24 horas a temperatura ambiente

(4) No todos los grados de PP son procesables por RV.

(5) Solo procesos en línea.

UA - Máquina de propósito general.

RV - Máquina por vacío alimentada automáticamente.

RD - Máquina por presión alimentada automáticamente.

RDM - RD con matrices de recorte.

HSA - Máquina de sellado en caliente.

FS - Máquinas con herramienta de llenado.

3. Contenido teórico

3.2 · Vacío [14].

El método más antiguo para conformar una hoja de plástico en una pieza utilitaria es el termoconformado al vacío. La descripción original para el proceso de termoconformado fue precisamente el de “formado al vacío”.

Como se ha explicado, el principio básico del proceso de formado al vacío es el de conformar una lámina termoplástica reblandecida en un molde perfectamente sellado y donde el aire atrapado será evacuado por la fuerza de vacío o succión. A medida que el aire es evacuado del molde, causa una presión positiva sobre la superficie de la hoja y por lo tanto, la presión atmosférica natural cederá para forzar a la hoja calentada a ocupar los espacios vacíos.

3.2.1 · Equipos de vacío.

Existe una gran variedad de bombas de vacío: de pistón recíprocante, de diafragma, de paletas, de rotor excéntrico, etcétera. Todas estas proporcionan un buen vacío, pero no son capaces de evacuar un volumen grande de aire a gran velocidad y por esta razón, en ocasiones es necesario conectar un tanque de reserva que sirva como “acumulador de vacío”.

Por otra parte, hay compresores que pueden desplazar un gran volumen de aire pero son limitados en cuanto a fuerza de vacío. Un adecuado sistema de vacío requiere de una bomba capaz de desplazar de 710 a 735 mm. de Hg. (28 a 29 Pulg. Hg o de 0.5 a 1 Psi absoluto) en el tanque de almacenamiento previo al ciclo de formado.

La línea, ducto o tubería entre el tanque de almacenamiento y el molde deberá ser lo más corta posible y con un mínimo de codos. Es importante eliminar fugas de aire por tubería dañada, mangueras perforadas así como válvulas no necesarias. Se recomienda utilizar válvulas de acción rápida o de bola [15]. Las bombas de vacío están disponibles en uno o dos pasos. Una bomba de vacío de dos pasos puede evacuar presiones por debajo de 10 Psi; la capacidad de desplazamiento o evacuación para una bomba de un paso se reduce a la mitad. En la tabla 3.4 se muestran las capacidades típicas para bombas de vacío.

Tabla 3.4: Especificaciones típicas para bombas de vacío.

ESPECIFICACIONES			CAPACIDAD TEÓRICA DE VACÍO				
No. DE CILINDROS	DIÁMETRO (mm)	CARRERA (mm)	UN PASO (M ³ /MIN)	DOS PASOS (M ³ /MIN)	VELOCIDAD (RPM)	POTENCIA REQUERIDA (Kw)	DIAM. DE SALIDA DE LA TUBERÍA
1	76	70	0.255	----	800	0.56	19
2	76	70	0.510	0.255	800	0.74	25
2	102	70	0.906	0.453	800	1.48	32
2	127	80	1.70	0.850	750	2.2/3.7	38
2	140	102	2.80	1.40	900	3.7	52
3	140	102	4.22	2.80	900	5.6	52

3. Contenido teórico

3.2.2 · Tanques de vacío.

Con excepción de algunos equipos de vacío, la mayor parte son suministrados con un tanque de almacenamiento. Tomando en cuenta que la presión de trabajo es de aproximadamente 10 Psi (alrededor de 21 Pulg. Hg /530 mm. Hg) de vacío, el volumen del tanque de almacenamiento deberá ser 2.5 veces mayor al volumen comprendido entre el molde, la caja de vacío y la tubería. Doblando el volumen del tanque de almacenamiento (y con otras condiciones similares) se podrá incrementar la presión en un 15% (11.5 Psi), conforme a lo establecido, el límite teórico para el proceso de formado al vacío es de sólo 14.7 Psi.

En muchos de los casos un rápido desplazamiento de vacío es muy importante. Esto sólo puede ser efectuado ubicando el tanque de vacío lo más cercano al molde y reduciendo la fricción en la tubería al máximo. Esto se puede lograr mediante:

- a) Un mayor diámetro de la tubería.
- b) Contar con curvas generosas en la tubería, evitando codos a 90°.
- c) Cambios en la sección transversal de la tubería (cambios de diámetros).

Muchos equipos que se ofrecen en el mercado no cumplen estas reglas. En general, se requiere de un diámetro de 1 pulg. en la tubería para desplazar 1 pie³ de aire, para piezas grandes un diámetro de 2 ó 3 pulg. será adecuado.

3.2.3 · Aplicación de las fuerzas de vacío.

En general, las bombas operan constantemente para mantener el vacío en el tanque de almacenamiento, existiendo una variación en la lectura del vacuómetro con cada ciclo. El vacío que se provoca en la parte conformada se debe mantener el tiempo suficiente para que se enfríe y resista la fuerza interna del material que tenderá a conservar la forma original, causando ondulaciones y pandeo.

Como regla general, cuanto más rápido se haga el vacío, la apariencia de la pieza será mejor aunque, ocasionalmente es conveniente una velocidad de conformado lenta para piezas muy profundas o de secciones intrincadas.

Cuando un molde hembra es muy profundo y su configuración se vuelve un problema, un vacío lento puede dar al plástico más tiempo para contraerse en la sección transversal, pudiendo eliminar de este modo una configuración deficiente.

3. Contenido teórico

3.3 · Bajo coste y “open hardware”.

3.3.1 · Bajo coste.

Los sistemas de bajo coste, o también denominados de “fabricación personal”, se entienden como equipos con una serie de características generales que vienen marcadas por una manera diferente de entender la fabricación y el ciclo de vida del producto, y que consiste en una democratización de la fabricación, una tendencia que promete revolucionar los métodos de diseño, producción y distribución de bienes materiales, dando lugar a un nuevo tipo de creadores y productores con un creciente deseo individual de hacer y personalizar los productos que consumen [16].

Como consecuencia del abaratamiento de las tecnologías y los sistemas de comunicación lo que se ha originado es que cada vez más ingenieros, diseñadores, programadores, etc. desarrollen sistemas y soluciones de bajo coste, gran parte de ellas desarrolladas como hobby [1, p.9].

La filosofía de “bajo coste” no deja de reunir adeptos a un modo de vida básico, práctico y barato, pero siempre sin renunciar a la esencia y la calidad de la necesidad. De lo que se trata es de eliminar elementos superfluos de los productos que no aportan valor como la imagen o percepción, conceptos por los que se suele pagar un alto precio. A cambio lo que se pretende ofrecer es un producto desnudo pero sin perder su esencia manteniendo una calidad razonable de acuerdo con su precio.

Estas soluciones, en el caso del diseño de producto y el prototipado ya están originando que el proceso pueda comenzar con una idea y se convierta en un prototipo sin que suponga una gran inversión para los usuarios, lo que permite que el diseño de producto no esté limitado únicamente a grandes empresas que pueden costearse la adquisición de maquinaria para el diseño y fabricación.

3.3.2 · Open hardware.

Como se comentaba en la introducción de este texto, el auge del software “open source” es un fenómeno relativamente reciente. Este tipo de software da acceso al usuario al código fuente, y no sólo al código objeto, es decir, la secuencia de ceros y unos que los ordenadores utilizan. Los códigos fuente del software son publicados gratuitamente en la red permitiendo a cualquier programador distribuirlos, bajarlos y utilizar dicho software, de tal forma que la comunidad pueda sugerir mejoras o incluso modificarlos y redistribuir su nuevo código [1, p.9].

Gracias a esto un gran número de programas exitosos de tipo “open source” han sido desarrollados provocando la realización de diversos estudios con tal fin de analizar este fenómeno desde diferentes perspectivas [17]

3. Contenido teórico

Utilizando la misma filosofía de operación, el “open hardware” se podría decir que sigue los pasos del “software open source” pero de una manera tangible. Suelen ser proyectos en los que los creadores han decidido publicar completamente todo su “código fuente”, es decir, los esquemas, firmware, software, lista de materiales, archivos de diseño, instrucciones, etc., es decir, todo lo necesario para acceder y reproducir nuevamente el producto, que pueden ser tan simples como la preparación de una bebida a productos de mayor complejidad como una impresora 3D.

3.4 · *Materiales y maquinaria utilizados en sistemas de bajo coste.*

En el planteamiento actual de la fabricación de productos la producción está basada en la realización del mayor número de copias posibles de un mismo producto geográficamente en el lugar donde el coste económico sea menor, independientemente de la distancia que deban recorrer las materias primas hasta la fábrica de componentes, los componentes hasta la cadena de ensamblaje, y los productos acabados hasta el usuario final.

Este modelo de producción sufre de tener un impacto medioambiental desproporcionado y no puede ser sostenido durante mucho tiempo debido a las limitaciones en cuanto a materias primas y combustibles [18]. A raíz de la concienciación sobre este problema surgen los sistemas de fabricación personal, que buscan que la distancia entre las materias primas, la fábrica, y el usuario final sea la menor posible, tanto como que en lugar de existir una gran fábrica a 10.000 kilómetros, existan muchas pequeñas a poca distancia.

Además, la característica “personal”, hace que sean sistemas que puedan localizarse en un ámbito doméstico, sin ocupar mucho espacio, rompiendo con la estética de “fábrica” del siglo pasado, con mecánica de acero y grasa, y que la capacidad de producción de objetos no sea tan alta como la de los sistemas industriales, ya que no necesitan producir muchas copias [19].

Como respuesta a la demanda de fabricación de productos por parte de los propios usuarios, surge la red internacional de Fab Labs, que son laboratorios de fabricación digital (minifábricas), y cuyo equipamiento permite la fabricación de casi cualquier objeto, y que sirven como centro de formación en diseño y fabricación, punto de encuentro entre “fabricadores personales” o “makers”, y fábrica cuyas máquinas son alquiladas por tiempo. En general todos los Fab Labs disponen de una fresadora cnc (para espumas, madera, o metales blandos), un cortador láser (para el corte de materiales en 2D), un plotter de corte (para la creación de máscaras), una impresora 3D (para la fabricación de piezas de plástico), y un equipamiento para la fabricación de los elementos electrónicos [20].

Debido a la maquinaria disponible en los FabLab, y a la presencia en casi cualquier lugar del mundo de fábricas de madera, el material más utilizado en los sistemas de fabricación personal es precisamente la madera, ya que además de permitir un fácil mecanizado y corte, y un fácil desensamblado, al ser un material natural es también biodegradable

3. Contenido teórico

por naturaleza, y por lo tanto el ciclo de vida del producto pasa de ser lineal (materias primas, fabricación, uso, desecho), a ser retroalimentado (materias primas, fabricación, uso, reciclado, reutilización) [21].

Para la optimización del tiempo de utilización de las máquinas de los Fab Lab, y por lo tanto el impacto en el coste de los productos, los sistemas de fabricación personal se caracterizan por estar formados mayormente por piezas fabricadas a través de trayectorias en 2D (con fresadora CNC o cortador láser) que se ensamblan unas con otras a través de machihembrados, y por contener el menor número posible de piezas que deban ser fabricadas en industrias, como pueden ser los tornillos y piezas metálicas [22].

Esto permite que en el caso de que el sistema tenga que ser enviado al usuario final, su embalaje ocupe el menor espacio posible y pueda ser ensamblado por éste, generando un valor añadido al sistema, ya que el usuario final contribuye en la fabricación, realizando el ensamblaje final del producto.

Aunque el objetivo real del diseño de estos sistemas es la libre distribución de los planos de fabricación (open hardware) a través de internet, buscando la mejora continua y colaboración entre multitud de personas en ésta (crowd sourcing), y la fabricación en el lugar más próximo al usuario final, es decir, en el Fab Lab más cercano.

3. Contenido teórico

4. SOLUCIÓN PROPUESTA

4. Solución propuesta

4.1 · Diseño conceptual.

Desde el inicio del presente estudio y teniendo en cuenta los conocimientos previos sobre la materia, dada la experiencia durante la asignatura de Prototipado Rápido del Master en Diseño y Fabricación Asistida Integrado por Computador CAD – CAM - CIM, se realizaron tres diseños conceptuales que sirvieron de referencia para el desarrollo del prototipo que finalmente se ha producido.

A continuación se detallan los diseños conceptuales propuestos.

4.1.1 · Diseño conceptual 1:

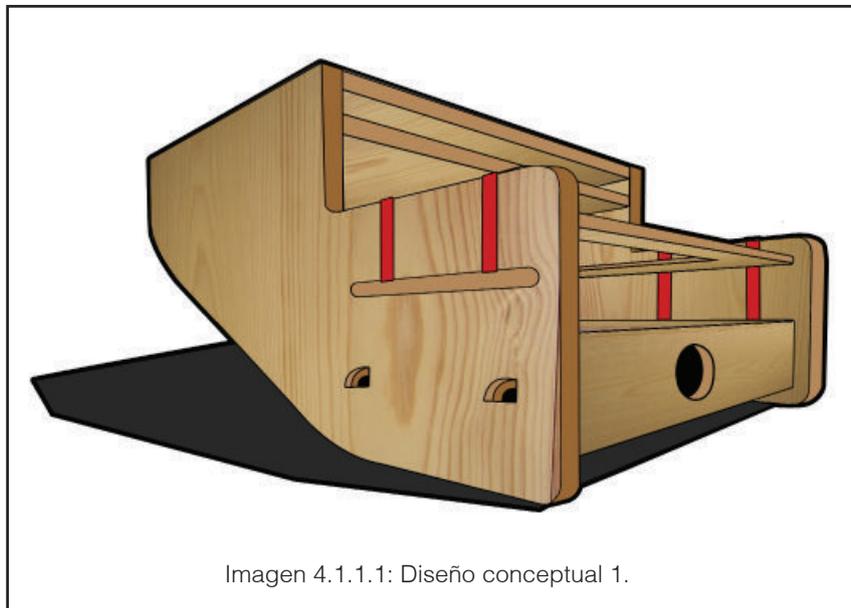


Imagen 4.1.1.1: Diseño conceptual 1.

Esta máquina, tal y como está planteada, tiene un sistema similar a la “Thermoforming Machine” mostrada en el apartado “Estado del Arte” (2.1.1 · Thermoforming Machine) de la presente Tesina, ya que la idea principal es que el movimiento de conformado lo realice el cajón de vacío que se eleva, manteniendo la lámina fija y ejerciendo la fuerza de conformado por parte de la herramienta o molde.

Este concepto está ideado para alojar el sistema de calefacción en un elemento con guías laterales que se desplazan, de tal forma que la calefacción pueda realizarse sobre la lámina ya fijada y al llegar a la temperatura deseada el elemento se retraiga y se pueda realizar el conformado.

En la práctica, esto origina dos movimientos en el momento del termoconformado, es decir, uno para eliminar el sistema de calefacción de la zona de conformado y otro a continuación para elevar el cajón de vacío con la herramienta o molde.

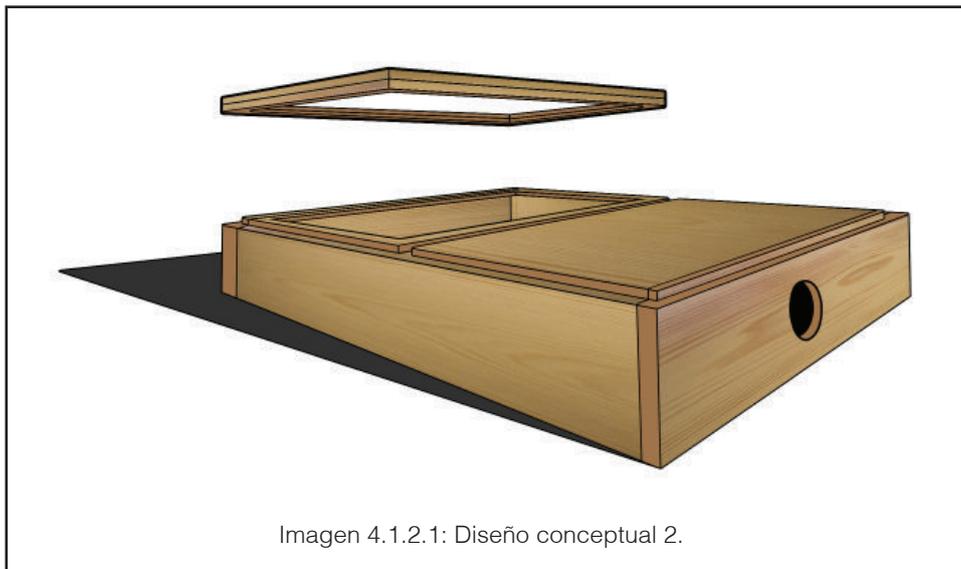
Esta característica resulta negativa en el proceso debido al tiempo requerido para

4. Solución propuesta

retirar el sistema de calefacción y elevar el molde, provocando el enfriamiento de la lámina y por lo tanto el mal conformado.

Además, el movimiento ascendente del molde requiere de un sistema indirecto de elevación que complica el diseño mecánico y encarece el producto, de la misma forma que la utilización de herrajes y guías metálicas.

4.1.2 · Diseño conceptual 2:



Este modelo está inspirado en las versiones de las máquinas “Hobby Vacuum Former” y “Vacuum Former Table”, ambas mostradas también en el apartado “Estado del Arte” (2.1.3 · Hobby Vacuum Former 12”x12” y 2.1.4 · Vacuum Former Table).

En este caso, de lo que se trata nuevamente es de aportar el sistema de calefacción inexistente también en este tipo de producto, los cuales simplemente cuentan con el cajón y la mesa de vacío, de tal forma que sin necesidad de un largo desplazamiento se pueda realizar todo el proceso, ya que generalmente los usuarios de este tipo de máquinas realizan la calefacción de la lámina en un horno doméstico.

Sin embargo, aunque el proceso se realice aplicando un solo movimiento, el hecho de tener que desplazar la lámina de forma descontrolada hasta el cajón de vacío genera el riesgo de no conseguir el encuadre necesario y por lo tanto, un mal conformado. Además, al incluir el sistema de calefacción en el mismo plano que el cajón de vacío el espacio ocupado por la máquina se multiplica por dos.

4.1.3 · Diseño conceptual 3:

Por último se presenta el tercer modelo propuesto, que surge de la asociación de ideas de las versiones conceptuales anteriores.

4. Solución propuesta

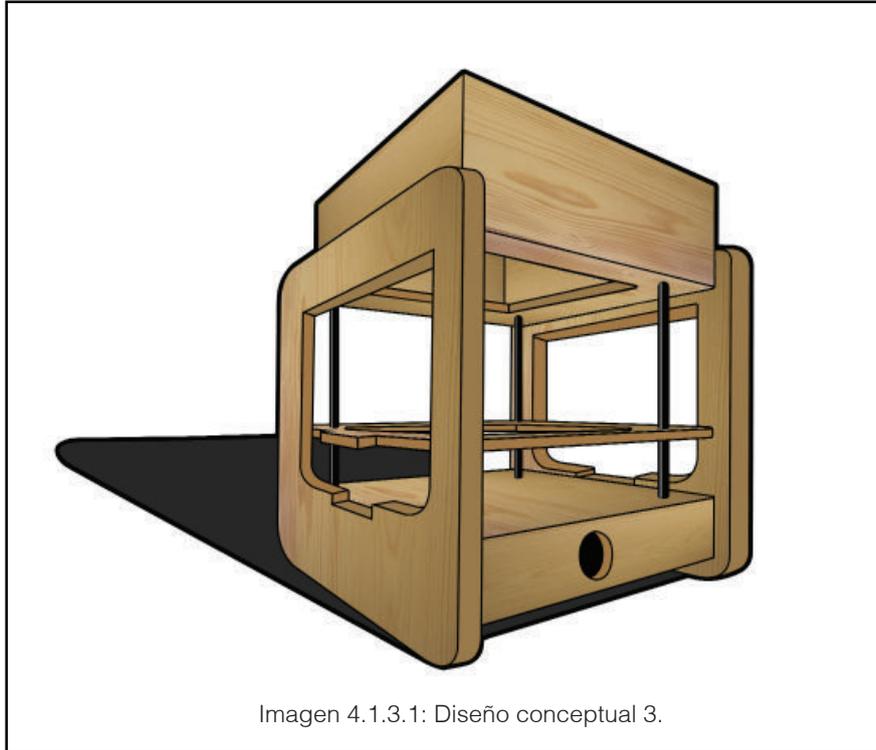


Imagen 4.1.3.1: Diseño conceptual 3.

Esta máquina, al igual que las anteriores incorpora el sistema de calefacción. La lámina termoplástica se sitúa en un soporte que se desplaza mediante unas guías de ayuda.

En el proceso de calefacción la lámina se sitúa en la parte superior y cuando ésta está lista para el conformado, mediante un único movimiento lineal se desplaza hacia el cajón o mesa de vacío. Dado que el desplazamiento está facilitado por las guías, se elimina el riesgo de un mal encuadre entre la lámina y la mesa de vacío.

Además, con este sistema, como resultado obtenemos una máquina con la que conseguimos reducir el espacio requerido para su uso.

Por estos motivos se ha considerado que este concepto es el más apropiado en cuanto a funcionabilidad y facilidad de uso.

4. Solución propuesta

4.2 · Diseño propuesto.

Después de seleccionar el diseño conceptual más apropiado bajo los criterios antes mencionados y tras estudiar y analizar diversas soluciones mediante modelado en 3D, se contruyó el prototipo de la máquina (imagen 4.2.1).



El prototipo consta tres partes claramente diferenciadas por su función:

- En la parte superior se encuentra la zona de calefacción, que como posteriormente se detallará, está compuesta por dos resistencias cerámicas.
- En la parte inferior se sitúa la mesa de vacío en la que se aloja el orificio al que se le acoplará un aspirador doméstico.
- Entre la zona de calefacción y la mesa de vacío se encuentran los marcos que harán de soporte para sujetar la lámina termoplástica.

El modelo cuenta únicamente con dos guías metálicas ya que debido al movimiento lineal que se realiza se ha considerado suficiente para el proceso.

El material escogido para el prototipo ha sido el contrachapado, principalmente por los motivos mencionados anteriormente en el punto 3.4 de esta Tesina (3.4 · Materiales y maquinaria utilizados en sistemas de bajo coste.), es decir, la facilidad de localización del material, facilidad de mecanizado, reciclabilidad, fácil ensamblado y desensamblado y bajo coste. La máquina en general está fabricada con elementos de 10mm de espesor, exceptuando tres elementos que emplean laminado de 15mm de espesor.

4. Solución propuesta

El diseño de todos los elementos estructurales se han realizado teniendo en cuenta su fabricación, ya que como anteriormente se ha descrito, la fabricación mediante trayectorias en dos dimensiones (imagen 4.2.2) permite ahorrar costes de mecanizado (con fresadoras CNC o cortador láser) además de permitir el machihembrado de los distintos elementos reduciendo o eliminando así la utilización de piezas ya fabricadas por la industria, como pueden ser tornillos o piezas metálicas.

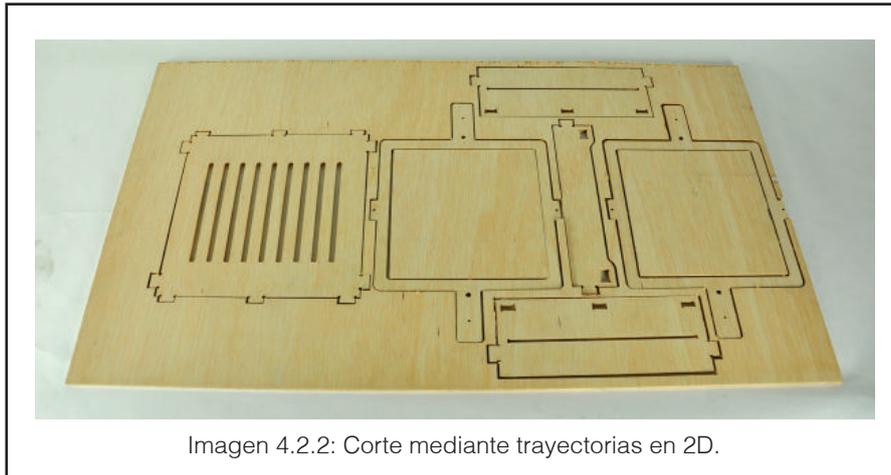


Imagen 4.2.2: Corte mediante trayectorias en 2D.

Para la unión de los diferentes elementos se revisó la metodología aplicada por Jochen Gros, que realizó un estudio digital llamado “50 Digital Wood Joints” [23] en el que se detallan mediante planos y archivos digitales 50 formas diferentes de machihembrar elementos producidos con madera.

Así pues, para este propósito finalmente se ha seleccionado la solución más simple que trata de la introducción de salientes dentro de agujeros con la misma geometría.



Imagen 4.2.3: Detalle de los salientes y agujeros.

Para el mecanizado de los agujeros y los salientes de los diferentes elementos se ha tenido en cuenta que la fabricación del prototipo se realiza mediante una fresadora CNC que utiliza herramientas cilíndricas y que, por su geometría jamás puede llegar a producir ángulos rectos interiores perfectos, generando en dichas zonas pequeños radios que impiden el montaje, por lo que en el diseño se han insertado pequeños agujeros en todas las esquinas con la intención de eliminar estos radios (imagen 4.2.3).

4. Solución propuesta

4.3 · Despiece por función.

En el siguiente apartado se describirán cada uno de los elementos que componen la máquina separándolos en diferentes grupos según su función dentro del proceso. En este caso concreto son cinco las funciones principales que se distinguen claramente:

- Subconjunto mesa de vacío.
- Subconjunto estructura.
- Subconjunto calefacción.
- Subconjunto sistema eléctrico.
- Subconjunto soportes de lámina.



4.3.1 · Subconjunto mesa de vacío.

El subconjunto consta únicamente de tres elementos de los cuales dos de ellos, por la necesidad de disponer una geometría específica para su función han requerido de un mecanizado con trayectorias en tres dimensiones. Dichas piezas son el soporte de la mesa de vacío (imagen 4.3.1.1), la mesa de vacío (imagen y) y la junta aislante.



4. Solución propuesta

El soporte de la mesa de vacío está mecanizada en contrachapado de 15mm de espesor debido a su función y a los elementos que sostiene. Dispone de diversos ranurados y un vaciado interior con un orificio. El ranurado de mayor espesor sirve como alojamiento para los soportes de la lámina termoplástica al realizar el conformado, mientras que el ranurado más fino es el lugar en que se aloja la junta aislante para evitar la pérdida de vacío en el proceso. El agujero interior es el orificio en el cual se insertará la boquilla del aspirador, mientras que el volumen vaciado será donde se asiente la mesa de vacío. Este elemento además dispone de varios salientes utilizados para el ensamblaje con los diferentes elementos de la estructura.

La mesa de vacío está fabricada en tablero de 10mm de DM debido a que gracias a su porosidad permite que el aire pase a través y facilite en cierta medida la absorción durante el conformado. Dispone de diversas ranuras tanto longitudinal como transversalmente y, agujeros pasantes en las intersecciones de éstas, provocando que el aire fluya a través y el vacío alcance toda la superficie de la mesa (imagen 4.3.1.3).

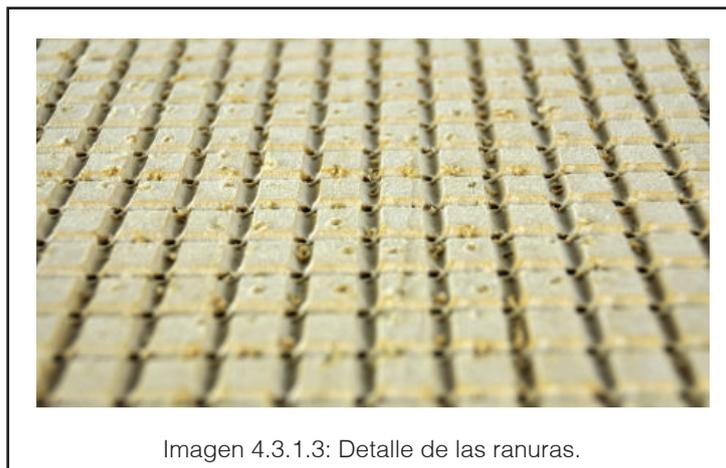


Imagen 4.3.1.3: Detalle de las ranuras.

Para la junta se puede emplear cualquier material aislante, como pudiera ser la silicona o cinta sellante, pero generalmente debe de ser un material gomoso.

4.3.2 · Subconjunto estructura.

La estructura de la máquina está compuesta por diversos elementos los cuales permiten el ensamblado y soportan todos los esfuerzos ejercidos sobre la máquina durante el proceso de conformado. Estos elementos son ambos laterales, el panel frontal inferior, el panel frontal superior, panel trasero superior, la tapa ranurada y las guías.

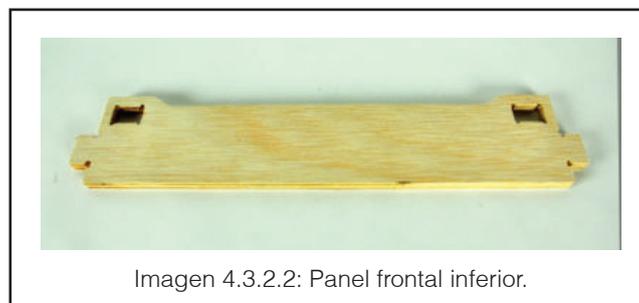
Como se comentaba anteriormente, además de la mesa de vacío, los laterales (imagen 4.3.2.1) también están mecanizados en tablero de 15mm de espesor debido a que estos elementos son los que soportan el esfuerzo principal producido durante el uso de la máquina.

4. Solución propuesta

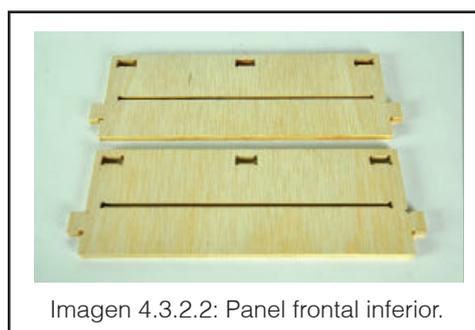
Tienen un ranurado central de forma rectangular por el que salen las manetas de los soportes de la lámina termoplástica de tal forma que permite el movimiento lineal para llevar a cabo el proceso. Además disponen de diversos agujeros para poder realizar ensamblaje del conjunto.



El panel frontal inferior (imagen 4.3.2.2) tiene dos funciones. Por un lado tiene una función meramente estética, ya que tapa la salida de la boca del aspirador y evita que éste se vea desde la posición de uso de la máquina. Por otro lado, ayuda a rigidizar la estructura uniendo ambos laterales y soportando parte del esfuerzo realizado en el soporte de la mesa de vacío a través de sus agujeros y salientes.



De la misma manera que el panel frontal inferior, también tienen como función ayudar a rigidizar la estructura uniendo los laterales el panel frontal superior y el panel trasero superior (imagen 4.3.2.3). Estas piezas, además permiten aislar el sistema eléctrico evitando su manipulación .



4. Solución propuesta

Por último tenemos la tapa ranurada (imagen 4.3.2.4). Este elemento además de servir estructuralmente igual que los anteriores y proteger al usuario de la manipulación del sistema eléctrico, además dispone de unas ranuras cuya función principal es la de permitir la disipación del calor que se pueda generar por las resistencias dentro de este volumen cerrado.



Imagen 4.3.2.4: Tapa ranurada.

Todos estos elementos exceptuando el panel frontal inferior, disponen de una ranura que sirve para fijar el soporte que aguanta las resistencias cerámicas (ver punto 4.3.3).

Por último decir que las guías son unos cilindros de diámetro 8mm que van fijadas en el soporte mesa de vacío, pasan a través del soporte de las resistencias y finalmente hacen tope con la tapa ranurada. Estos elementos tienen como función asistir al usuario en el movimiento de conformado.

4.3.3 · Subconjunto calefacción.

Este subconjunto está constituido por tres elementos y son el soporte de las resistencias y las dos resistencias cerámicas.

El soporte de las resistencias (imagen 4.3.3.1) es una lámina de madera de 5mm forrada con cinta adhesiva alumínica, cuya función es la de proteger la lámina del calor de las resistencias y evitar así su deterioro. Esta pieza tiene dos orificios en los que van alojadas las resistencias cerámicas. Su fijación a la estructura se realiza mediante la inserción de sus laterales en las ranuras longitudinales ubicadas en las piezas descritas en el apartado anterior.

Las resistencias cerámicas (imagen 4.3.3.2) son los elementos generadores de calor, y como es evidente, su única función es la de calentar las láminas termoplásticas.

4. Solución propuesta

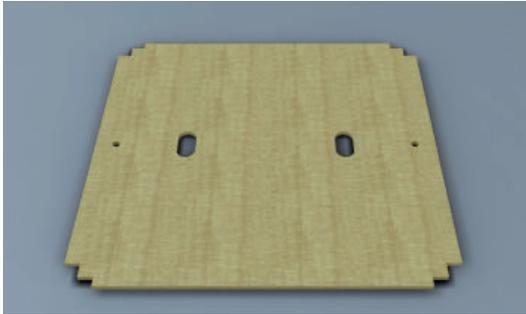


Imagen 4.3.3.1: Soporte de las resistencias.

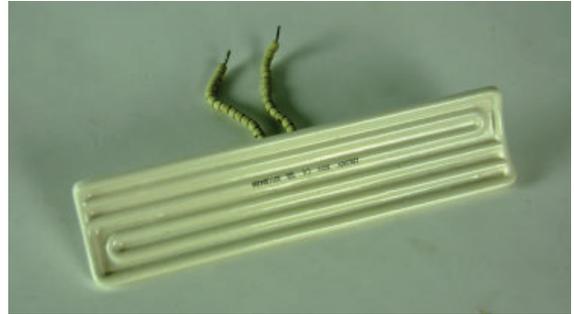


Imagen 4.3.3.2: Resistencia eléctrica.

Las resistencias cerámicas empleadas en este prototipo tienen una potencia de 500 vatios cada una y pueden alcanzar los 440°C según las mediciones (imagen 4.3.3.3) realizadas mediante un termómetro infrarrojo calibrado (imagen 4.3.3.4), por lo que son más que suficiente teniendo en cuenta los rangos de temperaturas empleados en el termoconformado.

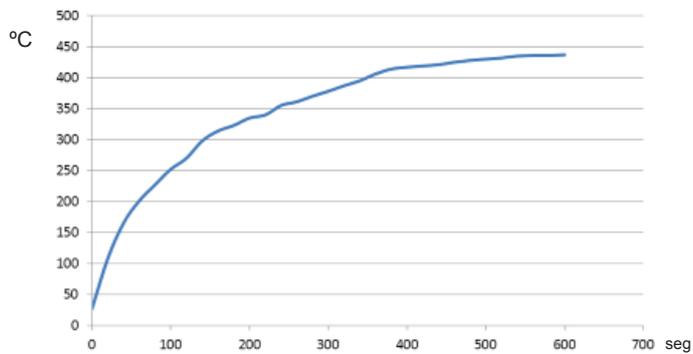


Imagen 4.3.3.3: Mediciones realizadas en las resistencias.



Imagen 4.3.3.4: Termómetro infrarrojo.

4.3.4 · Subconjunto sistema eléctrico.

Este subconjunto consta del material necesario para conseguir el control de las resistencias cerámicas.

Para dicha finalidad se empleará el mismo esquema eléctrico (imagen 4.3.4.1) utilizado en el apartado “2.2 Propuesta previa” descrita en el Estado del arte (apartado 2.2.4 · Subconjunto sistema eléctrico).

Este circuito dispone de un magnetotérmico que protege el circuito, un pulsador de enclavamiento, un regulador de potencia variable y un enchufe para conectarlo a la red (imagen 4.3.4.2).

4. Solución propuesta

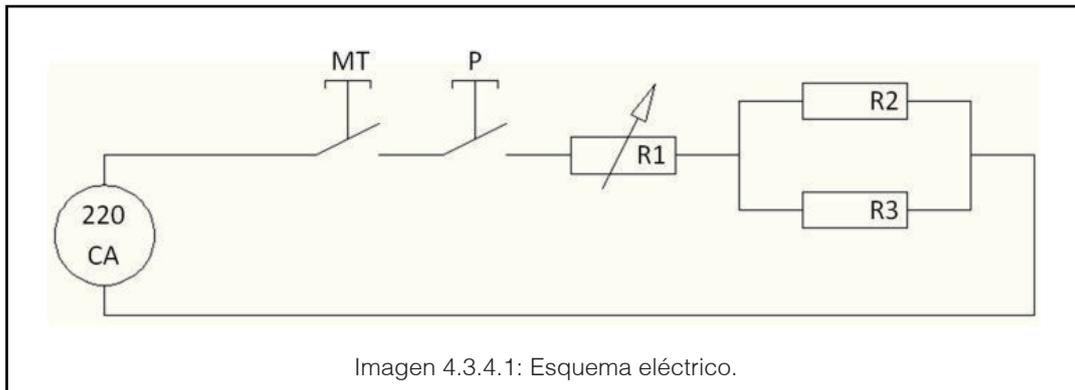


Imagen 4.3.4.1: Esquema eléctrico.



Imagen 4.3.4.2: Elementos eléctricos.

4.3.5 · Subconjunto soportes de lámina.

Este subconjunto consta de dos piezas iguales (imagen 4) cuya función es la de dar soporte a la lámina termoplástica durante su calentamiento y conformado.

Tienen forma de marco y en dos de sus laterales disponen de unos salientes que tienen como función servir de manetas para que el usuario pueda realizar la operación de conformado con facilidad.

Dichas manetas disponen de dos agujeros por los que pasan las guías y de cuatro agujeros más de menor diámetro que sirven para realizar la fijación entre ambos elementos mediante tornillos y tuercas.

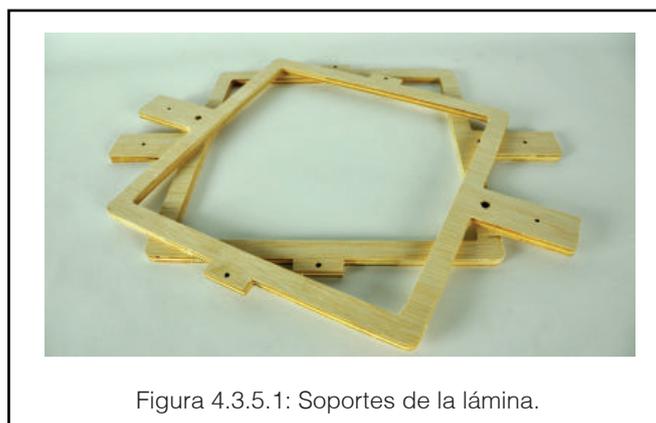


Figura 4.3.5.1: Soportes de la lámina.

4. Solución propuesta

4.4 · Termoplásticos más utilizados.

Básicamente, todos los polímeros termoplásticos son adecuados para el proceso de termoformado. Dichos materiales, cuando son sometidos a un calentamiento presentan una variación en su módulo de elasticidad, dureza y capacidad de resistencia bajo carga,

Como se explicaba en el apartado “3.1.6.1 · Influencia del periodo de calentamiento”, hay que tener en cuenta que con un incremento de temperatura, el comportamiento del material tenderá a volverse en un estado gomoeástico, lo cual facilitará el moldeo, pero si se supera el valor de temperatura crítica, la lámina termoplástica se puede dañar, por lo que poseerá peores propiedades mecánicas y peor distribución de espesor en sus paredes.

Según diversas fuentes [24, 25, 26], los materiales comunmente utilizados en el proceso de termoconformado al vacío son los siguientes:

- Poliestireno (PS).
- Polivinilo de cloruro (PVC).
- Tereftalato de polietileno amorfo (PETG).
- Acrinolitrieno butadieno estireno (ABS).
- Polietileno de alta densidad (HDPE).
- Poliestireno endurecido (SB).
- Policarbonato (PC).

A continuación se detallan brevemente las propiedades generales y algunos ejemplos de aplicación de estos termoplásticos.

- **Poliestireno (PS).**

El PS un material de alto brillo de excelente transparencia. El PS estándar sin modificar es muy quebradizo, por lo tanto su procesado mediante alimentación en rollo es imposible, siendo el procesado en línea la forma más común de utilizarlo. Es resistente al agua, alcoholes y ácidos orgánicos. Sin embargo no es resistente a los disolventes orgánicos, como la gasolina o la acetona ni a los rayos UVA. Entre sus aplicaciones se encuentran productos y tecnología de iluminación, pantallas y embalajes.

4. Solución propuesta

• **Polivinilo de cloruro (PVC).**

El PVC posee una alta resistencia mecánica, rigidez y dureza en general, pero en algunos grados tiene poca dureza y una alta sensibilidad a las muescas. De todos los materiales plásticos, el PVC proporciona la mejor resistencia de difusión (buenas propiedades aislantes). El PVC consta de sólo el 50% de productos derivados del petróleo, mientras que el otro 50% es cloro, y aunque es más ecológico que otros plásticos hay que tener precauciones en su reciclaje. Es resistente a los ácidos, soluciones alcalinas, alcoholes, aceites y grasas, mientras que muestra debilidad frente al benceno, acetona, éster, etc. Entre sus ejemplos de aplicación se encuentran embalajes en la industria alimentaria (en su mayoría reemplazado actualmente por el PET y el PETG) y elementos para la construcción.

• **Tereftalato de polietileno amorfo (PETG).**

Material apto para conseguir nitidez en los contornos incluso con geometrías complejas debido a que el PETG no cristaliza a temperaturas muy altas. Sus características mecánicas son similares a las del APET, pero en cuanto a coste, el PETG es más caro. Es resistente a los aceites, grasas, combustibles para motores, soluciones acuosas de sales y ácidos, siempre y cuando no sean concentrados. Entre sus aplicaciones están la de blisters para el envasado de alimentos listos para servir, pudiendo ser calentado incluso en un horno microondas. Además también se emplea en componentes resistentes al calor, tales como cubiertas en hornos de líneas de producción.

• **Acrolitrino butadieno estireno (ABS).**

El ABS se puede clasificar como uno de los plásticos de ingeniería más rentables, actualmente incluso en competencia con el PP. Existe una multitud de grados diferentes con propiedades específicas. Se distingue por su tenacidad elevada, su buena resistencia al calor y sus propiedades antiestáticas. Sin embargo no es adecuado para aplicaciones externas, ya que envejece demasiado rápido. Es resistente a la mayoría de productos químicos orgánicos, al vapor de agua y a los ácidos orgánicos, mientras que no lo es frente a acetona. Entre sus aplicaciones, en su mayoría suelen ser para componentes técnicos, como por ejemplo contenedores, cajas, revestimientos o sanitarios.

• **Polietileno de alta densidad (HDPE).**

Las propiedades mecánicas y químicas de este material están sujetas al grado de cristalinidad. Existen muchos tipos de polietilenos (LDPE, MDPE, LLDPE y UHMW), sin embargo, para el termoconformado la mayoría de las veces se utiliza el HDPE, ya que con espesores de hasta 3mm posee cualidades muy adecuadas para el termoconformado. Aunque tiene muy baja permeabilidad al vapor de agua la tiene relativamente alta para gas. Es resistente a los ácidos, gasolina, aceites, alcoholes, agua y casi todos los disolventes hasta una temperatura de 60°. Entre sus aplicaciones nos encontramos con envases de alimentos, paneles, cubiertas, recipientes de residuos, cajas de juguetes, etc.

4. Solución propuesta

- ***Poliestireno endurecido (SB).***

Este no es un material generalmente claro como el cristal debido a su componente de butadieno, aunque se pueden producir algunos grados prácticamente transparentes mediante modificación especial. Debido a que sus propiedades de termoconformado son muy buenas, posiblemente sea el material de referencia para este propósito. Químicamente resiste de manera similar al PS, pero de una manera más pobre. Hay que evitar la exposición frente a los rayos UVA. Entre sus aplicaciones se encuentran las cajas y los paneles de las puertas de los refrigeradores, material de picnic (vasos, platos, etc.) y en general, todo tipo de envases.

- ***Policarbonato (PC).***

Sus mejores atributos son su gran resistencia, tenacidad y resistencia al impacto, incluso a bajas temperaturas. Tiene propiedades eléctricas y dieléctricas muy buenas. Excelente permeabilidad a la luz. Resistente a los ácidos minerales diluidos, gasolina, grasas, aceites y alcoholes. No es resistente a las soluciones alcalinas, acetona, agua por encima de 60° y vapor de agua. Entre sus aplicaciones se encuentran soportes para ingeniería eléctrica, la industria automotriz y de electrodomésticos domésticos, ya que es resistente al calor.

4.5 · Recomendaciones: problemas y soluciones en el termoconformado.

Como se indicaba anteriormente, el termoconformado es un proceso que varía dependiendo de muchos factores, como por ejemplo el material utilizado, del sistema de calefacción, la temperatura ambiente, etc., por lo que es un proceso que aunque se ha estudiado en profundidad y existe mucha bibliografía, además de esto requiere de mucha práctica.

En la siguiente páquina se muestran las recomendaciones prácticas para resolver los problemas más comunes durante el proceso de conformado.

4. Solución propuesta

PROBLEMA	POSIBLE CAUSA	SOLUCIÓN PROPUESTA
<ul style="list-style-type: none"> · Aparición de burbujas en la superficie. 	<ul style="list-style-type: none"> · Humedad excesiva. · Calentamiento muy rápido. · Calentamiento no uniforme. 	<ul style="list-style-type: none"> · Presecar la lámina. · Calentar los dos lados de la lámina a 60°C. · Reducir la temperatura del horno. · Incrementar la distancia entre la lámina y el calefactor. · Verificar y reparar el horno. · Verificar elementos calefactores.
<ul style="list-style-type: none"> · Detalles y formas incompletas. 	<ul style="list-style-type: none"> · Vacío insuficiente. · Desplazamiento del vacío lento. · Calentamiento insuficiente de la lámina. 	<ul style="list-style-type: none"> · Eliminar obstrucciones en el sistema de vacío. · Incrementar el número de perforaciones. · Aumentar diámetro de las perforaciones. · Aumentar la potencia del aspirador. · Verificar posibles fugas del sistema de vacío. · Utilizar canales de vacío en la medida de lo posible. · Aumentar temperatura o tiempo de calentamiento.
<ul style="list-style-type: none"> · Cambio de color en la lámina. 	<ul style="list-style-type: none"> · Calentamiento excesivo. · Baja temperatura del molde. · La lámina se reduce en espesor. · Enfriamiento de la lámina antes de conformarse completamente. · Inadecuado diseño de molde. · Material no adecuado. 	<ul style="list-style-type: none"> · Reducir el tiempo de calentamiento. · Disminuir temperatura del horno. · Calentar el molde. · Incrementar el espesor de la lámina. · Conformar más rápido. · Aumentar la velocidad de vacío. · Calentar el molde. · Disminuir profundidad del molde. · Mejorar el flujo de aire de vacío. · Usar radios de curvatura mayores. · Cambiar el material

4. Solución propuesta

PROBLEMA	POSIBLE CAUSA	SOLUCIÓN PROPUESTA
<ul style="list-style-type: none"> · Alabeo o pandeo excesivo de la lámina. 	<ul style="list-style-type: none"> · Lámina muy caliente. · Lámina demasiado grande en área. 	<ul style="list-style-type: none"> · Disminuir el tiempo de calentamiento. · Disminuir temperatura del horno. · Si es posible, reducir el tamaño de la lámina.
<ul style="list-style-type: none"> · Aparición de marcas por enfriamiento en la pieza conformada. 	<ul style="list-style-type: none"> · Lámina demasiado caliente. · Baja temperatura del molde. 	<ul style="list-style-type: none"> · Disminuir la temperatura del molde. · Disminuir el tiempo de calentamiento. · Elevar temperatura del molde. · Suavizar o redondear el molde en áreas críticas.
<ul style="list-style-type: none"> · Aparición de pequeñas arrugas o marcas circulares. 	<ul style="list-style-type: none"> · Lámina muy caliente. · Agujeros para el vacío demasiado grandes. 	<ul style="list-style-type: none"> · Disminuir el tiempo de calentamiento. · Disminuir temperatura del horno. · Rellenar y agujerear nuevamente a un diámetro más pequeño.
<ul style="list-style-type: none"> · Variación visible en el pandeo de la lámina. 	<ul style="list-style-type: none"> · No hay uniformidad de temperatura en la lámina. 	<ul style="list-style-type: none"> · Verificar que el horno no tenga corrientes de aire y en el caso de que existan, incorporar deflectores.
<ul style="list-style-type: none"> · Aparición de arrugas durante el conformado. 	<ul style="list-style-type: none"> · Excesivo calentamiento de la lámina. · Excesivo pandeo de la lámina. · Vacío insuficiente. 	<ul style="list-style-type: none"> · Disminuir la temperatura del horno. · Disminuir el tiempo de calentamiento. · Aumentar la distancia entre los calefactores y la lámina. · Disminuir el rango de temperatura de conformado. · Verificar el sistema de vacío. · Incrementar orificios de vacío o canales.
<ul style="list-style-type: none"> · Líneas o zonas muy brillantes. 	<ul style="list-style-type: none"> · Lámina sobrecalentada en la zona de brillo. 	<ul style="list-style-type: none"> · Disminuir el tiempo de calentamiento. · Aumentar la distancia entre los calefactores y la lámina.

4. Solución propuesta

PROBLEMA	POSIBLE CAUSA	SOLUCIÓN PROPUESTA
<ul style="list-style-type: none"> · Mala apariencia en la superficie de la pieza. 	<ul style="list-style-type: none"> · Defecto causado por aire atrapado sobre la superficie del molde. · Vacío insuficiente. · Excesiva temperatura de molde. · Insuficiente temperatura de molde. · Superficie del molde demasiado rugosa. · Lámina sucia. 	<ul style="list-style-type: none"> · Generar rugosidad en la superficie mediante chorro de arena. · Incrementar el número de perforaciones en la zona afectada. · Disminuir la temperatura del molde. · Aumentar la temperatura del molde. · Suavizar la superficie del molde. · Realizar el molde con otro material. · Limpiar la lámina.
<ul style="list-style-type: none"> · Distorsión o contracción excesiva al desmoldear la pieza. 	<ul style="list-style-type: none"> · Pieza desmoldeada demasiado rápido. 	<ul style="list-style-type: none"> · Prolongar el ciclo de enfriamiento. · Utilizar algún refrigerante. · Utilizar vapor de agua en spray para disminuir la temperatura de la pieza. · Utilizar ventiladores eléctricos para enfriar la pieza dentro del molde.
<ul style="list-style-type: none"> · Excesiva reducción del espesor de la pared de la pieza. 	<ul style="list-style-type: none"> · Técnica inadecuada de conformado. · Variación en el espesor del material. · Calentamiento desigual de la lámina. · La lámina está a una temperatura excesiva. · Molde frío. · La lámina no está firmemente sujeta al marco. 	<ul style="list-style-type: none"> · Utilizar otra técnica de conformado: vacío con retorno, por presión de aire, presión de aire y retorno con vacío. · Verificar que el material se encuentre dentro de las normas de calidad. · Verificar la operación de calefacción. · Disminuir la temperatura del horno. · Disminuir tiempo de calentamiento. · Calentar el molde. · Incrementar presión de cierre y comprobar espesores.

4. Solución propuesta

PROBLEMA	POSIBLE CAUSA	SOLUCIÓN PROPUESTA
<ul style="list-style-type: none"> · Torsión de las piezas. 	<ul style="list-style-type: none"> · Pieza no enfriada convenientemente. · Distribución desigual del espesor de pared. · Diseño de molde inadecuado. · Diseño inadecuado de la pieza. · Temperatura del molde insuficiente. 	<ul style="list-style-type: none"> · Ajustar el ciclo de enfriamiento. · Realizar un pre-estiramiento. · Posible calentamiento desigual de la lámina. · Incrementar agujeros de vacío. · Modificar el molde. · Intentar modificar las áreas planas con una pequeña curvatura. · Incrementar temperatura del molde.
<ul style="list-style-type: none"> · Marcas de encogimiento en las esquinas. 	<ul style="list-style-type: none"> · Superficie del molde demasiado lisa. · Vacío insuficiente. 	<ul style="list-style-type: none"> · Generar rugosidad en la superficie mediante chorro de arena. · Verificar sistema de vacío. · Incrementar agujeros de vacío.
<ul style="list-style-type: none"> · Esquinas de espesor fino en conformados de profundidad. 	<ul style="list-style-type: none"> · Técnica inadecuada de conformado. · Lámina de espesor fino. · Calentamiento desigual de la lámina. · Calentamiento inadecuado del molde. 	<ul style="list-style-type: none"> · Utilizar otra técnica de conformado. · Aumentar el espesor de la lámina. · Verificar la operación de calefacción. · Cambiar la temperatura. · Cambiar la temperatura del molde.
<ul style="list-style-type: none"> · La pieza se queda agarrada al molde. 	<ul style="list-style-type: none"> · Alta temperatura de la pieza. · El ángulo de salida del molde es insuficiente. · Molde construido en madera. 	<ul style="list-style-type: none"> · Prolongar el tiempo de enfriamiento. · Disminuir temperatura del molde. · Dar un ángulo entre 1° y 3°. · Aplicar agente desmoledeante.

4. Solución propuesta

5. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

5. Conclusiones y trabajo futuro

Tras el estudio concienzudo de las variables teórico-prácticas implicadas en el proceso de deformación por presión bajo alta temperatura de láminas termoplásticas se han podido aplicar estos conocimientos en el desarrollo de un sistema de termoconformado por vacío.

Para este resultado ha sido crucial la fabricación de una máquina similar durante la asignatura de Prototipado Rápido del Máster en Diseño y Fabricación Integrada Asistidos por Computador, ya que pesar de que durante el desarrollo de dicho trabajo no se tuvieron en cuenta todos los condicionantes implicados en el proceso, se pudieron observar todos los errores y debilidades generados, aportando así experiencia práctica para la conceptualización de una nueva máquina que evitara estos problemas.

Además, el hecho de desarrollar el sistema de una manera totalmente orientada a la fabricación personal ha permitido que se pueda desarrollar el prototipo con un bajo coste y que en el futuro se pueda mejorar sin ocasionar un gran impacto económico.

Sin embargo, queda pendiente la optimización a nivel estructural y eléctrico del sistema, ya que no se ha ahondado en exceso y esto puede añadir valor a la máquina disminuyendo costes innecesarios y mejorando el proceso.

Aún así, se pretende publicar a nivel global los resultados obtenidos de este trabajo con el fin de que en la evolución del sistema esté implicada una comunidad de colaboradores.

Por último, el resultado de este trabajo se va a poner en conocimiento de la comunidad internacional de la red de laboratorios de fabricación digital (FABLAB) para que puedan investigar o desarrollar este sistema o similares.

6. BIBLIOGRAFÍA Y REFERENCIAS

6. Bibliografía y referencias

1. Miguel Fernández Vicente, Estudio e Integración de Sistemas de Bajo Coste para el Diseño Digital y el Prototipado Rápido, Tesis de Master, Valencia, 2012.
2. R.C. Progelhof and J.L. Throne, Polymer Engineering Principles: Properties, Processes, and Tests for Design, Hanser Publishers, Munich, 1993, Sección 1.2 "Introduction to Polymer History".
3. W. McConnell, "The Oldest Infant", in P.F. Bruins, Ed., Basic Principles of Thermoforming, Gordon and Breach, New York, 1971, p. 3.
4. S. E. Farnham, A Guide to Thermoformed Plastic Packaging, Cahners Books, Boston, 1972, p. 8.
5. Thingiverse, Thermoforming Machine (<http://www.thingiverse.com/thing:23208>).
6. Phlatboyz, Phlatformer Kit (http://www.phlatboyz.com/Phlatformer-Kit_p_10.html).
7. Revista Make, The Phlatformer (<http://kits.makezine.com/2011/11/13/the-phlatformer/>).
8. WidgetWorks Unlimited, 12"x12" Vacuum Former (http://www.widgetworksunlimited.com/12_x12_Hobby_Vacuum_Former_p/vf-12x12-vac_former.htm).
9. Warmplastic (<http://warmplastic.com/or.html>).
10. Illig, Adolf. Thermoforming. A practical guide. Ed. Hanser, Section 2.2.1 "Moisture absorption".
11. A typical standard is "Procurement and Supply Form SP-101", Chrysler Corporation, P.O. Box 2866, Detroit MI 48288.
12. Throne, James. L. Technology of thermoforming. Ed. Hanser, ISBN 1-56990-198-8, Section 8.11 "Sheet quality and quality control, Annoyance factors"

6. Bibliografía y referencias

13. Illig, Adolf. Thermoforming. A practical guide. Ed. Hanser, Section 2.2.5 “Static charging of thermoplastics forming material”.
14. Plastiglás (<http://www.plastiglas.com.mx>).
15. Wm. K. McConnell, Jr., Material Presented, Distributed at SPE Industrial Thermoforming Symposium & Workshop, 12-14, Marzo, 1985.
16. Catarina Mota (2011), The rise of personal fabrication, Proceedings of the 8th ACM conference on Creativity and cognition.
17. Von Krogh, Georg; and von Krogh. The Promise of Research on Open Source Software. Management Science, 2006, vol. 52, no. 7. pp.975-983. ISSN 0025-1909.
18. A Leonard - 2007 - The story of stuff - Journal of Occupational and Environmental Health.
19. Lipson, H., and M. Kurman. 2010. Factory@Home: The emerging economy of personal fabrication. White House Office of Science and Technology Policy.
20. Gershenfeld, N. (2005), Fab: The Coming Revolution on Your Desktop – from Personal Computers to Personal Fabrication, Basic Books, New York, NY.
21. W. McDonough, M. Braungart (2002), Cradle to cradle: Remaking the way we make things. - North point press.
22. S. Tibbits - Design to Self Assembly - Architectural Design, 2012 - Wiley Online Library.
23. Flexible Stream. Open Design Source. Jochen Gros. 50 Digital Wood Joints. (<http://www.flexiblestream.org/Digital-Wood-Joints-001.php>).
24. ToolCraft Plastics. Vacuum forming selection guide (http://www.toolcraft.co.uk/vacuum_forming_help_material_selection_guide.htm).

6. Bibliografía y referencias

25. Industrial Plastic Supply, Inc, Looking for vacuum forming (formable) plastics (<http://www.iplasticsupply.com/tag/vacuum-forming-materials/>).

26. Yamat Industry and trade Co, LTD. Materials Commonly Used in Vacuum Forming (<http://www.yamat.com.cn/en/newslist.asp?id=5987>).

