



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**“ANALISIS DEL PROCESO DE  
TERMOFORMADO PARA EL DISEÑO  
DE UNA MAQUINA PROTOTIPO”**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TITULO DE :**

**INGENIERO MECANICO**

**P R E S E N T A N :**

**SOTO IRINEO GABRIEL  
CABELLO RIBERA FRANCISCO JAVIER**

**ASESOR. M.I. MAGDALENA TRUJILLO BARRAGAN**

**MEXICO, D.F.**

**2004.**





Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

LA TESIS NO SALE  
DE LA BIBLIOTECA

*“Agradezco primeramente al Dios creador del universo, Jehová, por quien todas las cosas buenas llegan a ser, quien permite que alcance las metas necesarias para poder servir, tanto a Él como al prójimo.*

Especialmente y con mucho cariño, doy gracias a mi madre querida, que ha sido y será siempre mi apoyo, mi impulso y una de las razones por la cual seguir adelante, ..... con mucho amor le dedico este trabajo.

Agradezco a la máxima casa de estudios, la UNAM, por darme todo y más de lo necesario para tener una formación de gran nivel. También doy gracias a la M.I Magdalena Trujillo B. por su dirección y guía durante todo este tiempo y espero que pueda también recoger los frutos de su labor; gracias a cada persona: profesor, familiar, amigo y compañero de clase, quienes hicieran posible mi formación como profesionista y como persona,

..... y finalmente, gracias compañero Francisco Cabello R. por la colaboración en este proyecto, te deseo lo mejor ”

(1Cor. 10:31, Salmo 100)

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.  
NOMBRE: Francisco Javier Cabello Rivera.

FECHA: 13 de septiembre de 2004.

FIRMA: \_\_\_\_\_



**“POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU”**

**Ciudad Universitaria septiembre de 2004.**

**Gabriel Soto Irineo**

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de la UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.  
NOMBRE: Gabriel Soto Irineo.

FECHA: 13 de septiembre de 2004

FIRMA: Soto Irineo Gabriel

## **AGRADECIMIENTOS**

*Agradezco a Dios el darme la vida, el tener una familia y conocer muchas personas valiosas dentro de la Universidad Nacional Autónoma de México y fuera de ella y el permitirme terminar una carrera que significa mucho en mi vida. Agradezco a mis padres el apoyo que me dieron para poder terminar mis estudios, a todos mis amigos que me acompañaron durante mi paso por las aulas de esta respetable institución, y también quiero agradecer profundamente a todos y cada uno de los profesores que contribuyeron a que mi formación como ingeniero y como hombre fuera la mejor, en especial agradezco a la M.I. Magdalena Trujillo Barragán por la paciencia y el apoyo que siempre he recibido de su parte y por la valiosa colaboración para la realización de esta tesis. Agradezco también a la Universidad Nacional Autónoma de México porque durante 6 años me brindó un espacio y muchas oportunidades de desarrollo en todos los sentidos.*

*Gracias también a mi compañero y amigo Gabriel Soto Irineo por permitirme trabajar con él en esta tesis y por la amistad y comprensión que siempre me ha brindado.*

*A mis hermanos Patricia, José Luis, Celia, Alejandro, Luz María, Fernando y Jorge les agradezco el apoyo que toda mi vida me han dado, a mi cuñado Arturo Castellanos, los quiero mucho a todos y espero en Dios que sigamos juntos muchos años más. A mi hijo Christian Alejandro y a mi esposa Raquel Roxana también les agradezco el que sean la razón para seguir adelante y superarme como ingeniero y como ser humano.*

*Gracias sinceramente a todas y cada una de las personas que hicieron posible cumplir esta meta en mi vida.*

# ÍNDICE

- **OBJETIVO**
- **INTRODUCCION:**
  - ANTECEDENTES
  - CRONOLOGÍA DEL TERMOFORMADO
  - RESEÑA

## CAPÍTULO 1 MATERIALES PARA TERMOFORMADO

<u>1.1 Origen y descripción de materiales para termoformado. Acrilinitrilo-butadieno-estireno, Acetal (Polióxido de metileno), Politetrafluoretileno (PTFE), Nylon (poliamida), Polimetil-metacrilato (PMMA), Poliestireno.....</u>	<u>11</u>
<u>1.2 Obtención de láminas plásticas.....</u>	<u>25</u>
<u>1.3 Coloración y orientación de la lámina.....</u>	<u>28</u>
<u>1.3.1 Orientación biaxial.....</u>	<u>29</u>
<u>1.4 Especificaciones de las láminas plásticas.....</u>	<u>30</u>
<u>1.4.1 Tipos de láminas termoplásticas utilizadas en el proceso de termoformado.....</u>	
<u>1.4.2. Características del proceso de termoformado.....</u>	
<u>1.5 Condiciones de temperatura.....</u>	<u>31</u>
<u>1.5.1. Tiempo de secado previo al termoformado de láminas plásticas.....</u>	<u>33</u>
<u>REFERENCIAS.....</u>	<u>34</u>

## CAPÍTULO 2 CALENTAMIENTO, CONTRACCIÓN Y ESTIRADO DEL MATERIAL PLÁSTICO

<u>2.1 Descripción de las formas de transferencia de calor durante el termoformado. (conducción, convección y radiación).....</u>	<u>35</u>
<u>2.2 Distancia entre la lámina y el calentador.....</u>	<u>44</u>
<u>2.3 Fuentes de calentamiento.....</u>	<u>46</u>
<u>2.3.1 Descripción de las fuentes de calentamiento.....</u>	<u>47</u>
<u>2.3.2 Eficiencia de las fuentes de calentamiento.....</u>	<u>49</u>
<u>2.4 Tiempo de calentamiento del material.....</u>	<u>52</u>
<u>2.5 Estirado.....</u>	<u>53</u>
<u>2.5.1 Resistencia en caliente.....</u>	<u>54</u>
<u>2.6 Degradación de material plástico.....</u>	<u>55</u>
<u>2.7 Estimación de esfuerzos.....</u>	<u>57</u>
<u>2.8 Comportamiento mecánico de un sólido.....</u>	<u>61</u>
<u>2.9 Parámetro de diseño <math>\phi(T)</math>.....</u>	<u>63</u>
<u>2.10 Adelgazamiento en el espesor del material.....</u>	<u>66</u>
<u>2.11 Teoría de contracción.....</u>	<u>67</u>

2.11.1 Caracterización del material.....	68
2.11.2 Modelando analítico del proceso.....	70
2.11.3 Metodología del procedimiento para la predicción de la contracción	
2.12 Análisis de esfuerzo en la fase de estiramiento.....	71
2.13 Análisis del esfuerzo después del contacto y en la etapa de enfriamiento.....	73
2.14 Análisis de Contracción.....	74
2.15 Control de la contracción	
<u>REFERENCIAS</u> .....	76

## CAPÍTULO 3 MOLDES

3.1 Materiales para fabricar moldes para termoformado.....	77
3.2 Moldes de madera.....	79
3.3 Moldes de yeso.....	80
3.4 Moldes de plástico.....	81
3.5 Moldes de metal blando.....	83
3.6 Moldes de Niquel	
3.7 Moldes de aluminio	
3.8 Moldes de Acero.....	86
3.9 Criterios para el diseño del molde de termoformado	
3.10 Consideraciones en el diseño de moldes de termoformado.....	88
3.11 Venteo del molde (desplazamiento de aire).....	89
3.11.1 Dimensiones de los orificios de venteo.....	90
3.11.2 Localización de los orificios de venteo.	
3.12 Control de temperatura en el molde.....	95
3.13 Enfriamiento del molde.....	96
<u>REFERENCIAS</u> .....	98

## CAPÍTULO 4 DISEÑO DE UNA MÁQUINA DE TERMOFORMADO

<u>Propuesta de diseño</u>	
4.1 Fuente de emisión de calor.....	100
4.1.1 Planteamiento del problema	
4.1.2 Método de diseño (análisis y decisión).....	101
4.1.3 Características de equipo y diseño de detalle.....	104
4.2 Diseño del bastidor ajustable.....	108
4.2.1 Requerimientos para el bastidor.....	109
4.3 Equipos de vacío.....	110
4.4 Tanques de vacío, desplazamiento o de almacenamiento.....	113
4.5 Diseño de la cámara de vacío.....	114

4.5.1 Requerimientos para la cámara de vacío	
4.6 Controles de temperatura	115
4.7 Equipo para enfriamiento	116
REFERENCIAS	117

## **CAPÍTULO 5** **ECONOMÍA Y COSTOS DEL PROCESO DE** **TERMOFORMADO**

5.1 Costo de producción global	118
5.2 Eficiencias en la producción	120
5.3 Costo de un producto termoformado	121
5.4 Costo de la máquina prototipo para termoformado	123
5.5 Reciclado del material sobrante en el proceso de termoformado	126
REFERENCIAS	128

<b><u>CONCLUSIONES</u></b>	129
----------------------------	-----

### **APÉNDICE**

#### **A SIMULACIÓN E INNOVACIONES DEL PROCESO DE** **TERMOFORMADO**

A.1 Simulación del proceso de termoformado	131
A.2 Innovaciones en materiales poliméricos y maquinaria para el proceso de termoformado	134
A.2.1 Novedades de la termoformación en la industria de los empaques	135
A.2.2 El termoformado en la industria automotriz	136
A.2.3 Aplicaciones en el transporte de dispositivos electrónicos	139
A.3 Maquinaria	
A.3.1 Equipos auxiliares de interés para la termoformación	140
A.3.2 Generalidades	
A.4 Una nueva aplicación para la termoformación	141

#### **BIBLIOGRAFÍA**

#### **B Mecanismos de corte de material**

B.1 Mecanismos de corte de material	142
-------------------------------------	-----

#### **C Correcciones de defectos y Normas**

C.1 Correcciones de defectos	147
C.2 Normas	151

#### **D Cotizaciones.....153**

#### **E Planos**

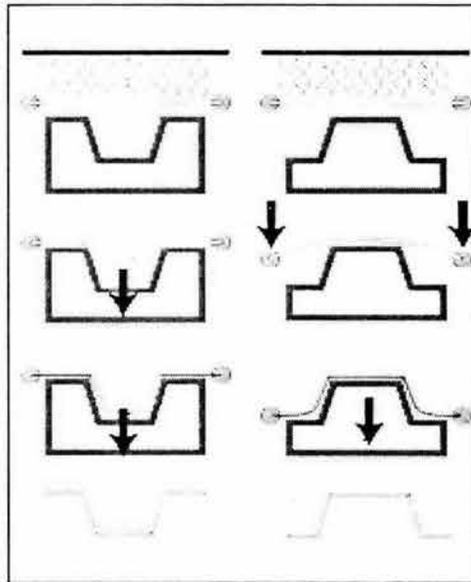
## **OBJETIVOS:**

- Realizar el diseño de una máquina de termoformado de plásticos, investigando previamente sobre sus principios y fundamentos teórico - prácticos, así como del comportamiento del material a transformar, según sus características, especificaciones y asequibilidad, describiendo los procesos complementarios involucrados para su obtención. (en el caso de láminas plásticas).
- Señalar los principales sistemas y factores que intervienen en su operación, las propiedades y los parámetros de operación, el tipo de herramientas a utilizar, así como el tipo de moldes y la manufactura de estos; indicando las ventajas y desventajas del proceso en comparación con otros de acuerdo a la similitud de productos.
- Por último, se determinará la rentabilidad de la máquina, obteniendo un producto específico, utilizando uno de los materiales mencionados con las distintas dimensiones y formas.

## INTRODUCCIÓN:

El termoformado.

El termoformado es un proceso de transformación secundario donde una lámina de material termoplástico toma la forma de un molde, sencillo o de mayor complejidad, por medio de presión y temperatura.



**Fig. 1.1 Termoformado de una lámina plástica  
De arriba hacia abajo: calentamiento de la lámina,  
fuerza de vacío, sostenimiento y enfriamiento.**

Esta lámina es fabricada de diversas maneras, por ejemplo: por fundición de pellets o polvos (PMMA), por calandrado (PVC), por rolado (PE, PP), por extrusión (ABS), entre otros. En el área comercial, este procedimiento permite la fabricación de artículos que abarcan un amplio espectro de aplicaciones en los mercados del envase- empaque y de consumo con los Blister Pack (empaque de burbuja).

En los aspectos técnicos, el adecuado balance de los conocimientos técnicos y empíricos permiten la mejora continua del procedimiento y la incursión en nuevos mercados. Junto con el soplado, es el proceso de transformación más prometedor para el siglo XXI. El termoformado ocasionalmente es mal interpretado como un proceso sumamente sencillo, que no requiere conocimientos muy especializados, sin embargo, la fabricación de un sencillo Blister Pack exige dominio de la tecnología de los plásticos.

El termoformado, a diferencia de procesos como la inyección, extrusión o el soplado es alimentado con lámina o en algunos casos con película, ambos productos de otros procesos de transformación, es considerado como un proceso de transformación secundario, ya que el producto es formado sin la fusión de la materia prima, únicamente mediante calor, la lámina adquiere la consistencia suficiente para adquirir una geometría. Sin embargo, con la adaptación de un extrusor en línea se puede optimizar el proceso.

El proceso de termoformado compite con los procesos, de inyección y el soplado, pues los costos por maquinaria, equipo y operaciones para termoformado son inferiores, así como también en la construcción de los instrumentales representa grandes ventajas que en ciertas condiciones obligan a considerarlo como alternativa e incluirlo en la evaluación de los proyectos. Este proceso de transformación ofrece excelente flexibilidad, permitiendo respuestas ágiles ante las necesidades y cambios del mercado, otorgando un amplio campo para los ajustes estratégicos.

### ANTECEDENTES

El termoformado tiene sus orígenes en las culturas antiguas, cuando el hombre iniciaba la observación y el aprovechamiento de todo lo que la naturaleza le ofrecía y, es así que en el antiguo Egipto, antes de la época de los faraones, que este pueblo sumergía una concha de tortuga en aceite o agua hirviendo, tomando una consistencia blanda que adquiría prácticamente cualquier geometría, que posteriormente se enfriaba con agua para que retomase su rigidez original pero conservando permanentemente la nueva forma. Las conchas de estos animales están compuestas de queratina; así como también los cuernos, pezuñas y uñas, dicha sustancia tiene un comportamiento termoplástico.

Los habitantes de la América prehispánica utilizaron de igual modo la corteza de los árboles, que debido a los contenidos de celulosa que presenta su composición igualmente reblandece al ser sumergida en un medio caliente, como aceite hirviendo; ya reblandecida la forzaban contra un objeto como una roca, obligándolo a tomar una forma, y al enfriar, obtener desde palanganas hasta botes para navegar.

En los inicios del siglo XIX se fabricaban varias piezas termoformadas en celulosa natural, sin constituir aún un registro industrial histórico ya que la disponibilidad de materia prima era realmente baja y restrictiva.

En 1862 Alexander Parkes obtuvo por medios químicos un plástico sintético por medio de la disolución de la celulosa mediante ácido nítrico y sulfúrico, produciendo un compuesto llamado nitrato de celulosa, el cual llamó Parkesita y que podía ser formado mediante la aplicación de aceite de resino, sin embargo el nitrato de celulosa es altamente inflamable y por lo tanto había que tener mucho cuidado con los objetos fabricados. Hacia el año de 1868 los hermanos Hyatt (John Wesley Hyatt) evitaron el peligro del producto obtenido, en vez de emplear aceite de resino para moldearlo emplearon alcanfor, obteniendo una sustancia que llamaron celuloide.

En la última mitad del siglo XIX los productos que se consumían en la Europa y América industriales eran fabricados en celuloide y el procedimiento empleado era sencillo pero de gran efectividad: la lámina de celuloide reblandecida caía sobre un objeto que funcionaba como molde. Por ejemplo, las teclas delgadas para piano se producían por este método sobre un pedazo de madera cautiva. La tecnología empleada no podía satisfacer la demanda, esta situación obligó la búsqueda de nuevas tecnologías para producir artículos y, gracias a la invención de los materiales termoplásticos, el termoformado inició su labor dentro de la industria. Este fue el caso de la Charles Burroughs Co., en Nueva Jersey

patentó un dispositivo hidráulico para el corte de las láminas delgadas, este avance permitió introducir la mecanización en los procedimientos aplicados hasta entonces.

En la segunda década del presente siglo, los industriales enfocaron su ingenio e iniciativa a la cuestión de los costos operativos y a la sustitución de la materia prima. Un esfuerzo en este sentido lo realizó la empresa Fermplas Corp. En 1930 fabricaron botellas a partir de dos mitades termoformadas, producto que gozó de un cálido recibimiento en el mercado por poco más de una década, siendo desplazado por el proceso de soplado que arrebató su posición en este sector.

Durante la década de 1930 y especialmente en la segunda mitad de ésta los preparativos bélicos con ante la inminente conflagración mundial se enfocaron al desarrollo tecnológico de los aparatos de guerra así como de su logística, desembocando en un gran auge para el proceso de termoformado, pues la industria de guerra produjo aplicaciones técnicas por este medio, como algunas partes producidas para los aviones. En cuanto el aspecto estratégico, las técnicas guerreras se apoyaron fuertemente en los mapas de relieve, especialmente empleados por los guardacostas de E.U.A.. Los países de primer mundo experimentaron durante la década de 1960 un auge económico sin precedentes generalizando una sensación de libertad y fortaleciendo la auto identidad del sistema capitalista; la cultura consumista estaba insertada en la mente de la sociedad. El sector industrial del envase - empaque experimentó un vertiginoso crecimiento en estos años, fortaleciendo el proceso de termoformado que ofrecía un amplio espectro de posibilidades y ventajas.

En la década de 1970 con la ruptura de la convencional inocencia social y el dinámico ritmo de la vida urbana, la demanda por artículos que permitieran a los individuos un mayor grado de independencia se vio notablemente incrementado, apareciendo contenedores para alimentos, porciones individuales para ser preparados en el horno y productos desechables, iniciando el termoformado de PS espumado, C-PET, y PP.

Actualmente los desarrollos en este proceso están encaminados a materiales de ingeniería que cubran mayores requerimientos en su desempeño, así como métodos de calentamiento más eficientes que permitan la transformación con mayor productividad.

En la tabla 1.1 se presenta un resumen cronológico de los procesos antecesores del termoformado:

Periodo	Suceso
Prehistoria:	
Egipto	Calentamiento de conchas de tortugas (queratina) en aceite caliente, aparición de contenedores de alimentos.
Micronesia	Calentamiento de conchas de tortugas (queratina) en agua caliente, formado de tazones.
Américas	Calentamiento de cortezas de árboles (celulosa natural) en agua caliente, formado de tazones y de botes.
1845	Proceso de extrusión, comercialización de los plásticos.
1850's	Gutapercha reemplaza al marfil en las bolas de billar.
1856	Primeros plásticos moldeables (pulpas y gomas) – Peck.
1862	Nitrato de celulosa, Parkesita – Alexander Parkes.
1868	Celuloide, John Wesley H.
1870's	Dispositivo hidráulico para el corte de las láminas delgadas - Charles Burroughs Co.
1910	Teclas de piano formadas por vacío en moldes de madera.
1930	Fabricación de botellas a partir de dos mitades termoformadas.- Fernplas Co.
1930's	Mapas en relieve para guardacostas.
1938	Blister Pack de acetato de celulosa (CA). Termoformadora automática con alimentación de rollo – Clauss B Strauch Co. Termoformadora automática de bandejas de cubos de hielo.
1942	Termoformado de acrílicos (fundición de PMMA) para ventanas blindadas, rompevientos.
1948	Termoformado de acrílicos (fundición de PMMA) para tinas de baño. Troman Bros. Inglaterra.
1954	Skin – Packaged, Asociación de Manufactura de Hardware Chicago.
1970	Chasis de automóvil de ABS – Borg Warner.

**Tabla 1.1 Cronología del termoformado**

## RESEÑA:

En este trabajo se propone un diseño para una máquina termoformadora de plásticos basado en el análisis del proceso, el cual abarca desde la obtención de las láminas de material plástico hasta la etapa de reciclado del mismo.

En el capítulo número uno se describen los diferentes materiales poliméricos a utilizar en el proceso de termoformado, explicando su origen y sus principales características de acuerdo a su estructura química y también sus limitaciones, adicionalmente, se explican los procesos mediante los cuales se obtienen las láminas de dichos materiales para su posterior moldeo. También hablamos de las características del proceso de termoformado y en la parte final de este primer capítulo se trata lo que respecta al tiempo de secado previo al termoformado que necesitan ciertos materiales plásticos y los tipos de degradación que sufren.

El capítulo dos está dedicado a una de las etapas más importantes del proceso de termoformado que es el calentamiento del material plástico. En dicho capítulo se describen las diferentes formas que existen para calentar la lámina plástica (conducción, convección y radiación), así como las ventajas y desventajas que se obtienen con cada una de ellas, partiendo de tipo de material a utilizar y de acuerdo a las características de diseño para la máquina. Se hace un análisis del mejor método para calentar las láminas y se describen los tipos de elementos o fuentes de calentamiento existentes. Otro aspecto importante que se discute es el referente al costo de operación de cada uno de los sistemas de calentamiento descritos, ya que este puede ser un factor decisivo en el momento de llevar a cabo el proceso en el ámbito industrial. Adicionalmente se definen conceptos fundamentales para la comprensión del proceso de termoformado como son estiramiento, resistencia en caliente de la lámina plástica, comportamiento mecánico de un sólido, adelgazamiento en el espesor del material, y la contracción en los productos obtenidos mediante termoformado.

En el capítulo tres, se describe la fabricación de moldes para termoformado, encontramos información sobre los materiales que se utilizan para esta aplicación y las técnicas de fabricación que se utilizan en la actualidad para este fin. También se discuten otros temas como los criterios y consideraciones básicas para el diseño de moldes de termoformado, el control de temperatura presente en el molde, el sistema de venteo del molde, así como las dimensiones y localización de los orificios de venteo.

Por otra parte, el capítulo cuatro presenta el diseño integral de la máquina de termoformado, una vez que se han presentado los fundamentos del proceso y que se cuenta con las bases técnicas necesarias para tal propósito. Se presenta la justificación que tiene este diseño desde el punto de vista económico y adicionalmente se mencionan las ventajas que tiene comparado con los equipos que se encuentran hoy en día en el mercado.

Se encuentra también en este capítulo el diseño conceptual de la termoformadora, así como el diseño de detalle, los criterios de selección para los diferentes elementos que conforman este equipo y los planos de fabricación.

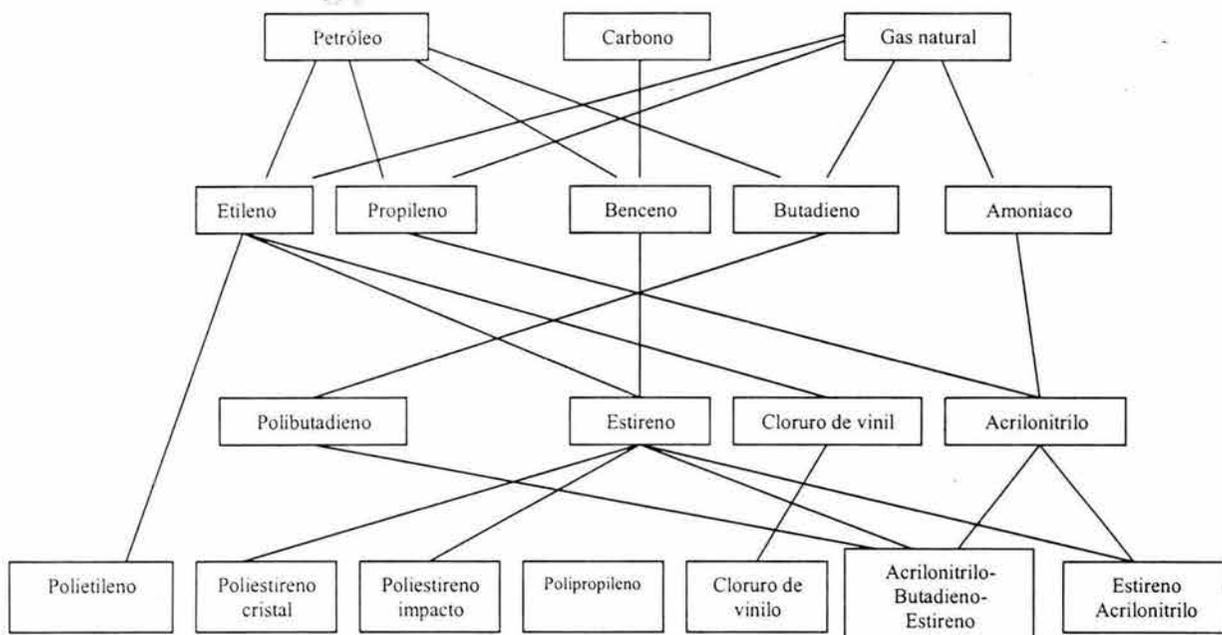
El capítulo cinco, nos describe al proceso de termoformado pero desde el punto de vista económico al mostrarnos información sobre los costos de producción global para un artículo en particular, también nos menciona las eficiencias que se tienen en este sentido y el impacto que tiene en los bolsillos de los fabricantes de artículos termoformados el reciclado de plásticos excedentes en las piezas termoformadas.

# CAPÍTULO 1

## MATERIALES PARA TERMOFORMADO.

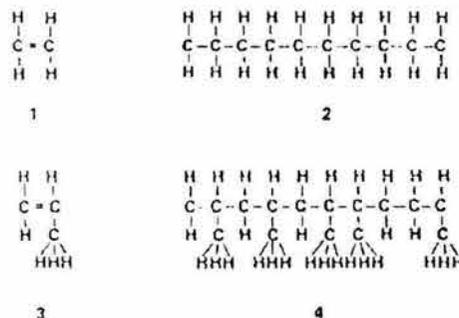
### 1.1 Origen y descripción de materiales para termoformado.

Los plásticos son manufacturados de compuestos de bajo peso molecular llamados monómeros, que son derivados del petróleo crudo, del carbono y del gas natural. El petróleo crudo y el carbono son procesados por destilación, trituración o por la extracción de solventes; en el caso del gas natural, al producirlo, se extraen algunos fluidos utilizados para la producción de monómeros, tales como: etileno ( $C_2H_4$ ), propileno ( $C_3H_6$ ) y benceno ( $C_6H_6$ ), que son la base de muchos de los polímeros utilizados en el proceso de termoformado<sup>(a)</sup>.



**Fig. 1.1 Materias primas para la elaboración de polímeros.**

En el proceso de polimerización, los monómeros, con la ayuda de catalizadores, alta temperatura y presión, reaccionan químicamente para crear la unión de moléculas con alto peso molecular.



**Fig. 1.2 Estructuras químicas de moléculas que forman polímeros: 1. Etileno, 2. Polietileno, 3. Propileno, 4. Polipropileno.**

Los termoplásticos tienen fuertes enlaces covalentes en el interior de las cadenas moleculares independientes y presentan fuerte entrelazamiento intermolecular. La longitud de estas cadenas y su entrelazamiento son factores determinantes en la resistencia y en la resiliencia de los termoplásticos producidos. Los termoplásticos utilizados en el proceso de termoformado están hechos de una resina con un alto peso molecular y con un arreglo intermolecular específico. Las láminas plásticas contienen moléculas con un máximo peso molecular (cadenas largas) para permitir el estiramiento sin ruptura o agrietamiento del material conformado.

En la manufactura de las láminas y al termoformarlas, debe considerarse tanto la degradación y el rompimiento de las moléculas; este rompimiento molecular ocurre durante la peletización, en el tornillo extrusor cuando el material fundido es empujado a través del dado y durante el corte de material, así como en su parte final de reciclado.

A continuación se describen algunos de los materiales plásticos que se utilizan en el proceso de termoformado<sup>(b)</sup>, adicionalmente, se muestran sus propiedades características utilizadas en dicho proceso:

#### *Acrilnitrilo-butadieno-estireno*

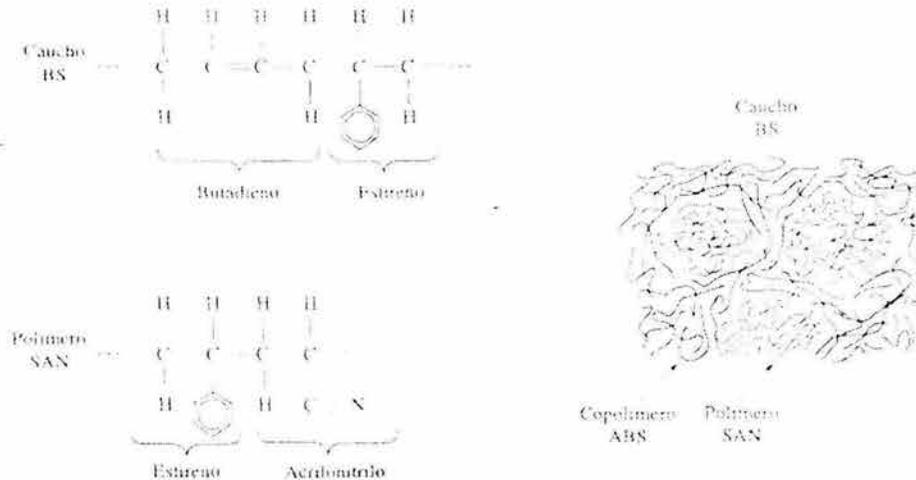
Los estirenos de alto impacto son hechos por adición de plásticos y algunos copolímeros de poliestireno son estireno-butadieno y estireno-acrilonitrilo. El butadieno y el estireno forman un copolímero lineal (hule de BS) que funciona como fibra del material ABS. El estireno y el acrilnitrilo forman un copolímero lineal (SAN) que sirve como matriz del ABS, entre otras características se encuentran su resistencia al impacto, al calor y al medio ambiente que es muy superior a la del estireno homopolímero así entonces el ABS (Acrilnitrilo Butadieno Estireno) es un terpolímero compuesto de dos copolímeros y es uno de los materiales poliméricos más comunes. Entre sus características más importantes se encuentran una excelente resistencia, rigidez y tenacidad, su acomodamiento se observa en la figura 1.3.

El ABS es un importante termoplástico para la manufactura de artículos de consumo. Como un ejemplo de las aplicaciones generales de este plástico se tiene la fabricación de teléfonos, que son moldeados por inyección de ABS. Por otra parte tiene una buena procesabilidad ya que es utilizado en la mayoría de los procesos de moldeo de plásticos.

El ABS tiene una buena resistencia química a las soluciones salinas, alcalinas, algunos minerales y aceites animales. Es fácilmente maquinable con tolerancias cerradas, es además dimensionalmente estable para poder ser termoformado.

Aceites base petróleo, solventes y algunas pinturas no deben ser utilizadas en este material ya que pueden causar que se vuelva quebradizo.

El ABS es económico y en su grado de propósito general es utilizado en una amplia variedad de aplicaciones que incluyen: interiores de aviones, construcción de modelos, equipo de purificación de agua, partes automotrices, equipo de laboratorio entre otras.



**Fig. 1.3 Estructuras químicas de copolímeros que forman el ABS.**

En la tabla 1.1 se resumen las propiedades del ABS y su norma relativa a cada propiedad

#### *Acetal (Polióxido de metileno)*

Acetal es el nombre común para la familia de los termoplásticos con nombre químico "polióxido de metileno". El acetal está disponible en grado copolímero de propósito general y versión homopolímero (Delrin® según DUPONT®) y algunos grados de Delrin® reforzados. El acetal provee una alta resistencia y una buena estabilidad dimensional y es fácil de maquinar. Como es un material semicristalino, es caracterizado por tener un bajo coeficiente de fricción.

#### Acetal homopolímero.

El acetal homopolímero ofrece más altas propiedades mecánicas que el acetal copolímero, pero también tiene una baja densidad, especialmente en secciones transversales largas. El homopolímero proporciona una menor resistencia química que el acetal copolímero. En la tabla 1.2 se muestran sus características típicas.

ASTM o UL	Propiedad	ABS
<b>FÍSICAS</b>		
D792	Densidad (lb/in <sup>3</sup> ) (g/cm <sup>3</sup> )	0.038 1.04
D570	Absorción de agua, 24 h (%)	-
<b>MECÁNICAS</b>		
D638	Resistencia a la tensión (psi) (MPa)	6,500 44.8175
D638	Módulo de tensión (psi) (MPa)	340,000 2344.3
D638	Elongación en tensión a la ruptura (%)	25 0.1723
D790	Resistencia a la flexión (psi) (MPa)	75,000 75.845
D790	Módulo de flexión (psi) (MPa)	320,000 220.64
D695	Resistencia a la compresión (psi)	-
D695	Módulo de compresión (psi)	-
D785	Dureza, Rockwell	R105
D256	IZOD Prueba de impacto (ft-lb/in)	7.0
<b>TÉRMICAS</b>		
D696	Coefficiente térmico de expansión lineal. (x 10 <sup>-5</sup> in./in./°F)	5.3
D648	Temperatura de deflexión. (°F / °C) a 264 (psi) 1.82(MPa)	215 / 102
D3418	Temperatura de fusión. (°F / °C)	- / -
-	Máxima temperatura de operación (°F / °C)	140 / 60
C177	Conductividad térmica. (BTU-in/ft <sup>2</sup> -hr-°F) (x 10 <sup>-4</sup> cal/cm-sec-°C)	- -
UL94	Flamabilidad	H-B
<b>ELÉCTRICAS</b>		
D149	Resistencia dieléctrica (V/mil)	-
D150	Constante dieléctrica a 60 Hz	-
D150	Factor de disipación a 60 Hz	-
D257	Resistividad (ohm-cm) a 50% RH	10 <sup>15</sup>

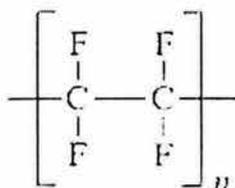
Tabla 1.1 Propiedades del ABS.

PROPIEDADES TÍPICAS DEL ACETAL				
ASTM o UL	Propiedad	Acetal Copolímero	Delrin <sup>®</sup> Homopolímero	Delrin <sup>®</sup> AF PTFE
<i>FÍSICAS</i>				
D792	Densidad (lb/in <sup>3</sup> )	0.051 1.41(g/cm <sup>3</sup> )	0.051 1.41(g/cm <sup>3</sup> )	0.054 1.50(g/cm <sup>3</sup> )
D570	Absorción de agua, 24 h (%)	0.2	0.2	0.2
<i>MECÁNICAS</i>				
D638	Resistencia a la tensión	9,500(psi) 65.5 (MPa)	11,000(psi) 75.84(MPa)	8,000(psi) 55.16(MPa)
D638	Módulo de tensión	400,000(psi) 2758(MPa)	450,000(psi) 3102.75(MPa)	435,000(psi) 2999.325(MPa)
D638	Elongación en tensión a la ruptura (%)	30	30	15
D790	Resistencia a la flexión	12,000(psi) 82.74(MPa)	13,000(psi) 89.635(MPa)	12,000(psi) 82.74(MPa)
D790	Módulo de flexión	400,000(psi) 2758(MPa)	450,000(psi) 3102.75(MPa)	435,000(psi) 2999.325(MPa)
D695	Resistencia a la compresión	15,000(psi) 103.42(MPa)	16,000(psi) 110.32(MPa)	16,000(psi) 110.32(MPa)
D695	Módulo de compresión	400,000(psi) 2758(MPa)	450,000(psi) 3102.75(MPa)	350,000(psi) 2999.325(MPa)
D785	Dureza, Rockwell	M88 / R120	M89 / R122	M85 / R115
D256	IZOD Prueba de impacto (ft-lb/in)	1.0	1.0	0.7
<i>TÉRMICAS</i>				
D696	Coefficiente térmico de expansión lineal. (x 10 <sup>-5</sup> in./in./°F)	5.40	4.70	5.00
D648	Temperatura de deflexión. (°F / °C) a 264 (psi) 1.82(Mpa)	220 / 104	250 / 121	244 / 118
D3418	Temperatura de fusión. (°F / °C)	335 / 168	347 / 175	347 / 175
-	Máxima temperatura de operación (°F / °C)	180 / 82	180 / 82	180 / 82
C177	Conductividad térmica. (BTU-in/ft <sup>2</sup> -hr-°F) (x 10 <sup>-4</sup> cal/cm-sec-	1.6 5.5	2.5 8.6	-
UL94	Flamabilidad	HB	HB	HB
<i>ELÉCTRICAS</i>				
D149	Resistencia dieléctrica (V/mil) , 1/8" de espesor.	420	450	400
D150	Constante dieléctrica a 60 Hz	3.8	3.7	3.1
D150	Factor de disipación a 60 Hz	0.005	0.005	0.010
D257	Resistividad (ohm-cm) a50% RH	10 <sup>15</sup>	10 <sup>15</sup>	3.0 x 10 <sup>16</sup>

Tabla 1.2 Propiedades del acetal.

*Politetrafluoretileno (PTFE)*

Este material pertenece a la familia de los fluorocarbonos que son polímeros basados en un átomo de flúor sustituto. El fluorocarbono más antiguo es el politetrafluoretileno, que es más conocido por la marca registrada Teflon®, hecho por polimerización de un gas con el mismo nombre químico, el acrónimo para este polímero es PTFE. El monómero es un átomo de flúor reemplazando a cada átomo de hidrógeno en la molécula de etileno.



**Fig. 1.4 Estructura química del monómero para el PTFE.**

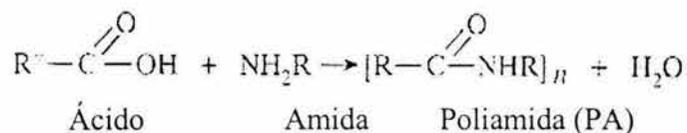
El PTFE es uno de los materiales químicamente inertes más conocidos. Su mayor limitación es que es expansivo y no es moldeable mediante las técnicas convencionales, tiene baja resistencia y por esta razón no debe ser usado en la fabricación de componentes estructurales.

Otra limitación para la fabricación de PTFE es que no se mezcla ni fluye como la mayoría de los termoplásticos. Las formas y partes que se hacen de este material son compactadas y sinterizadas con técnicas similares a las que se usan para los metales a través de la metalurgia de polvos. En la tabla 1.3 se mencionan las propiedades de este material polimérico.

*Nylon (poliamida)*

Las poliamidas son el producto de la condensación de un ácido y de una amida. Todas ellas tienen la característica del grupo de las amidas CONH.

La reacción básica que forma las poliamidas es:



**Fig. 1.5 Reacción para la obtención de poliamida**

<b>PROPIEDADES DEL (PTFE) TEFLON®</b>				
<b>ASTM o UL</b>	<b>Propiedad</b>	<b>PTFE (sin carga)</b>	<b>PTFE (25% fibra de vidrio)</b>	<b>PTFE (25% fibra de carbono)</b>
<b>FÍSICAS</b>				
D792	Densidad (lb/in <sup>3</sup> ) (g/cm <sup>3</sup> )	0.078 2.16	0.081 2.25	0.075 2.08
D570	Absorción de agua, 24 hrs (%)	< 0.01	0.02	0.05
<b>MECÁNICAS</b>				
D638	Resistencia a la tensión (psi)	3,900	2,100	1,900
D638	Módulo de tensión (psi)	80,000	-	-
D638	Tensión de elongación a la ruptura (%)	300	270	75
D790	Resistencia a la flexión (psi)		1,950	2,300
D790	Módulo de flexión (psi)	72,000	190,000	160,000
D695	Resistencia a la compresión (psi)	3,500	1,000	1,700
D695	Módulo de compresión (psi)	70,000	110,000	87,000
D785	Dureza, Shore D	D50	D60	D62
D256	IZOD prueba de impacto (ft-lb/in)	3.5	-	-
<b>TÉRMICAS</b>				
D696	Coefficiente de expansión térmica lineal (x 10 <sup>-5</sup> in./in./°F)	7.5	6.4	6.0
D648	Temperatura de deflexión al calor (°F / °C) a 264 (psi)	132 / 55	150 / 65	150 / 65
D3418	Temperatura de fusión (°F / °C)	635 / 335	635 / 335	635 / 335
-	Máxima temperatura de operación (°F / °C)	500 / 260	500 / 260	500 / 260
C177	Conductividad térmica (BTU-in/ft <sup>2</sup> -hr-°F) (x 10 <sup>-4</sup> cal/cm-sec-°C)	1.70 5.86	3.1 10.6	4.5 15.5
UL94	Flamabilidad	V-O	V-O	V-O
<b>ELÉCTRICAS</b>				
D149	Resistencia dieléctrica (V/mil), 1/8" de espesor	285	-	-
D150	Constante dieléctrica a 1 MHz	2.1	2.4	-
D150	Factor de disipación a 1 MHz	< 0.0002	0.05	-
D257	Resistividad volumétrica (ohm-cm) a 50% RH	> 10 <sup>18</sup>	> 10 <sup>15</sup>	10 <sup>4</sup>

Tabla 1.3 Propiedades del Politetrafluoretileno (PTFE)

La unidad de repetición para el nylon es:

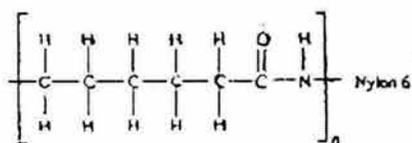


Fig. 1.6 Estructura química

Existe un buen número de poliamidas comunes, los varios tipos son usualmente designados como nylon 6, nylon 6/6, nylon 6/12, nylon 11, y nylon 12. Estos sufijos se refieren al número de átomos de carbono en cada sustancia reactiva en la condensación del proceso de polimerización. El nylon designado con un solo número en el sufijo es homopolímero y el nylon con dos números y una diagonal entre estos números es copolímero; nylon 6/12 es un copolímero del nylon 6 y del nylon 12.

El término poliamida es el verdadero nombre genérico para esta clase de polímeros, pero el término nylon ha sido usado por mucho tiempo y es ahora usado también como nombre genérico. El nylon 6 fue desarrollado en los años 30 y tuvo una importancia muy grande en la Segunda Guerra Mundial usado, por ejemplo, para piezas de paracaídas.

El nylon es termoplástico cristalino con buenas propiedades mecánicas y buena procesabilidad. Fue uno de los primeros plásticos de ingeniería y tiene las propiedades mecánicas suficientes como para ser usado en partes estructurales. Las propiedades mecánicas del nylon homopolímero son las más altas de todos los plásticos de ingeniería. Las temperaturas a las que puede ser sometido en uso son del orden de 260 °C, pero sus propiedades pueden degradarse con el tiempo debido a la oxidación. La gran desventaja del nylon como material de ingeniería es su tendencia a absorber humedad. El nylon 6 puede absorber hasta el 10% por peso (equilibrio a 20°C y 100%RH).

La absorción de humedad causa una baja en la resistencia a la tensión y rigidez, pero un incremento en su tenacidad. El nylon 6 y el 6/6 son muy susceptibles de absorber humedad y los designados como nylon 11 y 12 son los más resistentes del grupo. El aspecto más problemático de la absorción de humedad no es el efecto en la resistencia (este puede ser solucionado con un diseño adecuado) sino el cambio dimensional que se puede presentar en uso, que es más difícil de controlar. Una absorción de humedad de 10% en una parte de nylon 6 podría resultar en un cambio dimensional tan alto como 0.025 in/in (0.06cm/cm). Esto significa que una parte moldeada podría cambiar de dimensiones con las variaciones de la humedad relativa del ambiente. Por esta razón el nylon es utilizado en aplicaciones en donde el cambio en las dimensiones de las piezas no repercute en su funcionalidad. Por ejemplo algunas de sus aplicaciones son cubiertas, accesorios para regaderas, recubrimientos de alambre, piezas extruídas, ropa, refuerzos para llantas, textiles y carpintería.

El nylon es ampliamente usado en engranes y en maquinaria en donde los cambios dimensionales no afectan la funcionalidad. En estas aplicaciones los fabricantes proporcionan datos sobre los cambios dimensionales en condiciones de uso.



PROPIEDADES TÍPICAS DEL NYLON.						
ASTM o prueba UL	Propiedad	Nylon 6	Nyloil	Nylatron GSM	Nylatron GSM Blue	Nylatron NSM
<b>FÍSICAS</b>						
D792	Densidad (lb/in <sup>3</sup> ) (g/cm <sup>3</sup> )	0.042 1.15	0.042 1.16	0.042 1.16	0.042 1.15	0.042 1.15
D570	Absorción de agua, 24 h (%)	0.3 7.0	0.5 2.5	0.3 7.0	0.22 -	0.25 7.0
<b>MECÁNICAS</b>						
D638	Resistencia a la tensión (psi) (MPa)	12,000 82.74	10,000 68.95	10,500 72.93	10,000 82.74	11,000 75.84
D638	Módulo de tensión (psi) x1000 (MPa)	400 2758	425 2930.3	400 2758	500 3447.5	410 2826.9
D638	Elongación en tensión a la ruptura (%)	20	50	30	35	20
D790	Resistencia a la flexión (psi) x1000 (MPa)	16 110.32	15 103.42	16 110.32	15 103.42	16 110.32
D790	Módulo de flexión (psi)x1000 (MPa)	500 3747.5	425 2930.3	400 2758	425 2930.3	400 2758
D695	Resistencia a la compresión (psi)x1000 (MPa)	15 103.42	13 89.63	14 96.53	13 89.63	14 96.53
D695	Módulo de compresión (psi)x1000 (MPa)	400 2758	325 2240.8	400 2758	425 2930.3	400 2758
D785	Dureza, Rockwell	R115	R110	R110	R117	R110
D256	IZOD Prueba de impacto (ft-lb/in)	0.4	1.6	0.5	0.9	0.5
<b>TÉRMICAS</b>						
D696	Coefficiente térmico de expansión lineal. (x 10 <sup>-5</sup> in./in./°F)	3.5	3.5	3.5	5.9	5.0
D648	Temperatura de deflexión. (°F / °C) a 264 psi 1.82 (MPa)	200 / 93	350 / 177	200 / 93	-	200 / 93
D3418	Temperatura de fusión. (°F / °C)	420 / 215	450 / 232	420 / 215	420 / 215	420 / 215
-	Máxima temperatura de operación (°F / °C)	200 / 93	230 / 110	200 / 93	200 / 93	200 / 93
C177	Conductividad térmica. (BTU-in/ft <sup>2</sup> -hr-°F) (x 10 <sup>-4</sup> cal/cm-sec-°C)	-	-	-	-	-
UL94	Flamabilidad	HB	-	HB	-	HB
<b>ELÉCTRICAS</b>						
D149	Resistencia dieléctrica (V/mil) , 1/8" de espesor	500	550	400	-	400
D150	Constante dieléctrica a 60 Hz	3.7	3.7	3.7	-	-
D150	Factor de disipación a 60 Hz	-	-	-	-	-
D257	Resistividad (ohm-cm)a 50% RH	> 10 <sup>13</sup>	-	> 10 <sup>13</sup>	> 10 <sup>13</sup>	> 10 <sup>13</sup>

Tabla 1.4 Propiedades del nylon.

A continuación se muestra la molécula que forma este polímero.

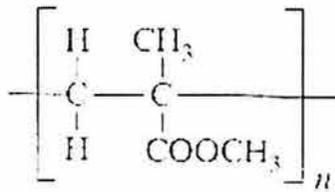


Fig. 1.8 Estructura química del PMMA

Los acrílicos son rígidos y claros, hechos para usarse en guardas para maquinaria, marcos para cristales y cubiertas, otro uso industrial es en el área de recubrimientos

Los nombres comerciales del acrílico son Plexiglas®, Lucite®, y Acrilyte®.

El acrílico ofrece gran transmisión de luz con un índice de refracción de 1.49 y puede ser fácilmente termoformado sin pérdida de claridad óptica. Periodos de exposición a la luz solar prolongados o de inmersión en agua no tienen un efecto significativo en las propiedades mecánicas u ópticas del acrílico, el cual no sufre ningún daño por contacto con soluciones acuosas, detergentes, limpiadores, ácidos inorgánicos diluidos, alcalinos e hidrocarburos alipáticos, sin embargo los acrílicos no son recomendados para usarse con clorinados o hidrocarburos aromáticos, éteres y cetonas.

#### *Poliestireno.*

Este plástico representa casi el 20% de todos los termoplásticos en uso comercial. Es de bajo costo y se usa en contenedores de comida y juguetes. El poliestireno es hecho de etilbenzeno; un anillo de benceno reemplaza a un átomo de hidrógeno en una molécula de etileno.

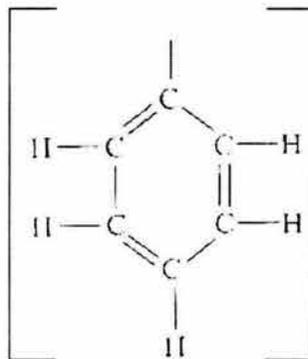


Fig. 1.9 Estructura química del monómero para el Poliestireno.

PROPIEDADES TÍPICAS DEL ACRILICO O PMMA.		
ASTM o prueba UL	Propiedad	Acrílico
<b>FÍSICAS</b>		
D792	Densidad (lb/in <sup>3</sup> ) (g/cm <sup>3</sup> )	0.043 1.18
D570	Absorción de agua, 24 h (%)	0.3
<b>MECÁNICAS</b>		
D638	Resistencia a la tensión (psi) (MPa)	8,000 - 11,000 55.16-75.84
D638	Módulo de tensión (psi) (MPa)	350,000 - 500,000 2413-3447
D638	Elongación en tensión a la ruptura (%)	2
D790	Resistencia a la flexión (psi) (MPa)	12,000 - 17,000 82.74-117.2
D790	Módulo de flexión (psi) (MPa)	350,000 - 500,000 2413-3447
D695	Resistencia a la compresión (psi) (MPa)	11,000 - 19,000 75.84-131
D785	Dureza, Rockwell	M80 - M100
D256	IZOD Prueba de Impacto (ft-lb/in)	0.3
<b>TÉRMICAS</b>		
D696	Coefficiente térmico de expansión lineal. (x 10 <sup>-5</sup> in./in./°F)	5 - 9
D648	Temperatura de deflexión. (°F / °C) a 264 psi , 1.82 (MPa)	150-210 / 65-100
D3418	Temperatura de fusión. (°F / °C)	- / -
-	Máxima temperatura de operación (°F / °C)	150-200 / 65-93
C177	Conductividad térmica. (BTU-in/ft <sup>2</sup> -hr-°F) (x 10 <sup>-4</sup> cal/cm-sec-°C)	3.9 1.2
UL94	Flamabilidad	-
<b>ELÉCTRICAS</b>		
D149	Resistencia dieléctrica (V/mil) , 1/8" de espesor	400
D150	Constante dieléctrica a 60 Hz	4.0
D150	Factor de disipación a 60 Hz	0.05
<b>ÓPTICAS</b>		
-	Mínima transmisión de luz (%)	92
-	Índice de refracción	1.48-1.50

Tabla 1.5 Propiedades del Polimetil-metacrilato (PMMA).

El poliestireno es predominantemente amorfo y antiestático. Los anillos de benceno tienen una localización aleatoria en la cadena polimérica y la presencia de una larga molécula (benceno) como sustituto de un átomo de carbono en la cadena causa una cadena mayor. La deformación por el movimiento relativo de la cadena es inhibida por la interacción de los anillos de benceno en las cadenas adyacentes. Este efecto estructural es el responsable de la inherente fragilidad y rigidez de este plástico.

Debido a su baja resistencia al impacto, el poliestireno no puede competir con otros plásticos de ingeniería para ser usado en máquinas. El poliestireno es un termoplástico que fue diseñado para aplicaciones donde se requieren excelentes propiedades eléctricas y mecánicas así como también buena procesabilidad. Es generalmente transparente, aunque también se le puede aplicar algún pigmento.

El poliestireno es normalmente procesado por inyección, pero debido a la excelente procesabilidad con que cuenta, otros métodos de procesamiento como el termoformado, el moldeo por compresión, la extrusión y el maquinado son factibles. El poliestireno en su amplia variedad de grados es resistente a agentes químicos como sales, alcoholes y algunos ácidos.

Aplicaciones típicas.

Separadores para cable coaxial, tubos para líquidos corrosivos, difusores de luz, cubiertas de tanques, perfiles, contenedores, puertas para refrigeradores y aplicaciones de empaque.

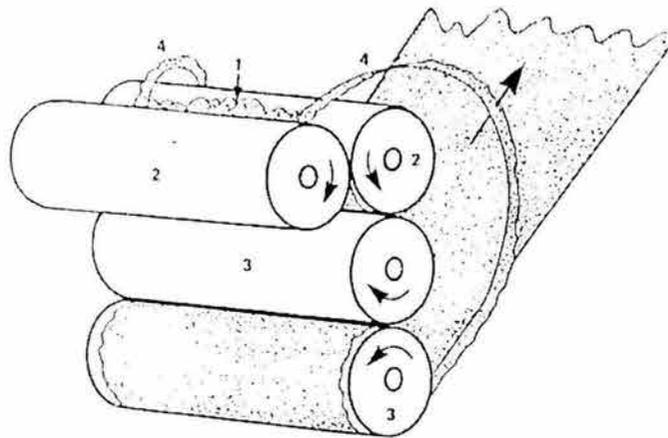
PROPIEDADES TÍPICAS DEL POLIESTIRENO.			
ASTM o prueba UL	Propiedad	GP-PS	HI-PS
<b>FÍSICAS</b>			
D792	Densidad (lb/in <sup>3</sup> ) (g/cm <sup>3</sup> )	0.043 1.05	0.043 1.04
D570	Absorción de agua, 24 hrs (%)	0.06	0.01
<b>MECÁNICAS</b>			
D638	Resistencia a la tensión (psi)X 1000 (MPa)	7.5 51.712	4.0 27.58
D638	Módulo de tensión (psi)X1000 (MPa)	450 3102.75	260 1792.7
D638	Tensión de elongación a la ruptura (%)	47	55
D790	Resistencia a la flexión (psi)X1000 (MPa)	6.1 42.059	8.7 59.9865
D790	Modulo de flexión (psi)X1000 (MPa)	475 3275.125	280 1930.6
D695	Resistencia a la compresión (psi)X1000 (MPa)	14.5 99.9775	7.5 51.7125
D785	Dureza, Rockwell	75M	56L
D256	IZOD Prueba de impacto (ft-lb/in)	0.8	2
<b>TÉRMICAS</b>			
D696	Coefficiente térmico de expansión lineal. (x 10 <sup>-5</sup> in./in./°F)	4.0	4.2
D648	Temperatura de deflexión al calor (°F / °C) a 264 (psi)/1.8202 (MPa)	200 / 95	195 / 92
D3418	Temperatura de ablandamiento Vicat (°F / °C)	224 / 107	214 / 102
-	Máxima temperatura de operación (°F / °C)	150 / 65	140 / 60
C177	Conductividad térmica (BTU-in/ft <sup>2</sup> -hr-°F) (x 10 <sup>-4</sup> cal/cm-sec-°C)	- -	- -
<b>ELÉCTRICAS</b>			
D149	Resistencia dieléctrica (V/mil) , 1/8" de espesor.	60	45
D149	Constante dieléctrica a 1MHz	2.5	2.7
D495	Resistencia al arco (sec)	70	100
D257	Resistividad volumétrica (ohm-cm)a 50% RH	>10 <sup>16</sup>	>10 <sup>16</sup>

Tabla 1.6 Propiedades del Poliestireno (PS).

### 1.2 Obtención de láminas plásticas.

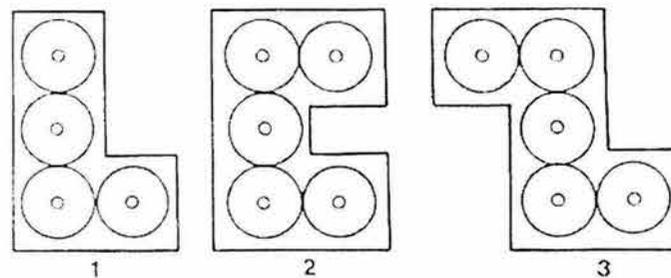
Existen tres métodos básicos para hacer laminas plásticas: calandrado, fundición y extrusión<sup>(a)</sup>. Estos están basados en agregar temperatura durante el proceso de manufactura de la lámina, para ablandar o fundir la resina termoplástica.

1. Calandrado.- Está compuesto por una serie de rodillos que son relativamente grandes en su diámetro, aproximadamente de 30.48 – 121.9 cm (12 a 48 in), y calentados entre los 162.8 – 232.2°C (325 - 450 °F). Mecánicamente los rodillos pueden ser controlados en sus revoluciones y en el giro. La función de los rodillos iniciales es la de mezclar, calentar y medir el ablandamiento de la resina plástica. Los rodillos intermedios son usados para dar el espesor final a la medida requerida. Los rodillos finales son básicamente para enfriar la lámina, así como reafirmarla y darle un acabado final (brillo, rugosidades, detalles y grabados). La temperatura de estos rodillos es controlada por medio del intercambio de calor con otro fluido (generalmente se usa el aceite), que circula a través del rodillo. El plástico precalentado y reblandecido, ya sea en pellets o en trozos, es introducido en el equipo de calandrado de manera continua a fin de evitar grandes huecos y hoyos a lo largo de la lámina.



**Fig. 1.10 Calandrado, arreglo de estación de "L" invertida. 1)material termoplástico, 2)rodillos alimentadores, 3)rodillo de ajuste de medida y de acabado superficial, 4)etapa de corte.**

El arreglo de los rodillos para este proceso varía y se relaciona de acuerdo al tipo de resina, al tamaño de la lámina, al método de alimentación y a algunos otros requerimientos adicionales.



**Fig. 1.11 Arreglo de rodillos para calandrado, estaciones tipo**  
**1. Forma de L, 2. Forma de C, 3. Forma de Z.**

Las láminas plásticas obtenidas por este método, no tienen una orientación molecular significativa. Tan pronto como son expuestas al ciclo de calor en el proceso de termoformado, tienden a colgarse inmediatamente.

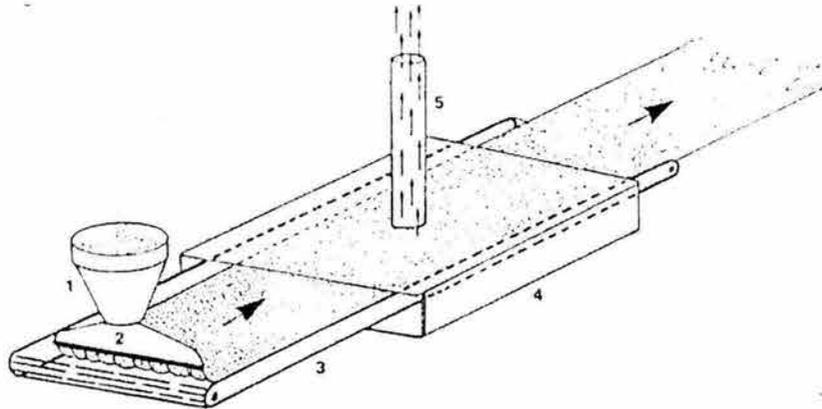
Por el proceso de calandrado, se pueden transformar materiales como el vinilo, el poliuretano, el ABS, el polietileno, el polipropileno y las variantes del estireno.

**2. Fundición.-** Para algunas resinas plásticas el método de fundición, tal vez sea el único método posible para la producción de las láminas. Dentro de este método, existen dos variantes: la primera de ellas es casi siempre usada con acrílico y sus derivados. Este proceso se realiza vertiendo la base de monómeros, o en muchos casos la materia polimérica, parcialmente fundida, en moldes (proceso por lotes) o en placas de acero móviles (proceso continuo). Para el proceso por lotes, tenemos que el material debe tener una fluidez necesaria para llenar el espacio entre las superficies del molde, y este es calentado hasta que finalice la polimerización.

La formación de burbujas indicará una gasificación en el polímero, siendo inservible, ya que estas burbujas, entre otros efectos, interferirán con la claridad óptica, la resistencia y el acabado final del producto. Con el molde se pueden dar los acabados tipo espejo, satín o mate en la lámina plástica. Por este proceso se producen usualmente láminas de 0.03 a 4.25 in (0.0762 – 10.8 cm) de espesor y un área de 120 por 144 in (304.8 – 365.8 cm). Mientras que el proceso continuo produce espesores de 0.08 a 0.375 in (0.2032 – 0.9525 cm) y anchos de 9 pies (274.32 cm). Entre algunos de los productos obtenidos por este método tenemos: señales y anuncios, tragaluces y tinas de baño.

El segundo tipo de fundición es el llamado “ fundición solvente”, el cual es usado comúnmente para transformar materiales como el polivinilclorado (PVC) en películas. El material en forma de resina y junto con los aditivos necesarios, es disuelto hasta llegar al estado líquido. Este plástico líquido será rociado, esparcido y estabilizado hasta la creación de un nivel uniforme en el espesor de la lámina. La medida del espesor de las láminas producida, está en fracciones de 1 a 20 milésimas, y es controlado por el flujo del material, la abertura de los dados, la presión y la velocidad de las placas de acero.

En las placas de acero con la ayuda de un horno de aire circulante, se vaporizan los solventes, quedando una película plástica. Los solventes vaporizados son recuperados para después utilizarlos nuevamente.



**Fig. 1.12 Líneas de fundición de láminas, 1)receptor de materia líquida, 2)dado de flujo, 3)placas móviles de acero, 4)horno de secado de solventes, 5)removedor de vapor disolventes.**

Las láminas obtenidas en general tendrán una buena claridad y un buen control de dimensión. Todas las láminas obtenidas por el método de fundición están libres de huecos, sin esfuerzos escondidos y tendrán un mismo estiramiento en ambas direcciones. Además, las películas hechas con resinas claras desplegarán excelentes propiedades ópticas.

Sin embargo, el método falla al no crear una orientación molecular en la lámina plástica, causando durante el proceso de termoformado, al calentarla, un colgamiento excesivo. Este colgamiento excesivo modifica la distancia entre la lámina y los calentadores, que da como resultado una mala distribución del calor sobre la superficie de la lámina.

**3. Extrusión.**- este proceso es capaz de convertir la materia termoplástica, ya sea en forma de pellets, polvos o de forma granular, en una mezcla de flujo continuo. Cuando se hace con un extrusor, esta mezcla fluye al ser forzada a pasar a través de un sistema de dados, que dan forma a la lámina de manera continua. La lámina es enfriada, hecha a la medida especificada, cortada en paneles individuales o en rollos continuos.

El proceso empieza con la alimentación o suministro de la resina, la cual puede distribuirse, por los proveedores, en bolsas (cantidades pequeñas), en cajas o en bultos (vagones) para cantidades grandes. El material termoplástico es introducido en alimentadores mecánicos que por medio de bombas es transportado hacia una cámara receptora o a un sistema de silos. Actualmente en este proceso se pueden utilizar resinas vírgenes o mezclas de estas con material para reciclar, originado del corte en la parte final del proceso.

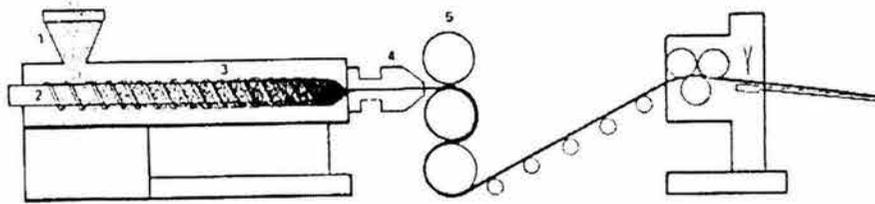


Fig. 1.13 Línea de extrusión de láminas, 1) receptor alimentador, 2) tornillo extrusor, 3) cañón extrusor, 4) dado extrusor, 5) estación de rodillos.

### 1.3 Coloración y orientación de la lámina.

La coloración de las láminas podrá hacerse desde el mezclado de la resina antes de la extrusión o bien después; sin embargo, se deberá, para el primer caso, calcular el desplazamiento que tendrá el área durante el termoformado. Se muestran a continuación los pigmentos utilizados para la coloración de las láminas.

Color	Inorgánicos	Orgánicos
Blanco	Bióxido de titanio	
Amarillo	Amarillo de: cromo, mercadmio Óxido de hierro	Amarillo de: toluidina, bencidina Diazo de condensación Tetracloro iso-indolina Pirazolona
Naranja	Naranja de: cromo, cadmio Mercadmio.	Naranja de: Dinitroanilina, bencidina, diarilida.
Verde	Verde de cromo hidratado Óxido de hierro.	Verde de flalocianina
Rojo	Rojo de: cadmio, mercadmio Óxido de hierro.	Rojo de toluidina, quinacidrona, Diceto-pirrol-pirrol, tio-indigo Diazo de condensación.
Azul	Azul de: hierro, cobalto, ultramar, Manganeso.	Azul de flalocianina
Negro	Óxido de hierro, Complejo de cromo.	Negro de humo.
Violeta	Ultramarino, manganeso.	Violeta de: dioxacina, quinacridona
Marrón	Sulfuro de mercurio, cadmio.	Quinacridona, tio-indigo.

Tabla 1.7 pigmentos orgánicos e inorgánicos.

Para el control de la orientación en la lámina se hace una extrusión a baja presión, esta orientación es el esfuerzo que se tiene o se añade durante el proceso, es decir, es el alineamiento de la estructura cristalina en los materiales poliméricos, originando con ello una alta uniformidad en la estructura y una integración de la lámina, en propiedades mecánicas y de forma; donde, para la mayoría de los materiales amorfos, tenemos una reducción en la lámina terminada de 6 a 12% en la dirección de la extrusión, y un crecimiento de 1 a 3% en la dirección transversal cuando se extruye con una estación alta

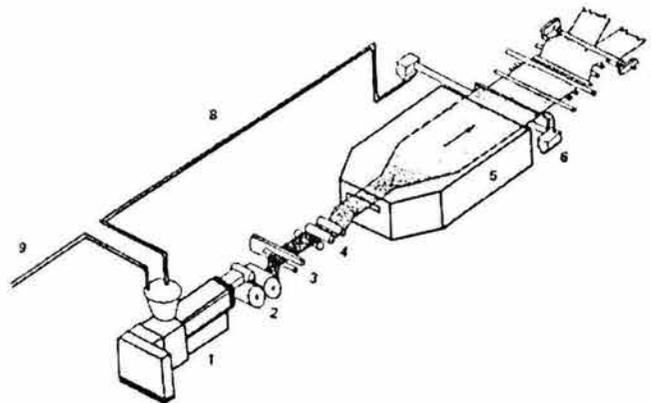
(con el rodillo superior), elevándose el porcentaje severamente al hacerlo con una estación baja.

Los porcentajes de esta orientación para láminas cristalinas (de mayor ordenamiento en sus cadenas poliméricas) llegan a ser de 20 a 55 % en la dirección de la extrusión. Para poder termoformar una pieza con las propiedades deseadas, se necesita que cada una de las variables durante la extrusión tengan un buen control (atribuyendo el 72% para su obtención a la extrusión). Una manera de incrementar los valores de las propiedades físicas, es haciendo una orientación biaxial en la lámina, teniendo entonces que durante el proceso de la extrusión, la lámina se extruya y enfríe a temperaturas de orientación con un alargamiento biaxial considerable.

### 1.3.1 Orientación biaxial.

Cuando las láminas son sometidas a una orientación biaxial después de la extrusión, éstas se hacen idealmente flexibles y resistentes a la fractura. Para realizar esta orientación biaxial, primero se extruye la lámina con las especificaciones de forma deseada, esta lámina se mantendrá continuamente tibia por una serie de rodillos a cierta temperatura, para posteriormente introducirla a un horno con temperatura controlada. La temperatura de la lámina se sostendrá ligeramente por debajo del punto de fusión de esta, evitando el flujo del material. La lámina se sujeta en sus extremos por medio de anclas llamadas “clamps” o “grips”, estirándola biaxialmente en la dirección de la maquina (MD), y en la dirección transversal (TD), para finalmente enfriarla y retener dicha orientación.

Como ejemplo tenemos al poliestireno, que al tener una orientación biaxial, presenta una mejor resistencia estructural a temperatura ambiente y en condiciones de refrigeración, siendo muy útil en la industria del empaque y servicio de alimentos. Otros materiales que pueden ser orientados biaxialmente son: el polipropileno, los policarbonatos y los acrílicos. El propósito de la orientación biaxial de los materiales termoplásticos es incrementar su resistencia al impacto y ganar resistencia adicional.



**Fig 1.14 Línea de producción de láminas orientadas biaxialmente,**  
 1) extrusor, 2) rodillos de fundición, 3) ajuste de espesor, 4) rodillos estiradores en MD,  
 5) horno estirador en TD, 6) corte de material, 7) corte de tiras, 8) trituradora y material de  
 reciclado, 9) mezcla de materias vírgenes –recicladas.

### 1.4 Especificaciones de las láminas plásticas.

De acuerdo a los estándares manejados en la industria, las especificaciones que a continuación se mencionan nos ayudan a conocer al material de acuerdo a las características que proporciona el formado previo<sup>(c)</sup>, esto es:

- El tipo de orientación, probada por calentamiento a una pieza de 10 por 10 pulgadas en un calentador de radiación tipo sándwich, que permite su enfriamiento y contracción.
- Las tolerancias dimensionales, espesores y longitudes, acabado y forma.
- Pruebas de impacto.
- Ausencia de humedad.
- Si el material es de primera o tiene algún contaminante.
- Acabado superficial que requiere la pieza final.
- Esfuerzo de tensión.
- Densidad.
- Elongación.
- Peso molecular.
- Módulo de elasticidad.
- Color.
- Aditivos (filtros).
- Permeabilidad.
- Olor.
- Refuerzos (fibras o polvos).

Parámetros que establecen la operación y el diseño de los moldes que se utilizarán posteriormente o incluso de sujeción de la lámina.

#### 1.4.1 Tipos de láminas termoplásticas utilizadas en el proceso de termoformado.

Por medio de los métodos de fabricación de las láminas mencionados, podemos obtener una gran diversidad de láminas, algunas simples y algunas otras con refuerzos, los aditivos, pueden cambiar el color, incrementar las características y propiedades mecánicas, así como alargar el tiempo de vida del material.

Cada una de las láminas que se han de utilizar en el proceso de termoformado, deberán observarse individualmente y sus ventajas y desventajas habrán de considerarse previamente. Algunos tipos de láminas termoplásticas son: naturales, orientadas, entintadas, pigmentadas, reforzadas, espumosas, metalizadas entre otras.

#### 1.4.2. Características del proceso de termoformado.

Como se mencionó, el proceso de termoformado, es un proceso secundario de transformación, para llegar a un producto final. Las siguientes son algunas de las características esenciales para tener una alta calidad en partes producidas por este proceso:

- La resina debe ser de alta calidad, homogénea y se debe conocer todo respecto a sus especificaciones, para tener las propiedades mecánicas deseadas en las láminas.
- Al igual que la resina la hoja también debe cumplir con lo anterior, teniendo con esto, parámetros de operación constantes y un proceso más eficiente.
- La temperatura de operación debe permanecer constante durante todo el proceso.
- El vacío se alcanzará con un mínimo de presión de 97 a 100 kPa (14.065 – 14.5 psi).
- El molde estará a temperaturas uniformes y sus propiedades deberán conservarse, para no tener alteraciones en las piezas finales.
- El enfriamiento de las piezas debe optimizarse.
- El corte de material excedente será el mismo en cada caso.

A lo largo de los diferentes capítulos se explicará ampliamente la manera en que se ve afectada cada una de estas características durante el proceso.

### 1.5 Condiciones de temperatura

La temperatura, el vacío y el aire comprimido son factores críticos para el proceso. Cualquier variación de la temperatura afectará drásticamente a la hoja en su resistencia a la tracción y en la elasticidad. La lámina se calienta uniformemente para que al momento de formar el vacío se tenga una mejor distribución del material, teniendo con esto un mínimo de efectos en los esfuerzos internos y en las propiedades físicas. Y cuando usamos presión durante el proceso de termoformado éste se vuelve más rápido. En la siguiente tabla se muestran las especificaciones de temperaturas de algunos materiales:

MATERIAL	TIPO	PROCESO DE EXTRUSION				PROCESO DE TERMOFORMADO					
		TEMPERATURA DE ORIENTACION		LIMITE INFERIOR		TEMPERATURA DE MOLDE		TEMP. DE FORMADO		LIMITE SUP.	
		°C	°F	°C	°F	°C	°F	°C	°F	°C	°F
ABS	A	138	280.4	127	260.6	85	185	149	300.2	182	359.6
ACETAL	C	138	280.4	127	260.6	71	159.8	154	309.2	182	359.6
ESTIRENO	A	135	275	127	260.6	85	185	149	300.2	182	359.6
POLISULFURO	A	213	415.4	190	374	163	325.4	246	474.8	302	575.6
POLIETILENO HD	C	132	269.6	127	260.6	82	179.6	146	294.8	182	359.6
TEFLÓN	C	254	489.2	232	449.6	149	300.2	288	550.4	327	620.6
ACRILICO / PVC DKE-450	A	154	309.2	143	289.4	79	174.2	171	339.8	182	359.6
ACRÍLICO	A	163	325.4	149	300.2	85	185	177	350.6	193	379.4
POLICARBONATO PTEG	A	177	350.6	168	334.4	138	280.4	191	375.8	204	399.2
POLIPROPILENO	C	138	280.4	129	264.2	88	190.4	154- 166	309.2- 330.8	166	330.8
VINYL ESP. RIG.	*	127	260.6	116	240.8	72	161.6	149	300.2	177	350.6

Tabla 1.8 Temperaturas de proceso. A- amorfo C- cristalino

La temperatura del molde será lo suficientemente baja para asegurar que el material pueda endurecer. El molde tendrá una variación de temperaturas cuando se alcancen presiones alrededor de los 0.46 (MPa) (66.7 psi).

Es importante conocer las temperaturas de orientación que se utilizan en el proceso de extrusión, ya que estas afectan la estructura molecular de la hoja a termoformar, pues algunos autores (\* William K. McConnell Jr. "Thermoforming"), aseguran que el efecto de esta temperatura influye en el proceso de termoformado considerablemente. Esto es debido a que la temperatura que se tiene al extruir, genera esfuerzos internos, y una vez termoformada la lámina estos se eliminan provocando deficiencias físicas en la pieza. Para tener una temperatura óptima de formado, debe tomarse en cuenta el tipo de geometrías de las piezas a termoformar, la tabla anterior muestra los límites inferior y superior de temperaturas para la deformación del material en el termoformado.

El límite inferior de temperatura nos indica la temperatura a la cual puede deformarse el material para este proceso. Cabe señalar que el límite superior contempla la temperatura de degradación del material, usada comúnmente en piezas grandes, para piezas caprichosas se considera la temperatura de límite inferior.

La manera de calentar la lámina plástica, después de cumplir las especificaciones de fabricación, debe ser uniforme a través del centro de la superficie hacia los extremos donde está sujeta en el bastidor.

En el siguiente capítulo se explicarán a detalle las formas de calentar la lámina de acuerdo a los sistemas de calentamiento, así como el cálculo de los parámetros de operación apropiados para el diseño y construcción de la máquina de termoformado.

Entre otras cosas, también se observa que a bajas temperaturas, en este proceso, se ocasionan esfuerzos internos excesivos en la pieza, disminuye su resistencia y se hace susceptible a la deformación y al quebrantamiento. El tiempo al cual se someterá el material a calentamiento, depende del espesor de la lámina, del equipo de calentamiento y del tipo de formado<sup>(d)</sup>.

Entonces tenemos:

\*A baja temperatura.- Existe una concentración de esfuerzos internos en la pieza que posteriormente con cambios bruscos de temperatura ocasiona que se presentan fisuras y quebrantamiento.

\*A alta temperatura.- existe la aparición de burbujas y marcas de molde.

En la práctica, la temperatura para realizar el termoformado es difícil de establecer, por lo general se hace una estimación en el comportamiento de la lámina. El punto de revenido que es el cambio gradual en el cual la lámina cede durante el calentamiento sirve para establecer dicha temperatura. Sin embargo, el criterio no puede aplicarse en todos los materiales plásticos, ya que algunos de estos pueden sobrecalentarse antes de empezar a ceder y aún determinándose esta temperatura se pueden tener variaciones por:

- Fluctuación en el espesor.
- Cambios de temperatura del equipo o del medio.
- Fluctuaciones en el voltaje de la línea (infrarrojo).
- Equipo inadecuado y mantenimiento, entre otros.

### 1.5.1 Tiempo de secado previo al termoformado de láminas plásticas.

Muchos de los plásticos, como el Policarbonato (PC), el Acrílico (PMMA), el Polietilen Tereftalato (PET), y el ABS, son higroscópicos. La magnitud o el grado de absorción de agua que poseen estos materiales dependen de la naturaleza de cada uno de ellos, así como del tiempo de exposición al medio ambiente. La absorción de agua es un proceso de difusión, en el cual las moléculas de agua llenan los espacios de aire entre las cadenas poliméricas de la lámina. Cuando la lámina es rápidamente calentada, durante el proceso de termoformado, las pequeñas inclusiones que existen en la lámina se expanden para producir pequeños espacios vacíos, las moléculas de agua se difunden hacia estos espacios y producen burbujas visibles, en el caso de las láminas transparentes se presenta una apariencia de holgura, y en otros caso se notan opacas o arrugadas.

Algunas referencias del tiempo de secado para estos materiales comunes se presentan a continuación:

<i>Material</i>	<i>Temperatura de transición vítrea. Tg (°C)</i>	<i>Temperatura del horno. De secado. To (°C)</i>	<i>Tiempo (h)</i>
<i>ABS</i>	<i>100</i>	<i>90</i>	<i>2</i>
<i>PMMA</i>	<i>105</i>	<i>95</i>	<i>2</i>
<i>PET</i>	<i>70</i>	<i>65</i>	<i>3-4</i>
<i>PA6 (NYLON 6)</i>	<i>50</i>	<i>50</i>	<i>3-4</i>
<i>PA66 (NYLON66)</i>	<i>50</i>	<i>50</i>	<i>3-4</i>
<i>PVC</i>	<i>90</i>	<i>70</i>	<i>2</i>
<i>ACETATO</i>	<i>100</i>	<i>90</i>	<i>1.5</i>

**Tabla 1.9 Tiempo de secado para algunos polímeros.**

## REFERENCIAS:

**(a) John Florian**

"Practical Thermoforming, Principles and Applications"  
pg. 1-99, 243, 267-313  
pg. 18-29.

**(b) <http://www.boedeker.com>****(c) William K. McConnell Jr.**

"Thermoforming"  
pg. 1332,1333.  
President McConnell Company Inc.  
P.O.Box 11512 Fort Wort TX76110

**(d) Roberto Marcos Cubillas**

"Manual técnico de Termoformado"  
Plastiglas de México SA de CV pg. 16, 18

**(e) James L. Throne**

"Polymer Properties"  
in M. Bakker Ed. Encyclopedia of Packaging Technology  
John Wiley & sons. 1986

**(f) Marcel Dekker**

"Plastics Process Engineering"  
1979.

**(g) Enciclopedia del Plástico**

IMPI pg. 145

**(h) James L. Throne**

"Thermoforming, A look forward"  
SPE Tech. Papers. 1983. Pg. 464

**(i) Donald R. Askeland**

"Ciencia e Ingeniería de los Materiales"  
internacional Thomson Editor 3ª Ed.

## CAPÍTULO 2

### CALENTAMIENTO DEL MATERIAL PLÁSTICO

#### 2.1 Descripción de las formas de transferencia de calor durante el termoformado.

Para tener un control adecuado del calentamiento se deben considerar tanto el tipo de material a deformar así como el grado de orientación, esto es debido a que se liberan tensiones internas o de orientación, lo cual puede causar el adelgazamiento de la lámina. Un calentamiento excesivo o rápido puede provocar vaporizaciones internas volátiles o plastificantes provocando abultamientos.

Para espesores delgados de lámina, el mejor método de calentamiento es por medio de la radiación, pues este medio es el más eficiente, debido a la rápida y uniforme transferencia de calor a través del material, por que comparada con láminas de espesores gruesos se requiere de un mayor control en el calentamiento de la pieza, ya que a ciertas temperaturas el material se degrada antes de que el centro alcance la temperatura de formación, por lo que para este caso, se hace el calentamiento por la transmisión térmica convectiva de aire en horno, teniéndose mayor eficiencia a un menor costo. Los materiales plásticos semicristalinos (mencionados en el capítulo uno) deberán calentarse a una temperatura donde exista un balance entre la fluidez y la resistencia al calor del material, provocando, con una variación  $\pm 5$  °C (rango de temperatura de formado, experimental), defectos en las piezas a termoformar. En tanto que los plásticos amorfos pueden operar en un rango mayor de temperatura. A continuación se muestran los efectos de algunos plásticos según su estructura:

Estructura y Material	Parámetro.			
	Capacidad calorífica	Rango de procesamiento	Tendencia al pandeo	Resistencia en Caliente
SEMICRISTALINO PP PE	Alto	Angosto	Alta	Baja
AMORFO PS PVC PMMA PC	Bajo	Amplio	Baja	Media

**Tabla 2.1 Efectos en el calentamiento por la estructura molecular.**

El calentamiento depende de la cantidad de energía que absorba el material, esta propiedad puede afectarse por las características ópticas, entre otras si la lámina es transparente, translúcida, opaca o pigmentada y sobre todo, teniendo en cuenta la estructura molecular. Por ejemplo, los materiales translúcidos (transparentes) como el Poliestireno, el Acrílico y el Polietilén Tereftalato absorben la energía de manera volumétrica. La absorción de manera volumétrica tiene un efecto en el aumento de la temperatura que es mayor en la

superficie y disminuye gradualmente hacia el interior, haciendo necesario calentar por ambos lados, sobre todo para el termoformado. Así, el calentamiento de la lámina en el proceso de termoformado es el más importante, ya que se requiere de un balance de energía, con el cual se obtenga, para el diseño del sistema, la máxima eficiencia, donde el calor por unidad de masa de la lámina desde la temperatura ambiente ( $rt$ ) a la temperatura de formado ( $Tf$ ) se puede obtener con la siguiente expresión:

$$Q = \int_{rt}^{Tf} C_p(T) dT \quad \begin{array}{l} \text{Q en (cal / g)} \\ \text{(Btu/lb)} \end{array} \quad \text{(I)}$$

$C_p(T)$  es el calor específico dependiente de la temperatura, la temperatura de formado será entonces el promedio de la temperatura de la lámina, que esta dada por:

$$Tf = (1/L) \int_0^L T(x) dx \quad \text{(II)}$$

donde  $T(x)$  es la temperatura en la posición  $x$ ,  $0 < x < L$ .

Si el calor específico dependiente de la temperatura no se conoce, se puede estimar un valor promedio de la temperatura de formado, por medio de un valor semejante de algún otro polímero.

Para calcular la transferencia de calor con mejor precisión, se puede considerar el cambio de entalpía entre la temperatura ambiente y la temperatura de formado, es decir:

$$Q = H(Tf) - H(rt) \quad \text{(III)}$$

donde  $H$  es la entalpía a la temperatura dada.

Por lo que la siguiente tabla muestra la energía requerida para calentar algunos polímeros, basados en el calor específico y en la entalpía para cada material.

MATERIAL	Temperatura de formado Tf °C	$\Delta H^*$ cal/g Tf-20	$\rho$ g/cm <sup>3</sup>	Cp* Cal/g °C	Razón de calentamiento s/mm	Absorción de energía KW/m <sup>2</sup>	Eficiencia %	Coeficiente máximo de transferencia de calor h.	
								KW/m <sup>2</sup> °C	Btu/ft <sup>2</sup> h °F
LDPE	129	71.7	0.92	0.498	25	11.5	27.6	0.0182	3.21
PMMA	177	104.1	1.2	0.559	27	19.44	48.6	0.0333	5.87
PVC	138	55.9	1.4	0.265	21	15.88	39.7	0.0255	4.50
PS	146	65.0	1.05	0.341	13-15	19.03-21.97	47.6-54.9	0.0310-0.0358	5.46-6.30
PTFE	288	66.9	1.2	0.342	13	25.86	64.7	0.0548	9.65
PA-66	224	105.0	1.2	0.419	27	19.84	49.6	0.0370	6.52

\* condiciones a las que se determinan:  $T_{\infty} = 760 \text{ }^{\circ}\text{C}$   $Q/A = 40 \text{ Kw/ m}^2$

**Tabla 2.2 Características térmicas generales de algunos polímeros.**

Así, el efecto de la transferencia de calor sobre las láminas para termoformado es:

1. La **CONDUCCIÓN** es el proceso más rápido, la cual consiste en la transferencia de energía en forma de calor por difusión en un medio debido a un gradiente de temperatura, el mecanismo por el cual se realiza es a escala atómica o molecular. Los polímeros tienen una movilidad molecular escasa y tienen muchos espacios libres en su estructura, lo cual los hace malos conductores térmicos en comparación con los metales y aún con la materia orgánica.

El método conocido, para la transformación del plástico, es por medio de la lámina atrapada, la cual se calienta en una plancha porosa de material antiadherente, pasando por los poros aire a presión, obteniendo un calentamiento homogéneo en cualquier zona.

Para el cálculo de la transferencia de calor a través de la lámina se considera que la incidencia es sobre una superficie plana, de estado estable y en una sola dirección, el modelo que rige este comportamiento está dado por la Ley de Fourier:

$$Q/A = -k \Delta T/\Delta x$$

donde Q/A es el flujo de calor por unidad de área, k es el coeficiente de conductividad térmica del material, ΔT es la diferencia de temperaturas y Δx es el espesor de la lámina, y ΔT/Δx es el gradiente de temperaturas.

Como ejemplo tenemos, que si a una lámina de PS de 0.3 cm de espesor, con una conductividad térmica de  $5.8 \times 10^{-4}$  cal/cm / s °C es expuesta a un flujo de calor de 8.8 kW/m<sup>2</sup>, el estado estable de la diferencia de temperatura será de 111 °C.

2. Por CONVECCIÓN, es el proceso más lento en el cual se expone el material con un fluido (aire caliente) a alta temperatura, rigiéndose por la Ley de Newton del enfriamiento:

$$q = hA \Delta T$$

donde h es el coeficiente convectivo de transferencia de calor y ΔT es el gradiente de temperatura entre la superficie de la lámina y el aire caliente. Siendo A el área superficial de la lámina a calentar.

El sistema por convección puede ser un horno o una configuración de resistencias eléctricas, que debe mantener la temperatura de termoformado para el material que se vaya a utilizar, el ciclo es lento y se rige por el calor específico de cada material. Como un segundo ejemplo tenemos que si una lámina de acrílico de 3.1 mm de espesor que tiene 0.35 de calor específico, que se coloca en un horno de aire recirculante a una temperatura de formado de 182 °C, el cual requiere aproximadamente de 12.5 minutos para que el material este a la temperatura de termoformado teniendo aproximadamente un minuto por cada 0.25 mm de espesor. Si se tiene una longitud de onda apropiada a una temperatura entre 177 – 182 °C, se puede alcanzar en 2.1 minutos.

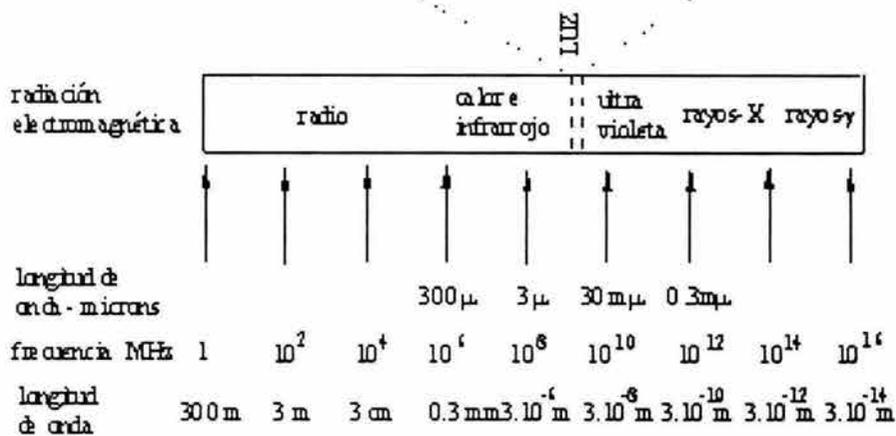


Fig. 2.1 Espectro de longitudes de onda

3. Por **RADIACIÓN**, es la energía electromagnética emitida por la materia a una temperatura finita y concentrada en la región espectral de aproximadamente 0.1 a 100  $\mu\text{m}$ . Para el proceso de termoformado el rango de la longitud de onda por la cual se estará radiando la energía será de 0.3 a 20  $\mu\text{m}$ .

Una manera de calcular la transferencia de calor necesaria para este proceso, es por medio de la radiación emitida por un cuerpo negro. La máxima energía total emitida en todas las longitudes de onda ( $E_b$ ) por cualquier fuente a una temperatura absoluta  $T$  que es emitida por un cuerpo negro, se obtiene de sustituir la ecuación de Planck de la distribución espectral ( $I$ ) en la ecuación de potencia emisiva total hemisférica  $E = \int E_{\lambda}(\lambda) d\lambda$ .

Por lo que la distribución espectral es

$$I_{\lambda, b}(\lambda, T) = \frac{2hc_0^2}{\lambda^5 [\exp(hc_0/\lambda kT) - 1]} \quad (\text{IV})$$

donde  $h = 6.6256 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$  y  $k = 1.3805 \times 10^{-23} \text{ J/K}$  son las constantes universales de Planck y de Boltzmann, respectivamente,  $c_0 = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$  es la velocidad de la luz en el vacío y  $T$  es la temperatura absoluta del cuerpo negro.

Siendo la distribución de Planck la potencia emisiva espectral dada por:

$$E_{\lambda, b}(\lambda, T) = \pi I_{\lambda, b}(\lambda, T). \quad (\text{V})$$

Es decir:

$$E_b = \int_0^{\infty} \frac{2\pi hc_0^2}{\lambda^5 [\exp(hc_0/\lambda kT) - 1]} d\lambda$$

que al integrarse nos queda:

$$E_b = \sigma T^4 \quad (\text{VI})$$

donde  $\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$  es la constante de Stefan-Boltzmann.

La ecuación de la distribución de Planck se grafica para temperaturas seleccionadas, donde las características importantes son:

1. La radiación emitida varía de forma continua con la longitud de onda.
2. La radiación emitida aumenta al aumentar la temperatura.
3. La emisión predominante se localiza en la región infrarroja.

Las fuentes de radiación que actuarán sobre las láminas, pueden ser referidas a esta energía de emisión de cuerpo negro.

La distribución espectral del cuerpo negro adquiere su valor máximo donde la longitud de onda correspondiente  $\lambda_{\max}$  depende de la temperatura, la cual se obtiene derivando la ecuación anterior con respecto a  $\lambda$  e igualando a cero:

$$\lambda_{\max} = C_3/T$$

siendo  $C_3 = 2897.8 \mu\text{m} \cdot \text{K}$ , obtenida experimentalmente con las constantes antes dadas. Teniendo entonces que la energía específica máxima emitida para esta longitud de onda es:

$$E_b, \lambda, \max = C_4 T^5 \quad (\text{VII})$$

siendo  $C_4 = 1.287 \times 10^{-14} \text{ kW/m}^2 \times \text{K}^5 \times \mu\text{m}$

En la siguiente tabla se puede apreciar la radiación de energía máxima para temperaturas de calentamiento en el intervalo de  $250^\circ \text{C}$  a  $1100^\circ \text{C}$  de acuerdo a un cuerpo negro.

Temperatura		Longitud de onda $\mu\text{m}$	Energía específica* (pico de longitud de onda).	
F	$^\circ\text{C}$		$\text{KW/m}^2 \mu\text{m}$	$\text{Btu/ft}^2 \text{ h F}$
400	204	6.06	0.32	102
500	260	5.43	0.55	176
600	316	4.92	0.91	289
700	371	4.50	1.43	454
800	427	4.14	2.16	686
900	482	3.84	3.16	1005
1000	538	3.57	4.52	1435
1100	593	3.34	6.28	2000
1200	649	3.14	8.57	2720
1300	704	2.96	11.50	3650
1400	760	2.80	15.10	4810
1500	816	2.66	19.70	6250
1600	871	2.53	25.20	8020
1700	927	2.41	32.00	10200
1800	982	2.31	40.10	12700
1900	1038	2.21	49.80	15800
2000	1093	2.12	61.30	19500

\*  $E_b, \lambda, \max = C_4 T^5$

**Tabla 2.3 Valores de la radiación de energía máxima a diversas temperaturas.**

Como la mayoría de los plásticos absorben la energía que se radia en un rango específico de longitudes de onda, las temperaturas para el proceso de termoformado por lo tanto deben corresponder a este rango, la siguiente tabla muestra el rango de temperaturas ideal para el termoformado de algunos plásticos:

Material	Longitud de onda ideal ( $\mu\text{m}$ )	Rango de temperatura de la fuente emisora respecto a $\lambda$ .	
		C	F
LDPE	3.2-3.9	470-630	877-1170
HDPE	3.2-3.7	510-630	950-1170
PS	3.2-3.7	510-630	950-1170
PVC	6.4-7.4	120-180	245-355
	1.65-1.8	1340-1480	2440-2700
PMMA	2.2-2.5	885-1045	1625-1910
	1.4-2.2	1045-1800	1910-3265
PA-66	1.9-2.8	765-1250	1405-2285
	3.4-5.0	310-580	585-1075
CELLULOSA (ACETAL)	2.2-3.6	530-1045	990-1910
	5.2-6.0	210-285	440-545

Tabla 2.4 Los plásticos para Termoformado, temperaturas de la fuente emisora y sus longitudes de onda.

Un aspecto importante que se debe conocer de la fuente, con respecto a su comportamiento, es la fracción de energía emitida por un cuerpo negro a una temperatura dada sobre una longitud de onda específica, por ejemplo a 800 °C un cuerpo negro emite un 42% de su energía en un rango de 2.0 a 4.0  $\mu\text{m}$ , estos datos se pueden aproximar de la siguiente figura:

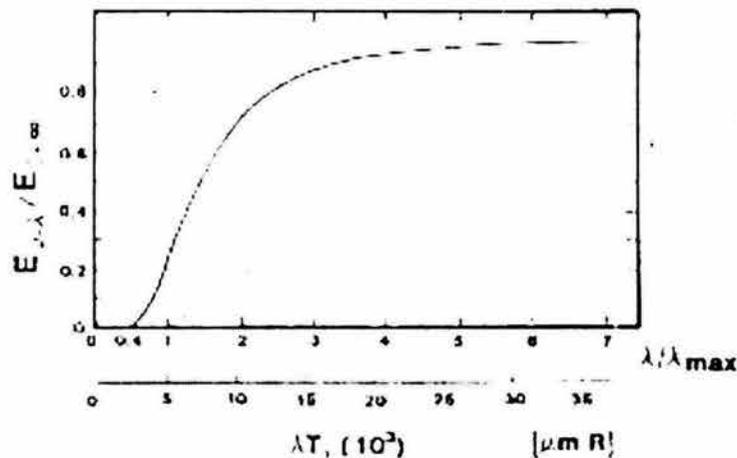


Fig. 2.2 Energía emitida vs longitud de onda.

Se debe tomar en cuenta que un cuerpo real solo toma como referencia al cuerpo negro, por lo tanto se debe considerar una propiedad de la radiación superficial, la emisividad ( $\epsilon$ ), la que se define como la razón de la radiación emitida por la superficie a la radiación emitida por un cuerpo negro a la misma temperatura. Los valores de la emisividad están en el rango de  $0 < \epsilon < 1$ , donde  $\epsilon = 1$  es para el cuerpo negro. Por lo tanto, ahora tenemos que la energía emitida para un cuerpo real está expresada de la siguiente forma:

$$E_r = \epsilon \sigma T^4 \quad \text{(VIII)}$$

Cuando la emisividad depende de la longitud de onda; la energía total emitida se encuentra por la siguiente integración:

$$E_b = \int_0^{\infty} \epsilon(\lambda) \sigma T^4 d\lambda$$

Algunos valores de esta emisividad de la fuente se dan en la tabla 2.5, para materiales que intervienen en el proceso de termoformado:

Material	Temperatura(°C) y longitud de onda pico (µm)				Absorción
	38 9.3	260 5.4	538 3.6	1371 1.8	
Aluminio	0.04	0.05	0.08	0.19	0.26
Pulido	0.11	0.12	0.18	-	-
Oxidado	0.94	0.42	0.60	0.34	-
Adonizado					
Cromo	0.08	0.17	0.26	0.40	-
Pulido					
Acero	0.06	0.08	0.16	0.25	0.45
Pulido	0.63	0.66	0.76	-	-
Fundición, oxidado					
Galvanizado	0.23	-	-	0.42	0.66
Nuevo	0.28	-	-	0.90	0.89
Sucio	0.94	0.97	0.98	-	-
Plato de acero	0.96	-	0.85	-	0.74
Oxido		0.80	-	-	-
Tubo de acero	-				
Oxidado					
Acero inoxidable	0.15	0.18	0.22	-	-
Pulido	0.85	0.85	0.85	-	-
Deteriorado (clima)	0.03	-	-	0.18	-
Filamentos de tungsteno	0.95	-	0.82	0.25	0.27
Papel blanco	0.91	-	-	-	-
Yeso	-	-	-	0.65	-
Acero esmaltado					
Pinturas	0.96	0.98	-	-	0.97-0.99
Laca negro	0.94	0.90	-	-	-
De aceite	0.95	-	0.91	-	0.12-0.26
Blanca (ZnO)	0.96	-	-	-	-
Agua	0.93	-	-	-	-
Madera	0.90	-	-	-	-
Vidrio					

Tabla 2.5 Emisividades de algunos materiales típicos.  
J.J Thorne "Technology of thermoforming"

Como todas las superficies radian energía, entonces la máxima energía absorbida por una lámina plástica es determinada por un balance de energía neta por radiación entre el cuerpo real emisor y el cuerpo negro a calentar (lámina plástica). Entonces tenemos que la transferencia de calor requerida para el proceso de termoformado está dado por la siguiente expresión:

$$Q/A = \sigma F_g (T_h^4 - T_s^4) \quad (\text{IX})$$

donde  $T_h$  es la temperatura de la fuente de radiación y  $T_s$  es la temperatura de la lámina,  $T$  es la temperatura absoluta (K),  $\sigma$  es la constante de Stefan - Boltzmann antes mencionada.  $F_g$  es el factor de corrección para un cuerpo real, donde se consideran las emisividades de la fuente  $\epsilon_h$  y de la lámina plástica  $\epsilon_s$ . Este factor de corrección para fuentes de radiación plana es:

$$F_g = 1 / (1/\epsilon_h + 1/\epsilon_s - 1) \quad (\text{X})$$

Sin embargo, habrá de considerarse, para un cálculo mas preciso, la transferencia de calor necesaria para calentar la lámina en forma convectiva, llegando para nuestro proceso al siguiente resultado:

$$Q/A = h (T_s - T_\infty) + \sigma F_g (T_h^4 - T_s^4) \quad (\text{XI})$$

En la práctica se ha observado que las láminas con espesores de 0.3175 cm (1/8 in) pueden absorber prácticamente toda la radiación infrarroja. Películas delgadas menores que 5 mm no pueden calentarse en ciertas regiones del infrarrojo, como es el caso de las películas poliméricas de fluorocarbono, que llegan a ser transparentes por arriba de  $\lambda = 7.5$  micras.

Al reducir la emisividad se incrementa la temperatura y se puede cambiar la radiación cerca del rango de infrarrojo. Los materiales que obtienen ventaja con este cambio son los que están pigmentados o que poseen densidades altas, debido a que la corta longitud de onda de la radiación penetra y genera un calor profundo en el plástico. Sin embargo, las poliolefinas y los fluorocarbonos absorben menos eficientemente la radiación, así como también, algunas láminas con pigmento blanco.

Ahora bien, cuando la fuente y la lámina son específicas, una porción de la radiación emitida por esta no llega a incidir sobre la lámina, la energía se pierde por el intercambio entre ambas, en el termoformado, el intercambio de energía es máximo en el centro de la lámina y es mínimo en los extremos, este caso es conocido como el efecto del domo de energía, las relaciones entre este efecto, las dimensiones y el espaciamiento entre la fuente y la lámina se ajustan por el factor geométrico  $F$ , el cual usualmente toma valores de 0.7, que es el 70 % de la energía transferida entre ambos elementos, el otro 30% se va hacia todos los alrededores (elementos y ambiente); para este proceso tenemos el siguiente rango:

$$0.818 < F < 0.905.$$

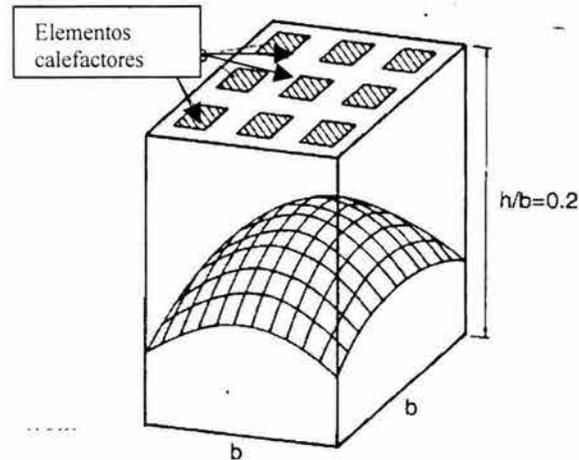


Fig. 2.3 Efecto del domo de energía.

\* J.L. Throne, *Technology of Thermoforming*, Hanser, 1996, pp. 155-159

Por lo tanto la ecuación anterior se modifica quedando finalmente como:

$$Q/A = h (T_s - T_\infty) + \sigma F_g F (T_h^4 - T_s^4) \quad (\text{XII})$$

### 2.2 Distancia entre la lámina y el calentador.

En muchas ocasiones se ha dicho que la distancia entre la lámina plástica y la fuente de calentamiento no es normalmente un factor significativo de diseño; sin embargo, hay que considerar que una corriente de aire entre la lámina y esta fuente de calentamiento es transparente a la energía radiante, pero no al calentamiento producido por la convección. Esta corriente provoca la pérdida de calor hacia los alrededores por parte de ambos elementos. Este tipo de convección es llamado comúnmente “convección de enfriamiento” y que puede calcularse, interviniendo directamente en la eficiencia del sistema de calentamiento.

El aire es calentado por esta convección natural, con un coeficiente de transferencia de calor de  $h = 20 \text{ W/m}^2 \times \text{k}$ . si los calentadores se colocan relativamente cerca de la superficie de la lámina plástica, la columna de aire no puede circular con la suficiente velocidad para disminuir la efectividad del calor radiado durante el proceso. Con distancias en el orden de .3028 m (1 pie) entre calentadores, los vórtices pueden quitarse rápidamente y tener una completa efectividad en remover el calor de ambos elementos (lámina – calentador). La efectividad de la convección de enfriamiento de manera natural se incrementa si el ancho o el largo de la lámina son reducidos proporcionalmente con la distancia entre la lámina y el calentador.

Además, la energía por radiación puede ser absorbida por el vapor de agua y por el  $\text{CO}_2$  que esté presente en el aire a esta distancia.

La efectividad de absorber el calor se incrementa al aumentar esta distancia. Por lo tanto, al incrementar esta distancia, se provocan pérdidas hacia los alrededores afectando al factor geométrico de forma (F). Esta energía que se pierde puede calcularse si la temperatura de los alrededores es conocida, ajustando después la temperatura requerida para calentar la lámina, siendo necesario el uso de instrumentos de medición y de control. Al incrementar los tiempos de ciclo se tiene pérdidas de menos del 5%.

Una manera de conocer un valor aproximado del factor de forma, tomando su relación con la distancia entre la lámina y el calentador, así como el ancho y el largo de la lámina, es por medio de la siguiente gráfica:

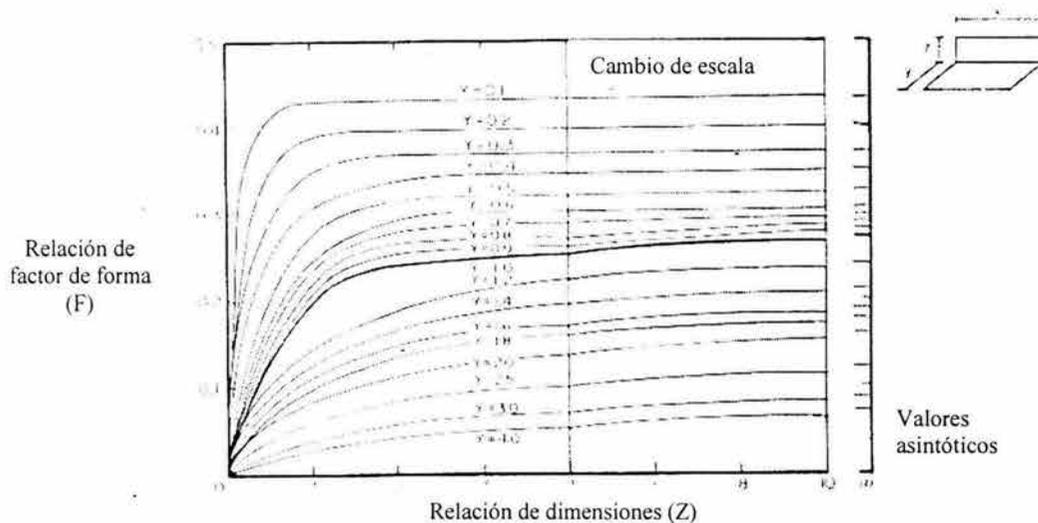


Fig. 2.4 Factor geométrico VS distancia entre lámina y calentador, ancho y largo.

Para apreciar la pérdida de energía que se origina en las orillas de la lámina sujeta al bastidor de la máquina termoformadora, se llega a considerar el factor de forma (antes mencionado) de una instalación. Se considera que el área superficial del calentador es idéntica a la de la lámina plástica. Los parámetros que pueden obtenerse al dividir los lados con la distancia entre el calentador (fuente de radiación) y la lámina ( $M = \text{ancho del calentador} / \text{distancia}$  y  $N = \text{largo del calentador} / \text{distancia}$ ) pueden distinguirse en la siguiente gráfica, donde se lee el valor correspondiente del factor de forma en el eje de las ordenadas.

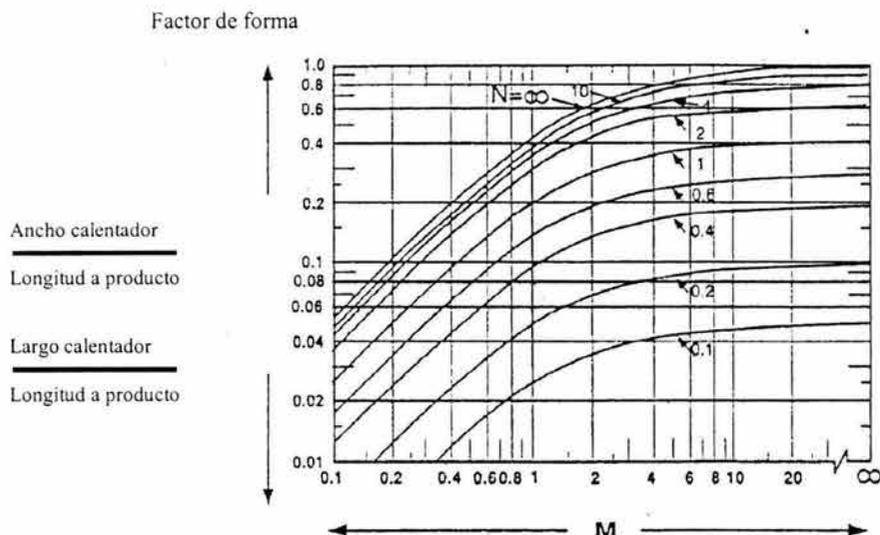


Fig. 2.5 Diagrama factor de forma vs dimensiones.

Este valor indica el porcentaje de radiación que se emite sobre la lámina. La reducción de la distancia entre el calentador y la lámina ayudará a evitar la pérdida de energía. Pero, se debe tener cuidado con la sobreexposición del material, para evitar ahora la degradación de este.

2.3 Fuentes de calentamiento.

Para este proceso de termoformado, como ya se ha analizado, se necesitan fuentes de calor infrarrojas. Algunas de las formas comunes hoy son los calentadores tubulares forrados de metal, tubos de cuarzo, lámparas de cuarzo, paneles de frente catalítico, planos de gas, y emisores de cerámica. Cada fuente tiene su propio conjunto distintivo de características:

	Envoltura De Metal	Tubo de Cuarzo	Lámpara De Cuarzo	Catalítico	Paneles de frente Plano	De cerámica
<b>Eficiencia Radiante</b>	56%	61%	86%	80%	88%	96%
<b>Fuerza Física</b>	Alto	Bajo	Muy Bajo	Alto	Media	Media
<b>Calentamiento Enfriamiento</b>	Lento	Rápido	Muy Rápidamente	Muy Lento	Lento	Lento
<b>Max. Temp.</b>	1400 °F	1600 °F	4000 °F	800 °F	1600 °F	1292 °F
<b>Sensibilidad del Color</b>	Bajo	Bajo	Alto	Bajo	Bajo	Bajo

Tabla 2.6 características de las fuentes de radiación comercial.

Donde el significado de cada característica es:

*Eficiencias Radiante:* La cantidad total de energía infrarroja, concerniente "a un radiador de cuerpo negro", que se emite de la fuente.

*Fuerza Física:* La fuerza física de cada fuente. Un alto grado indica una fuente muy durable que pueda soportar abuso físico tal como caer una llave en la fuente.

*Calentamiento / enfriamiento:* La cantidad de tiempo requerida por la fuente para llegar hasta la temperatura de funcionamiento y para llegar a la temperatura ambiente.

*Temperatura Máxima:* Temperatura de funcionamiento máximo de la fuente.

*Sensibilidad del Color:* Capacidad de una carga típica de absorber la radiación espectral emitida de una fuente basada en el color de la carga (pigmento).

### 2.3.1 Descripción de las fuentes de calentamiento.

1. Calentadores de radiación por gas.- la energía que proporciona el gas es convertida en energía radiante; este gas es quemado de manera controlada en celdas o estructura celulares finas en paneles cerámicos, las estructuras son de honeycomb abiertas en uno de sus lados, por donde se suministra el gas, mezclado con aire. El rango de la radiación emitida, se encuentra en el espectro de longitud de onda infrarroja (5.6 – 10.0  $\mu\text{m}$ ). El beneficio de este tipo de calentadores es su gran ahorro energético.

2. Calentadores eléctricos radiantes.- Estos calentadores funcionan con alambres de alta resistencia, hechos de materiales de aleaciones de níquel – cromo principalmente.

Los distintos niveles de calentamiento varían por sobre exposición, acabado superficial de los elementos y por la distancia entre la lámina y la fuente de calentamiento. Algunas de las características de los elementos más comunes son:

- Resistores eléctricos. Estos están fuera de fase, son peligrosos al operarlos por el riesgo de un choque eléctrico y por la emisión de chispas; además, su eficiencia ofrece una calidad y ajuste muy pobres.
- Calentadores tubulares (Calrod). Estos calentadores están compuestos de un fino alambre delgado de níquel – cromo, generalmente enrollado, el cual está revestido por un tubo de acero y es llenado y cubierto por un material aislante bajo presión. Los calentadores tubulares son muy durables y casi indestructibles, calientan con al menos un 50% de la energía que irradian hacia la lámina plástica. Por medio de reflectores parabólicos se puede aprovechar un porcentaje mayor de dicha energía.

Las siguientes figuras nos muestran la forma, configuración de estos calentadores por radiación:

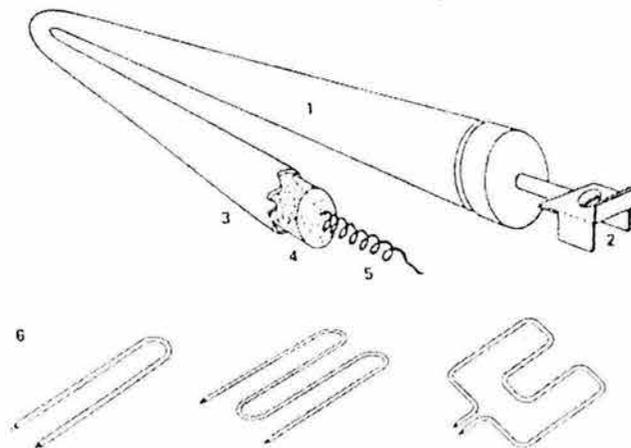


Fig. 2.6 Calentadores eléctricos (Tipo tubular)

1.cuerpo del calentador tubular, 2.conector eléctrico, 3.cubierta de acero, 4.aislante mineral(oxido de magnesio), 5.alambre delgado de nickel – cromo, 6.formas comerciales

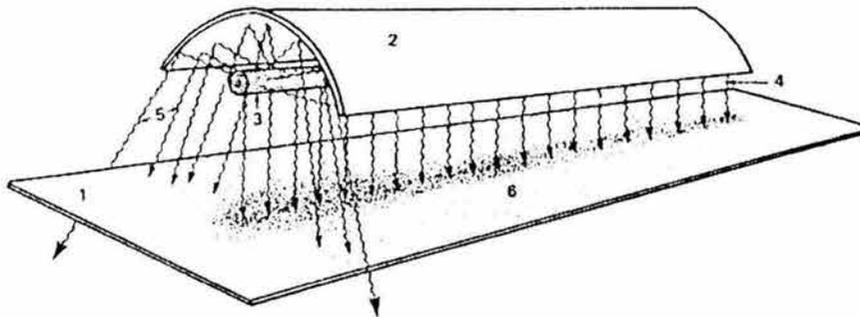
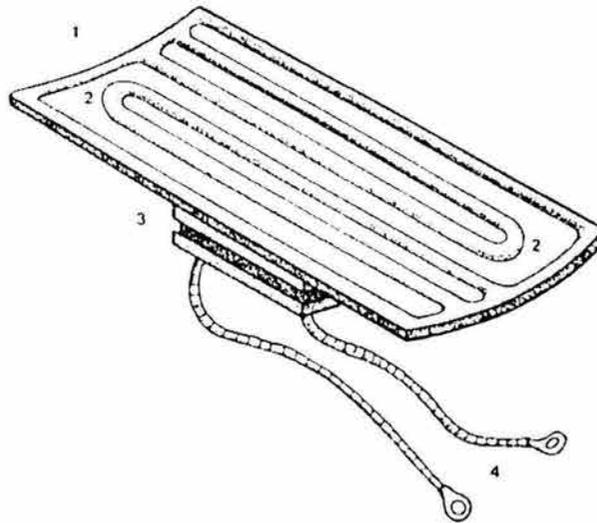


Fig. 2.7 Reflectores térmicos.

1.lámina termoplástica, 2.reflector, 3.calentador tubular, 4.emisión de calor, 5.calor reflejado, 6.distribución de calor.

- Calentadores tipo listón plano. Muy parecidos a los del tipo tubular, sin embargo, la resistencia está colocada en un arreglo en zigzag. Su cuerpo es aproximadamente de 2.54 a 3.81 cm (1 a 1 ½ in) de ancho y con espesores de 0.635 a 0.9525 cm (¼ a 3/8 in).
- Calentadores cerámicos.- su costo es muy alto en comparación con los ya mencionados, pero el control y su programación de la temperatura aportan mayores beneficios al proceso de termoformado. Estos son fabricados con finos alambres enrollados y cubiertos por un material cerámico barnizado.



**Fig. 2.8 Calentadores cerámicos.**  
 1.cuerpo cerámico curvado, 2.resistencia incrustada,  
 3.pieza de montaje, 4.cable de conexión.

- Calentadores de vidrio Pyrex. Son hechos con vidrio templado de borosilicato, cubiertos por su revés con una película electro-conductora. Poseen una gran efectividad al emitir el calor de forma uniforme, tienen una mínima fluctuación del calor y son muy frágiles. Se pueden conseguir en tamaños de 30.48 a 60.96 cm (12 a 24 in) o en paneles de 15.24 a 76.2 cm (6 a 30 in) y su calor no excede los 348.9 °C (660°F).
- Calentadores de cuarzo. La eficiencia de estos es muy alta, por sí mismos son buenos aislantes eléctricos con una gran estabilidad en la temperatura y de retención de calor. Su eficiencia depende de su rápida respuesta al emitir energía o al dejar de hacerlo.

### 2.3.2 Eficiencia de las fuentes de calentamiento.

La eficiencia de las fuentes de radiación nos ayuda a saber la fracción que realmente se transforma en calor, de las fuentes más usadas en el termoformado, podemos hablar de las resistencias cerámicas, que a altas temperaturas nos brindan los siguientes rangos, de 316°C a 760 °C se tienen las eficiencias de 50 a 100 % respectivamente, valores muy similares a las del tipo tubular y de espiral. Por combustión de gas a 900 °C se tiene una eficiencia del 84%, en la tabla siguiente se mostrarán algunos de los valores de eficiencia neta, así como algunos datos complementarios para estas fuentes:

Fuente de radiación	Energía máxima	Temperatura máxima	Energía de cuerpo negro	Máxima Eficiencia %	Respuesta al calor.	Tiempo enfriamiento
	k W/ m <sup>2</sup>	°C	k W/ m <sup>2</sup>			
Bulbos:						
R-40 reflector	16.1	2200	2140	< 1	3 s	10 s
G-30 bulbo	6.4	2200	2140	< 1	3 s	10 s
Proyector Cerámico	1.4	870	97.3	1.4	5 – 10 min	5 – 10 min
Lámpara de Cuarzo	310.0	2200	2140	14.5	3 s	10 s
Tubular:						
Metálica						
Envainada	46.5	870	97.3	48	5 min	5 min
Cuarzo	77.5	980	141	55	1 min	20 s
Carátula:						
Cuarzo	58.1	760	64.7	90	2 – 4 min	2 – 4 min
Panel:						
Revestido de vidrio	14.4	315	6.8	100	5 min	5 min
Fibra de Vidrio	12.9	595	32.0	40	5 min	5 min
Metálica						
Envainada	31.0	595	32.0	97	5 min	5 min
Cerámica	31.0	760	64.7	48	5 – 10 min	5 – 10 min
Cuarzo	62.0	980	141	44	5 – 20 min	5 – 20 min
Hoja						
Expuesta	59.2	815	79.7	74	4 s	10 s
Rollo						
Expuesto	85.2	815	79.7	100	3 min	3 min
Gas IR-choque						
Plato de Cerámica	1890	1260	314	5 – 35	2 – 3 min	2 – 3 min
Gas IR						
Superficie Encendida						
Plato de Cerámica	252	930	117.7	20 – 55	2 – 3 min	2 – 3 min
Pantalla	126	870	97.3	20 – 55	1 min	1 min
Fibra Cerámica	148	900	107.1	35 – 65	4 – 8 min	4 – 8 min
Catalítico	15.8	370	9.8		30 min	5 min

Tabla 2.7 Eficiencias de fuentes de energía por radiación

Para la mayoría de las fuentes de radiación tenemos en promedio que se pierde de un 20 a un 30 % de la energía emitida en el ambiente y las superficies de los alrededores. La siguiente tabla muestra los porcentajes de energía convertida (energía de la fuente a energía térmica) de algunas fuentes para varios tipos de polímeros (láminas plásticas), a ciertas condiciones de operación:

Material	Tipo de fuente de radiación			
	Cerámica	Varilla metálica	Cuarzo	
	510 °C 4.0 $\mu\text{m}$	550 °C 3.8 $\mu\text{m}$	680 °C 3.0 $\mu\text{m}$	760 °C 2.8 $\mu\text{m}$
LDPE	13 %	15 %	17 %	20%
HDPE	13	15	17	20
PS	13	15	17	20
PVC	5	5	22	25
PMMA	0	2	50	65
PA-6	30	28	24	28
Celulosa (acetal)	18	28	48	56
Para una rango de termoformado de 1.4 a 3.6 $\mu\text{m}$	28	33	70	77

Tabla 2.8 Eficiencias para calentadores por radiación para distintos materiales.

Para las fuentes de radiación de cerámica tenemos que estas se fabrican de tres formas: cóncavo, plano, y cónico. Estos estilos de la cara del emisor darán lugar a los modelos radiantes específicos de la emisión según se muestra en la Fig.2.9. Nota: La radiación infrarroja se emite perpendicularmente a la superficie de la emisión.

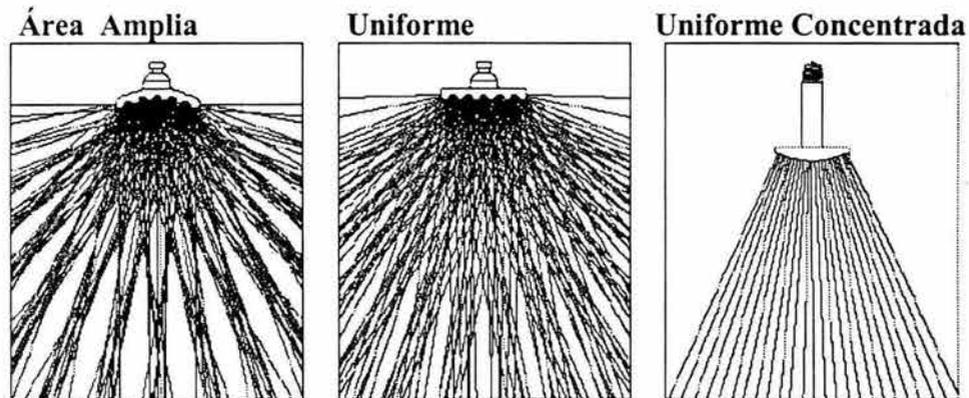


Fig. 2.9 Modelos radiantes de la emisión de emisores de cerámica

En el modelo *Concentrado*: La superficie cóncava emitirá "un modelo" radiante concentrado que sea altamente eficaz cuando se desea la calefacción de la zona tan buena como la calefacción radiante en general. En el modelo *Uniforme*: La superficie plana producirá "un modelo" uniforme para la calefacción en una proximidad cercana entre el emisor y la lámina que es calentada. Y en el *Área Amplia*: La dimensión de una variable convexa emite "un modelo ancho" del área que sea deseable en la calefacción de la comodidad u otras aplicaciones que requiere un modelo radiante disperso de la emisión.

#### 2.4 Tiempo de calentamiento del material.

Para estimar el tiempo de calentamiento, se consideran las distintas variables del material (propiedades y dimensiones), pudiendo hacer una comparación entre materiales de acuerdo a sus antecedentes (experimentales en la mayoría de los casos), para el tipo de calibre o de espesores de las láminas tenemos que el calentamiento se ve afectado de la manera indicada en la siguiente tabla.

Calibre	Delgado	Grueso
Sistema de calentamiento	Radiación Conducción	Convección
Ciclos	Cortos	Largos
Gradiente de Temperatura	Uniforme entre superficie y centro	Superficie mas caliente que el centro
Probabilidad de Degradación	Media	Alta
Eficiencia de Transmisión Térmica	Rápida	Lenta

**Tabla 2.9 Efecto del calibre de la lámina sobre el calentamiento.**

Tenemos entonces, que el tiempo de calentamiento se ve afectado si se modifican, principalmente, los requerimientos energéticos del material para alcanzar la temperatura de formado, la capacidad calorífica, la densidad y el calibre.

Una aproximación confiable para obtener el tiempo de calentamiento del material, es por medio de la siguiente expresión:

$$t = Cc \times \rho \times \text{calibre} / Q_{\text{calentador}} \quad (\text{XIII})$$

Tiempo = Capacidad calorífica x Densidad x Calibre / Calor emitido por el calentador.

También, por medio de una relación matemática entre el tiempo conocido de otro material y sus propiedades, se puede determinar el tiempo de calentamiento de aquél que se vaya a termoformar.

$$Rt = (Cc \times \rho \times \text{calibre})_{t_{\text{desconocido}}} / (Cc \times \rho \times \text{calibre})_{t_{\text{conocido}}} \quad (\text{XIV})$$

teniendo entonces que el tiempo de calentamiento es:

$$t = Rt \times t_{\text{conocido}} \quad (\text{XV})$$

Considerando que el calentamiento se hace de forma uniforme sobre toda la superficie y que el tiempo determinado de calentamiento es el necesario para que la masa plástica alcance la temperatura de formado, podemos asegurar que el termoformado puede hacerse en ese tiempo, sólo ajustando (de manera experimental) si se presentan defectos de calidad o de propiedades mecánicas, tratando de evitar la degradación del material por permanecer más tiempo del ya calculado para el calentamiento por medio de las expresiones antes mencionadas. En la siguiente tabla se muestran los rangos en los que se encuentran algunos parámetros de proceso para diversos materiales plásticos.

Material	Longitud de onda ideal $\lambda$ $\mu\text{m}$	Rango de temperatura de la fuente emisora respecto a $\lambda$ .	Q/A energía máxima	Tiempo de exposición Para un calibre de 0.5mm	Tiempo de exposición Para un calibre de 2.0mm
		$^{\circ}\text{C}$	KW/m <sup>2</sup>	(s)	(s)
HDPE	3.2-3.7	510-630	20.595	13.6	54.65
PS	3.2-3.7	510-630	20.647	10.0	40.00
	6.4-7.4	120-180	14.503	7.02	28.10
PVC	1.65-1.8	1340-1480	107.623	10.21	40.84
	2.2-2.5	885-1045	44.228	4.19	16.78
PMMA	1.4-2.2	1045-1800	196.747	18.73	74.93
PA-66	1.9-2.8	765-1250	68.469	14.04	56.17
ACETAL	3.4-5.0	310-580	20.612	4.23	16.91
	5.2-6.0	210-285	15.128		

Tabla 2.10 Parámetros de proceso para el termoformado de algunos materiales

### 2.5 Estirado

El estiramiento es una deformación del material, su extensión depende de la temperatura a la que se expone la lámina, del nivel aplicado de presión, del nivel molecular y de la orientación, y en general del comportamiento esfuerzo-deformación del material.

Alrededor de la temperatura de transición vítrea ( $t_g$ ), la mayoría de los polímeros amorfos tienen suficiente movilidad de deformación bajo carga. Si un material fluye, este puede permanecer deformado después de quitar la carga. Para los polímeros cristalinos, y alrededor de  $t_g$ , las cadenas que no están envueltas en dicha estructura cristalina, pueden deformarse, dependiendo del nivel de deformación y del grado de cristalinidad. Cuando la lámina es preestirada con aire a presión antes del formado, se hace un estiramiento biaxial donde el material está experimentando una deformación libre; piezas como tragaluces y burbujas para empaques tienen esta propiedad. Cuando la lámina es mecánicamente

estirada (plug-assist, web-breakers) o cuando ésta toca la superficie del molde casi inmediatamente después de iniciar el estiramiento, se manifiesta un estiramiento uniaxial provocando una deformación.

### 2.5.1 Resistencia en caliente.

El esfuerzo a la tracción y el módulo elástico decrecen mientras la elongación crece cuando la temperatura incrementa. La prueba a la tracción, su método y análisis, nos ayuda a medir el esfuerzo de los polímeros en estado sólido. Y en condiciones ambientales, para una prueba de tracción uniaxial con probetas tipo moño, a una temperatura establecida, el módulo de Young falla bajo carga en la elongación inicial. De esta prueba, vale la pena tomar en cuenta la velocidad de deformación, ya que durante el proceso de termoformado se puede ver su efecto sobre la optimización de éste.

La norma utilizada para láminas plásticas, es la ANSI / ASTM D638-77a donde los especímenes a utilizar tomados de láminas, platos o plástico moldeado, se clasifican en plásticos rígidos y semirígidos, los cuales están determinados en la norma que se anexa en el apéndice de esta tesis.

En pruebas de tracción, con una velocidad de aplicación de fuerza de aproximadamente 25.4 (cm/min) los resultados de cedencia son de 0.3 a 0.6 ( $s^{-1}$ ), un buen control de estas pruebas de tracción, con temperatura, reporta mejores datos sobre el material. Por lo que el desgarramiento que puede sufrir el material al estar expuesto a temperaturas elevadas, deberá evitarse. Por ejemplo, los polímeros amorfos como el ABS, presentan menor tendencia al desgarre que algunos cristalinos (HDPE, PP), aún cuando estos últimos están reforzados; pero el refuerzo de los polímeros cristalinos abre la oportunidad de utilizarlos en el termoformado, siendo candidatos los que pueden formarse a temperaturas entre los 10 ( $^{\circ}C$ ) y su temperatura de fusión.

A elevadas temperaturas, el estiramiento uniaxial no se registra en la región cuello de botella formado en la muestra y el agrietamiento se presenta en el mango de ésta: la relajación de esfuerzos y el sobrecalentamiento del material que pueden ocurrir durante la prueba térmica, pueden causar que los valores arrojados de la elongación inicial sean dudosos.

La prueba uniaxial de fluencia en caliente “hot creep” es otra prueba muy utilizada para evaluar los materiales utilizados en el proceso de termoformado. Se hace con un arreglo de cargas aplicadas para monitorear los valores de los esfuerzos y del cambio de deformación. La muestra es colocada en un horno a alta temperatura sin ninguna carga aplicada, para después aplicar una carga grande instantáneamente, se hace la medición, con una cámara de alta velocidad, el tiempo depende de la elongación a la cual el material cede, los valores obtenidos por este tipo de prueba son aproximadamente de 5 ( $s^{-1}$ ).

Estos dos métodos mencionados (fluencia en caliente y tracción en caliente) brindan muy buenos resultados del material, sin embargo, no pueden predecir las condiciones del proceso necesarias para obtener una correcta réplica.

Estudios recientes se han enfocado en el desarrollo de una prueba de laboratorio para un estiramiento biaxial más cercano a la realidad. Se pretende encontrar y definir un parámetro de diseño  $\phi(T)$  más útil, para evaluar el comportamiento del material expuesto a las condiciones normales de estiramiento durante el proceso.

Para entender y definir este parámetro se requiere de un análisis previo del material, considerado como un fluido o como un sólido, de acuerdo a las condiciones de operación a las que se encuentre sujeto.

### 2.6 Degradación del material plástico

El sobrecalentamiento puede provocar la degradación del material; sin embargo, se deben cuidar los distintos tipos de degradación, a continuación se dará una breve descripción de cada uno de los mecanismos de degradación que envuelven a este proceso<sup>(k)</sup>:

Degradación Mecánica: esta degradación se origina por los procesos de maquinado y los del tipo ultrasónico, el primero se origina dentro del comportamiento visco – elástico de los polímeros, principalmente se da en regiones donde la temperatura juega un papel importante en la estructura molecular de estos materiales, en tanto que en el segundo, se produce un rompimiento de las cadenas poliméricas por cavitación, esta cavitación ocurre bajo la influencia del ultrasonido, donde se forman burbujas y se colapsan en el material creando ondas de choque que originan dicha ruptura.

Para comprender la forma en que se origina la degradación mecánica, es importante analizar dos tipos de temperaturas que influyen en los materiales, **la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) y la temperatura de fusión ( $T_m$ )<sup>(l)</sup>.**

A temperaturas altas, los polímeros se vuelven líquidos muy viscosos en los que las cadenas están constantemente en movimiento cambiando su forma y deslizándose unas sobre las otras. A temperaturas muy bajas, el mismo polímero sería un sólido duro, rígido y frágil. El polímero puede solidificarse formando un sólido amorfo o uno cristalino. Como se sabe los polímeros con fuertes irregularidades en su estructura tienden a formar sólidos amorfos y los polímeros con cadenas muy simétricas tienden a cristalizar, por lo menos parcialmente.

Un polímero completamente amorfo, a temperaturas altas está en forma de un líquido viscoso, y al enfriarlo, se vuelve cada vez más elástico hasta que llega a la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ), se convierte en un sólido duro, rígido y frágil. Lo que sucede es que, conforme disminuye la temperatura, el polímero se contrae porque las cadenas se mueven menos y se atraen más. Dado que va disminuyendo el volumen libre, es decir, los espacios entre las moléculas, los segmentos de las cadenas tienen cada vez menos lugar para girar, hasta que al llegar a  $T_g$ , dejan de hacerlo, el material se pone rígido y en esas condiciones se vuelve vítreo, es decir frágil.

El estado vítreo lo alcanzan diferentes polímeros a diferentes temperaturas. Los que sean más flexibles, con menos grupos voluminosos o con heteroátomos en sus cadenas, podrán

girar o permanecer flexibles a temperaturas menores que los otros. Por ejemplo, los silicones, el polietileno y el hule natural tienen temperaturas de transición vítrea de -123, -120 y -73 °C (-189.4, -184 y -99.4) respectivamente. En cambio, polímeros con grupos grandes o grupos muy polares o polarizables, tienen de por sí tan baja movilidad que son vítreos a temperatura ambiente y para reblandecerlos se requiere de altas temperaturas.

Los polímeros semicristalinos tienen dos transiciones: una, cuando cristaliza el polímero al enfriarlo ( $T_m$ ) y la otra cuando el material elástico resultante se vuelve vítreo ( $T_g$ ). Entre  $T_m$  y  $T_g$ , los cristalitos están embebidos en una matriz más o menos elástica y el material es correoso, pero abajo de  $T_g$  los cristales están dispersos en una matriz frágil. Las propiedades mecánicas de los polímeros también cambian con la temperatura y en la gráfica del módulo de elasticidad con la temperatura se aprecian las mismas transiciones.

Abajo de  $T_g$ , el material es un sólido vítreo de gran rigidez, que se manifiesta por altos módulos que generalmente alcanzan los 106 psi (7.31MPa). La única deformación posible se debe al estiramiento y doblamiento de los enlaces covalentes que unen a los átomos en la cadena, y al estiramiento de los enlaces intermoleculares. A temperaturas superiores a  $T_g$ , la deformación es más extensa y más dependiente del tiempo, porque las moléculas ya tienen mayor libertad y cambian continuamente su forma y hasta cierto punto su posición. La aplicación del esfuerzo tiende a orientar a las moléculas en favor de configuraciones existentes. Si la temperatura es mayor, pero muy cercana a  $T_g$ , la deformación es prácticamente reversible. Entre  $T_g$  y  $T_m$ , el material es huloso porque las cadenas están enmarañadas y eso dificulta su movimiento. A temperaturas cercanas a  $T_m$  y mayores, las cadenas poliméricas ya se deslizan y se separan causando flujo viscoso irreversible. El material se comporta como un líquido muy viscoso.

Un polímero parcialmente cristalino, generalmente tiene mayor resistencia mecánica que el mismo material con estructura amorfa. La mayor resistencia o mayor módulo se debe al gran número y espaciamiento regular de los espacios intermoleculares en las estructuras cristalinas. En los polímeros amorfos, el número de estas interacciones es menor y su espaciamiento es errático, así que al aplicarles esfuerzos, muchas secciones del polímero se extienden o deforman libremente.

La velocidad de cristalización de los polímeros depende de factores cinéticos que afectan la capacidad de los segmentos de cadena, para acomodarse en sus posiciones dentro de la red cristalina. Esos factores son:

- a. Flexibilidad de las moléculas.
- b. Condiciones de la cristalización.

a. Flexibilidad de las moléculas.

Para que un polímero cristalice, sus moléculas deben tener suficiente elasticidad, es decir, la movilidad necesaria para colocarse en posiciones precisas durante el proceso de cristalización. Uno de los polímeros con cadenas más flexibles es el polietileno, cuyos segmentos giran fácilmente y eso explica la gran tendencia a cristalizar. Para apreciar esto, usaremos una proyección en la que imaginamos ver un segmento de dos carbonos, a lo largo del eje mayor de la cadena, cuando los átomos de carbono giran, llegan a quedar eclipsados y en esa posición, la repulsión entre ellos es máxima. Cuanto mayor es el

tamaño de los átomos o grupos químicos y mayor es su polaridad, más fuerte es la repulsión, más se dificulta el giro y menos flexible es la molécula. Cuando la estructura polimérica esta compuesta por carbonos, y por lo general, el hidrógeno es el que se encuentra presente, se dificulta el giro y se hace menos flexible la molécula. En cambio, en el policloruro de vinilo, uno de los sustituyentes es cloro, átomo de gran tamaño y alta polaridad. La resistencia al giro de los segmentos es muy grande, y el PVC es un polímero rígido con grado de cristalinidad que rara vez sobrepasa el 20 %. Las estructuras químicas que influyen sobre las cadenas poliméricas son:

- Enlaces dobles
- Grupos aromáticos
- Heteroátomos en el esqueleto
- Grupos alquílicos.

b. Condiciones de la recristalización.

El efecto de la temperatura sobre la cristalización de los polímeros es conflictivo. Por una parte, se requieren temperaturas altas para impartir a las moléculas poliméricas suficiente energía cinética (movilidad) y que puedan acomodarse en la red cristalina. Pero sólo a bajas temperaturas van a permanecer en forma estable en los cristales. El balance entre esas dos condiciones produce una velocidad máxima de cristalización a una temperatura intermedia. Existen dos factores estructurales que favorecen la cristalización en los polímeros. La regularidad de la estructura molecular hace posible que las moléculas se acomoden en una red cristalina. La polaridad de las moléculas aumenta la atracción entre cadenas adyacentes y, en consecuencia, la atracción que tiende a colocarlas ordenadamente en el cristal y mantenerlas firmemente en él.

Degradación Térmica: Se debe al rompimiento de los enlaces químicos bajo la influencia de calor, que es el resultado del incremento en los enlaces de disociaciones de energía. Los materiales poliméricos son altamente sensibles al calor debido a la fuerza limite de los enlaces covalentes que forman su estructura. El rompimiento puede ocurrir de manera aleatoria en las cadenas debido a una propagación de la reacción degradante.

Tanto la degradación de tipo mecánico, como la del tipo térmico, deberán tomarse en cuenta para el diseño de la máquina, por ser los elementos (la sujeción, el vacío y el calentamiento) principales para la transformación de la lámina.

### 2.7 Estimación de esfuerzos.

A las temperaturas de formado, los polímeros son incompresibles y su elasticidad es dependiente del tiempo. Cuando se aplica una carga baja por tiempo prolongado, los polímeros tiene propiedades semejantes a los fluidos, estos fluyen o se deslizan. A niveles de carga discontinuos, exhiben defectos como la fragilidad o doblamiento como los sólidos. El proceso de termoformado se considera como un proceso rápido, con altas deformaciones. El comportamiento del esfuerzo de tensión se puede escribir de la siguiente manera:

$$\sigma = f(\epsilon, \epsilon^*) \quad \text{(XVI)}$$

$\sigma$  es el esfuerzo aplicado (Mpa),  $\epsilon$  es la deformación real por unidad de longitud, y  $\epsilon^*$  es la razón de cambio de deformación real ( $\text{sec}^{-1}$ ). Esta interrelación es sensible a la temperatura. Para los sólidos puramente elásticos en extensión uniaxial, el esfuerzo es proporcional a la deformación, siendo esta proporcionalidad el módulo de elasticidad (Young).

$$\sigma = E \epsilon \quad (\text{XVII})$$

para el estiramiento biaxial

$$\sigma = E \epsilon_i / (1-\nu) \quad (\text{XVIII})$$

$\nu$  es la relación de Poisson,  $i$  es la dirección ( $i = 1, 2$ ). Si se considera el plástico como un fluido puramente Newtoniano, el esfuerzo es proporcional únicamente con la razón de cambio de la deformación, por lo que para el estiramiento uniaxial tenemos:

$$\sigma = \eta_e (\epsilon^*) \epsilon^* \quad (\text{XIX})$$

donde  $\eta_e (\epsilon^*)$  es la viscosidad elongacional del fluido. Para un fluido independiente de este cambio de deformación, la elongación uniaxial también conocida como viscosidad de Trouton es 1/3 de la viscosidad de corte Newtoniano.

$$\eta_{\text{Newt}} = 3 \eta_{\text{trout}}$$

y para el estiramiento uniforme biaxial, la viscosidad de Trouton es 1/6 de la viscosidad de corte Newtoniana.

$$\eta_{\text{Newt}} = 6 \eta_{\text{trout}}$$

La elasticidad natural dependiente del tiempo de los polímeros en el proceso de termoformado, puede entenderse en términos del comportamiento de los sólidos y de los fluidos. La dependencia del tiempo puede incluirse en un típico análisis de esfuerzo-deformación de un sólido o de modelos reológicos convencionales del esfuerzo-cambio de deformación que puede ser alterados para incluir comportamientos semejantes al de los sólidos con altos cambios de deformación. Ambos métodos simplifican condiciones de casos generales de los análisis mecánicos viscoelásticos. La mayoría de los métodos que determinan la deformación y su razón de cambio de deformación, responden a la aplicación de esfuerzos (al estirar) incluyendo reometría extensional, inflación biaxial o de burbujas en tubos y láminas, estiramiento biaxial en soplado y pruebas de tracción o deslizamiento. De estas pruebas, la prueba de tracción nos brinda una mejor información del material expuesto a condiciones de carga pequeñas y de temperaturas constantes.

A temperatura ambiente, muchos polímeros siguen un comportamiento cercano al ideal de esfuerzo-deformación-ductilidad de un material sometido a una prueba de tracción, respondiendo al modelo siguiente:

$$\sigma = \sigma_0 \exp(m\epsilon) \quad (\text{XX})$$

$\sigma$  es el esfuerzo a conocer,  $\sigma_0$  es el esfuerzo inicial y  $m$  es el factor de ductilidad. Si el material es idealmente, dúctil  $m \approx 1$ .

S. Bahadur (en Strain Hardening Equation and the Prediction of Tensile strength of Rolled Polymers), ha reportado valores de  $0.92 < m < 1.6$  para polímeros con niveles de cambio de deformación de menos de  $0.0333 \text{ s}^{-1}$ . Para altos niveles de carga y de temperatura los rangos en tracción de la medición son muy altos y las condiciones de error causan dificultades para interpretar los datos. Se puede añadir al modelo de tracción o deslizamiento el comportamiento de dependencia del tiempo con la siguiente expresión

$$\sigma = \sigma_0 f(\epsilon) g(\theta) \quad (\text{XXI})$$

donde  $\theta$  es la viscosidad extensional.

Para polímeros amorfos como el PMMA o el HIPS a temperaturas normales de formado, el modelo ideal elástico es:

$$\sigma = \sigma_0 \epsilon^m \theta^n \quad (\text{XXII})$$

donde el HIPS presenta un pequeño comportamiento dependiente del tiempo con  $n = 1$ . Del otro lado, el ABS/PVC y el PVC exhiben un comportamiento esfuerzo-deformación a temperaturas de proceso. Si el material se deforma uniformemente durante el estiramiento uniaxial, la resistencia a la tracción puede obtenerse de:

$$T^* = \sigma_0 \exp[(m-1) \epsilon_f] \quad (\text{XXIII})$$

donde  $\epsilon_f$  es el esfuerzo real a la fractura. Si  $m = 1$  entonces  $T^* = \sigma_0$ .

La resistencia a la tensión de un polímero decrece con la temperatura. Por lo tanto, a temperaturas de formado normales, la resistencia a la tracción para estos polímeros son alrededor de 0.07 a 0.7 MPa (10 a 100 psi).

Desde que la temperatura de formado de la lámina esta alrededor de  $T_g$  los materiales amorfos pueden considerarse como fluidos. Por lo que el comportamiento bajo carga puede considerarse en términos de la viscosidad elongacional, la cual en estado isotérmico se incrementará con el tiempo.

A muy bajos cambios de deformación tenemos que  $\eta_e = \theta^n$ , donde  $n < 1$ . Para las oleafinas, la viscosidad elongacional de manera biaxial a temperaturas de formado y muy bajos cambios en la deformación, es inversamente proporcional a este cambio de deformación ( $0.000015 - 0.006 \text{ s}^{-1}$ ). Al incrementarse el cambio de deformación en tiempos más cortos, la viscosidad aparente varía asintóticamente.

El comportamiento del estiramiento de la lámina se observa mejor en términos de las magnitudes relativas de los tiempos para el proceso y la memoria del material. Para entender esto, consideremos un fluido simple de "Maxwell" que consiste en un resorte ideal elástico y un amortiguador viscoso puestos en serie.

Si el fluido es forzado a cierta magnitud, el esfuerzo resultante decaerá. Esto puede representarse por:

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-\theta/\theta_1) \quad (\text{XXIV})$$

donde  $\sigma_0$  es el esfuerzo inicial y  $\theta_1 = \mu / G$ ,  $\mu$  es la viscosidad (Newtoniana) del amortiguador y  $G$  es el módulo de elasticidad del resorte; y  $\theta_1$  es la relajación o el tiempo de retardo del fluido.(Modelo ideal viscoelástico).

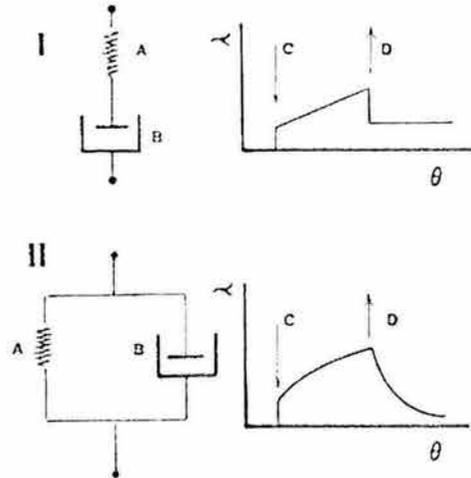


Fig 2.10 Modelo viscoelástico dependiente del tiempo

A resorte, B elemento viscoso, C aplicación del esfuerzo, D liberación de esfuerzo,  $\lambda$  esfuerzo,  $\theta$  tiempo.

Para un fluido simple de Maxwell a bajos cambios de deformación ( $\epsilon^* \cong 0$ ) la ecuación del tensor de esfuerzos-deformación-cambio de deformación-elástico de un líquido, se reduce a una relación entre el esfuerzo y la dependencia al desplazamiento (tracción) donde este último es:

$$J = J_0 (1 - \exp(-\theta/\theta_1)) \tag{XXV}$$

primer tiempo de retardación

entonces  $\sigma = 6 G_1 \epsilon_0^* [1 - \exp(-\theta/\theta_1)] \tag{XXVI}$

para tiempos largos  $\theta \rightarrow \infty$   $\sigma = 6 G_1 \epsilon_0^* \theta_1 \equiv \mu \epsilon_0^*$

Para grandes cambios de deformación ( $\epsilon_0^* \rightarrow \alpha$ ) el tensor es:

$$\sigma = G_1 [(1 + \Delta/2) \exp(2\epsilon_0^* \theta) - (\Delta/2) \exp(4\epsilon_0^* \theta)] \tag{XXVII}$$

$\Delta$  es proporcional a la relación de la diferencia del segundo esfuerzo con el primer esfuerzo normal del polímero, y es negativo. Entonces la predicción del modelo que bajo cambio de deformación constante, el esfuerzo incrementa exponencialmente con el tiempo, es decir, que a altos cambios de deformación, la variación en el incremento del esfuerzo es más grande que la variación del esfuerzo de relajación interno del material. El material se comporta como si fuera un sólido elástico.

Para una velocidad constante de estiramiento, el cambio de deformación disminuye con el tiempo, de esta manera se estabiliza el rápido crecimiento inicial del esfuerzo.

Si la temperatura dependiente de los tiempos de relajación para un polímero cualquiera no se conoce, un valor aproximado a cualquier temperatura estará dado por:

$$\theta_1(T) = \eta_0(T) / G(T) \quad (\text{XXVIII})$$

$\eta_0$  es el valor inicial de la viscosidad al corte y  $G$  es el módulo de tracción (valor de la caída inicial de la curva esfuerzo-deformación). Si el tiempo de proceso es menor que  $\theta_1$  (aprox. 10% menos), el material se comporta como una membrana elástica, y si el tiempo es 10 veces mayor, el material probablemente se comporte como un fluido.

### 2.8 Comportamiento mecánico de un sólido.

En el proceso de termoformado, comúnmente se tiene que, una lámina de PP de 1.25 mm (0.060 in) de espesor se estira arriba de  $26.8 \text{ sec}^{-1}$  y una lámina de HIPS de 2.54 mm (0.1 in) de espesor tiene un valor aproximado de  $2.4 \text{ sec}^{-1}$ . Para este tipo de valores muchos de los polímeros responden como si fueran sólidos elásticos. A continuación se analizará este comportamiento para conformar mejor al material durante el proceso.

Los esfuerzos principales en sólidos elásticos se definen en términos de una función de energía de esfuerzo  $W$ :

$$\sigma_i = dW / d\lambda_i \quad (\text{XXIX})$$

$\lambda_i$  es la relación de extensión en la dirección  $i = 1, 2$ ,  $dW$  es el incremento entre el trabajo realizado cuando el material es estirado en un incremento entre  $d\lambda_i$  y el esfuerzo  $\sigma$ .

Generalmente esta función se escribe en términos de los tres invariantes principales del tensor de esfuerzos de Cauchy.

$$\begin{aligned} W &= W(I, II, III) \\ I &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \\ II &= 1/\lambda_1^2 + 1/\lambda_2^2 + 1/\lambda_3^2 \\ III &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \end{aligned}$$

La expresión de energía esfuerzo-deformación puede escribirse como:

$$\sigma_i = (dW / dI) (dI / d\lambda_i) + (dW / dII) (dII / d\lambda_i) + (dW / dIII) (dIII / d\lambda_i)$$

para un sólido incompresible  $\lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 = 1$ . Entonces  $III = 1$  y los últimos términos son nulos.

Para el estiramiento uniaxial  $\lambda_1 = \lambda$ ,  $\lambda_2 = \lambda_3 = 1/\lambda^{1/2}$

$$\sigma \lambda = (\lambda^2 - 1/\lambda) [2(dW / dII) + (2/\lambda)(dW / dI)] \quad (\text{XXX})$$

$\sigma \lambda$  es el esfuerzo a la tracción,  $\sigma$  siendo el esfuerzo por unidad de área de una sección transversal. Para un estiramiento biaxial  $\lambda_1 = \lambda_2 = \lambda$ ,  $\lambda_3 = 1/\lambda^2$  la relación esfuerzo-deformación resulta:

$$\sigma \lambda = (\lambda^2 - 1/\lambda^4) [2(dW / dII) + 2\lambda^2](dW / dI) \quad (\text{XXXI})$$

los términos principales representan la respuesta de un material sólido bajo carga.

La forma exacta para  $W(I, II)$  depende del grado de la curvatura en la gráfica de datos de la elongación. Para deformaciones largas en membranas sólidas, se recomienda la expresión:

$$W(I, II) = \sum_{ij} C_{ij} (I - 3)^i (II - 3)^j \quad (\text{XXXII})$$

Para diferentes pruebas, algunos autores han utilizado esta expresión para explicar el comportamiento del material, a continuación se describirán estas:

<i>Expresión</i>	<i>Material</i>	<i>Fuente de datos</i>	<i>Nombre autor</i>
$W = C_{10} (I - 3)$	Treloar PMMA	Estiramiento uniaxial	NeoHookean
$W = C_{10} (I - 3) + C_{01} (II - 3)$	Goma natural vulcanizada, HIPS	Estiramiento uniaxial Inflamación de burbuja	Mooney
$W = C_{01} (II - 3)$	PP	Prueba de tracción	Funt
$W = C_{10} (I - 3) + C_{01} (II - 3)^2$	HIPS	Inflamación de burbuja	Schmidt

Tabla 2.11 Expresiones de la función de energía para esfuerzo

Las constantes de las expresiones son sensibles al cambio de temperatura. En el límite donde el esfuerzo es cero, las constantes pueden ser definidas en términos del módulo elástico.

$$E/6 = (dW / dI) + (dW / dII) \quad (\text{XXXIII})$$

Para la mayoría de los polímeros,  $(dW / dI) \gg (dW / dII)$ . El modelo de NeoHookean funciona mejor a nivel bajos de deformación, o también sobre la línea de la región viscoelástica. Y el modelo de Schmidt funciona mejor a altos niveles de deformación, sin estar a temperatura constante.

La siguiente tabla muestra algunos de los valores típicos para los coeficientes de la función de energía de esfuerzo:

Material	Temperatura	C1 (MPa)	C2 (MPa)	C3 (MPa) x 10 <sup>6</sup>	Fuente
HIPS	123.3	0.0758	-	0.001179	Schmidt/ Caley
HIPS	124.7	0.08598	-	0.0001331	
HIPS	124.4	0.14445	-	0.002234	
Goma natural vulcanizada	25.0	0.1618	0.0147	-	Treloar
PP	A = 165 - T	0.0	0.080*A	-	Funt
Celulosa Acetato Butirato		0.1236	-	3400	Schmidt/ Caley

Tabla 2.12 Valores típicos para los coeficientes de la función de energía de esfuerzo  
 $C1=dW / dI$ ,  $C2= dW / dII$ ,  $C3= 2(dW / dIII)(II-3)$

### 2.9 Parámetro de diseño $\varphi(T)$

El propósito de obtener este parámetro, es determinar las condiciones apropiadas de proceso para cualquier material dado. Este parámetro está referido a la derivada de la función de energía esfuerzo-deformación con respecto al primer invariante principal del tensor de esfuerzos de Cauchy.

La relación entre  $\varphi$  y la presión de formado, para un disco uniforme de radio "a" y un espesor inicial  $h_0$ , con  $\delta$  en unidades del domo formado sobre la horizontal es:

$$Pa/2h_0 = \varphi(2\delta/a)/[1 + (\delta/a)^2] \quad (\text{XXXIV})$$

Como  $\varphi$  está referida a la función de energía del esfuerzo es por lo tanto sensible a cambios de temperatura, por lo que se escribe  $\varphi = \varphi(T)$  con unidades de fuerza por unidad de área (MPa).  $\varphi(T)$  se puede determinar calentando uniformemente una lámina de radio "a" y espesor inicial  $h_0$ , midiendo la extensión del pandeo ( $\delta/a$ ) como una función de la presión aplicada.

Otras formas de determinar este parámetro son descritas a continuación.

Si en la deformación de la lámina se considera que el espesor es constante en cualquier sección de esta, ( $\lambda_h = [1 + (\delta/a)^2]^{-2}$  y  $\lambda_1^2 = 1 + (\delta/a)^2$ ), entonces el valor máximo que puede tomar  $\lambda_1$  es 1.61, con  $(\delta/a) = 1.26$  y la presión aplicada será:

$$P_{\max} = \sqrt{3} \varphi(T) (2h_0/a) \quad (\text{XXXV})$$

Sin embargo, esta aproximación no es correcta, debido a que en el estiramiento biaxial, no existe un espesor constante durante la deformación. El análisis puede ser restringido para

una mejor comprensión, el cual se hace en el caso de una deformación en una cavidad cónica con un determinado ángulo  $\alpha$ .

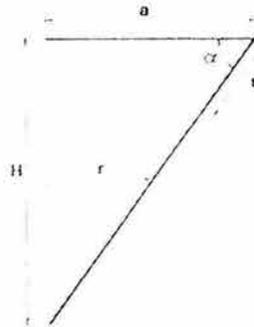


Fig 2.11 Factores geométricos para un molde cónico hembra.

El material que no está en contacto con la pared es biaxialmente estirado, teniendo para  $\lambda_1 = \lambda_0$  y  $r_0 = a$ , que:

$$r/a = (r_0/a)^{\cos \alpha}$$

con espesor igual a

$$\lambda_1 = (h/h_0) = 1/\lambda_0^2 = (r/r_0)^2 = (r/a)^{2(\sec \alpha - 1)}$$

y una presión

$$P = (2\phi(T) h_0/r) G(\alpha)$$

donde

$$G(\alpha) = \sin \alpha [1 - \sin^6 \alpha / \delta (1 - \cos \alpha)^3]$$

Si "s" es la distancia del lado del cono, desde el fondo hasta la salida de este, entonces tenemos que:

$$r/a = [1 - s/(2 \tan \alpha)]$$

$$h/h_0 = [1 - s/(a \tan \alpha)]^{2(\sec \alpha - 1)}$$

$$P = 2 \phi (T) (h_0/a) G(\alpha) / [1 - s/(a \tan \alpha)]$$

Para la mayoría de este tipo de moldes,  $\alpha = 60^\circ$ ,  $G(\alpha) = 0.5$ ,  $r/a = 1 - (0.577 s/a)$ ,  $h/h_0 = (r/a)^2$  y  $P = \phi (T) (h_0/a) / [1 - (0.577 s/a)]$ . Además, para un cilindro o un molde recto,  $\alpha = \pi/2$  y:

$$h/h_0 = \exp (-2 s/a)$$

$$P = 2 \phi (T) (h_0/a) [1 - 0.125 \exp (-6 s/a)]$$

La presión de deformación es directamente proporcional al parámetro  $\phi (T)$  y al espesor relativo de la lámina ( $h_0/a$ ), si esta presión es arreglada para el proceso de termoformado (donde  $P < 0.1 \text{MPa}$  [15 psi]), entonces la habilidad de deformar a la lámina en un espesor específico ( $h_0/a$ ), con una forma o profundidad ( $s/a$ ) dada, depende completamente del parámetro de material de diseño  $\phi (T)$ :

$$\varphi(T) = [(1 - s/(\tan \alpha))P/2G(\alpha)] / (h_0/a)$$

Usualmente  $\varphi(T)$  decrece con el incremento de la temperatura.

Para una cavidad de pared recta, una vez que  $s/a$  excede el valor de 0.5, la profundidad de vacío, al igual que el efecto de la geometría, dejan de ser factores importantes, por lo que:

$$P = 2 \varphi(T) (h_0/a) \quad (s/a > 0.5)$$

Para un simple formado por vacío ( $P < 0.1 \text{ MPa}$ ) y para 50 mm [2 in] de diámetro de la cavidad con un espesor de 1 mm [0.040 in],  $\varphi(T)$  debe ser menor que 1.3 MPa [187.5 psi].

En la siguiente tabla se muestran los datos tomados de una prueba de tracción para el PVC sin plastificar, bajo carga constante de 2.9 MPa y las condiciones antes mencionadas.

Relación de vacío	$h/h_0$	$P / 2 \varphi(T) (h_0/a)$
0.0	1.0	0.875
0.1	0.819	0.931
0.2	0.670	0.962
0.3	0.549	0.979
0.4	0.449	0.989
0.5	0.368	0.994
0.6	0.301	0.997
0.7	0.247	0.998
0.8	0.202	0.999
0.9	0.165	0.999
1.0	0.135	1.000

Tabla 2.13 Reducción de espesor y de presión para distintas relaciones de vacío.

Ahora para una cavidad de pared recta, cuando  $s/a = 0$ , tenemos:

$$P = 2 \varphi(T) (h_0/a) * 0.875$$

Un simple formado por vacío, con  $h_0/a = 0.04$ ;  $P = 0.1 \text{ MPa}$  y  $\varphi(T) < 1.5 \text{ MPa}$  [214.3 psi]. Los siguientes datos nos indican que para temperaturas menores a los 100° C, el formado no puede lograrse:

Temperatura (°C)	$\epsilon^*$ (s <sup>-1</sup> )	$\lambda$ (μm)	$\varphi(T)$ MPa [psi]
98	2.2	2.7	1.5 [213.7]
100	2.45	2.95	1.3[186.7]
110	4.6	5.1	0.65[93.6]
118	4.6	5.1	0.65[93.6]

Tabla 2.14 Prueba de tracción y parámetro de diseño para PVC con  $\sigma = 2.9 \text{ MPa}$  [426 psi]

Como resultado, tenemos que al incrementar la temperatura sobre el mínimo de formado, permitirá que la lámina se forme con un mínimo de presión, y el límite superior será en el cual se tenga el punto donde prácticamente se presenta la ruptura.

### 2.10 Adelgazamiento en el espesor del material

Para el diseño de piezas termoformadas es necesario establecer los siguientes criterios: Deberá considerarse un adelgazamiento en el espesor del material, esto dependerá más que nada de la forma, tamaño y técnica utilizada. En términos generales se puede considerar que el adelgazamiento en el espesor del material es directamente proporcional a la altura de la pieza.

- Deberá considerarse un ángulo de salida de moldeo entre  $3^\circ$  y  $5^\circ$ .
- Deberá tomarse en cuenta una contracción en la pieza del 0.6 al 2.5% al enfriar (dependiendo del material y de la geometría de la pieza).

Por lo general, la superficie de la pieza termoformada será lisa, aunque es posible obtener algunas texturas. En el diseño de la pieza es conveniente incluir radios grandes; es posible obtener aristas, pero podrán causar rasgaduras en el material. Bajo todas las condiciones de termoformado donde las piezas son formadas por una hoja o lámina de plástico, el área de la superficie se volverá más larga, habrá un estiramiento y por lo tanto el espesor del material se volverá más delgado. Uno de los factores decisivos para este adelgazamiento es el radio, definido generalmente como el radio máximo de profundidad o altura con el mínimo espacio a través de la abertura. Para estimar este adelgazamiento, uno deberá determinar el área de la hoja disponible para el termoformado y dividirla entre el área de la pieza final, incluyendo el desperdicio. Siempre es deseable que los moldes y las piezas termoformadas tengan radios de curvatura generosos. En la práctica, con un micrómetro o calibrador se puede determinar el espesor directamente en la pieza termoformada, cortando pequeños pedazos en las distintas secciones; otros métodos son usar hojas translúcidas y correlacionando la intensidad del color contra el adelgazamiento de la hoja. También se puede determinar el espesor, cuadrículando con un marcador de aceite la hoja antes de termoformarla y observar el estiramiento del material.

En la figura siguiente se muestra el procedimiento para obtener el adelgazamiento de forma experimental de una geometría sencilla.

$$\% \text{ de adelgazamiento} = \frac{\text{espesor final de material}}{\text{espesor original del material}} = \frac{\text{área disponible de la hoja}}{\text{área total de la pieza formada}} = \frac{A \times B}{A \times B \times E (2C + 2D)}$$

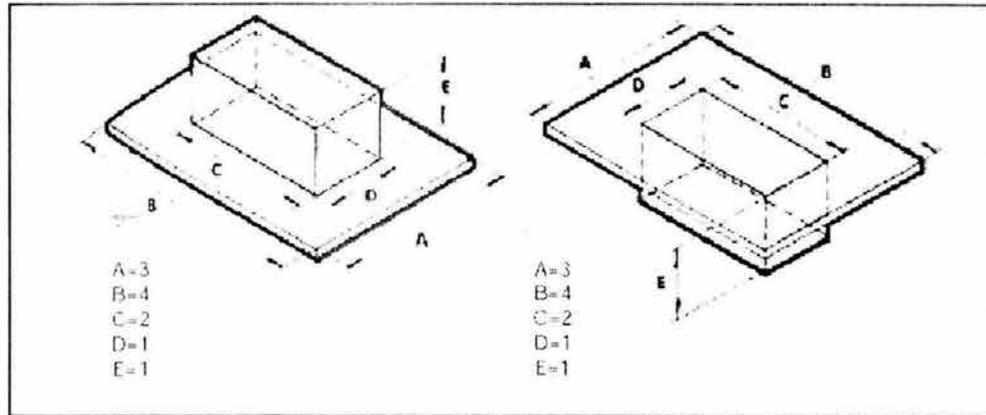


Fig. 2.12 Adelgazamiento de material.

### 2.11 Teoría de contracción.

En los últimos años se han desarrollado una serie de modelos analíticos para poder simular los procesos de termoformado y soplado, se han conseguido con ellos simulaciones cada vez más próximas a la realidad, pero todavía se tienen algunas deficiencias en este sentido. Los estudios antes mencionados muestran que la distribución del espesor es altamente dependiente del material, pero depende más de la geometría del molde; sin embargo, las propiedades del material en los modelos constitutivos tienen una influencia significativa sobre parámetros como la presión y el tiempo del proceso, la estabilidad, los perfiles de esfuerzo y, por último, sobre la contracción final de la pieza formada.

Aunque algunos conocedores del proceso de termoformado piensan que éste se realiza de una manera tan sencilla que descartan el uso de sistemas analíticos, vale la pena ser usuario de ellos para mejorar la calidad de los productos obtenidos mediante este proceso.

La forma básica del modelo tiempo-deformación y el esquema numérico para la evaluación de la relajación son ampliamente usados en el análisis de elemento finito para procesos de termoformado. Una forma más avanzada del modelo tiempo-deformación es el desarrollado por Kaye-Berstein Kearsley-Zapas (KBKZ)<sup>(1)</sup>.

Como punto de partida para el formado del producto se tiene la lámina de material polimérico reblandecida, misma que será puesta en contacto físico con el molde para

formarla con la geometría de éste. En esta parte del proceso el espesor del material se reduce como resultado del estiramiento que sufre la lámina para poder cubrir en su totalidad la superficie del molde; dicho estiramiento es evaluado mediante algunas ecuaciones descritas en la parte correspondiente.

Una vez que la lámina ha cubierto completamente la superficie del molde, es decir, que se ha realizado el formado del producto, la temperatura de la lámina comienza a descender y es en ese momento cuando comienza a darse el fenómeno de contracción y es también en este momento cuando el modelo KBKZ tiene su punto de partida para analizar dicho proceso para su cuantificación.

La implementación del análisis de contracción utiliza el modelo KBKZ para numerosos materiales que han sido caracterizados para usarse en simuladores comerciales de formado, esto elimina errores potenciales, resultado del uso de diferentes modelos constitutivos entre el formado y las simulaciones de contracción.

El modelo KBKZ en su forma general está dado por el tiempo(t), la variable tiempo en relación con su derivada, y los parámetros dependientes del material  $a_k$  y  $\tau_k$ . Asumiendo que la temperatura depende de la relación de Arrhenius, el esfuerzo puede ser modelado de la siguiente forma<sup>(k)</sup>:

$$\sigma(t) = \sigma(T_0)\exp(-\alpha (T - T_0))$$

Donde : T representa la temperatura en grados centígrados.  
T<sub>0</sub> representa una temperatura de referencia.

El parámetro de Arrhenius, a, es usado para definir la influencia de la temperatura en el comportamiento del material. Otra aproximación para incluir el efecto de la temperatura en el modelo KBKZ es usar la función siguiente en la ecuación anterior :

$$\text{Log}(a_t) = C_1(T-T_0)/C_2 + (T - T_0)$$

Donde C<sub>1</sub> y C<sub>2</sub> son constantes del material las cuales pueden ser derivadas de los datos de relajación.

### 2.11.1 Caracterización del material.

El modelo KBKZ describe la relación esfuerzo-deformación de un polímero bajo diferentes razones de deformación y temperatura. La no-linealidad del modelo hace que los parámetros altamente relacionados tengan menos significado físico, y sean determinados separadamente. Los resultados del modelo KBKZ se pueden comparar con la predicción esfuerzo-deformación relacionada con observaciones experimentales.

Los parámetros que dependen del material y el parámetro de Arrhenius a, el cual da el efecto de la temperatura pueden ser determinados simultáneamente si los grupos de datos experimentales y las curvas de esfuerzo-deformación bajo diferentes razones de deformación y temperatura están disponibles.

Según los autores del método, se han realizado experimentos con ABS común, donde una muestra de 25mm x 25mm x 7.3mm es colocada en un sistema de pruebas de compresión lubricada (Instron 5566) después del equilibrio a temperaturas designadas (180°C, 185°C y 190°C). Para crear una condición de deslizamiento y reducir los efectos de los filos se utiliza aceite en las superficies del espécimen.

Alpha	Tau (s)
0.626071	175923.95
27.64236	21528.22
500	8918.05
Arrhenius (1/°C)	Temperatura de referencia (°C)
0.023004679	180
Amortiguamiento alpha	Amortiguamiento beta.
1	-0.160499666

Tabla 2.15 Parámetros usados en el modelo KBKZ para el ABS.

Las figuras 2.13 y 2.14 dan los resultados observados para el esfuerzo a diferentes razones de deformación y temperatura, los parámetros del ABS para el modelo que están dados en la tabla 2.10.1.1 son aplicados al modelo analítico de contracción para la evaluación del esfuerzo en la etapa final de la contracción.

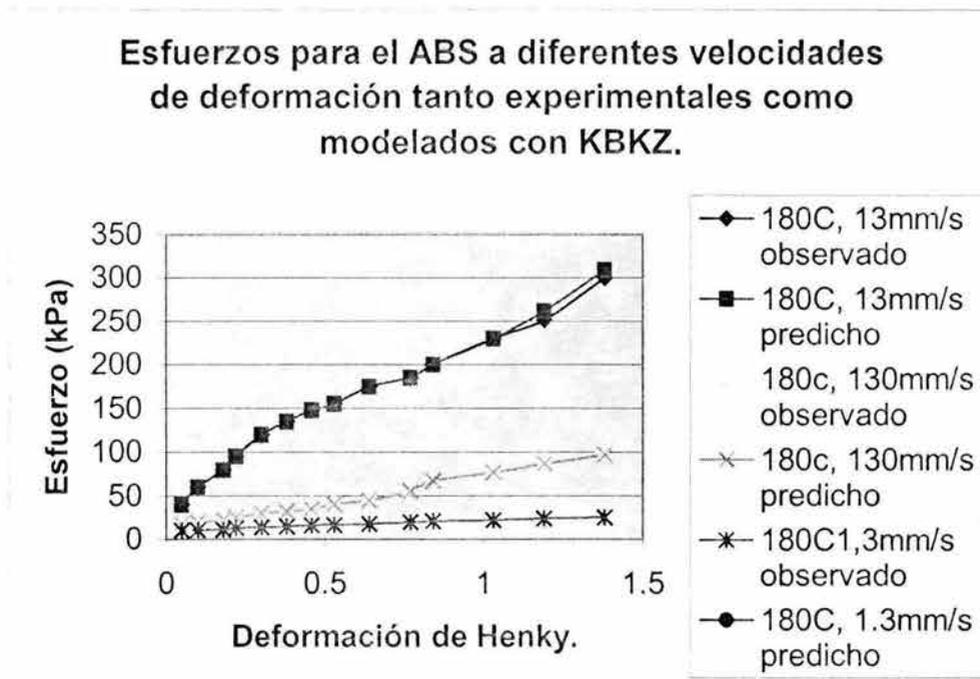


Fig. 2.13 Esfuerzos para el ABS a diferentes razones de deformación usando el modelo KBKZ.

### Comparación experimental del modelo propuesto por KBKZ para el ABS a diferentes temperaturas.

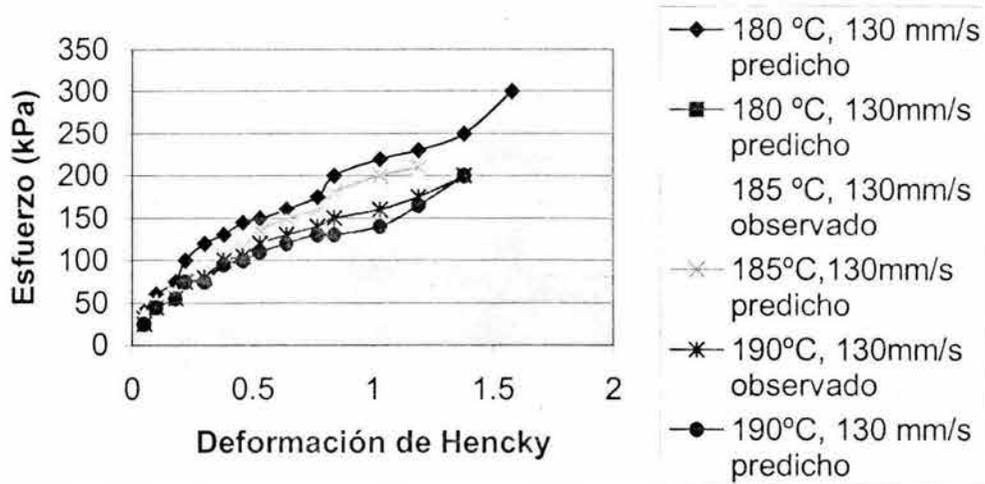


Fig.2.14 Esfuerzos para el ABS a diferentes temperaturas.

#### 2.11.2 Modelado analítico del proceso.

La contracción es el efecto combinado de la acumulación de esfuerzo debido al estiramiento y acumulación de esfuerzo térmico debida al constante enfriamiento. Así la acumulación de esfuerzo y la subsecuente relajación pueden ser usados para determinar la distribución de la deformación, y finalmente, la contracción, la cual es la integral de la deformación a lo largo del perfil geométrico.

El modelo KBKZ es una representación aproximada de las relaciones de esfuerzo-deformación para materiales poliméricos, y es capaz de definir el comportamiento no lineal bajo diferentes razones de deformación y temperaturas. Debido a que la constricción física del molde sobre el material convierte la contracción térmica de deformación en esfuerzos térmicos; el módulo de Young y la expansividad del material son importantes para caracterizarlo. La expansividad puede ser descrita por el coeficiente de expansión térmica o la presión, volumen y curvas de temperatura modeladas con un doble dominio.

La figura 2.15 indica que el análisis de la contracción consiste de: 1) Una simulación del termoformado para la distribución del espesor; 2) Un análisis térmico para la solución de la temperatura; 3) Un análisis en la fase de estiramiento para la estimación de la dilatación inducida por esfuerzo; 4) Un análisis post contacto para el esfuerzo térmico y relajación; 5) Un análisis post moldeo de deformación para la estimación de la contracción. Un simulador comercial de termoformado es usado para simular el calentamiento de la lámina, pandeo, predilatación, dilatación, y el resultado de espesor y distribución del espesor.

El detalle del modelo desarrollado para contracción y el procedimiento para cada etapa subsecuente del análisis son discutido posteriormente.

### 2.11.3 Metodología del procedimiento para la predicción de la contracción.

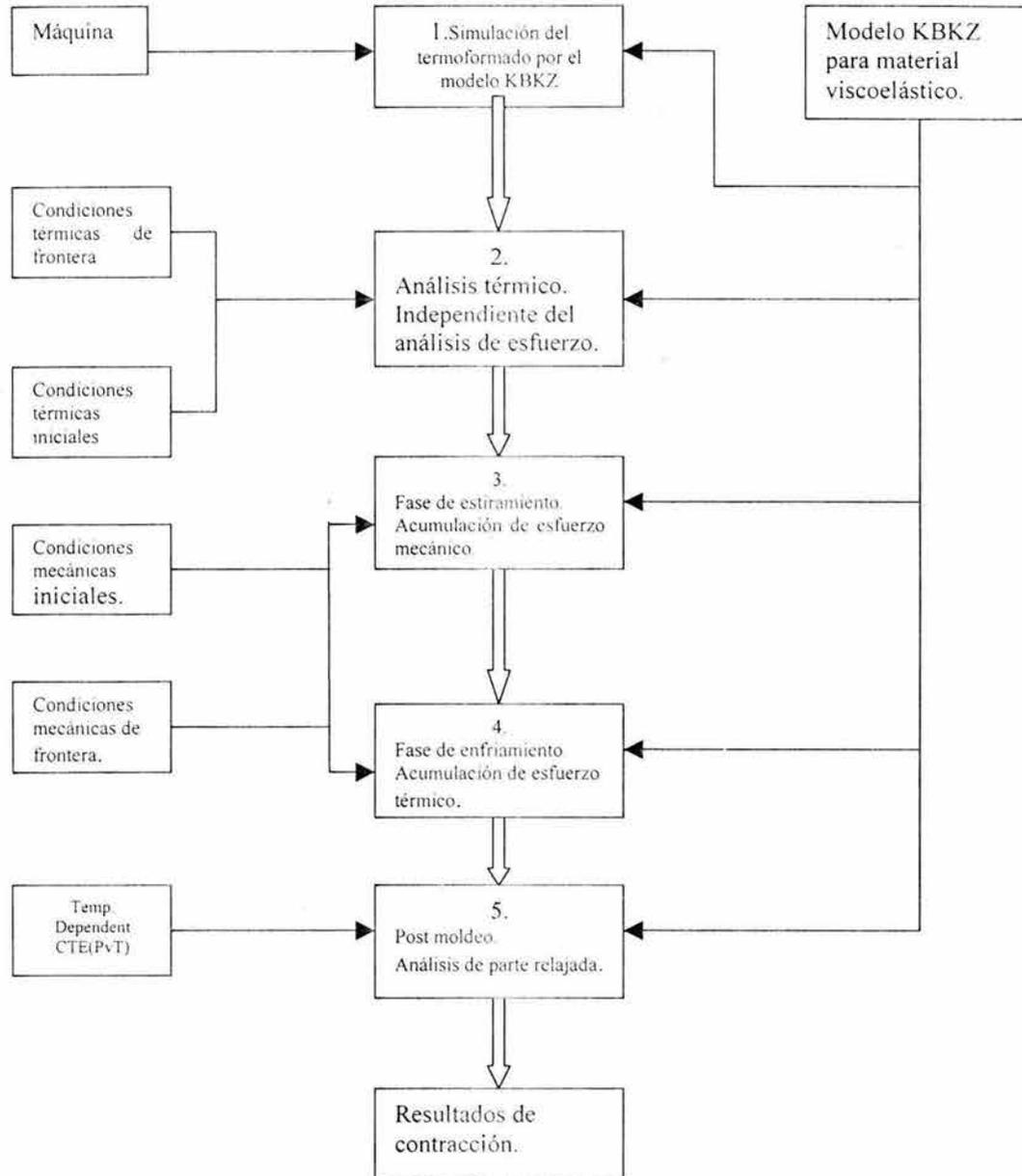


Fig. 2.15 Metodología para la estimación de la contracción usando el modelo KBKZ en una parte termoformada

### 2.12 Análisis de esfuerzo en la fase de estiramiento.

La historia de estiramiento es altamente dependiente de la geometría del molde, la presión de formado, la temperatura y otros factores. Una solución general analítica de la historia del estiramiento es difícil de derivar para geometrías complejas. El estiramiento se lleva a cabo de una manera no uniforme, ya que algunas zonas necesariamente deben estirarse más que otras para cubrir completamente la superficie del molde, o en otras palabras, proporcionarle al producto deseado el máximo detalle posible en el formado. Cabe

mencionar que para conseguir un formado con mucho detalle es preciso contar con un sistema eficiente de vacío, con la capacidad adecuada para conseguir, además, ciclos cortos y una buena calidad en el producto obtenido.

El objetivo de esta sección es conseguir una estimación analítica de los esfuerzos acumulados mecánicamente y una estimación de la distribución del espesor de la parte termoformada.

La historia del estiramiento es altamente dependiente de la geometría del molde, de la presión de formado, de la temperatura y de otros factores.

La historia del estiramiento es difícil de derivar por la complejidad de la geometría y también por su dependencia con la localización de cada punto de la lámina. El completo estiramiento ocurre en segundos y la dependencia que tiene con la localización en la lámina reblandecida se observa en las marcas de formado que las láminas poliméricas muestran en las superficies en contacto con el molde, en algunas el estiramiento finaliza cuando en otras continua hasta que la parte es completamente formada. En algunas aplicaciones de termoformado, vacío o aire a presión son usados para que la lámina entre en contacto con las áreas donde se ubican los pequeños detalles del molde. La diferencia de presión entre los dos lados de la lámina plástica conducen a que la misma se estire más rápidamente.

Para simplificar la solución analítica, se asume que la lámina completa se expande o se estira a una razón constante hasta que entra en contacto con el molde.

$$dE/dt = \text{constante.}$$

El esfuerzo resultante de la diferencia de presión en una membrana esférica de expansión puede ser estimado como:

$$\sigma = PR/2b$$

donde P es la presión aplicada, R es el radio de expansión y b es el espesor de la membrana<sup>(1)</sup>.

La respuesta elástica de un polímero a la aplicación de un esfuerzo es de la forma:

$$\sigma = \eta(\epsilon)$$

Donde  $\eta$  es la viscosidad aparente del flujo polimérico y  $\epsilon$  la deformación. Considerando las diferentes condiciones en el inicio y en el final del estiramiento, la razón promedio de estiramiento puede ser estimada como:

$$\epsilon = P/2\eta((R0/2b0) - (Rcor/2bcor))$$

Donde  $R_0$  representa el radio de encorvamiento de la lámina en el inicio del contacto con la superficie del molde y  $R_{cor}$  representa el radio de la pequeña característica de la parte y el correspondiente espesor después del estiramiento.

La extensión biaxial de la lámina polimérica coincide con la contracción en la dirección del espesor<sup>(m)</sup>.

Asumiendo la incompresibilidad del material y la homogeneidad de la deformación, la deformación en la dirección del espesor está dada por:

$$\varepsilon = \ln(b/b_0).$$

Donde  $b$  es el espesor de la lámina como una función del tiempo.

La razón de deformación es:

$$\dot{\varepsilon} = d\varepsilon/dt$$

y la correspondiente extensión biaxial bajo la consideración de incompresibilidad es  $-0.5 \ln(b/b_0)$

La distribución final del espesor es posible conseguirla mediante la simulación del proceso en un software comercial.

### 2.13 Análisis del esfuerzo después del contacto y en la etapa de enfriamiento.

El estiramiento termina cuando la lámina polimérica completamente entra en contacto con el molde. La deformación que se tiene en el enfriamiento es despreciable comparada con la de la fase de estiramiento y es estimada usando modelos para material elástico. La acumulación de esfuerzos durante el enfriamiento es inducida térmicamente. Después la parte moldeada es expulsada y los esfuerzos residuales se relajarán y subsecuentemente causarán contracción y pandeo.

Cuando la parte es limitada por la superficie del molde el esfuerzo térmico residual se incrementa sin relajación al tiempo  $t$ , que está dado por:

$$\Delta\sigma(t) = (\alpha - \alpha_{\text{molde}}) (T(t) - T(t+\Delta t))E(T(t))$$

y considerando los efectos de la expansión térmica del molde, el esfuerzo puede ser evaluado por múltiples iteraciones:

$$\sigma(t+\Delta t) = (\sigma(t) + \Delta\sigma(t)) * g(\Delta t, T(t))$$

donde  $g(\Delta t, T(t))$  es el módulo de relajación relativa para la temperatura  $T(t)$  por diferencial de tiempo  $\Delta t$  es caracterizado por el modelo constitutivo KBKZ.

### 2.14 Análisis de Contracción.

Después de que la pieza sale del molde la acumulación de esfuerzos residuales ocasionará la contracción. La libre contracción en la dirección  $x$ , de la posición  $x_1$  a la posición  $x_2$ , ( $x_2 > x_1$ ) puede ser estimada como:

$$S = (\alpha (T_g - T_{\text{final}}) - \alpha_{\text{mold}}(T_{\text{mold}} - T_{\text{final}})(x_2 - x_1) + \int (\sigma_{\text{cc}}(x) / E(x)) dx$$

Donde  $\alpha$  y  $\alpha_{\text{mold}}$  son los coeficientes de expansión térmica del polímero y del molde respectivamente,  $T_{\text{final}}$  es la temperatura de uso de la parte termoformada,  $\sigma_{\text{cc}}(x)$  es la componente del esfuerzo en la dirección  $X$  para la posición  $x$  acumulada transversalmente al espesor cuando la lámina ha tenido contacto completamente con el molde, y  $E(x)$  es el módulo dependiente de la localización para el tiempo de expulsión de la pieza. Bajo constricciones mecánicas de la lámina comunes para un formado macho o presiones de vacío que jalan la parte durante el enfriamiento, los esfuerzos térmicos serán acumulados y significan relajación antes de relajarse como deformación. Así, el primer término de la ecuación anterior requiere la integración sobre la geometría y no puede ser simplificado como el producto de la temperatura y el coeficiente de expansión térmica. Otro modelo analítico es el propuesto a continuación que incluye los efectos de las constricciones en la fase de enfriamiento. Entonces, la contracción correspondiente es:

$$S = \int (\alpha (T_{\text{rel}}(x) - T_{\text{final}}) - \alpha_{\text{mold}}(T_{\text{molde}} - T_{\text{final}}) dx + \int (\sigma_{\text{rel}} / E(x, T_{\text{rel}})) dx$$

$T_{\text{rel}}$  y  $t_{\text{rel}}$  son la temperatura y el tiempo cuando la parte no está constreñida por el molde. Para moldeo positivo, la relajación ocurre cuando la parte es expulsada. Para moldeo negativo, la relajación ocurre cuando la presión o la succión del vacío en la parte terminan. Para partes con características complejas, la relajación puede ser gobernada por una o ambas situaciones. En algunos casos, la presión de succión o el vacío no son suficientes para mantener el contacto con la superficie del molde.

### 2.15 Control de la contracción.

A través de varias aproximaciones se han tratado de disminuir los problemas que causa la contracción en los materiales poliméricos, incluyendo mayores cambios en las resinas y en las estructuras de los comonomeros, el uso de refuerzos y la polimerización parcial de la resina antes del moldeo no han tenido éxito. La última solución a estos problemas ha sido la adición de algunos termoplásticos a la formulación del compuesto. Estos termoplásticos están usualmente presentes en un 2 a 5% en peso de la parte final moldeada o 7 a 20% de la porción orgánica de la formulación. Estos polímeros mezclados pueden, esencialmente, eliminar la contracción en la polimerización de poliéster insaturado.

El grado de mejoramiento en el control de la contracción depende de la estructura del termoplástico, de su peso molecular, de las cantidades usadas, y de la estructura de la resina poliéster insaturada empleada, sin embargo, poniendo atención a estos factores se puede conseguir eliminar la contracción por completo y esto significa que se pueden tener moldeos con excelentes acabados superficiales, partes no pandeadas, y estabilidad en la precisión dimensional. La tabla 2.16 muestra una formulación simple con o sin aditivos

termoplásticos y sus efectos en la contracción que se presentan en el moldeo para cada caso, muestra el efecto de la presencia del termoplástico en las propiedades físicas.

	PORCENTAJE EN PESO	
	Convencional	Con aditivo de bajo perfil
Resina poliéster insaturada *	26.1	15.7
Solución termoplástica en estireno.**	-	7.7
Estireno.	-	2.6
Carbonato de calcio.	52.6	52.7
Estearato de zinc.	1.0	1.0
Peroxybenzoato t-Butyl.	0.3	0.3
Fibra de vidrio	20	20
*Poliéster insaturado alquídico conteniendo 30% aproximadamente de estireno.		
**Solución a 40% en peso de termoplástico en estireno.		

**Tabla 2.16** Formulación típica de compuestos para moldeo premezclados.

Se ha encontrado un buen número de termoplásticos que dan diferentes niveles en el control de la contracción, por ejemplo, están los acetatos de polivinilo, polimetilmetacrilatos y copolímeros con otros acrilatos, poliuretanos, copolímeros estireno-butadieno y otros elastómeros, poliestireno y algunos copolímeros y una variedad de poliésteres saturados. Estos polímeros mezclados en razones apropiadas con poliésteres insaturados y comonomeros dan como resultado niveles aceptables de contracción.

## REFERENCIAS PARA ESTIRADO:

- (a) James L. Throne  
"Thermoforming, A look forward"  
SPE Tech. Papers. 1983. Pg. 65
- (b) James L. Throne  
"Plastics Process Engineering"  
pg. 316, 619-636, 657, 714-735
- (d) F. Kreith  
"Principles of Heat Transfer"  
2<sup>nd</sup>. Ed. International Text Book Co. 1965  
pg. 215-216.
- (e) J.L. Throne  
"Technology of Thermoforming"  
Hanser, 1996, pp. 155-159
- (f) N. Platzler  
"Sheet Forming"  
in E.C. Bernhardt Ed. Processing of Thermoplastics Materials  
Resihold 1959. Pg. 485.
- (g) F.P. Incropera and D.P. DeWitt  
"Fundamentals of Heat and Mass Transfer"  
4<sup>th</sup> Ed. 1996.
- (h) S. Chatraci C.W. Macosko and H.H. Winter. J.  
"Rheology"  
pg. 25, 433-443.  
1981.
- (i) S.I. Krishnamachari  
"Applied Stress Analysis of Plastics", A Mechanical  
Engineering Approach  
Von Nostrand Reinhold N.Y. 1993
- (j) G. Gruenwald  
Thermoforming "A Plastics Processing Guide"  
Pg. 5-10.
- (k) <http://www.me.wpi.edu/sisson/polymers./therm.html>
- (l) Jae D. Yoon Sung W. Cha  
"Change of Glass Transition temperature of polymers "  
[www.elsevier.nl/locate/polytest](http://www.elsevier.nl/locate/polytest)

REFERENCIAS PARA  
CONTRACCIÓN:

- (a) V.E. Malpas and C.H. White  
"Laboratory Comparison of the Thermoforming Properties of  
Two ABS Materials"  
in P.F Bruin, Ed. Basic Principles of Thermoforming, Gordon  
and Breach, 1973.  
Pg. 103.
- (b) V.E. Malpas and J.T. Kempthorn  
"Comparison of Polyolefin Thermoforming by Hot Tensile  
Testing"  
SPE Tech. Papers, 32, 1986, pg. 63.
- (c) R.L. Harris and F.P. Bruins  
"A New Technique for Predicting Optimum Thermoforming  
Conditions"  
in P.F. Bruins, Ed. Basic Principles of Thermoforming,  
Gordon and Breach, 1973, pg 81
- (d) S. Bahadur  
"Strain Hardening Equation and Prediction of Tensile Strength  
of Rolled Polymers"  
Polym. Eng. Sci. 13, 1973, pg 266.
- (e) J.L. White  
"Theoretical Considerations of Biaxial Stretching of  
Viscoelastic Fluid Sheets with Application to Plastic Sheet  
Forming"  
Rheology Acta. 14, 1975, pg. 600.
- (f) J.M. Funt  
"An Analysis of The Rheology of Polypropylene  
Below Its Melting Point"  
Polym. Eng. Sci. 15, 1975, pg 817.
- (g) J.G. Williams  
"A Method of Calculation for Thermoforming Plastics Sheets"  
J. Strain Anal. 5, 1970, pg 49.
- (h) J.G. Williams  
"Stress Analysis of Polymers"  
John Wiley & Sons, 1973, pg. 211-220.
- (i) L.R. Schmidt and J.F. Carley  
"Biaxial Stretching of the Heat Softened Plastic Sheet:  
Experiments and Results".  
Polym. Eng. Sci. 15, 1975,
- (j) K. Kouba  
"Thermoforming Quarterly"  
1998 Vol. Fall, 13  
R.I. Tanner  
"Engineering Rheology"  
2d Edition Oxford University Press N.Y 2000
- (k) J.D. Ferry  
"Viscoelastic Properties of Polymers"  
2d. Edition
- (l) James L. Throne  
"Poly Plast. Technology Engineering"  
pg. 80, 685-700.  
1991.
- (m) C. W. Makosco  
"Rheology: Principles Measurements and Applications"  
VCH New York 1994

## CAPÍTULO 3

### MOLDES PARA TERMOFORMADO

Un molde es la herramienta que posee la geometría de la pieza que se piensa obtener mediante el proceso de termoformado y que, al entrar en contacto físico con la lámina plástica reblandecida, le confiere dicha geometría de manera permanente.

De la definición anterior se infiere que el molde es parte fundamental en el proceso de termoformado, ya que si existe algún error en la geometría de esta herramienta, ese mismo error se presentará en el producto final; por esta razón en este capítulo se discutirán los aspectos más importantes de los moldes como son: los materiales con los que se fabrican, algunas consideraciones sobre su diseño y las técnicas de fabricación que existen para estas herramientas.

Es sabido que para producir artículos por termoformado, se requiere de la implementación de algún tipo de herramental sin considerar las dimensiones o cantidad de artículos a producir; los dos componentes principales de este herramental son el molde y el dado de corte. En algunas ocasiones estos dos componentes son combinados en una sola herramienta que realizará ambas funciones.

El molde puede ser fácilmente considerado como el corazón o el cerebro no solamente del herramental, sino del proceso completo de termoformado. Esta herramienta forma a una lámina termoplástica caliente en un producto con una forma específica, dicha lámina es plana y puede adquirir una gran variedad de geometrías dependiendo del producto que se desea obtener. El molde es el instrumento a través del cual el plástico se forma estirándose en varias direcciones y en este formado de la lámina plástica el molde debe permanecer en contacto con ella para transferirle todos los detalles tanto como sea posible y mantener ese detallado del artículo permanentemente hasta que sea removido sin daño alguno. El molde por sí mismo puede significar la diferencia entre perfección o imperfección en los detalles transferidos al producto y también entre resultados satisfactorios o productos defectuosos.

Una de las razones más importantes para la elección del termoformado sobre otros procesos de transformación de plásticos es que los moldes tienen costos sustancialmente más bajos en comparación con los de inyección por ejemplo. El molde puede ser hecho muy sencillo y de los materiales menos costosos, ambos factores pueden ser extremadamente ventajosos sobre los costos del herramental de otros procesos y a menudo determina la elección del termoformado sobre otras técnicas de procesamiento de plásticos. La reducción en el costo del herramental, sin embargo, no es la única razón para esta elección: las altas cantidades de producción son otro factor importante.

#### 3.1 Materiales para fabricar moldes para termoformado<sup>(a)</sup>.

La fabricación de moldes para termoformado utiliza una gran variedad de materiales. El primer paso es establecer la cantidad deseada. El proceso de termoformado puede ser aplicado a una corrida corta de producción y un molde provisional puede ser adecuado para

este trabajo. Corridas largas de producción significan un alto volumen de producción y necesitan un molde más durable y de tipo permanente.

Los materiales menos costosos son fáciles de trabajar, sin embargo su expectativa de vida y su mala estabilidad dimensional hacen que sean usados por una corta temporada solamente. Por otro lado, los moldes metálicos tratados especialmente pueden tener sustancial permanencia y varios años de producción a menos que sufran un daño prematuro, pero obviamente sus costos son elevados.

En contraste con otros procesos de transformación de plásticos, como la inyección, en el termoformado se tiene la ventaja de utilizar presión y temperatura relativamente bajas, y por esta razón se pueden utilizar una gran variedad de materiales. Generalmente podemos emplear moldes de madera y estos son ideales para una baja producción, y como la madera tiene una baja conductividad térmica favorece a que la hoja que ha sido calentada hasta cierta temperatura no se enfríe rápidamente al primer contacto, pero cuando se tiene una mediana o alta producción los moldes de madera son inadecuados ya que comienzan a acumular calor modificando su geometría debido a ello. La construcción de moldes con laminados fenólicos resulta mejor, debido a que no los afecta demasiado la humedad y el calor.

Existen también moldes fabricados con cargas minerales o metálicas y resina poliéster o epóxica o de poliuretano rígido, éstos tienen la facilidad de poder vaciarse y obtener inclusive un molde de múltiples cavidades. Las propiedades térmicas de las resinas epóxicas o poliéster, las hacen adecuadas para corridas de mediana producción, inclusive se podrá embeber tubería de cobre como sistema de enfriamiento para controlar mejor la temperatura del molde, pero aún así resulta insuficiente para altas producciones.

Los moldes de aluminio son adecuados para altas producciones, pero la conductividad térmica del aluminio hace necesario precalentar el molde por medio de circulación de agua caliente a través del sistema de calentamiento/enfriamiento o radiando calor con resistencias eléctricas o calentando el molde con el mismo material a termoformar. Para corridas largas será necesario incorporar un termostato para asegurar que exista la menor fluctuación de temperatura en la superficie del molde evitando así un sobreenfriamiento. Las propiedades del aluminio podrán ser mejoradas con la aplicación de una capa de politetrafluoroetileno en su superficie para facilitar el desmoldeo de la pieza.

Se puede decir que existen cuatro grupos de materiales para la construcción de moldes de termoformado y son<sup>(b)</sup>:

- 1) Madera
- 2) Minerales (Yeso)
- 3) Resinas plásticas.
- 4) Metales, los cuales son de aplicación común. (Aluminio y acero)

Los moldes empleados en el termoformado pueden variar de acuerdo al trabajo realizado, éstos pueden ser desde un bloque de madera contra del que se estira manualmente la lámina

reblandecida, hasta aquellas complejas construcciones con líneas de enfriamiento y piezas móviles destinadas a grandes producciones de artículos desechables o aplicaciones técnicas.

Sin embargo, todo molde debe cubrir ciertas cualidades, como estabilidad dimensional frente al cambio térmico presentado durante la operación o durante el almacenamiento. De igual forma es deseable que la resistencia al ataque de agentes químicos sea buena, sin presentar problemas de resistencia mecánica en su vida útil.

La superficie del molde debe permanecer libre de carga estática luego de remover la pieza, de lo contrario, ésta estará adherida al molde, su textura no deberá mostrar variación ni deformación así como presentar los orificios de venteo suficientes para el correcto estiramiento del material.

La elección del material para construir un molde se basa tanto en consideraciones económicas, productivas, técnicas, la familiaridad que tenga el fabricante del molde con el material, con los procesos de transformación aplicables al mismo para la obtención del molde, disponibilidad del material, vida útil esperada y peso.

### 3.2 Moldes de madera.

Las maderas duras como el fresno, nogal y roble, entre otras, son preferidas para fabricar moldes, durante su formación se debe considerar como parte importante que el proceso de secado sea un elemento de detalle y esmero ya que de no realizarse adecuadamente la madera podría presentar grietas y fracturas.

El trabajo en madera para producir moldes de termoformado se realiza con técnicas y herramientas convencionales, presentando cierta atención cuando se requiera de algún ensamble, que se puede realizar con uniones acanaladas y adhesivos como resorcinol, pegamento en caliente, o del tipo epóxico. Antes de resanar la madera, todo rastro de humedad es retirado por medio del secado, de lo contrario el calentamiento cíclico típico en este proceso provocaría fracturas en el molde reduciendo notablemente su vida útil.

Los barrenos de vacío se hacen con un taladro que penetra la madera dejando un barreno ciego, que al encontrarse con otro realizado desde la dirección y superficie contrarias produce un orificio de venteo; el diámetro de la broca determinará el flujo de aire máximo a ser evacuado.

Con esta técnica se fabrica la cantidad de orificios necesarios; posteriormente se aplica el barniz o esmalte, preferentemente del tipo epóxico, ya que presenta excelente comportamiento después de cientos de ciclos de trabajo sin requerir de un nuevo terminado. Para el termoformado a temperaturas no muy altas, como es requerido por las láminas de PVC-F, espuma de PS o las de PUR, los barnices de base poliuretano exhiben un buen desempeño.

Aplicados en moldes de materiales más resistentes como plástico o metales, los elementos de madera se emplean como trampas de arrugas o pliegues, así como para inutilizar alguna

sección. En la siguiente tabla se presentan las propiedades típicas de las maderas que se usan para fabricar moldes prototipo para termoformado.

Propiedad	Tipo de madera					
	Fresno	Caoba	Maple	Pino	Roble	Encino
Densidad						
(lb/ft <sup>3</sup> )	34	40	35	56	37	32
(g/cm <sup>3</sup> )	0.55	0.64	0.56	0.58	0.6	0.51
Módulo de flexión						
10 <sup>6</sup> (psi)	1.44	1.57	1.55	1.32	1.25	1.42
(GPa)	9.93	10.8	10.7	9.10	8.62	9.79
Trabajo a carga máxima						
(in-lb/in <sup>3</sup> )	6.6	23.7	13.3	14.0	11.6	14.6
cm/kg/cm <sup>3</sup> )	1.17	1.67	0.94	0.99	0.82	1.03
Máxima resistencia a la ruptura en dirección paralela al grano						
(psi)	3990	4580	4020	3680	3560	4300
(MPa)	27.5	31.66	27.7	25.4	24.5	29.6
Razón de compresión Paralela-perpendicular						
Adimensional	5.96	5.45	6.28	5.11	5.31	8.78
Altura de impacto para fractura completa						
(in)	38	74	40	48	42	37
(m)	0.97	1.88	1.02	1.22	1.07	0.94

Tabla 3.1 Propiedades mecánicas típicas de maderas utilizadas en la fabricación de moldes prototipo para termoformado.

### 3.3 Moldes de yeso.

Otro de los materiales que a menudo se usan para construir moldes de termoformado es el yeso, sus aplicaciones se limitan a corridas cortas o medianas de producción, ya que la mayoría de los yesos comerciales no presentan la suficiente dureza superficial ni la resistencia mecánica requeridas para la fabricación de moldes de larga duración.

La fabricación de los herramientales es mediante la técnica de vaciado de la mezcla del yeso y agua, el fraguado de esta mezcla es una reacción hidrolítica que eleva la temperatura hasta cerca de los 100 °C, situación a considerar en la fabricación de los negativos, que son los recipientes que contienen la mezcla del yeso y el agua mientras se realiza el curado, etapa en la cual el molde adquiere las propiedades y la geometría que se necesita para el proceso de termoformado.

El negativo es recubierto con un agente desmoldante como el alcohol polivinílico soluble en agua, procurando que esté libre de burbujas al igual que el molde, pues la presencia de estos defectos disminuye la consistencia estructural del herramientales, para este fin, el

fabricante de moldes aplica una pequeña capa inicial de yeso muy diluida, que al fraguar permite el vaciado de otra mezcla de yeso con menor cantidad de agua.

Como es necesario que el molde esté provisto de un sistema de enfriamiento, los conductos refrigerantes y los orificios de venteo se construyen mediante la inserción en los negativos de alambres recubiertos con agentes desmoldantes o plastilina, y de esta forma al endurecer el yeso se extraen del molde.

La extracción de burbujas de aire o vacío es mediante la variación de la mezcla antes de fraguar, considerando que una elevada viscosidad favorece la aparición de burbujas; pero también una mezcla de alto contenido de agua, produce un molde de bajas características físicas; es decir, debe encontrarse la proporción de agua correcta que otorgue la mayor resistencia mecánica del molde pero también que permita la evacuación de las burbujas.

El curado se realiza aproximadamente en 30 minutos, aunque existen algunos yesos que tardan una hora en adquirir la resistencia necesaria.

Una vez hecho esto, el molde fraguado está en condiciones para que los alambres de los orificios de venteo sean retirados. El herramental debe almacenarse en un sitio tibio los días necesarios para que alcance el equilibrio de la humedad.

El siguiente paso es la colocación de un acabado superficial con papel lija abierta y barniz epóxico. La aplicación de refuerzos como fibra de vidrio es opcional, con ellos se aumenta la resistencia del molde y su vida útil; en su aplicación debe cuidarse que las fibras estén húmedas para su adecuada adhesión al yeso.

### 3.4 Moldes de plástico<sup>(b)(c)</sup>.

Este tipo de moldes se prefieren para trabajar láminas gruesas, donde se reportan ventajas económicas, en los procesos en que el acumulamiento de calor sobre la superficie del molde es intermitente; donde el molde no es calentado para facilitar el formado y en la producción de piezas de gran superficie por vacío con bajos niveles productivos (100 piezas o menos).

Los plásticos termofijos, resinas epóxicas (EP) y poliéster insaturado; ambos reforzados con fibra de vidrio, son los más empleados para fabricar moldes, en especial para aquellos procesos que no exceden los 60°C en la superficie del molde y el formado se realiza por vacío.

La fabricación de moldes con estos dos materiales usualmente es similar y ambos parten de un negativo, en madera o yeso, que debe estar completamente seco, ya que la temperatura a la cual curan estos materiales puede alcanzar los 100 o 125 °C, sus superficies son selladas con una pequeña capa de laca automotriz o poliuretano industrial.

El empleo de alcohol polivinílico (EVOH) como agente desmoldante es efectivo si antes los negativos fueron secados perfectamente, aunque los plásticos gozan de buena aceptación para cumplir estas funciones. Es importante tener presente que cualquier

sustancia empleada con estos fines debe aplicarse con un pulverizante neumático para realizar una cobertura uniforme.

Para garantizar un buen acabado superficial al fabricar moldes con poliéster insaturado, es necesaria la aplicación de un formulado conocido como "Gel-Coat", así como la expulsión de cualquier burbuja atrapada y una segunda capa de este compuesto que es pulverizado.

El siguiente paso de la construcción del molde es colocar una capa de fibra de vidrio en velo sobre el "Gel-Coat" seguido por la aplicación de resina poliéster, procurando que ninguna burbuja de aire quede atrapada, el inicio del curado marca el momento para colocar otra capa de fibra de vidrio pero en petatillo, que asegura una mejor resistencia a la tensión en las direcciones longitudinal y transversal, además de ser fácilmente orientado y configurado para cubrir de manera más eficiente las curvas cerradas.

Una vez construidas las secciones críticas del molde los refuerzos de madera o yeso pueden ser añadidos; otra manera de aumentar la resistencia mecánica es con elementos de poliéster completamente curados y reforzados con fibra de vidrio; éste último presenta mayor afinidad con el material pues el petatillo está humedecido con resina poliéster catalizada. El curado de la resina poliéster es un proceso exotérmico; por eso las capas de material están limitadas a 6mm, en caso de tener mayor espesor existe un riesgo de presentar una fractura durante el secado.

En estos moldes se aplica una última capa, cuando las anteriores de petatillo hayan alcanzado un espesor de 3 mm. Esta última capa consiste en filamento de vidrio cortado a la cual se le somete a la presión constante y repetida de rodillos con discos roladores. Esto tiene la intención de expulsar las burbujas de aire atrapadas. El papel de las capas aplicadas de esta forma se restringe con relación a aquellas realizadas manualmente, pues las primeras presentan sólo del 70 al 80 % de la resistencia a la flexión de las segundas, es decir, la aplicación manual, produce piezas con mayor rigidez.

La fabricación de la estructura interna del molde comienza cuando éste cuenta con un espesor de 6 mm, asunto que es de cuidado, ya que un molde mal reforzado en este sentido puede sufrir pandeos con el uso continuo; para evitar esto se colocan costillas de madera que sirven como elementos de refuerzo y que impiden que el molde modifique su geometría con la aplicación intermitente de fuerzas. Cabe mencionar que cualquier cambio en la geometría del molde se presentará en la geometría del producto, y este puede ser un aspecto de suma importancia cuando se moldean piezas de precisión.

La estructura interna del molde, con espesor de 2 a 2.5 cm y una abertura de 10 a 15 cm de madera laminada, es fijada con resina catalizada y fibra de vidrio. A este refuerzo se le suelen añadir tubos de PVC, aluminio o resina poliéster reforzada con fibra de vidrio acoplados unos con otros en la parte posterior del molde y fijados con fibra de vidrio humedecida con resina catalizada. Una vez construido, el molde cura de 24 a 48 horas o para asegurar el endurecimiento total, se puede colocar en un horno a 50 °C por el mismo tiempo.

### 3.5 Moldes de metal blando.

La fabricación de estos moldes es mediante la deposición de zinc pulverizado o atomizado sobre la superficie del negativo. El metal funde con la temperatura proveniente de un arco eléctrico, por una boquilla penetra aire a presión que proyecta las diminutas gotas de zinc.

En teoría todo metal es susceptible de ser aplicado así, pero en la práctica se prefiere el uso del zinc y sus aleaciones, debido a su baja temperatura de fusión.

Este proceso inicia con el recubrimiento del negativo con un agente desmoldante como el alcohol polivinílico, la aspersión del metal es realizada desde las orillas del negativo, y tiene la función de ir formando la geometría del molde, el proceso finaliza cuando se alcanza el espesor de pared deseado en el molde y posteriormente se remueve éste de la superficie del negativo.

En los moldes positivos de varias cavidades, para obtener un buen copiado del molde es necesario ayudar a la lámina a alcanzar el fondo del molde, en especial cuando las cavidades positivas están muy próximas entre sí, es recomendable emplear una asistencia de formado o empujador.

### 3.6 Moldes de níquel.

Otra técnica utilizada para fabricar prototipos o moldes para bajas producciones es la electro-deposición de níquel sobre la superficie de un negativo conductivo eléctricamente. Comúnmente los negativos están hechos de yeso, madera, cerámica o plástico, materiales aislantes de la electricidad, por ello y para proceder con la electro-deposición se aplica un recubrimiento de barniz de poliuretano; cuando el barniz inicia su curado, este es vaciado con polvo de grafito mediante aire.

### 3.7 Moldes de aluminio.

Cuando se desea que un molde para termoformado tenga una larga vida útil se está pensando en una corrida larga de producción, y para estas aplicaciones los metales como el acero y el aluminio son excelentes candidatos. En particular el aluminio es un material que posee una gran ligereza comparado con el acero y que, además su bajo mantenimiento y poco desgaste, lo ubican como uno de los materiales más adecuados para construir moldes.

Como ya se mencionó, el aluminio es muy ligero, cualidad que no sacrifica el desempeño mecánico, característica necesaria al considerar la importancia de la inercia en el movimiento del herramental y su efecto sobre el proceso de termoformado y la maquinaria. También ha de notarse que este material tiene una conductividad térmica alta, de tal forma que el enfriamiento del material es rápido, logrando reducciones en el tiempo del ciclo de termoformado. La fabricación de estos moldes puede ser mediante dos técnicas: por maquinado o por vaciado del metal fundido.

El proceso de fabricación por maquinado es como sigue: a partir de bloques de aluminio en grados especiales, cuya dureza típica es de 130 Brinell, las superficies del molde son talladas con máquinas herramientas como fresadoras y rectificadoras hasta llegar a la geometría deseada del producto a termoformar.

En cuanto al método por vaciado, el aluminio cae sobre los negativos de cerámica, yeso calcinado, o arena de moldeo a 550 o 600 °C. El vaciado atmosférico produce moldes para corridas cortas o para prototipos, pues resulta en un herramental poroso y con una dureza superficial no uniforme, que en parte impide un terminado constante en la superficie, esto sin considerar los rechupes que se presentan en el molde fundido cuando el material termina de solidificar. En cuanto a la porosidad, provoca problemas en el termoformado por presión debido a la pérdida de aire o cuando las líneas de enfriamiento están cerca de la superficie del molde existe un riesgo constante de exudación del líquido en perjuicio de la calidad de la pieza así como de la estabilidad del proceso.

Mediante el procedimiento de vaciado por presión se produce un molde sin porosidades que presenta mayor densidad, las contracciones sufridas por la solidificación del material se siguen presentando, pero mediante esta técnica son menos notorias, lo que se traduce en una mejor calidad superficial de la pieza termoformada. Otro aspecto de consideración es que mediante el vaciado por presión se pueden conseguir geometrías que presentan muchos detalles, lo que no se podría lograr con máquinas herramientas, con un buen control de los parámetros del proceso se consiguen artículos de muy buena calidad y agradables a la vista del consumidor.

Las técnicas de fabricación anteriormente descritas se aplicarán para obtener un molde dependiendo de la duración de la corrida de producción, de las características del producto a obtener, del material que se desee procesar y de la calidad deseada en el producto fundamentalmente, ya que como se mencionó al principio de este capítulo, el molde es el elemento más importante del proceso de termoformado y es quien le confiere al producto obtenido todas las características que lo hacen funcional y que determinan el nivel de calidad que posee.

Una característica importante del aluminio, que ha de tomarse en cuenta en el diseño del molde de termoformado es su baja dureza superficial, razón por la cual, la colisión contra superficies de rieles, guías, marcos y demás elementos del equipo de termoformado debe evitarse ya que lastima el herramental, pues el acero del que están generalmente hechos es más duro que el aluminio.

Por otro lado, el aluminio presenta un coeficiente de expansión térmica mayor que el acero, es decir, con el incremento de la temperatura el primero se dilata en mayores proporciones, este factor indica que la fijación de estos moldes no es muy estrecha, de lo contrario aparecen pandeos provocados por expansiones térmicas. Esto se debe tomar en consideración sobre todo cuando la corrida de producción es de miles o millones de piezas, ya que es en corridas largas cuando la expansión se puede presentar en dimensiones mayores y puede dañar el equipo. Para conseguir que no se presente alguna deformación

causada por una elevada temperatura en el molde es necesario que éste cuente con un adecuado sistema de refrigeración.

La siguiente tabla resume algunas de las características de los materiales utilizados en la construcción de moldes<sup>(d)</sup>.

GRUPO	MATERIALES EMPLEADOS	VOLUMEN DE PRODUCCIÓN.	VENTAJAS Y DESVENTAJAS.
MADERAS	Pino, caoba, cedro, maple, triplay, aglomerado.	Baja.	Estos moldes se caracterizan por ser de bajo costo, tiempo de construcción corto y buen acabado superficial, aunque en algunos casos la veta de la madera deje marcas de moldeo. La madera deberá estar estufada y si se desea un mejor acabado y evitar cambios dimensionales debido a la humedad, los moldes deberán sellarse con caseína, barniz fenólico o resina epóxica diluida en metil-etil cetona. Para lograr un mejor acabado la veta de la madera debe estar paralela a la longitud del molde, los moldes hechos con triplay o aglomerado tienen más duración. La duración del molde puede prolongarse considerablemente reforzando las aristas con metal.
MINERALES	Yeso (carbonato de calcio) fluosilicato de sodio.	Baja, mediana.	Los moldes de yeso tienen mayor duración que los de madera y pueden vaciarse de un compuesto de yeso de bajo encogimiento, alta resistencia y reforzados en su interior con malla de metal, fibra de vidrio y otros materiales que no absorban humedad. El yeso se vacía sobre el modelo y debe dejarse curar por un tiempo de 5 a 7 días a temperatura ambiente. Si la superficie del moldeo es buena no se requiere un acabado posterior. Los recubrimientos de resina poliéster, epóxica o fenólica proporcionan una superficie más resistente. Deben tenerse extremas precauciones para no astillar el yeso al hacer las perforaciones. Si se dejan previamente insertados trozos de alambre, que sean removidos de su sitio después del secado este proceso se facilita.
RESINAS PLÁSTICAS.	Resina poliéster, resina epóxica, resina fenólica, laminados plásticos, nylon.	Mediana.	Los moldes de resinas plásticas son más costosos y elaborados que los de yeso o de madera, pero ofrecen una mayor duración, superficies más tersas y mejor estabilidad dimensional. A las resinas poliéster, epóxicas o fenólicas se les puede adicionar polvo de aluminio que proporciona una temperatura más homogénea del moldeo, con coalín, fibra de vidrio y otras cargas. A estos moldes se puede incorporar el sistema de vacío, embebiendo media caña de cartón en la parte posterior del molde.
METALES.	Aluminio, cobre-berilio, hierro, acero.	Alta.	Son ideales para grandes corridas de producción, altas presiones o formado mecánico. Pueden usarse moldes de fundición en aluminio, bronce o cualquier otra aleación de bajo punto de fusión, y maquinados en acero, latón o bronce. Son los más costosos, el tiempo de construcción es largo, tienen mejor acabado superficial, bajo costo de mantenimiento y mejor estabilidad dimensional. Es forzoso utilizar el sistema de enfriamiento, así como para enfriamientos rápidos en la pieza.

**Tabla 3.2 Características de los materiales más usuales en la fabricación de moldes de termoformado.**

### 3.8 Moldes de acero.

La aparición en el mercado de procesos de formado a alta velocidad, formado mecánico, corte en molde, formado por presión, formado con calentamiento de molde y termoformado, ha dirigido la atención hacia los moldes fabricados en acero, los cuales son caros, siendo su empleo justificable con el desempeño en condiciones de servicio extremo, altos requerimientos de copiado y estabilidad ciclo a ciclo así como presentar elementos móviles o deslizantes

### 3.9 Criterios para el diseño del molde de termoformado.

Los criterios que se presentan a continuación son el punto medular para cualquier desarrollo que se pretenda fabricar mediante la técnica de termoformado; luego entonces estos criterios básicos y las consideraciones en el diseño de moldes serán los parámetros fundamentales para la construcción del molde, no importando la complejidad que éste pueda tener. Hay que mencionar también que en la construcción del molde es necesaria la evaluación de los siguientes conceptos<sup>(d)</sup>:

- 1.- Forma y dimensiones de la pieza.
- 2.- Apariencia de la pieza.
- 3.-Volumen estimado de fabricación.

Ponderando estos conceptos, posiblemente el más importante sin dejar de tomar en consideración los otros dos sea el volumen estimado de producción, ya que de éste dependerá la definición del tipo de molde, material, acabado, técnica de termoformado, etcétera.

Los siguientes son los criterios básicos para el diseño del molde:

- 1.- Un molde macho es más fácil de usar, cuesta menos y es el más adecuado para formar piezas profundas. En general un molde hembra no deberá emplearse para formar piezas que requieran una profundidad mayor de la mitad del ancho de la pieza. El molde hembra se usará cuando la pieza terminada requiera que la cara cóncava no tenga contacto con el molde.

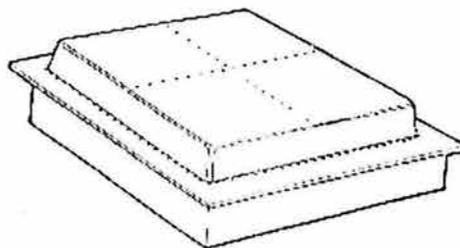
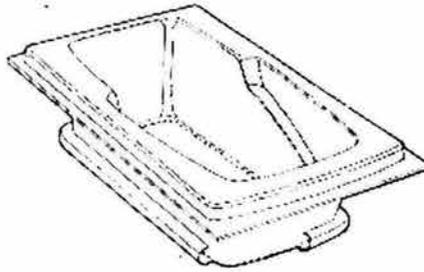


Fig. 3.1 molde macho

Molde macho, en él se observa la ubicación de los orificios de venteo para moldear contenedores multiusos.



**Fig. 3. 2 Molde hembra para fabricar bañeras.**

2.- Los moldes deberán contar con suficientes orificios de vacío para que la lámina revenida pueda estirarse en las partes críticas del molde, los orificios del molde deberán hacerse en las partes más profundas y en las áreas donde el aire pueda quedar atrapado, deben ser lo suficientemente pequeños para no causar marcas (de 1/32 in a 1/8 in de diámetro). Se puede lograr un vacío más efectivo si el orificio es agrandado por la parte interna.

3.-Deberá proveerse el molde de conductos que permitan la circulación de agua o aceite a través del mismo cuando se requiera un control de temperatura.

4.-Cuando las dimensiones de la pieza formada sean críticas, los moldes deberán construirse de dimensiones mayores para compensar la contracción del material. La contracción que debe esperarse de la temperatura de moldeo a la temperatura ambiente es de 1% máximo.

5.- Una pequeña curvatura del molde en las partes planas de áreas grandes permitirá obtener áreas planas al enfriar la pieza.

6.- No se podrán obtener piezas con paredes a 90 grados, el molde deberá tener un ángulo de salida de por lo menos 3 grados.

7.- Es recomendable redondear las aristas ya que el formado en vértices acumula esfuerzos internos. La resistencia de la pieza será mayor diseñando orillas, esquinas y cantos redondeados.

8.- Las partes delgadas o más débiles pueden reforzarse con costillas, las cuales reforzarán también áreas planas de gran tamaño.

9.-Si es necesario moldear incrustando un inserto permanente, debe considerarse, la diferencia de coeficientes de expansión de los diferentes materiales, de lo contrario podrá fallar la pieza a causa de un inserto forzado por la diferencia de expansiones y contracciones de los materiales en contacto.

10.- La superficie de los moldes puede ser forrada con franela de algodón, fieltro, terciopelo, gamuza u otros materiales para disminuir las marcas del molde; lo más usual es utilizar franela de algodón.

### 3.10 Consideraciones en el diseño de moldes de termoformado.

Una de las grandes ventajas en el proceso de termoformado es la diversidad y tipo de moldes que se pueden fabricar a un costo muy bajo y en tiempos relativamente cortos, teniendo una gran preferencia en varias aplicaciones sobre otros procesos.

Generalmente sólo la mitad del molde se necesita y depende de la forma del producto, la apariencia deseada y la técnica seleccionada (puede ser molde macho o hembra).

La elección de la forma adecuada se vuelve más importante cuando la pieza a termoformar es más profunda. Cuando son piezas poco profundas, perfiles pequeños o cuando el adelgazamiento en el espesor del material es despreciable, entonces la elección dependerá de la apariencia de la pieza. Si el detalle del molde es importante, entonces el lado de la hoja de plástico que toca la superficie del molde deberá ser la vista de la pieza.

Algunas veces la geometría del producto deseado presenta radios considerables que requieren un mayor estiramiento de la lámina para poderse formar, entonces en estos casos la cara que no toca la superficie del molde eventualmente será la vista de la pieza, adicionalmente se debe tener un control dimensional más cerrado con la superficie del molde.

Es necesario aclarar que las superficies obtenidas mediante los procesos de inyección y extrusión no podrán conseguirse mediante las técnicas convencionales de termoformado. Inclusive los materiales altamente brillantes, pueden perder su brillo durante el proceso, adicional a que tienden a enfatizar marcas y ondulaciones por contacto de un molde frío y cambios en el espesor del material. El cambio en espesor del material es un factor que puede causar pequeñas distorsiones en el producto formado, de esta manera, es importante que en el proceso de extrusión de la lámina el espesor sea un factor de sumo cuidado. Se recomienda que todos los contornos estén bien redondeados, de hecho un molde con radios grandes beneficiará la operación de termoformado ya que el material tenderá a estirarse mejor.

Si se requiere que el material copie detalles del molde, como texturas antiderrapantes u otras similares, estos por lo menos deberán tener una altura tres veces mayor que el espesor del material, de no ser así sería necesaria una capacidad mayor de vacío, si el formado es por vacío, o una presión de aire mayor, si el formado es por aire a presión, esto a su vez, se traduce en un mayor costo del equipo de termoformado y en un mayor costo del producto. Para lograr que la superficie del molde tenga la menor rugosidad posible se puede tallar esta superficie con esferas de vidrio o materiales abrasivos, con esto se puede eliminar el aire atrapado permitiendo el movimiento del aire entre el molde y la pieza. A veces es conveniente rayar la superficie del molde con una lija burda, esto ayuda en la etapa de desmoldeo para romper el vacío que existe entre el molde y la pieza.

En la siguiente tabla se encuentran los niveles de rugosidad que se pueden obtener por diferentes métodos de fabricación.

Proceso	Micras ( $\mu\text{m}$ )	Micropulgadas ( $\mu\text{in}$ )
Aserrado	25-12.5	1000-500
Fundición en arena	25-6.3	1000-250
Fundición en molde permanente	3.2-1.8	125-63
Fresado	6.3-1.6	250-50
Taladrado	6.3-1.8	250-63
Láser	4.0-0.8	200-32
Electro erosión	6.3-1.8	250-63
Materiales abrasivos	1.8-0.4	63-16
Pulido.	0.7-0.4	30-16

**Tabla 3.3 Rugosidades obtenidas mediante diferentes procesos en la construcción de moldes de termoformado.**

Cuando se utiliza una temperatura baja de moldeo, la hoja conservará una mayor tenacidad y elasticidad. Para piezas grandes, se recomienda incrementar el tiempo o temperatura de moldeo con zonas difíciles de termoformar y así se minimiza este tipo de defecto. En el caso de una lámina de moldeo profundo por tener una estructura parcialmente entrecruzada tiende a minimizar el defecto de las arrugas.

### 3.11 Venteo del molde (desplazamiento de aire).

Los moldes hechos con los materiales y procesos descritos anteriormente deben contar con orificios de venteo que los hagan funcionales para el proceso de termoformado. A través de estos orificios el vacío es aplicado con el propósito de forzar la lámina termoplástica caliente contra el molde. La ubicación de los orificios de venteo es uno de los aspectos más críticos, ya que si son insuficientes o se ubican en zonas equivocadas, los moldes no son funcionales y el proceso de termoformado no puede tener éxito.

En general el diámetro de los barrenos de vacío deberá ser ligeramente menor al espesor del material. Como punto de partida, los barrenos de vacío tendrán un diámetro equivalente al espesor final de la pieza termoformada, para aquellos casos en que el espesor del material sea muy delgado o grueso, o que no importe si se marcan estos orificios, entonces esta recomendación no aplica. Podemos considerar que un rango apropiado está entre 1/32 in hasta 1/8 in de diámetro. En caso necesario para desplazar un volumen grande de aire, se pueden barrenar orificios de 1/8 in o 1/4 in de diámetro dependiendo de la construcción del molde.

La localización y el número de orificios de venteo son tan importantes como sus dimensiones. Los orificios de venteo deben estar interconectados por canales en la parte posterior del molde, que viaje por toda ella y con un sistema de bombeo que los conecte con la fuente de la fuerza de formado. El sistema de bombeo y todos los canales deben estar provistos de tuberías flexibles que no restrinjan el movimiento repetitivo del molde.

La ubicación de los orificios de venteo en el molde se realiza usualmente por barrenado, si el molde es fundido o de materiales epóxicos, esto se puede realizar insertando alambres que posteriormente se retiran cuando el material ha solidificado. La determinación del

número y localización de los orificios de venteo obedece a la práctica común en la fabricación de moldes de termoformado.

### 3.11.1 Dimensiones de los orificios de venteo.

Para comenzar, es necesario determinar las dimensiones máximas de los orificios que optimizan el proceso de termoformado, así como también la presión de formado que puede ser introducida a través de ellos; sin embargo, orificios muy grandes pueden ocasionar marcas en los artículos termoformados. En algunos casos estas marcas originadas por el sobredimensionamiento de los orificios dan un acabado inaceptable a los artículos plásticos. Por esta razón los fabricantes de moldes reducen las medidas de los orificios de venteo en el molde.

En la siguiente tabla se encuentran las medidas funcionales para orificios de venteo en moldes de termoformado.

Medida fraccionaria (in)	Calibre del barreno (in)	Equivalente decimal (in)	Medida fraccionaria (in)	Calibre del barreno (in)	Equivalente decimal (in)
	80	0.0135	1/32	66	0.0330
	79	0.0145		65	0.0350
				64	0.0360
1/64	-	0.0156		63	0.0370
	78	0.0160		62	0.0380
	77	0.0180		61	0.0390
	76	0.0200		60	0.0400
	75	0.0210		59	0.0410
	74	0.0225		58	0.0420
	73	0.0240		57	0.0430
	72	0.0250		56	0.0465
	71	0.0260			
	70	0.0280	3/64	-	0.0469
	69	0.0292		55	0.0520
	68	0.0310		54	0.0550
				53	0.0595
1/32	-	0.0312			
	67	0.0320	1/16	-	0.0625

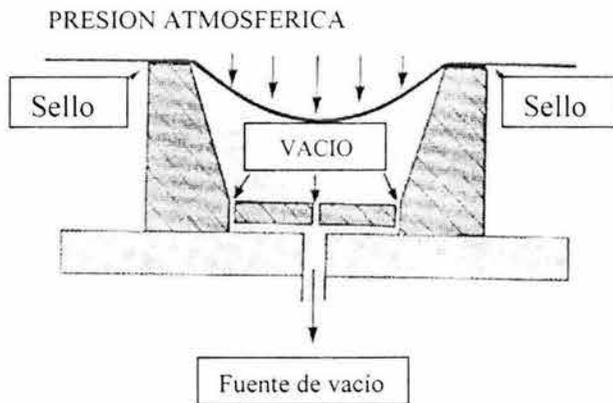
Tabla 3.4 Diámetros de orificios de venteo utilizados en moldes para termoformado.

### 3.11.2 Localización de los orificios de venteo.

El segundo criterio en la fabricación de un molde es la elección de la ubicación de los orificios de venteo. Para llegar a la máxima transferencia de detalles del molde hacia la lámina plástica todo el aire atrapado en la parte interna del molde debe ser evacuado por medio de vacío o fuerzas de presión. Una vez que se ha atrapado el aire entre la superficie del molde y la lámina plástica, este aire debe ser removido por medio de los orificios de venteo. Para una remoción ideal del aire, los orificios de venteo deben ser situados a lo largo de las esquinas y en toda el área de contacto entre el molde y la lámina plástica,

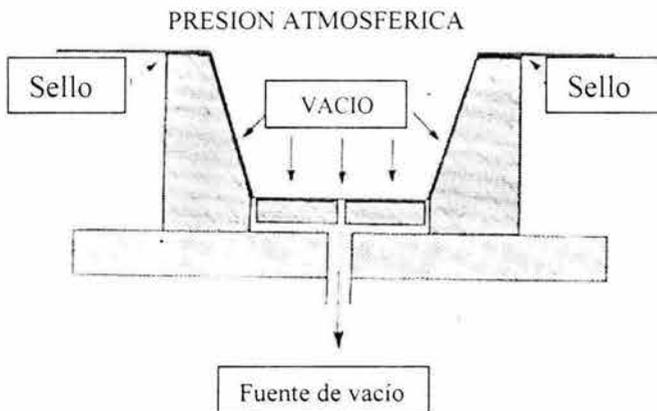
incluyendo cavidades y corazones. Una ubicación errónea de los orificios puede traducirse en defectos en la pieza obtenida como arrugas, esfuerzos y otros más.

La localización ideal de los orificios de venteo en el molde incluye un gran número de ellos en la estructura del mismo; además la velocidad y calidad del proceso de termoforado en particular hacen de la evacuación del aire un factor muy importante. En las siguientes figuras observamos un ejemplo de la localización correcta e incorrecta de orificios de venteo.

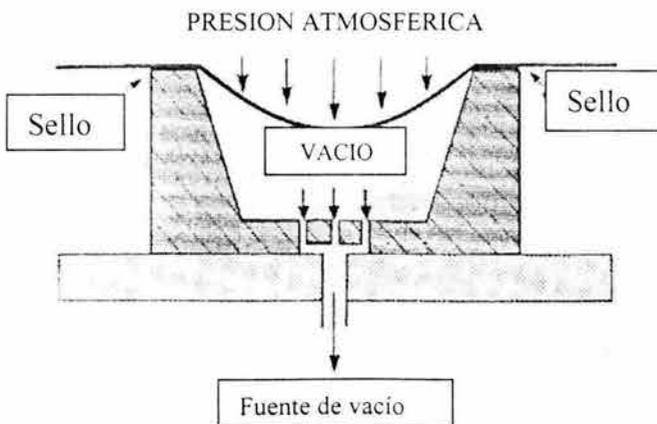


MOLDE CON UNA CORRECTA UBICACIÓN DE LOS ORIFICIOS DE VENTEO

a) El formado comienza satisfactoriamente, el vacío es aplicado. La lámina está correctamente sellada y la lámina reblandecida.

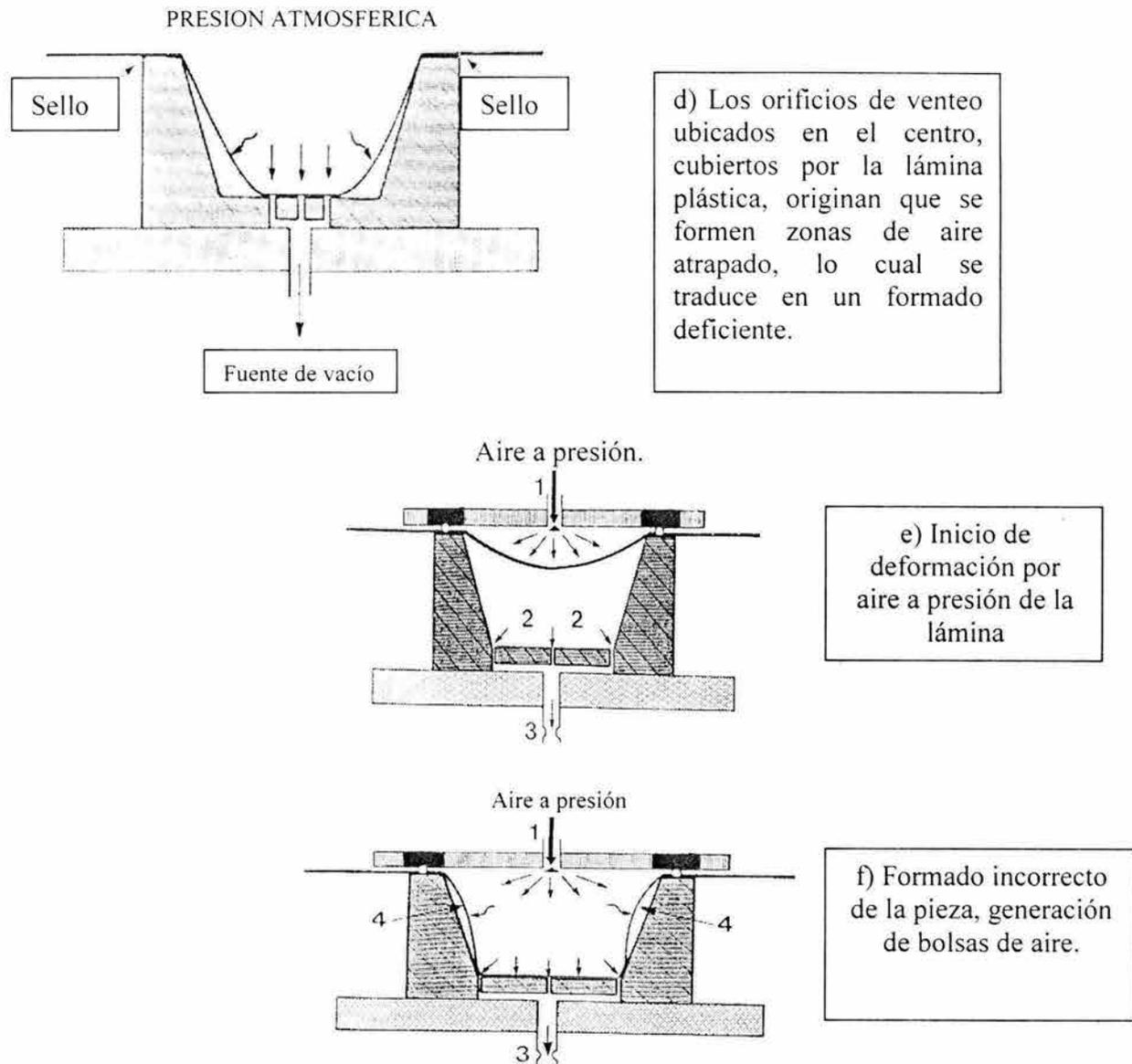


b) El formado es realizado con un detallado completo.



MOLDE CON UNA INCORRECTA UBICACIÓN DE LOS ORIFICIOS DE

c) El formado inicia de la misma manera que en la otra disposición de los orificios de venteo.



**Fig. 3.3 Condiciones de formado sobrepresurizado. a) Entrada de fuerza de presión. b) Insuficientes orificios de venteo. c) Restricciones en la línea de vacío. d), e), f) Bolsas de aire atrapadas.**

En la figura 3.3 se observa la formación de bolsas de aire entre el molde y la lámina plástica, defecto que es ocasionado por una incorrecta ubicación de los orificios de venteo. Adicionalmente, se observa que el número de orificios de venteo es insuficiente.

Para determinar el número de orificios necesario en el molde, la capacidad volumétrica del molde debe ser determinada. Este valor representa el desplazamiento de aire que tendrá lugar cuando el proceso de termoformado se lleve a cabo. Para formas geométricas

sencillas, es fácil determinar el volumen de desplazamiento del molde; sin embargo, con formas complicadas o irregulares, el cálculo ya no es tan fácil. Los valores son estimados aproximadamente con formas geométricas conocidas y así se llega a un valor global; para una determinación exacta de este valor las cavidades del molde pueden ser rellenas con materiales que fluyen libremente.

El diámetro de la salida de la bomba debe ser confrontado con el del resto de la tubería. Una restricción en las líneas de evacuación causará una disminución en las fuerzas de vacío creando defectos. Adicionalmente, la sección transversal de la tubería debe ser dividida por el número de cavidades del molde y luego por el barreno escogido, este cálculo es expresado por la siguiente fórmula:

$(P/U) / D =$  número de orificios de venteo requeridos por cavidad del molde.

Donde : P es el área de la sección transversal de la línea de succión.

D es el área de los orificios de succión.

U es el número de cavidades del molde.

Esta fórmula proporciona el número mínimo de orificios necesarios para lograr las fuerzas de vacío necesarias por cada cavidad.

Dependiendo de la medida de los orificios así como de las condiciones que prevalezcan en el lugar y de la duración de la corrida de producción es usual que se tenga una buena cantidad de orificios inhabilitados por algunas basuras que se logran incrustar en ellos o por el fenómeno de corrosión.

Cuando las características de diseño del molde no requieren fuerzas de vacío máximas una simple instalación de una válvula entre la bomba y el molde puede reducir la fuerza de vacío a niveles satisfactorios.

El número de orificios de venteo se vuelve más crítico cuando el formado se realiza aplicando aire a presión sobre la hoja reblandecida para obligarla a que entre en contacto con el molde y adquiera su geometría, este aire a presión ejerce una fuerza sobre el molde, misma que ha de tomarse en cuenta en el diseño del mismo. El formado por presión no solamente utiliza mayor fuerza que el formado por vacío, sino que también se lleva a cabo mucho más rápidamente. Como una comparación entre estos dos tipos de termoformado, cabe mencionar que por vacío a 29.92 (in Hg) se produce una fuerza de formado equivalente a 0.1013 MPa (14.7 psi) en el formado por presión, por otro lado, utilizan entre 0.3448 - 0.6896 MPa (50 - 100 psi) . La siguiente tabla compara los niveles de vacío y las fuerzas de presión.

Cuando altos niveles de fuerza de presión son aplicados contra la lámina termoplástica, el aire atrapado por el otro lado de la misma debe ser evacuado rápidamente.

Vacío (in Hg)	Presión		Vacío (in Hg)	Presión	
	(psi)	(MPa)		(psi)	(MPa)
5.00	2.45	0.0169	18.00	8.66	0.0597
6.00	2.94	0.0202	18.36	9.00	0.0621
6.12	3.00	0.0206	19.00	9.32	0.0642
7.00	3.43	0.0237	20.00	9.81	0.0677
8.00	3.92	0.0270	20.40	10.00	0.0689
8.16	4.00	0.0276	21.00	10.30	0.0710
9.00	4.42	0.0305	22.00	10.79	0.0744
10.00	4.91	0.0339	22.44	11.00	0.0749
10.20	5.00	0.0345	23.00	11.28	0.0778
11.00	5.40	0.0372	24.00	11.77	0.0812
12.00	5.89	0.0406	24.48	12.00	0.0828
12.24	6.00	0.0414	25.00	12.27	0.0846
13.00	6.38	0.0440	26.00	12.76	0.0880
14.00	6.87	0.0474	26.52	13.00	0.0901
14.28	7.00	0.0483	27.00	13.25	0.0914
15.00	7.36	0.0507	28.00	13.74	0.0947
16.00	7.85	0.0541	28.56	14.00	0.0966
16.32	8.00	0.0552	29.00	14.23	0.0981
17.00	8.34	0.0575	29.92	14.70	0.1014

**Tabla 3.4 Conversión entre presión positiva y presión negativa para procesos de termoformado.**

Pies cúbicos de aire por minuto para una línea simple, diámetro en (in)											
Medidor de presión(psi)	1/64	1/32	1/16	1/8	1/4	3/8	1/2	5/8	3/4	7/8	1
3	0.048	0.194	0.770	3.100	12.4	27.8	49.5	77.5	111	152	198
4	0.056	0.223	0.890	3.500	14.3	32.1	57.0	89.2	128	175	228
5	0.062	0.248	0.990	3.970	15.9	35.7	63.5	99.3	143	195	254
6	0.068	0.272	1.090	4.340	17.4	39.1	69.5	109	156	213	278
7	0.073	0.293	1.170	4.680	18.7	42.2	75.0	117	168	230	300
9	0.083	0.330	1.320	5.300	21.1	47.7	84.7	132	191	260	339
12	0.095	0.380	1.520	6.070	24.3	54.6	97.0	152	218	297	388
15	0.105	0.420	1.680	6.720	26.9	60.5	108	242	242	329	430
20	0.123	0.490	1.960	7.860	31.4	70.7	126	196	283	385	503
25	0.140	0.560	2.250	8.980	35.9	80.9	144	225	323	440	575
30	0.158	0.630	2.530	10.10	40.5	91.1	162	253	365	496	648
35	0.176	0.700	2.810	11.30	45.0	101	180	281	405	551	720
40	0.194	0.770	3.100	12.40	49.6	112	198	310	446	607	793
45	0.211	0.840	3.380	13.50	54.1	122	216	38	487	662	865
50	0.229	0.920	3.660	14.70	58.6	132	235	366	528	718	938
60	0.264	1.060	4.230	16.90	67.6	152	271	423	609	828	1082
70	0.300	1.200	4.790	19.20	76.7	173	307	479	690	939	1227
80	0.335	1.340	5.360	21.40	85.7	193	343	635	771	1050	1271
90	0.370	1.480	5.920	23.70	94.8	213	379	592	853	1161	1516
100	0.406	1.620	6.490	26.00	104.0	234	415	649	934	1272	1661
110	0.411	1.760	7.050	28.20	113.0	254	452	705	1016	1383	1806
120	0.476	1.910	7.620	30.50	122.0	274	488	762	1097	1494	1951

**Tabla 3.5 Volumen de aire evacuado en el proceso de termoformado como función de la presión y el diámetro de la línea de succión.**

Para determinar el número ideal de orificios de venteo en un modelo de formado a presión siempre es bueno hacer más orificios de los que se harían usualmente en la técnica de formado por vacío. Si el molde no tiene suficientes orificios de venteo las deficiencias se mostrarán en los resultados del formado, es decir, en la apariencia de las partes y en las lentas velocidades de formado. Para estimar la evacuación del aire del molde y, con ellas, las razones de flujo para varios niveles de presión la tabla 3.5 puede ser consultada.

### 3.12 Control de temperatura en el molde.

En el proceso de termoformado, el molde lleva acabo una doble función, la primera es la de proveer la forma de un producto a una lámina plástica y la segunda e igualmente importante, es la de absorber el calor del plástico formado para que el plástico pueda mantener la forma adquirida. En un proceso de termoformado de ciclos cortos, el plástico caliente está en contacto con el molde más frecuentemente que en ciclos largos; entonces, por la rápida repetición del ciclo el molde mismo o en conjunto con la estructura de la máquina de termoformado no puede disipar el calor adquirido.

Sin enfriamiento, el calor se acumularía en el molde y eventualmente alcanzaría el mismo nivel de calor que la lámina termoplástica para formado. Los moldes que logran alcanzar la misma temperatura que la lámina reblandecida o cercana a ella no podrán brindar un enfriamiento al producto termoformado después del ciclo de formado, esto hará menos eficiente el proceso y elevará el tiempo de las corridas de producción. Para efectuar el enfriamiento del molde, éste debe recibir algún tipo de refrigerante que rápidamente disminuya su temperatura. Un método auxiliar de enfriamiento continuo rápidamente disminuirá la temperatura en la operación completa de termoformado.

El método de enfriamiento debe ser ajustable para incrementar o decrementar los efectos del mismo, los ajustes en el enfriamiento deben proveer un amplio rango de temperaturas para mantener la temperatura deseada en el molde para el proceso específico de termoformado.

En algunos casos, la operación completa de termoformado puede ser manejada sin enfriamiento. El calor del artículo formado puede ser disipado por la estructura de la máquina empleada para este proceso. Además parte de este calor es eliminado a través de la superficie del artículo formado y hacia el medio ambiente.

Este tipo de enfriamiento puede ser incrementado con la colocación de ventiladores, los cuales no deben ser colocados apuntando directamente hacia el área a termoformar, ya que pueden producir corrientes no deseadas que pueden significar errores en la pieza.

Si el aire del ambiente está también caliente, para enfriar eficientemente la lámina plástica, se coloca una unidad que produzca una corriente de bajo volumen de salida con agua a presión misma que es instantáneamente vaporizada al contacto con el aire, la vaporización, con la característica de absorción del calor, reducirá la temperatura del aire y así se conseguirá el efecto de enfriamiento.

Cuando prevalecen condiciones de alta humedad, este método es obviamente menos eficiente que en otras ocasiones, la corriente puede producir absorción de humedad en las superficies cercanas.

### 3.13 Enfriamiento del molde.

El calor acumulado en el cuerpo del molde debe ser removido para proveer completamente la función de enfriamiento al artículo plástico formado. Para realizarse esto, la temperatura del molde debe permanecer ligeramente por debajo de la temperatura de la hoja plástica. Para realizar esta tarea se pueden implementar equipos, sobre todo en producciones de alta velocidad de termoformado.

La fuente de enfriamiento puede ser provista por una unidad de control de temperatura y una unidad de enfriamiento de agua. En este caso el enfriamiento es acompañado de la circulación de fluidos refrigerantes. Estos fluidos están básicamente compuestos de agua con algún tratamiento químico, usados fundamentalmente para evitar la corrosión.

Algunos químicos base glicol pueden ser añadidos al agua para hacer las veces de anticongelante; es raro, pero también se usa el Freón en sistemas de enfriamiento. El propósito de emplear fluidos de enfriamiento es absorber el calor del molde con el flujo del refrigerante, retirando el calor de la estructura del molde.

El primer requerimiento de este sistema de enfriamiento es suministrar el suficiente flujo de refrigerante. Los fluidos refrigerantes deben ser circulados en el cuerpo del molde por una bomba. El acoplamiento del sistema de bombeo y el molde, así como de otros sistemas se hace con mangueras flexibles. Las líneas de bombeo son usualmente equipadas con válvulas que confinan el fluido refrigerante en el molde cuando este va a ser removido y cambiado en la máquina.

Además estas válvulas tiene otro propósito diferente a la contención del fluido durante los cambios de molde, también pueden ser utilizadas como regulador para reducir o incrementar el flujo de los fluidos refrigerantes, proporcionando más o menos enfriamiento al molde. Un enfriamiento uniforme y eficiente se logra con un sistema que cubra completamente el cuerpo del molde; por otra parte, el fluido dentro del molde debe circular a una razón suficiente para prevenir la formación de burbujas que hagan decrecer la eficiencia del enfriamiento del molde.

El segundo requerimiento en este tipo de método de enfriamiento está relacionado con la razón de flujo del fluido. El patrón de flujo del refrigerante en el interior del molde debe ser diseñado con mucho ingenio para mantener una temperatura uniforme en todo el molde. Si esto no se cumple, el molde estará frío donde entra el refrigerante y se calentará donde sea su salida.

La medición de la temperatura de las superficies del molde no puede revelar patrones de flujo incorrectos. La medición de la temperatura del refrigerante a la entrada y a la salida puede ser de ayuda en este sentido, los cambios leídos en la temperatura pueden ser causados por varios factores adicionales a los cambios en las condiciones del

termoformado, por ejemplo las razones de flujo del refrigerante, restricciones del bombeo del fluido, acoplamiento de otros sistemas al molde, bloqueo de los canales de enfriamiento restringiendo el flujo en las superficies del canal de enfriamiento y cambios en la dirección del flujo entre otros.

El molde puede estar hecho solamente con estructuras de pared, es decir hueco, y en este caso el refrigerante debe ser bombeado con altos niveles de velocidad de flujo y también debe tener algunas características del flujo turbulento que se consiguen con las altas velocidades del flujo.

Aspectos negativos del enfriamiento en moldes pueden encontrarse cuando las operaciones de termoformado son detenidas y luego se vuelven a reanudar, como en otros procesos, en estos casos la temperatura no se puede tener bajo control. En una operación continua, así como con un enfriamiento continuo del molde, el molde experimentará mayor enfriamiento durante los paros que el proceso requiera.

**REFERENCIAS:**

(a) **Throne James**

"Thermoforming"  
Hanser Publishers 1985.

(b) **John Florian**

"Practical Thermoforming, Principles and Applications"  
pg. 79.

(c) **Enciclopedia del Plástico**

IMPI

(d) **L.D.I José A. Gallardo Frade,**

"Manual Técnico de Termoformado"  
Plastiglas.

(e) **William K. McConnell Jr.**

"Thermoforming"  
pg. 1357 - 1361.  
President McConnell Company Inc.  
P.O.Box 11512 Fort Wort TX76110

## CAPÍTULO 4

### DISEÑO DE UNA MÁQUINA PARA TERMOFORMADO

*\* Justificación para el diseño y construcción de una máquina de termoformado de plásticos.*

Como ya se mencionó en los antecedentes del proceso de termoformado, este proceso tiene en la actualidad un gran crecimiento debido a la variedad de aplicaciones que se le han encontrado hasta situarse hoy en día como uno de los procesos de transformación de plásticos más prometedores del presente siglo.

Sin duda alguna, el crecimiento que tiene este proceso ha sido posible gracias a que en el terreno de la fabricación de herramental y maquinaria también se han tenido significativos avances. Cada vez las máquinas que producen artículos termoformados presentan nuevas variantes que las hacen más versátiles, rentables y novedosas.

Por esta razón, nace la necesidad de realizar mejoras a los diseños que se encuentran en el mercado para este tipo de maquinaria, mejoras que estén encaminadas a la obtención de productos termoformados de una mejor calidad y a un menor costo tomando en cuenta la diversidad de materiales poliméricos que se tienen a disposición.

Considerando que en los equipos actuales hay restricciones en cuanto al tamaño de los productos, que la cantidad de calor emitida es constante no importando si toda ella es aprovechada para llevar a cabo el formado y que su costo en ocasiones es muy elevado, el diseño que presentamos toma como puntos de mejora los anteriores con un incremento en la calidad de los productos obtenidos con esta máquina.

Se ha observado que la cantidad de material plástico que se tiene que cortar una vez que se ha formado un producto es grande, y si a eso le aumentamos que las corridas de producción son ordinariamente de miles de piezas, esto da como resultado una gran cantidad de material que no se aprovecha plenamente y que hace que los artículos obtenidos mediante este sistema sean más caros.

Por otra parte, la energía que se utiliza para calentar la lámina en la máquina de termoformado, no debe variar o excederse más allá de lo permitido para cada tipo de material a termoformar, requiriendo por lo tanto de un buen control de ella. Por estas dos razones, en particular, el diseño que se propone plantea un bastidor ajustable a tres áreas diferentes siendo la mayor de 75 x 60 cm, esto con el propósito de que si el producto que deseamos fabricar es pequeño se utilice un bastidor pequeño para que sea menor la cantidad de material que se tenga que remover en el proceso final de corte.

Por otra parte, al contar con tres diferentes áreas de formado, la cantidad de calor emitida también tiene que ser regulada para proveer la energía requerida y no más, razón por la cual el panel de calentamiento con que cuenta esta propuesta de diseño tiene resistencias cerámicas que están dispuestas de manera que puedan operarse en arreglos de manera

independientemente y dar el calentamiento para la lámina plástica de una manera uniforme y rápida.

En la descripción del proceso de termoformado se mencionó que la lámina plástica se calienta para posteriormente ser moldeada, para esto es necesario contar con un mecanismo que traslade la hoja de un sitio a otro, este mecanismo puede ser construido para que funcione de forma mecánica o neumática, la primera se lleva a cabo accionando un pedal que cuenta con un sistema de poleas y contrapesos para elevar la lámina hasta llevarla a la distancia apropiada del panel de calentamiento y, posteriormente, la baja hasta ponerla en contacto con la superficie del molde; y la otra forma de realizar la misma operación es por medio de un pistón neumático que está acoplado a la bomba de vacío, este último, es más eficiente pero también más costoso.

### Propuesta de diseño

Con base en los capítulos anteriores y los argumentos dados al inicio de este capítulo los requerimientos para la máquina de termoformado de mediana capacidad son:

Bastidor ajustable a tres diferentes áreas de formado:	75 x 60 cm 70 x 55 cm 65 x 50 cm
Espesor de la lámina plástica a transformar:	0.5 – 2.5 mm
Presión de vacío necesaria:	0.09466 – 0.0984 MPa.
Cámara de vacío:	seccionada en tres partes de acuerdo a las dimensiones del bastidor, profundidad de 3 cm.
Profundidad de formado máxima:	15 cm
Temperatura de formado:	146 – 288 °C
Variación de temperatura:	+/- 3 °C
Potencia de la fuente de calentamiento:	10 – 60 kW/m <sup>2</sup>
Sistema neumático de desplazamiento del bastidor:	pistón doble efecto (482 N)

## 4.1 Fuente de emisión de calor.

### 4.1.1 Planteamiento del problema:

Para el proceso de termoformado, el parámetro más importante para la formación de la lámina plástica, es la temperatura. Dentro de los distintos medios para calentar la lámina plástica, la transferencia de calor por radiación es la mejor de acuerdo al análisis previo. Para la lámina de área máxima de 75 x 60 cm y 3 mm de espesor, es necesario calentarla uniformemente y con una rapidez necesaria para no degradarla o afectar sus propiedades finales. Por lo que, esta fuente deberá responder instantáneamente y mantener constante la temperatura.

El control de la temperatura debe cumplir con los siguientes requisitos:

- Variación entre +/- 3 °C.
- Buena respuesta al calor
- Facilidad de programación.

#### 4.1.2 Método de diseño (análisis y decisión):

En la selección de la fuente para el calentamiento por radiación, se ha escogido el “*Método de propiedades ponderadas*”, el cual parte de un conjunto de materiales previamente elegidos para esta aplicación y de las propiedades a considerar, estas propiedades tendrán un peso, que dependerá de la importancia dentro del proceso y según el criterio del diseñador. El valor de la propiedad ponderada lo obtendremos multiplicando el valor numérico de la propiedad por el factor de peso (A). Así, los valores de la propiedad ponderada individualmente para cada material se suman para dar como resultado un índice de desempeño gama ( $\gamma$ ) y el material con el índice de desempeño más alto será el escogido.

$$\gamma = \Sigma B A$$

Cada propiedad se escala en un valor numérico que no exceda de 100 y el resto de los valores se escalan en proporción a este más alto.

Donde:

$$B = (\text{valor numérico de la propiedad} \times 100) / \text{valor máximo que se tenga en la lista}$$

Y en el caso donde se tengan valores mínimos, donde se desea reducir la propiedad:

$$B = (\text{valor mínimo que se tenga en la lista} \times 100) / \text{valor numérico de la propiedad}$$

Si la propiedad carece de valores cuantitativos, entonces es usual aplicar la valoración en términos de bueno, regular y malo dando valores numéricos de 1 a 5.

A continuación se plantean las propiedades de diseño relacionadas con la temperatura:

1. Eficiencia de la transformación de energía. Esta debe ser alta para asegurar un calentamiento uniforme y un mayor aprovechamiento de energía.
2. Se debe alcanzar un máximo de temperatura, abarcando un rango de temperaturas de formado de los distintos materiales que se puedan termoformar en la máquina a diseñar. Dicho rango se encuentra entre 146° C para el Polietileno de alta densidad y 288° C para el Teflón.
3. La energía de la fuente (kW/m<sup>2</sup>), marcará el rango de operación necesario, y establecerá un valor máximo.

A temperaturas bajas la radiación se esparce sobre longitudes de onda mayores y viceversa, debido a que cada plástico absorbe radiación infrarroja en distintas regiones. Por lo que, para escoger la fuente adecuada, se ha de efectuar el cálculo de la energía máxima para el

caso de nuestro producto, y así comparar los resultados, teórico y de diseño, junto con las características de los proveedores, para su selección.

De la Tabla 2.4 “Los plásticos para Termoformado, temperaturas de la fuente emisora y sus longitudes de onda”, tomamos como ejemplo el PVC y tenemos:

Temperatura de la fuente de emisión 885 – 1045° C  
A una longitud de onda  $\lambda$  [2.2 – 2.5]  $\mu\text{m}$

Para el cálculo teórico, utilizando las ecuaciones del análisis para el calentamiento vista en el capítulo 2, la energía máxima, será:  $E_{b, \lambda} = \sigma T_h^5$

Con  $\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$  y donde asignaremos para nuestro material  $T_h = 1015 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $\lambda = 2.35 \text{ } \mu\text{m}$ , por lo que resulta:

$$E_{b, \lambda} = 5.670 \times 10^{-8} (1015 + 273)^5 = 45.6203 \text{ KW/m}^2$$

Y ahora para calcular la energía máxima que puede dar nuestra máquina de termoformado para el PVC, tenemos de la fórmula planteada:

$$Q/A = h (T_s - T_\infty) + \sigma F_g F (T_h^4 - T_s^4)$$

Con los siguientes parámetros

$h = 20 \text{ W/m}^2 \text{ k}$   
 $T_s = 171^\circ \text{ C}$   
 $T_\infty = 25^\circ \text{ C}$   
 $T_h = 1015^\circ \text{ C}$   
 $\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$

$$F_g = 1 / (1/\epsilon_h + 1/\epsilon_s - 1) = F_g = 1 / (1/0.9 + 1/0.3 - 1) = 0.29$$

$$\epsilon_h = 0.9, \epsilon_s = 0.3 \text{ de tablas. con } M = 55/20 = 2.75,$$

$$\text{y } N = 80/20 = 4 \text{ de la Figura 2.5, } F = 0.6$$

tenemos:

$$Q/A = 20((171+273) + (25 + 273)) + 5.670 \times 10^{-8} (0.29) 0.6 ((1015 + 273)^4 - (171 + 273)^4)$$

$$Q/A = 41\,608.21 \text{ W/m}^2 = 41.60821 \text{ kW/m}^2$$

Podemos observar que los valores obtenidos son muy parecidos, lo cual nos indica que estamos dentro del rango correcto para el calentamiento adecuado de la lámina de PVC. Sin embargo, con el valor de  $Q/A$ , que es para el diseño específico de nuestra máquina, podemos seleccionar el tipo fuente de radiación que cumpla con todos los parámetros necesarios para el termoformado adecuado. Y así, para este punto 3, el valor necesario, para tener un calentamiento óptimo es de aproximadamente  $42 \text{ kW/m}^2$  (en el caso del límite superior). Cabe mencionar que cada tipo de fuente de radiación, puede regularse de acuerdo a la temperatura deseada.

4. Respuesta al calor, esta propiedad de la fuente debe ser buena y predomina al principio del proceso, después solo se controla y el rango deseado es de los 3 a los 5 minutos.

5. Control y programación, indica la capacidad de cada fuente y se numerará de 1 a 4, de bueno a malo.

Fuente de radiación	Eficiencia % *	Temperatura máxima (°C)	Energía máxima (kW/m <sup>2</sup> )	Control y programación (de bueno a malo)	Respuesta al calor		Montaje y dimensiones pequeñas (de bueno a malo)	Costo (de caro 6 a barato 1)
					(seg)	(de bueno a malo)		
Tubo de cuarzo	61	880	77.5	2	60	2	1	3
Lámpara de cuarzo	86	2200	310.0	1	3	1	2	6
Catalítico	80	430	15.8	4	1800	6	3	1
Panel	88	880	50.0	3	400	4	2	2
Cerámica	96	700	60.0	2	420	5	1	4
Gas	55	1100	300	3	150	3	3	5

\*datos obtenidos de los fabricantes.

**Tabla 4.1 Propiedades a considerar de varias fuentes de calentamiento.**

Para el factor de peso A, se tienen las siguientes proporciones:

Eficiencia %	Temperatura máxima (°C)	Energía máxima (kW/m <sup>2</sup> )	Control y programación (de bueno a malo)	Respuesta al calor (seg)	Montaje y dimensiones pequeñas (de bueno a malo)
0.25	0.20	0.20	0.15	0.10	0.10

**Tabla 4.2 Factor de peso A, para cada propiedad.**

Al aplicar el método escogido obtenemos:

Fuente de radiación	Eficiencia %	Temperatura máxima (°C)	Energía máxima (kW/m <sup>2</sup> )	Control y programación (de bueno a malo)	Respuesta al calor (seg)	Montaje y dimensiones pequeñas (de bueno a malo)	$\gamma = \sum B A$	#
Tubo de cuarzo	63.54	32.72	184.52*	50	50	100	44.929	IV
Lámpara de cuarzo	89.58	13.0909	738.09*	100	100	50	55.013	III
Catalítico	83.33	66.97	37.62*	25	16.6666	33.33	42.9665	V
Panel	91.66	32.72	119.047	33.333	25	50	65.763	II
Cerámica	100	41.14	142.857	50	20	100	81.299	I
Gas	57.29	26.18	714.28*	33.333	33.33	33.33	31.2135	VI

\* Se excluye por no alcanzar o exceder el valor requerido.

**Tabla 4.3 Resultados del método de propiedades ponderadas.**

Del método escogido se puede ver claramente que la fuente para radiación, que mejor se ajusta a los requerimientos es la del tipo cerámico. Sin embargo, si se considera el costo de cada elemento, utilizando un factor de mérito igual a:

$M = (C_x / C_y) \gamma$  donde  $C_x$  es el valor de la fuente y  
 $C_y$  el valor máximo de todas las fuentes

Se obtendrá entonces:

Fuente de radiación	M	#
Tubo de cuarzo	14.9763	IV
Lámpara de cuarzo	9.1688	V
Catalítico	42.9665	I
Panel	32.8815	II
Cerámica	20.3247	III
Gas	6.2427	VI

**Tabla 4.4 Resultados de selección con base en el costo.**

Por costo de la fuente, podemos ver que los resultados son muy engañosos, ya que el tipo de fuente que antes nos indicaba una gran deficiencia, ahora es la mejor con respecto al costo; sin embargo, las fuentes que cumplen los requerimientos y que no varían drásticamente su valor son: los Paneles, las Resistencias Cerámicas y los Tubos de Cuarzo. Y al observar de la tabla de propiedades, las resistencias cerámicas se ajustan más a los requerimientos de diseño y de proceso.

#### 4.1.3 Características de equipo y diseño de detalle:

A continuación se presentan las características técnicas de una resistencia cerámica escogida (Modelo Salamander):

Pulse FTE (Emisor Lleno del Canal)

- Energía infrarroja clasificada 96%
- Temperatura máxima 1292° F (700° C)
- Vida útil en exceso de operación 10000 h.
- La densidad del voltaje es de 6.45 W/in<sup>2</sup> a 38.71 W/in<sup>2</sup>  
(10 kW/m<sup>2</sup> – 60 kW/m<sup>2</sup>) comparado con Q/A = 41.61 kW/m<sup>2</sup>
- Voltajes 150-200-250-300-350-400-500-600-650-750-800-1000 V
- Distancia recomendada de 8" (200mm) entre el material y el calentador.
- Conveniente para 90% de aplicaciones normales.



Fig.4.1 Resistencia cerámica Salamander.

Las dimensiones de la resistencia cerámica se pueden observar en los siguientes esquemas, lo cual nos dará una mejor comprensión del área necesaria para el montaje en el panel de calentamiento de la máquina:

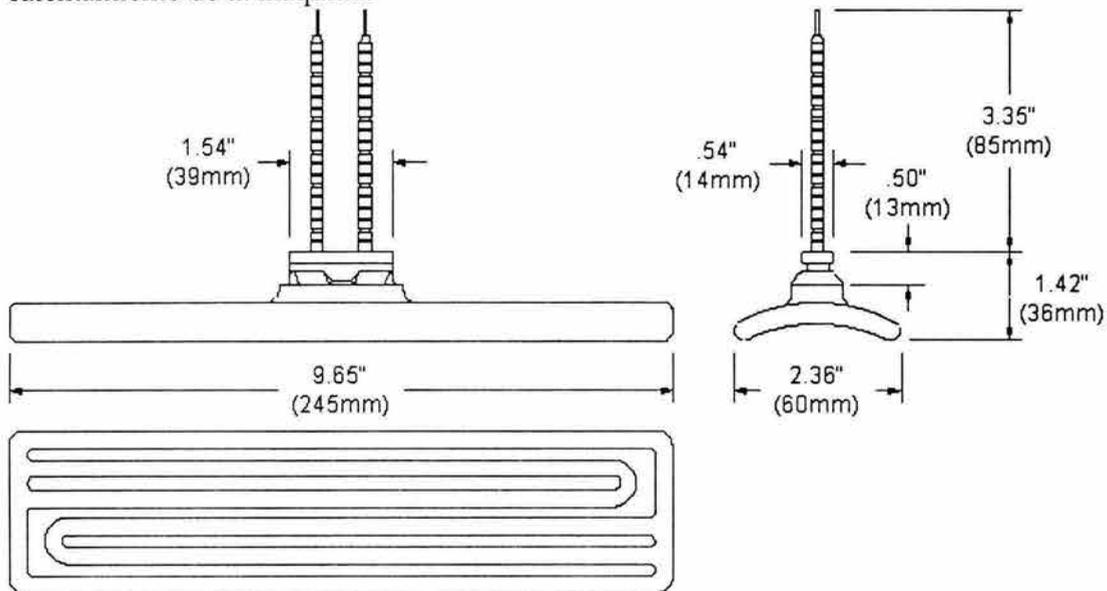


Fig.4.2 Dimensiones estándar de la resistencia cerámica.

Este tipo de resistencias cerámicas cuenta con un diagrama de emisión – espaciamiento, dado por los fabricantes, el cual se puede utilizar para determinar el espaciamiento apropiado de la cerámica del emisor cuando está utilizada en una aplicación tal como un panel infrarrojo. Para alcanzar un modelo uniforme del calor, es crítico que los emisores estén espaciados de modo que la emisión radiante pueda alcanzar su objetivo. Cuanto más traslape ocurre, más uniforme será el calor a través de la cara del producto que es calentado. El área de intensidad radiante más alta de la emisión para un solo emisor se muestra dentro de las dos líneas cruzadas oscuras en la rejilla radiante de emisión. Para que las emisiones del elemento sean óptimas, la línea discontinua muestra que ocurrirá una punta de la intersección en una distancia de 17.78 cm (7 in) si los emisores se colocan una distancia de 5.08 cm (2 in) de borde a borde. Este mismo concepto se debe utilizar a cualquier

determinada distancia para colocar el producto si usa un panel existente, o la colocación de emisores.

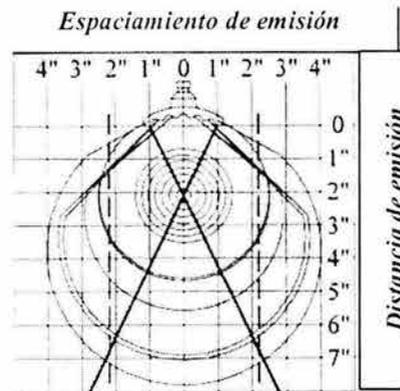


Fig.4.3 Rejilla Radiante De la Emisión De Salamander

La manera de montar los emisores cerámicos se muestra a continuación:

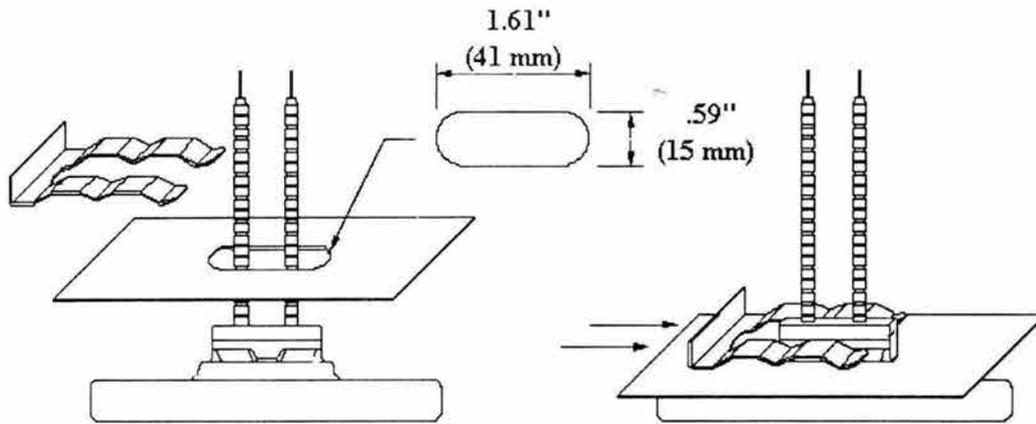


Fig. 4.4 Montaje de cerámica del emisor

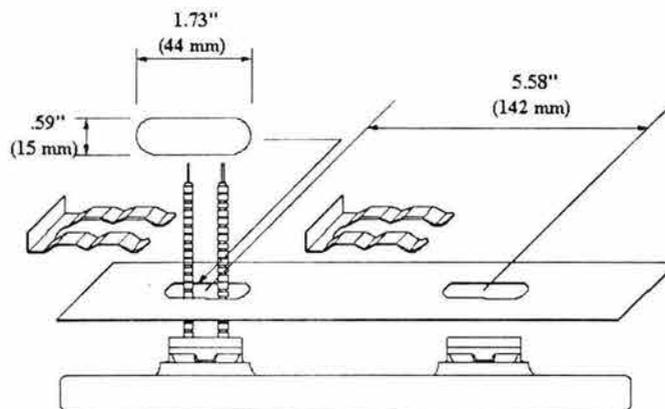


Fig. 4.5 Montaje de cerámica del emisor de LTE

El elemento más grande de LTE tiene dos postes que se montan en la cara posterior. Este gráfico muestra un LTE y un reflector con dos agujeros para el montaje.

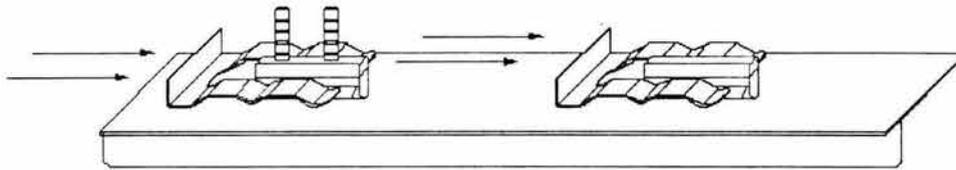


Fig. 4.6 Este gráfico muestra un LTE instalado en un reflector.

El espaciamiento entre emisores deberá cumplir con las siguientes especificaciones:

- El espaciamiento debe ser tal que el incidente infrarrojo de las emisiones que resulta en el blanco sea uniforme y máximo.
- Un firme espaciamiento en el arreglo de resistencias permite que se coloque el blanco mas cerca de éste, consiguiendo con esto menos pérdidas y mejorando la uniformidad de la emisión.

Para el uso de paneles, el arreglo para los emisores cerámicos, considerando las recomendaciones anteriores, se muestra en la siguiente figura:

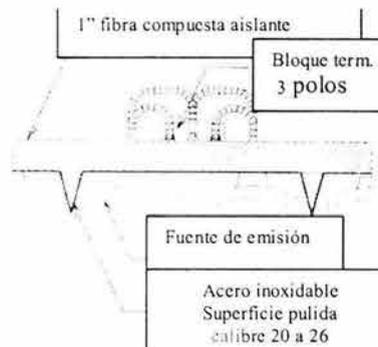


Fig. 4.7 Configuración del panel

Arreglo de resistencias. El número de resistencias que llevará el arreglo, para la formación de un panel depende de:

- Dimensiones
- máxima para la lámina a termoformar (75 x 60 cm)
  - propuesta para el armazón (85 x 65 cm)
  - de la resistencia (24.5 x 6 cm)



Fig. 4.8 Dimensiones del armazón y del área de formado máximas.

Por lo que tomando en cuenta la separación entre resistencias (5.08 cm, 2 in) se llega al siguiente arreglo:

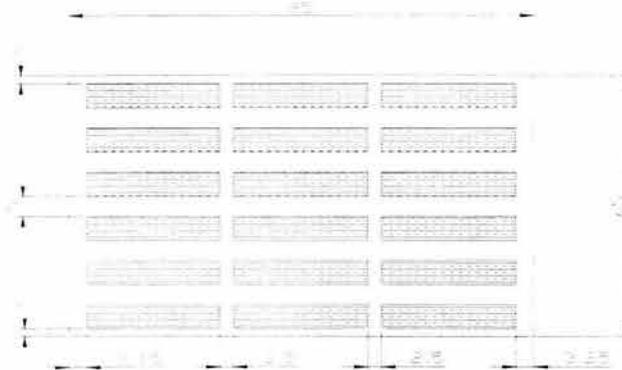


Fig. 4.9 Arreglo de resistencias, distancias de montaje.

Se requieren de 18 resistencias cerámicas y de algunos repuestos, para un mantenimiento posterior. En el montaje o ensamble final, deberá instalarse un material aislante (fibra de asbesto) entre el armazón exterior y la lámina de montaje de las resistencias, esto es, para evitar la pérdida de calor ya consideradas anteriormente.

El *plano 1/12* del apéndice E detalla el ensamble completo del sistema de calentamiento terminado:

Las especificaciones de cableado, tendrán la capacidad de anexar equipos de control y medición sin tener algún riesgo. Estas recomendaciones son:

- Cable de magnesio de alta temperatura 450° C (842° F) (con grado conveniente de temperatura y amperaje), este cable deberá operar por encima del aislante de cerámica de la fibra.
- En las fuentes los bloques de terminales de cerámica se recomiendan para permitir el reemplazo rápido del emisor.

El sistema de calentamiento se puede seccionar en dos partes, una que abarque la parte central del área a calentar y la segunda que abarque las resistencias de los extremos, con el fin de que cuando se usen únicamente las áreas del centro, no se tengan pérdidas de energía por el uso innecesario de resistencias eléctricas.

#### 4.2 Diseño del bastidor ajustable:

El bastidor de una máquina termoformadora tiene como función sujetar la lámina polimérica y trasladarla a una distancia determinada del panel de calentamiento para que la lámina alcance la temperatura de formado que, como ya se ha mencionado, es diferente para cada material; una vez que la lámina se encuentra a la temperatura adecuada el bastidor la traslada hasta ponerla en contacto con el molde para que se efectúe el formado y los procesos posteriores descritos en otros capítulos. Adicionalmente, para realizar los movimientos antes mencionados, el bastidor debe contar con un mecanismo que lo desplace

y para este propósito existen al menos dos opciones, un pistón neumático y un mecanismo de poleas y contrapesos.

Para que el bastidor pueda desempeñar sin problemas estas funciones, es necesario que cubra algunas características que en breve se han de mencionar y que permitirán obtener piezas termoformadas de mejor calidad.

En la fabricación de artículos termoformados se ha observado que en muchas ocasiones es necesario cortar una cantidad considerable de material plástico para obtener el producto deseado, esto debido a que tanto el área en la que es aplicada la succión por parte de la bomba de vacío, como el bastidor tienen dimensiones fijas.

Para solucionar esta limitación de la máquina termoformadora, que se traduce en un aumento en el costo final de un producto, proponemos un diseño en el que la cámara de vacío sea ajustable a tres diferentes áreas y en el cual también el bastidor también sea capaz de ajustarse a estos tres tamaños para que, de esta forma, sea posible regular la cantidad de material suministrado a la máquina así como la cantidad de calor emitida por las resistencias y agilizar el formado de la pieza al disminuir también la cantidad de aire a evacuar.

Con estas modificaciones se pretende optimizar el proceso de formado y disminuir el costo de los productos obtenidos mediante esta técnica de transformación de plásticos.

Las dimensiones que tiene el bastidor de la máquina termoformadora son:

- 65 X 85 cm para la parte a formar de mayores dimensiones.
- 55 X 75 cm para la parte intermedia.
- 45 X 65 cm para la pieza de menores dimensiones.

El bastidor será construido de tubular cuadrado de una pulgada y se ajustará manualmente a las tres diferentes áreas por medio de ranuras hechas sobre el mismo bastidor.

#### 4.2.1 Requerimientos para el bastidor.

Esta parte de la máquina termoformadora debe ser construida de un material rígido para que sostenga a la lámina plástica de una manera uniforme asegurando que permanezca en la misma posición durante el proceso y adicionalmente debe ser capaz de adoptar tres diferentes dimensiones para poder termoformar piezas de tres diferentes áreas.

El bastidor no deberá deformarse por estar en contacto con la lámina plástica, considerando que ésta se encontrará a temperaturas que se oscilan entre los 150 - 210 °C y que los ciclos de producción pueden llegar a ser de miles de piezas.

Por otra parte, debe ser ligero, ya que deberá moverse con facilidad para poder trasladar la lámina plástica hacia el panel de calentamiento y también ponerla en contacto con el molde.

Como se mencionó, el bastidor debe poder adoptar tres diferentes áreas de formado, y esto lo debe hacer por medio de un mecanismo sencillo que permita al operario cambiar las dimensiones del bastidor rápidamente para permitir que el proceso no se vea interrumpido por periodos prolongados, reduciendo con ello los tiempos muertos.

Adicionalmente, el bastidor deberá contar con seguros, también conocidos como “clamps” para sujetar la lámina plástica durante el proceso, proponemos por lo menos cuatro seguros para formar adecuadamente la lámina.

Otro elemento que se requiere que tenga el bastidor son los sellos que deberán colocarse en la parte inferior del mismo para evitar que cuando se aplique la presión de vacío ingrese aire de los alrededores a la cámara de vacío y pueda crear problemas en el formado de la pieza. Estos sellos son de goma y estarán dispuestos a lo largo de toda la parte inferior del bastidor. De los planos 2/12a 5/12 se observa la configuración de bastidor ajustable.

### 4.3 Equipos de vacío

Para mantener el vacío adecuado, las bombas se mantienen en operación constante, por lo que la elección del tipo de fuerza para realizar el formado de la pieza de una lámina plástica depende de: tamaño de la pieza, del número de partes a producir, de las velocidades del ciclo y adicionalmente a estos se deben tomar en cuenta las limitaciones de la lámina plástica, de la resistencia del molde y de la disponibilidad del equipo.

En la práctica se ha visto que las partes mejor termoformadas se hacen por medio de un rápido vacío o por aire comprimido, ya que se crea un mayor contacto con el molde, dando mejor eficiencia en el enfriamiento, en los detalles y con mejores tolerancias, siendo el vacío generado no menor a 25 in de Hg. (84 kPa).

Un adecuado sistema de vacío requiere de una bomba capaz de desplazar de 0.09466 a 0.0984 MPa (710 a 735 mm. de Hg., 28 a 29 in Hg o de 0.5 a 1 psi absoluto) en el tanque de almacenamiento previo al ciclo de formado, según datos prácticos.

Pero para seleccionar la capacidad de la bomba de vacío, se determinó el valor de la resistencia a la tensión, para una temperatura de formado, según el tipo de material a utilizar, donde el esfuerzo dependiente de la temperatura y esta dado por la relación:

$$\sigma = C e^{Q/RT} \quad (\text{psi}) \quad (\text{A})$$

donde Q – es la energía de activación para el flujo plástico (cal/gmol)

R – es la constante universal de los gases 1.987 cal/(mol K)

T – medida de la temperatura (K)

C – constante de proporcionalidad

Teniendo que para la energía de activación para el estado de fluencia térmica es:

$$Q = R \ln(\epsilon^*_1 / \epsilon^*_2) / (1/T_2 - 1/T_1) \quad (\text{cal/gmol})$$

Entonces, tomando los valores para  $\varepsilon^*_1 = 2.2$ ,  $\varepsilon^*_2 = 4.6$  ( $s^{-1}$ ) a  $T_1 = 98^\circ\text{C}$  y  $T_2 = 118^\circ\text{C}$  respectivamente de la tabla 2.14 del capítulo 2, para el PVC, tenemos sustituyendo valores:

$$Q = 10631.075 \text{ cal/gmol}$$

Con este valor obtenido, y para las condiciones iniciales a  $T_0 = 25^\circ\text{C}$  y  $\sigma_0 = 9000$  psi, en la ecuación (A) tenemos:

$$C = 1.435114 \times 10^{-4} \text{ (psi)}$$

Llegando al modelo para el esfuerzo dependiente de la temperatura, de la siguiente forma:

$$\sigma = 1.435 \times 10^{-4} e^{10631.075/(1.987T)}$$

para las condiciones de termoformado, tomando al PVC nuevamente como material de referencia, con una temperatura  $T = 171^\circ\text{C}$ , obtenemos:

$$\sigma(171^\circ\text{C}, 444^\circ\text{K}) = 24.56 \text{ psi} = 0.16938 \text{ MPa}$$

este valor, indica el esfuerzo de cedencia del material para la temperatura dada, por lo que la presión necesaria para hacer fluir al material sería  $P = 0.16938 \text{ Mpa} = 1267.5 \text{ mm Hg}$ . Ahora para obtener el valor adecuado para la presión de vacío, que asegure el formado a la temperatura especificada, habrá de considerarse el *Criterio de von Mises*, aplicado para el caso de cedencia en condiciones de tensión uniaxial.

$$6K^2 = (\sigma_3 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_1)^2 \quad \text{Ecuación de von Mises}$$

$$\text{para } \sigma_2 = \sigma_3 = 0 \text{ y } \sigma_1 = \sigma_0 \quad \sigma_0 = 3^{1/2} K$$

de donde finalmente  $K = \sigma_0 / 3^{1/2}$  y sustituyendo  $\sigma(171^\circ\text{C}) = \sigma_0 = 0.16938 \text{ Mpa}$ , la presión de vacío necesaria para deformar el material sobre un molde en el proceso de termoformado será igual a:

$$K = P = 0.09676 \text{ MPa} = 731.8 \text{ mm Hg}$$

El tipo de bomba escogida para el diseño de la máquina prototipo, que cumple con las especificaciones del proceso de termoformado y con todos los demás parámetros antes analizados, tiene las siguientes características:

*Bomba de vacío ESIVACH H200 (800 l/h, 735 mm de Hg, diámetro de succión 1 in., 1200 rpm, potencia 2 Hp, con motor acoplado de 2 hp y 1200 rpm). La bomba esta construida con hierro fundido y acero, de rotor excéntrico con aletas deslizantes, silenciosa y de gran eficiencia; armada con lubricador automático de presión para trabajo pesado.*

Para optimizar el sistema de vacío se deben eliminar los ángulos de 90° entre el tanque donde se realiza el vacío y el molde. Las válvulas a utilizar para un rápido proceso de vacío son las del tipo de globo y de bola, requiriendo una abertura total. La siguiente tabla muestra las medidas para los conductos por donde se realiza el vacío y de los tamaños de válvulas, de acuerdo al área termoformada.

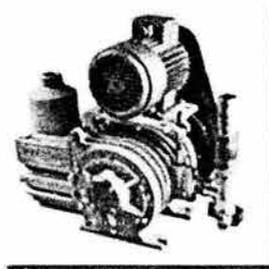
Máquina de termoformado Área de formado	Línea de vacío y control Tamaño de válvulas. diámetro
Arriba de 76 x 91 cm (30 x 36 in) 91 x 222 x 213 x 74 cm (36 x 48 in arriba de 84 x 108 in) 244 x 305 cm (96 x 120 in) en adelante	25 mm (1 in) 38 mm (1 ½ in) 51 mm (2 in)

**Tabla 4.5 Medidas de conexión para un vacío adecuado.**

Lo anterior se logra si la tubería entre el tanque de almacenamiento y el molde es lo más corta posible. Es importante eliminar fugas de aire por tubería dañada, mangueras perforadas, coples o niples flojos, así como válvulas no necesarias. Las bombas de vacío están disponibles en uno o dos pasos. Una bomba de vacío de dos pasos puede evacuar presiones abajo de 517.24 mm Hg (0.06896 MPa); la capacidad de desplazamiento o evacuación para una bomba de un paso se reduce a la mitad. En la Tabla siguiente, se muestran las capacidades típicas para bombas de vacío.

Especificaciones			Capacidad teórica de vacío				
No. De cilindros	Diámetro (mm)	Carrera (mm)	Un paso (m3/min)	Dos pasos (m3/min)	Velocidad (rpm)	Potencia (KW)	Diam. Salida de la tubería (mm)
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	1.700	0.850	750	2.2/3.7	38
2	140	102	2.800	1.400	900	3.7	52
3	140	102	4.220	2.800	900	5.6	52

**Tabla 4.6 Capacidades típicas de bombas de vacío, uno y dos pasos.**



**Fig. 4.10 Bomba de vacío.**

#### 4.4 Tanques de vacío, de desplazamiento o de almacenamiento.

Se toma en cuenta para la selección del tanque de almacenamiento, que la presión de vacío debe ser aproximadamente de 0.06896 MPa (10 psi alrededor de 21 in. de Hg / 530 mm Hg), por lo que el tanque deberá tener un volumen de 2.5 veces el volumen comprendido entre el molde, la cámara de vacío y el de la tubería. Al duplicar el volumen del tanque de almacenamiento, se podrá incrementar la presión en un 15 % (0.07931 MPa / 11.5 psi) conforme a lo establecido; el límite teórico para el proceso de formado al vacío es de 0.1013 MPa (14.7 psi).

Se recomienda que el tanque de vacío esté lo más cerca posible al molde, para tener un desplazamiento de vacío rápido, así como el reducir la fricción en la tubería, lo cual se logra con:

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

Se ha visto que con un diámetro de 1 in. en la tubería es suficiente para desplazar 1 pie<sup>3</sup> de aire, si se trata de piezas pequeñas, de lo contrario, un diámetro de 2 ó 3 in. será el adecuado. Es recomendable también contar con una manguera flexible de plástico reforzada en su interior para que no permita que se colapse; en la siguiente figura se muestra la forma de conectar los elementos mencionados (bomba y cámara de vacío, tanque de almacenamiento y tubería):

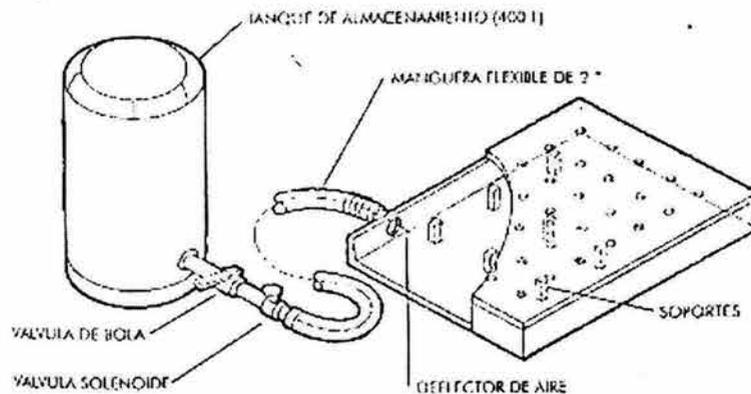


Fig. 4.11 Conexión de los elementos para el sistema vacío.

Por lo tanto, el vacío que se provoca en la parte formada 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. Un tanque de este tipo ayudará a que se haga más rápido el vacío y que la apariencia de la pieza sea mejor; ocasionalmente es conveniente una velocidad de formado lenta para piezas muy profundas o de secciones complejas. Cuando un molde hembra es muy profundo y donde la configuración se vuelve un problema, un vacío lento puede dar al plástico más tiempo para contraerse en la sección transversal, de este modo se puede eliminar una configuración deficiente.

Para reducir el tiempo de desplazamiento del volumen de aire en la periferia de la hoja reblandecida y en la caja de vacío, se puede rellenar el espacio con pelotas de espuma de poliestireno o pedazos de poliuretano.

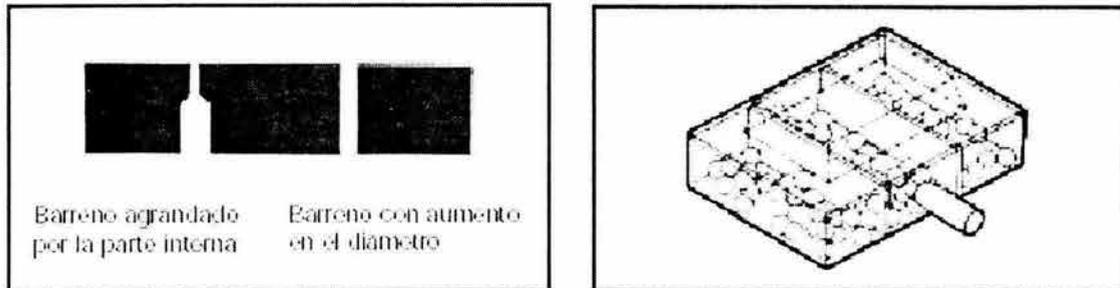


Fig. 4.12 Optimización del desplazamiento en una cámara de vacío.

#### 4.5 Diseño de la cámara de vacío

La cámara de vacío es el elemento que contiene el aire que será evacuado mediante una presión de vacío para llevar a cabo el formado de la lámina reblandecida. Debido a que para el diseño que proponemos el bastidor podrá adoptar tres diferentes tamaños, esto obliga a que la cámara también sea seccionada en tres áreas para que, de esta forma, se evacúe la cantidad de aire necesaria para el formado y sea más ágil el proceso.

Estas tres áreas en las que está dividida la cámara de vacío son las que puede adoptar el bastidor y delimitan tres diferentes volúmenes de aire. El volumen para cada una de estas áreas se menciona a continuación.

Con una altura de 3 cm para la cámara de vacío:

16575 cm cúbicos para la pieza de mayores dimensiones.

12375 cm cúbicos para la pieza de dimensiones intermedias.

8775 cm cúbicos para la pieza más pequeña.

##### 4.5.1 Requerimientos de la cámara de vacío:

Deberá ser un recipiente construido de lámina metálica que no presente fugas, ya que de ello depende la rapidez con que se lleve a cabo el formado de la pieza plástica. Se propone que sea metálica ya que requiere cierta rigidez para ensamblarse con mangueras, válvulas y otros elementos que componen el sistema de vacío de la máquina termoformadora.

Las dimensiones de la cámara de vacío son: 60 x 75 cm para formar la pieza de mayores dimensiones. Estará seccionada en su interior y la primer sección tendrá 55cm de ancho por 70 cm de largo y la sección más pequeña tendrá 50 cm de ancho por 65 cm de largo.

Las tres áreas en las que será seccionada esta cámara serán delimitadas por paredes construidas también de lámina metálica y estarán conectadas entre sí por válvulas de paso, mismas que se utilizarán dependiendo de las dimensiones del artículo que se desee formar.

En los *planos 6/12 y 7/12* de diseño se muestran las dimensiones de cada una de las secciones para la cámara de vacío propuesta y el de la platina.

#### 4.6 Controles de temperatura

La variación de temperatura generada por los elementos de calentamiento y por el tiempo de exposición de la lámina plástica a la radiación, hacen necesario la implementación de un controlador de estos parámetros para tener una producción óptima. Al generarse un calentamiento menor al especificado, es necesario tener un tiempo de permanencia o de exposición mayor, sin embargo, aunque a temperaturas bajas se obtenga un ciclo mas seguro y controlable, la producción se hace más costosa y menos eficiente.

La forma más fácil y común para controlar el calentamiento generado, es por medio de un switch apagado/encendido, y se hace de manera manual en la mayoría de las veces. Pero para tener una mejor precisión se recurre a la automatización. Los sistemas automatizados más avanzados utilizan un termostato o termocople, los cuales registran las variaciones de temperatura con un sensor, en una zona específica, reaccionando a cualquier variación, mandando respuesta de tipo numérico. Los rangos de fluctuación de temperatura de un termostato, dependen de su manufactura y composición, por lo que los del tipo electrónico resultan más precisos. Estos últimos, poseen un microprocesador que detecta las fluctuaciones (en milisegundos) y ajusta inmediatamente el desequilibrio. Regula los picos de temperatura de las ondas producidas y ajusta linealmente la temperatura específica (set-point).

Para el control de la máquina diseñada, este es de tipo digital con doble display, con entrada de termopar, el cual nos brindara un control preciso de temperatura y tiempos de exposición.



Fig. 4.13 Controlador de temperatura

#### 4.7 Equipo para enfriamiento.

El enfriamiento de una pieza termoformada es tan importante como el calentamiento, pero en algunos casos podrá consumir más tiempo que el calentamiento. Por este motivo es importante seleccionar el método más apropiado. Algunas veces, cuando se forman piezas de espesores gruesos que toleran un menor esfuerzo interno, es aconsejable retardar el enfriamiento normal, cubriendo la pieza con una tela o franela suave. Si la pieza está sujeta, la fuerza de sujeción se irá perdiendo poco a poco durante el enfriamiento y se presentará un encogimiento que relevará los altos esfuerzos de este proceso. La mayor parte del calentamiento absorbido durante el ciclo de calentamiento deberá disiparse del plástico antes de que se retire del molde, de otra forma pueden ocurrir distorsiones y alabeos en la pieza. Si la pieza es formada en un molde macho, se deberá desmoldar antes de que se presente un encogimiento y sea difícil de desmoldar.

La conducción y convección son prácticamente los únicos métodos para disipar el calor en vista de que la conductividad térmica en los plásticos es baja, por que se ha visto que un enfriamiento largo se presenta en piezas de un espesor superior de 2 mm. Y, lo más común es utilizar ventiladores eléctricos para enfriar la pieza; este método tiene la ventaja de que la pieza puede ser enfriada en el molde, la desventaja es que la corriente de aire no será suficiente para enfriar el molde en cada ciclo, causando un exceso de calor e interfiriendo con el ciclo normal de calentamiento. Aquí, la influencia del material del que está hecho el molde, es de suma importancia, pues, el enfriamiento de una pieza en contacto con el molde es muy eficiente si éste es de metal y tiene ductos de enfriamiento con recirculación de agua. Es recomendable utilizar en estos casos un volumen suficiente de líquido refrigerante para mantener uniforme la temperatura del molde. Si se mantiene el agua de enfriamiento a cierta temperatura, se minimiza la formación de marcas en la pieza (usualmente conocidas como ondulaciones en su superficie) por tener un molde frío.

Los moldes de aluminio o de resina epóxica y/o poliéster son muy adecuados si se pretende incluir un sistema de refrigeración. Los moldes de madera no son muy convenientes para corridas largas debido a que no disipan el calor rápidamente.

Para enfriar el molde se requiere de una bomba de baja potencia y en ocasiones es suficiente con la misma presión de una conexión directa con la toma de agua. Hay métodos de enfriamiento muy rápidos que utilizan un spray o cortina muy fina de agua deionizada o dióxido de carbono líquido, que rápidamente enfría la superficie de una pieza termoformada. Este método no se utiliza frecuentemente por su costo, cualquiera de los dos puede justificarse, especialmente si se aplica localmente para prevenir desgarres térmicos en piezas muy profundas, recordando que un enfriamiento irregular y rápido de la pieza formada es inducida a generar esfuerzos que afectan la durabilidad.

Los *planos* de 8/12 a 10/12 muestran la configuración y las dimensiones finales de la máquina de termoformado y sus diferentes componentes. Adicionalmente los diagramas de conexión del sistema neumático y el unifilar eléctrico, se muestran en los *planos* 11/12 y 12/12 respectivamente.

**REFERENCIAS:**

(a) **G. Gruenwald**

Thermoforming "A Plastics Processing Guide"  
Pg. 71 - 75.

(b) **William K. McConnell Jr.**

"Thermoforming"  
President McConnell Company Inc.  
P.O.Box 11512 Fort Wort TX76110  
pg. 1343.

(c) **Apuntes Facultad de Ingeniería UNAM**

"Diseño, Selección y Aplicación de Materiales"  
M.I. Magdalena Trujillo Barragán.

## CAPÍTULO 5 ECONOMÍA Y COSTOS DEL PROCESO DE TERMOFORMADO

La cantidad y la calidad del producto terminado, son la llave del éxito en este proceso. La calidad de los productos depende de la capacidad del operador, de la selección de la materia prima y de un adecuado sistema de control de todos los parámetros involucrados en la producción. El consumo de energía es otro factor importante, sobre todo en el balance energético, donde se presenta un considerable flujo de dinero.

Los siguientes diagramas nos muestran los principales factores a considerar en la producción de algún artículo por medio del termoformado.

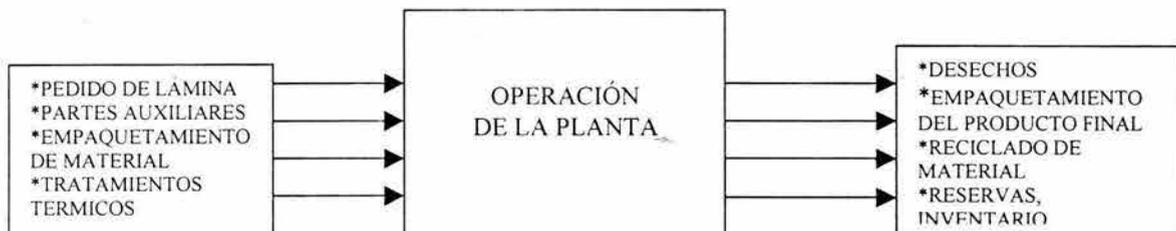


Fig. 5. 1 Factores a considerar en la producción.

En el termoformado, generalmente, intervienen tres categorías de negocio: existencial, incremental e intento aislado. El negocio existente está relacionado con el costo requerido para producir otro artículo, cuando los costos de producción del último son conocidos. El negocio incremental se presenta cuando añadimos un nuevo producto a la línea en un negocio ya existente. Y un intento aislado consiste en el grupo de costos involucrados en el inicio de nuevos negocios lejos de la fuente de recursos. Este último requiere de un análisis de los procesos que están en competencia.

El precio del producto, depende principalmente del costo de la materia plástica a utilizar. Este costo ya incluye el costo por transformación de la lámina plástica. Teniendo un rango proporcional de 2.8 a 4 veces el costo del material, sin embargo esta relación solo deberá usarse para tener un valor aproximado del costo y no como un análisis de comparación del proceso.

### 5.1 Costo de producción global.

Para producir un artículo sencillo en un negocio existente, el costo unitario para este producto se obtiene al dividir el promedio del costo global de este en un tiempo determinado entre el número de productos en este tiempo.

$$\text{Costo de producto} = \text{gastos de producción} / \text{número de productos}$$

Considerando que los costos de operación que una planta de manufactura normalmente contempla, son:

- operación
- mantenimiento
- supervisión
- gerencia
- empleados de seguridad
- soporte técnico
- soporte administrativo
- nómina
- utilidades
- combustible
- vapor
- electricidad
- agua de enfriamiento/tratamiento
- materiales poliméricos
- aditivos y mezclas
- moldes, cortadores
- suministros
- material de mantenimiento
- material de seguridad
- impuestos locales
- seguros
- servicios por contratos
- contenedores, anaqueles

La planta de operación es considerada como un estado estable cuando las ordenes adicionales para la manufactura actual pueden valorizarse. El tiempo de operación, se puede calcular por medio de las siguientes consideraciones:

- ◆ Inventario de la materia prima (actual y anteriores).
- ◆ Adquisiciones adicionales.
- ◆ Costo de material consumido
- ◆ Salarios
- ◆ Utilidades
- ◆ Gastos adicionales
- ◆ Gastos por manufactura
- ◆ Nómina
- ◆ Depreciaciones
- ◆ Gastos indirectos
- ◆ Costos por trabajo en proceso
- ◆ Costos de producción
- ◆ Inventario de productos terminados
- ◆ Perfil bruto
- ◆ Ventas

(todas las consideraciones se calculan para un periodo mensual)

Para tener una aproximación del costo por hora-máquina, tenemos el siguiente cálculo:

$$M = \text{costo hora-máquina} = \text{costo de producción} / (\text{No de máquinas} \times \text{No de horas por máquina})$$

teniendo que el costo anual de producción (CAP) será:  $CAP = \Sigma M_i$

### 5.2 Eficiencias en la producción

La eficiencia del proceso se obtiene de dividir el número de partes que se producen en un cierto periodo entre el número ideal que pueden hacerse en ese mismo periodo. Las máquinas de termoformado están diseñadas para operar continuamente, por lo que en la industria están en el rango del 70 % o cumplen con 6100 h/año. La eficiencia se ve afectada, como en la mayoría de los procesos, por las puestas en marcha, dependiendo del operador y teniendo hasta el 75 % o 6600 h/año. Después la supervisión se hace necesaria para todo el personal y equipo involucrado para la producción de un artículo, aportando un 17 % {resulta de  $[0.7 / (0.8 \times 0.75)] - 1$ }, o bien, 1060 h/año. Las eficiencias no afectan la calidad del producto, pero si el costo de éste, por lo que se requiere de un mejor control en el ciclo del proceso, lo cual indica una mejor eficiencia de trabajo. Sin embargo, aunque la eficiencia de la máquina mantenga un 70 % en la producción de piezas de buena calidad, existen pérdidas inherentes durante el proceso. A continuación se listan algunos de los factores involucrados:

<u>PÉRDIDA POR</u>	<u>PORCENTAJE</u>	<u>COMENTARIO DE LA FALLA</u>
Defectos en las láminas	-	Responsabilidad del proveedor
Falla en la inspección del material	-	imperfecciones, color bajo.
Falla de almacenamiento	0 - 1	Esquinas defectuosas, rollos maltratados
Falla durante el secado	1	Mala sujeción, amarre de superficies suaves, lisas
Falla en el transporte de carga	0 - 1	Choques de piezas quebradizas desgarres
Temperatura	0 - 1	Sobrecalentamiento, sensibilidad del material (PVC, ABS)
Mal formado de la pieza	3 - 5	Espesor delgado, vacío Sobrepasado, baja temperatura.
Molde dañado	1 - 2	Marcas de enfriamiento, baja temperatura
Defectos de corte	1 - 2	Cuchillas flojas, causan rasgaduras, rebabas
Rechazo de inspección	1	Láminas defectuosas, después del calentamiento
Defectos de empaque	0 - 1	Sobre empaque, bultos muy grandes

Daños de inventario	1 - 2	Tiempos largos
Devolución del cliente	2 - 3	
	10 - 20 %	

**Tabla 5.1 Porcentajes de pérdidas inherentes.**

### 5.3 Costo de un producto termoformado.

En el siguiente ejemplo se considera la producción de 120 piezas por una jornada de trabajo de un día, utilizando la máquina prototipo diseñada tenemos:

Material a utilizar: PVC

#### 1. Material

Tamaño unitario: 670 x 490 x 85 mm

Promedio del espesor: 1.12 mm

Relación área de vacío:  $(670 \times 490 + 2 \times 85 \times 490 + 2 \times 85 \times 670) / (670 \times 490) = 1.6$

Espesor inicial:  $1.6 \times 1.12 = 1.792 \approx 1.8$  mm

Volumen del material:  $67 \times 49 \times 0.18 = 590.94$  cm<sup>3</sup>

Dimensión de la lámina suministrada: 750 x 600 x 1.8 mm

\* Costo de material: 23.325 \$/Kg  
(agosto de 2003)

Peso específico del PVC: 1.16 - 1.35 g/cm<sup>3</sup>

Peso de la pieza terminada.  $1.16 \times 590.94 = 685.49$  g

#### 2. Costo / eficiencia de la máquina Termoformadora

Costo hora/máquina: 40 \$/h

Tiempo del ciclo: 6 min.

Eficiencia del proceso: 85 %

Tiempo de instalación o puesta en marcha: 30 min. (2 partes malas)

Tiempo fuera: 10 % de la corrida (5 partes)..... 12 h de jornada

QC reservas: 10 partes

Tiempo de producción de partes aceptables:  $(120 + 5) / (0.85 \times 12) = 12.3$

## 3. Balance de material

Partes aceptadas totales: 120

Partes aceptadas reservas: 10

Partes defectuosas:  $0.5 \times 12.3 = 6.15$

Partes desechadas en la puesta en marcha: 2

Partes desechadas en el tiempo fuera: 5

Producción total:  $143.15 \approx 144$

## 4. Costo de material

Peso de la lámina pedida:  $144 \times (75 \times 60 \times 0.18) \times 1.6 = 186.6 \text{ Kg.}$

Costo de la lámina pedida:  $23.325 \times 186.6 = \$ 4352.445$

Peso total del producto terminado:  $120 \times 0.68549 = 82.2588 \text{ Kg.}$

Costo total del producto terminado:  $23.325 \times 82.2588 = \$ 1918.7$

Precio unitario del material desechado: \$ 3.92

Precio total del material desechado:  $3.92 \times (186.6 - 82.2588) = \$ 409.013$

Costo total del material:  $4352.45 - 409.013 = \$ 3943.4$

## 5. Costo unitario

Costo total del material: \$ 3943.4

Costo de hora/máquina:  $40 \times (12.3 + 0.5) = \$ 512$

Costo por acabados finales:  $8 (\$/h) \times 12.8 (h) = \$ 102.4$

Costo por empaque:  $\$ 0.9 \times 144 = \$133.33$

Costo de manufactura:  $\$ 4691.1$

Costo / partes aceptables:  $4691.1 / 120 = \$ 39.093$

Costo / Kg por partes aceptables:  $39.093 / 0.68549 = \underline{\underline{\$ 57.023}}$

Eficiencia del costo por material:  $1918.7 / 3943.4 \times 100 = 48.7 \%$

Eficiencia por peso del material:  $82.2588 / 186.6 \times 100 = 44.1 \%$

Este ejemplo, solo nos muestra una aproximación del costo de un artículo, interactuando con las eficiencias de manufactura; por lo que para un análisis más completo, el costo de hora/máquina deberá calcularse por medio de los balances del material y de la energía consumida, considerando también los costos por ensamble y venta.

#### 5.4 Costo de máquina prototipo de termoformado

Con base a las especificaciones y requerimientos planteados en los capítulos anteriores, para el diseño de la máquina de termoformado propuesta, el costo de producción de ésta deberá compararse con el de alguna otra máquina que se ofrezca en el mercado, presentando rangos similares de operación y producción. Por lo tanto, para poder comparar el diseño propuesto, es necesario primero obtener el costo total de fabricación.

Dentro de los aspectos a considerar tenemos:

Area de formado	600 x 750 mm
Profundidad máxima de formado	150 mm
Espesor máximo de formado	2.5 mm
Motor de sistema de vacío	2.0 HP
Resistencia calefactora (densidad del voltaje)	10 KW/m <sup>2</sup> – 60 KW/m <sup>2</sup>
Alimentación	2 x 220 V 60Hz
Corriente de entrada	40 A
Control de: (manual)	
Tiempo de precalentado	0-60 seg
Tiempo de vacío	0-30 seg
Tiempo de enfriado	0-30 seg
Consumo de aire a 60 Kg/cm <sup>2</sup>	2 HP
Dimensiones (aprox.)	850 x 950 x 1500 mm
Producción aproximada	1 ciclo x min
Vida útil	5 – 6 años
Tiempo de operación	continuo las 24 h

Los costos de los elementos que conforman la máquina prototipo se desglosan en la siguiente tabla:

CANTIDAD	UNIDAD	DESCRIPCION DEL ARTICULO Año 2003	COSTO UNITARIO	TOTAL
1		BOMBA DE VACIO ESIVACH H200 800 l/h, 735 mm Hg, Diam. Succ. 1 in , 1200 rpm, 2 Hp, CON MOTOR ACOPLADO (2 Hp, 1200 rpm).	\$ 12900.00 MN	\$ 12900.00 MN
1		FILTRO DE SUCCION	\$ 1100.00 MN	\$ 1100.00 MN
1		SILENCIADOR	\$ 450.00 MN	\$ 450.00 MN

1		GUARDABANDAS	\$ 400.00 MN	\$400.00 MN
1		VACUÓMETRO	\$ 480.00 MN	\$ 480.00 MN
4	LITROS	ACEITE	\$ 57.50 MN	\$ 230.00 MN
20		REISTENCIAS DE CERAMICA INFRARROJA POTENCIA 250, 400, 650 Y 1000 Watts, 240 V MODELO CRB	\$ 32.90 Dls (9.90 peso/dl)	\$ 658.00 Dls
20		REFLECTOR PARA RESISTENCIA INFRARROJA MODELO CRK00007 (Se puede reemplazar por un sistema de menor costo, e implementar en lugar del sistema de elevación manual, un cilindro neumático.)	\$31.90 Dls	\$ 638.00 Dls
1		CONTROL DE TEMPERATURA DIGITAL DOBLE DISPLAY, ENTRADA TERMOPAR J O K, SERIE 553M	\$ 1760.00 MN	\$1760.00 MN
1		TERMOPAR TIPO J CON DIÁMETRO DE 3/16" POR 1/8", TERMINALES DE 2 m CUBIERTAS CON MALLA DE AC. INOX	\$ 98.00 MN	\$ 98.00 MN
3	TRAMO 6 m	PTR (PERFIL TUBULAR REFORZADO) 1 in, CALIBRE 14	\$ 180.00 MN	\$ 540.00 MN
1	VOL. LITROS	TANQUE DE ARRANQUE 10 LITROS	\$ 150.00 MN	\$ 150.00 MN
			<b>TOTAL</b>	<b>\$30938.40</b>
			<b>TOTAL + IVA</b>	<b>\$35579.16</b>

(agosto de 2003)

Para el costo final de la máquina es necesario contemplar los costos por un estudio de mercadeo (estudio de mercado, plan de mercadeo, plan de venta y plan de ejecución y de estrategias), permisos y tramites legales, y las ganancias (35 – 40 %), que incluyen los costos por diseño (o en un monto único, se tiene por 200 h a 400\$/h, un total de \$80000), manufactura y salarios.

Por lo tanto y basándonos en referencias de mercadotecnia básicas se obtuvo lo siguiente:

Costos por:	Material y equipo.....	\$ 35579.16
	Mercadeo.....	\$ 20000.00
	Permisos (aprox).....	\$ 10000.00



de formado, con un mayor rango de espesores para el material, con implementos del bastidor, y con balances de energía que permiten ajustar el proceso con mayor versatilidad y tener un mayor ahorro de energía, a un costo menor al de los propuestos en el mercado.

### 5.5 Reciclado del material sobrante en el proceso de termoformado.

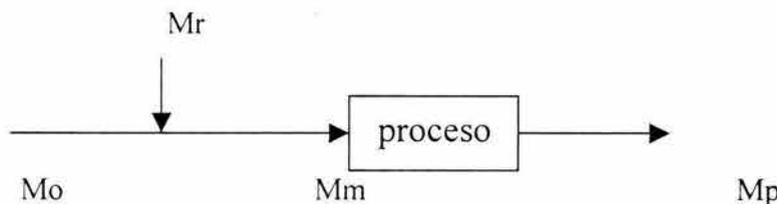
Una gran parte del material utilizado en el proceso de termoformado, es desechada por medio de algún proceso de corte al obtener nuestro producto final, este material llega a ser en ocasiones de hasta el 70 % del de la lámina original, lo cual implicaría un costo enorme en pérdidas, por lo que es conveniente reciclarlo.

Para el cálculo de la propiedad mecánica perdida en el reciclado, tenemos las siguientes consideraciones:

1. Después de cada paso del proceso, la propiedad mecánica es "X" veces la del material anterior al proceso.
2. Para cada unidad del material procesado, "Y" representa a las unidades de reciclaje.
3.  $0 < X < 1$ ;  $0 < Y < 1$ .
4. La composición de la propiedad mecánica se obtiene de las propiedades de la materia virgen y de la reciclada, durante la mezcla de estos.

Se tomaran en cuenta las consideraciones siguientes:

- $M_o$  es la propiedad mecánica de la resina virgen.
- $M_r$  es la propiedad mecánica del reciclado.
- $M_m$  es la propiedad mecánica de la mezcla.
- $M_p$  es la propiedad mecánica del material procesado.



Para el primer ciclo, no existe reciclado, entonces:  $M_{p1} = X M_{m1} = X M_o$

Para el segundo ciclo:

$$M_{p2} = X M_{m2}$$

pero

$$M_{m2} = Y M_{r1} + (1 - Y) M_o$$

siendo

$$M_{r1} = M_{p1}$$

por lo que

$$M_{p2} = X [Y X + (1 - Y)] M_o$$

Para el tercer ciclo:

$$M_{p3} = X M_{m3}$$

pero

$$M_{m3} = Y M_{r2} + (1 - Y) M_o$$

siendo ahora

$$M_{r2} = M_{p2}$$

por lo que resulta

$$Mp_3 = [X^3 Y^2 + x^2 Y (1 - Y)] Mo$$

pero

$$\sum ar^i = ar + ar^2 + ar^3 + \dots + ar^n = a [(1 - r^n)/(1 - r)]$$

entonces para cierto número de ciclos:

$$Mp_N = [1 - (1 - X)[(1 - (XY)^{N-1})/(1 - (XY))]] Mo$$

Y para un número infinito de ciclos:

$$\text{desde } (XY) < 1, \lim_{N \rightarrow \infty} (XY)^{N-1} = 0$$

quedando por último la expresión:

$$Mp_{\infty} = [(1 - (1 - X))/(1 - XY)] Mo$$

Por ejemplo, tenemos que si  $X = 0.9$  y  $Y = 0.5$ :

Después de:	1 ciclo	$Mp_1/Mo = 0.9$
	2 ciclos	$Mp_2/Mo = 0.855$
	3 ciclos	$Mp_3/Mo = 0.835$
	8 ciclos	$Mp_8/Mo = 0.8185$
	20 ciclos	$Mp_{20}/Mo = 0.8182$
	$\infty$ ciclos	$Mp_{\infty}/Mo = 0.8182$

podemos observar que después del tercer ciclo, para este ejemplo, la precisión esta en el 2% del límite, el cual es aceptable dentro del error experimental permitido.

**REFERENCIAS:**

(a) **James L. Thorne**

“Thermoforming, A look forward”

SPE Tech. Papers. 1983.

Pg. 219 – 232.

(b) **Thomas R. M. James M. Taylor**

“ Investigación de Mercado: enfoque aplicado”

(c) **Apuntes de licenciatura: Relaciones Comerciales IPN**

“Cálculos Financieros”

## CONCLUSIONES:

Uno de los problemas más comunes en gran parte de la industria manufacturera, enfocada a la transformación del plástico, en particular la parte que concierne al proceso de termoformado, es que generalmente se ajusta y diseña experimentalmente (a prueba y error) la producción o mejoramiento de este proceso, y se siguen los lineamientos marcados por los diseñadores y productores extranjeros, lo cual nos lleva a simplemente ser una mano de obra, que pocas veces puede diseñar, prevenir o corregir las situaciones que surgen de la necesidad de desarrollar o innovar productos.

Se observa que los objetivos de esta tesis se cumplieron pues se realizó un análisis de los parámetros que involucran el comportamiento del material durante el proceso de termoformado.

Se comprueba que el responsable de que se tengan las propiedades y características deseadas en un producto es el material, y la respuesta de este a las condiciones externas; es decir, su comportamiento antes, durante y después del proceso marcará definitivamente el tipo de parámetros a considerar para su conformación.

De los resultados obtenidos en los cálculos para el PVC, uno de los materiales comunes para el proceso pero que presentan dificultades al transformarse, podemos concluir que esta máquina es capaz de termoformar materiales que se encuentren en el rango de temperaturas de 146 a 288 °C.

Considerando las especificaciones del material seleccionado, por medio del cálculo de la transferencia de calor por radiación (ecuación XI cap. 2), el valor obtenido de 41.6 kW/m<sup>2</sup>, es muy aproximado al determinado en la industria (ecuación VI cap. 2), sin embargo, para el diseño del sistema de calentamiento, el valor obtenido fue fundamental para el criterio de selección del elemento calefactor, resistencias cerámicas, las cuales están distribuidas en el panel de calentamiento en función al área de formado utilizada, dicha área es delimitada por el bastidor ajustable que nos permitirá disminuir la cantidad de material desperdiciado en el proceso.

Del análisis viscoelástico para el material, donde se considera la razón de cambio de deformación en función de las temperaturas, para la determinación del parámetro de diseño, se obtuvo el valor de la presión de vacío necesaria para el formado de una pieza. El cual fue de 0.09676 MPa (731.8 mm Hg) y se utilizó para la selección de la bomba mas adecuada.

Por otra parte, el costo total aproximado de esta máquina de termoformado de \$105582.45, es inferior a los que se tienen actualmente en el mercado para máquinas de capacidades similares, que oscilan entre los \$120000 y \$150000.

Con base en lo anterior, concluimos que esta propuesta plantea una máquina de termoformado versátil, económica y en la cual se optimizan los parámetros de proceso para los diferentes materiales a transformar.

Consideramos que esta máquina se presenta como una alternativa para solucionar algunos de los problemas más comunes a los que se enfrentan en la actualidad los fabricantes de artículos termoformados, además de que el análisis realizado en esta propuesta puede extrapolarse a máquinas de mayor capacidad. Esto contribuye a que el proceso de termoformado sea considerado con mayor frecuencia en la evaluación de proyectos.

En función del plástico a transformar y el nivel de producción que se desee obtener se seleccionará el material y la técnica de fabricación para un molde de termoformado, que es un elemento de suma importancia en el proceso ya que influye directamente en la calidad del producto obtenido. Para diseñar y reproducir un molde, sujeto a las capacidades de cualquier máquina de termoformado se mencionaron algunos de los programas de simulación más comerciales que se ajustan a los requerimientos del diseño y producción en la industria, sin tener que invertir en la construcción de prototipos. Aunque los costos por el programa son relativamente altos, en el caso de nuestra máquina, al desarrollar un nuevo producto, es posible, solicitar ayuda técnica a cualquiera de las empresas mencionadas, lo cual, evitará pérdidas en la fabricación de prototipos.

La teoría y las sugerencias implicadas dentro del análisis de esta máquina de termoformado, servirán como un manual *teórico – práctico* para la futura construcción de esta o de alguna otra que parta de los mismos principios y necesidades. En esta pequeña parte del proceso de termoformado, en un principio, sin conocer la diversidad de disciplinas implicadas, pudimos haber pensado que era algo sencillo y fácil, sin embargo, hemos visto que el grado de complejidad estará dado según surjan nuevas necesidades de mejorar el proceso, las funciones del producto y de buscar alternativas eficientes entre los procesos dedicados a la transformación del plástico ya existentes.

## SIMULACIÓN E INNOVACIONES DEL PROCESO DE TERMOFORMADO

### *A.1 Simulación del proceso de termoformado*

Para el desarrollo de productos moldeados por termoformado es común invertir tiempo y materiales valiosos en pruebas de error para la construcción del molde hasta llegar a un buen diseño de la parte terminada. Los programas de simulación permiten un valioso ahorro de tiempo (alcanzando hasta un 80%) y de materiales. Aunque hay que destacar que los proveedores de tales programas los ofrecen a costos que oscilan entre los US \$6.000 a US \$40.000, dependiendo de la sofisticación de los cálculos<sup>(b)(c)</sup>.

Entre algunos de los proveedores se encuentran: Polydynamics, que en 1992 lanzó al mercado su programa T-formcad. C-Mold que ha presentado varias mejoras a su programa original, como la versión C-Mold 2000 específica para Windows y con una mayor facilidad de interacción con CAD/CAM. Compuplast ofrece ahora un nuevo paquete de simulación, versión T-SIM. Fluent Inc. también está presentando su nuevo programa Polyflow 3.7, con varias ventajas en la predicción de los parámetros del proceso. El Consejo Canadiense de Investigación formó un consorcio de 15 empresas y universidades para desarrollar un programa de simulación del proceso de termoformación, del cual se espera ofrezca varias características optimizadas. Sherwood Technologies está desarrollando programas que analizarán únicamente las etapas de calentamiento y enfriamiento del proceso de termoformación. Por último, la Universidad de Massachussets, en Amherst, está desarrollando un programa de simulación que tendrá la capacidad de analizar inclusive la termoformación de láminas coextruidas.

El alcance de los paquetes de simulación avanzados entrega como resultado un despliegue gráfico de la parte moldeada, indicando el perfil de espesores, el estiramiento que ha sufrido la lámina en cada punto y la temperatura del producto a la salida del molde. Con esta información y los datos del material de fabricación, es posible calcular también propiedades mecánicas tales como la resistencia a la compresión del producto terminado.

Los simuladores permiten ubicar sobre la lámina original la distribución final de espesores, de tal manera que el procesador pueda predecir la localización de los puntos débiles del producto y modificar así el patrón de calentamiento de la lámina. Puede también ayudar a mejorar la impresión de productos termoformados preimpresos en la lámina.

De acuerdo a los proveedores, la exactitud de la predicción puede acercarse alrededor del 10%, al menos en las partes con formas simples. Partiendo de un modelo de CAD se introduce en el paquete de simulación, información relacionada con el material de fabricación del producto, la cual puede encontrarse en una base de datos previamente alimentada en el paquete también deben indicarse los parámetros de operación de la máquina termoformadora, como son las zonas de calentamiento del horno, el movimiento de la lámina, la geometría del molde, el tiempo de activación del movimiento del molde, la extensión de este movimiento, el tiempo de la entrada del aire de formación y el vacío, y la velocidad de enfriamiento de la lámina dentro de la cavidad.

La calidad de la predicción depende de la información con que se cuente sobre las propiedades de los materiales y de los modelos matemáticos que se empleen para predecir su comportamiento: los modelos viscoelásticos pueden modelar el flujo del plástico y el estiramiento del mismo, tomando en cuenta los esfuerzos cortantes y su relación con la cantidad de estiramiento de los materiales.

Dentro del proceso de termoformado debemos lograr que en el momento de la termoformación el material adquiera una fluidez (componente viscosa) que lo deje moldear pero que, al mismo tiempo, tenga una resistencia mecánica en caliente que más tarde se revierta en rigidez de la pieza ya formada y fría (componente elástica). El proceso depende de si el material es amorfo o semicristalino. Al primer grupo pertenecen, por ejemplo, el poliestireno, el PVC y el PMMA. En el segundo se destacan el polipropileno y el polietileno.

Los plásticos amorfos ofrecen una ventana de temperatura de proceso bastante amplia, dando como resultado que las tolerancias de los parámetros de operación sean más laxas y fáciles de alcanzar en la mayoría de los equipos de formación. Las fuerzas requeridas para el moldeo son relativamente bajas (la fuerza causada por un equipo de vacío puede ser suficiente). Los materiales semicristalinos requieren niveles de temperatura en donde se alcanza un balance entre una condición de fluidez y resistencia del material caliente lo suficientemente altas para permitir una termoformación de buena calidad. El rango o ventana de operación es muy estrecho; del orden de 5°C. Las fuerzas mecánicas que se deben aplicar son más altas que las que se requieren en la termoformación de los plásticos amorfos, estas fuerzas disminuyen cuando se aumenta la temperatura del material.

Para alcanzar una buena calidad en el producto termoformado debe existir un balance entre la condición de flujo viscoso del material y la resistencia mecánica de la lámina caliente. La simulación del proceso de termoformación generada en el computador puede proporcionar también información sobre los espesores mínimos que se obtienen con una lámina dada, el tiempo del ciclo de termoformación y los requerimientos estructurales de la pieza terminada.

El simulador, C-Mold se emplea para simular en tres dimensiones la distribución de los espesores para una pieza, por ejemplo, una tina de baño donde el material escogido es ABS. El C-Mold es uno de los programas que están hoy disponibles en Estados Unidos para consultorías comerciales y pertenece a la compañía AC Technology, de Louisville, Kentucky. Otro programa comercial importante es el T-Formcad de la compañía Polydynamics, Inc., de Hamilton Ontario. Por lo tanto, a continuación se describen las características de estos paquetes de simulación:

■ **Polydynamics** fue el primero de los seis proveedores de programas de simulación en lanzar un simulador al mercado, denominado **T-Formcad**, en 1992. Sus características esencialmente son, describir el comportamiento de la deformación de la lámina al aplicar la presión de formado, la distribución de los espesores durante el termoformado valiéndose de elementos triangulares en maya (elemento finito) para formar la superficie. El programa puede analizar piezas complejas en 3D y aproximadamente cuesta US\$1.900 por la licencia anual, o US\$5700 la licencia perpetua.

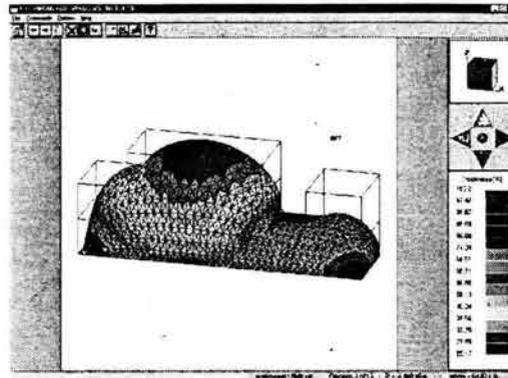


Fig A.1 Análisis de deformación de la lámina, Polydynamics

■ **C-Mold** permite el modelado y la visualización del módulo de interfase del usuario en el paquete de simulación del proceso de termoformación. Mejora la animación de los resultados referentes a la presión, temperatura y estiramiento. El programa puede correr en una estación de trabajo con Unix o en un PC y la interfase con el usuario cuesta US\$10.000, y el paquete de simulación del proceso de termoformación cuesta US\$30.000.

■ **Compuplast** pronto ofrecerá la versión 4.0 de su paquete de simulación **T-SIM** desarrollado por T-SIM cz, en la República Checa. De la versión mejorada se dice que opera con mayor facilidad y que le permite a los usuarios hacer rotaciones de las piezas formadas, proyecciones de mayor tamaño e imágenes panorámicas en tiempo real. Las nuevas opciones de despliegue permiten definir sombras y señalar marcos de alambre. El modelo viscoelástico se ha mejorado. Entre las nuevas características se incluyen la determinación de encogimientos y deformaciones dimensionales. Perdikoulias también dice que el paquete puede simular la formación de láminas coextruidas o rellenas con minerales o materiales de refuerzo. Los precios son superiores a los US\$15.000.

■ **Fluent Inc.** Está entregando su nueva versión 3.7 del programa **Polyflow** con mejoramientos con respecto al tratamiento del calentamiento, el combado de la lámina, preestiramiento, el movimiento del contramolde y la formación de ondulamientos. El programa maneja también propiedades viscoelásticas en estado no isotérmico. Polyflow calcula los resultados al doble de la velocidad de las versiones anteriores. Otras características son el procesamiento integrado previo y posterior de la información, la importación de modelos CAD, la formación automática de mallas, la animación del proceso y una base de datos de materiales, expandible a 30 genéricos. Polyflow está disponible para operación en Unix o en PC, y cuesta cerca de US\$20.000.

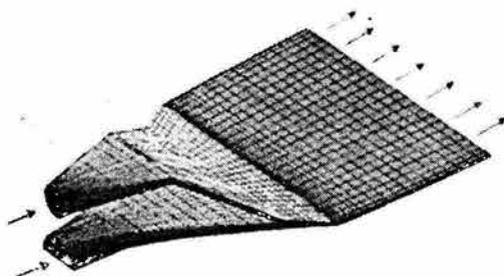


Fig. A.2 Simulación de la distribución de flujo de dos materiales coextruidos.

■ El Instituto de Materiales Industriales del Consejo Nacional de Investigaciones del Canadá (IMI-CNRC), junto con un consorcio de 15 organizaciones académicas e industriales (incluyendo a Dow Plastics y Montell Polyolefins), está desarrollando un simulador del proceso de termoformación con base en un paquete inicialmente concebido para el modelamiento del proceso de moldeo por soplado. Este nuevo programa contendrá un modelo viscoelástico y desplegará el proceso en secuencias de manera animada para poder analizar el calentamiento de la lámina, el enfriamiento de la pieza formada y deformaciones. Un algoritmo de optimización puede alimentar automáticamente los resultados de regreso al programa para realizar iteraciones adicionales. Las versiones para PC o estaciones de trabajo estarán basadas en Windows. También se incluirá la posibilidad de estudiar láminas coextruidas. El producto puede ser licenciado a través de un acuerdo con el consorcio. Robert DiRaddo, líder de grupo para modelado y optimización afirma que su paquete será el primero en simular la termoformación de láminas gemelas.

■ Sherwood Technologies está desarrollando cuatro programas con base en Java para el análisis del calentamiento de la lámina y el enfriamiento de la pieza formada. Específicamente tratará el calentamiento de la lámina por uno y dos lados, respectivamente, así como el calentamiento de la misma por sectores. Los programas de Sherwood costarán entre US\$150 cada uno o US\$500 por el grupo.

■ La Universidad de Massachusetts, en Amherst, está desarrollando un programa para el modelado de materiales coextruidos. David Kasmer, profesor asistente de Ingeniería Industrial y Mecánica, está dirigiendo una investigación destinada a crear un simulador que combine los modelos de los diferentes materiales en una coextrusión. Espera ofrecer una serie de herramientas computarizadas para el final del año.

#### A.2 Innovaciones en materiales poliméricos y maquinaria para el proceso de termoformado.

En este capítulo abordaremos algunos de los recientes desarrollos que se han presentado en materiales poliméricos para termoformado, adicionalmente se mencionan las aplicaciones que muchos de ellos ya tienen o podrían tener en un futuro no muy lejano; cabe mencionar que cada vez son más amplias las posibilidades que el termoformado tiene para convertirse en uno de los procesos de transformación de plásticos más usados, ello debido a los constantes avances que también se tienen en cuanto a la fabricación de moldes y máquinas termoformadoras. Las tendencias del mercado exigen a los proveedores de materiales para termoformación innovar su oferta. Los desarrollos tecnológicos y una adecuada

manipulación de las características de los materiales permiten el empleo de resinas que antes se consideraban poco adecuadas para este proceso que se adapta de manera efectiva a las nuevas exigencias y que, de esta forma, se sitúa como uno de los procesos de transformación de plásticos con mayor potencial en el presente siglo sin olvidar, por supuesto, al proceso de inyección que hoy en día es el más empleado.

Para satisfacer las necesidades del mercado y mantenerse competitivamente en él es necesario hacer inversiones en moldes, y realizar corridas de producción más cortas y con materiales más sofisticados e impactantes. Existe, por lo tanto, una tendencia hacia la diferenciación de marcas y a ofrecer alternativas novedosas y llamativas al consumidor. El proceso de termoformación se adapta a esta tendencia de una manera muy efectiva, ya que con él se pueden hacer corridas de producción más cortas. Destacamos aquí resinas novedosas que se están adaptando con éxito al proceso de termoformación en varias industrias entre las que destacan la industria de empaques y la automotriz.

#### A.2.1 Novedades de la termoformación en la industria de los empaques

La industria de empaques mira cada vez con más interés las ventajas ofrecidas por el proceso de termoformación y las sopesa frente a las de la inyección, especialmente porque los dos ofrecen alternativas tecnológicas para la fabricación de empaques de alta barrera<sup>(d)</sup>.

Las empresas fabricantes de empaques se están reorganizando para adoptar estrategias guiadas por el tipo de tecnología de fabricación más que por factores regionales o geográficos. Las empresas de alimentos se están segmentando por tipos de productos, como los bienes de consumo, los de servicios de alimentos y éstas estaban organizadas más de acuerdo a las características regionales y geográficas. Adicionalmente, las empresas de alimentos, a medida que crecen buscan tener un menor número de proveedores y una de sus mayores exigencias es la innovación en el diseño de los empaques, otra es la reducción en los costos de los mismos.

El proceso de termoformación ha facilitado el ahorro en la utilización de materiales y el aumento de la productividad, así como el desarrollo de nuevos productos. Esto ha llevado a la sustitución de envases de vidrio, metal y papel, en periodos de tiempo relativamente largos, como ocurrió con la transición del yoghurt en vidrio al yoghurt en plástico o de las bandejas de carne en cartón recubierto a las bandejas de poliestireno espumado y hoy está ocurriendo con empaques para helado, los cuales están migrando desde el papel. Las razones para estos cambios fueron varias, pero seguramente el costo fue importante. Por otro lado, el menor costo de los moldes de termoformación justifica el uso del proceso en producciones de un menor número de unidades.

Unas necesidades importantes de las empresas en la actualidad tienen que ver con crear o mantener la identidad de sus marcas y, por otro lado, la de buscar una diferenciación de sus productos. La termoformación se ha prestado para la introducción de nuevos materiales de empaques rígidos, como es el caso del tereftalato de polietileno cristalizado VersaTray® de Voridian®, el cual es apto para fabricar envases de alimentos para calentar en cualquier tipo de horno. El material resiste temperaturas de hasta 200 °C.

Igual ha ocurrido con la nueva resina PLA NatureWorks® de Cargill Dow®, que promueve la imagen de los productos por ser biodegradable. La resina se procesa con facilidad en termoformadoras configuradas para poliestireno.

En Italia ya se están fabricando empaques para pastas y otros alimentos frescos, los cuales fueron adoptados por la cadena Iper, del norte de este país. Los envases, a su vez están recubiertos por una película extruída también con PLA. En esta aplicación se ha reemplazado al HIPS y el PLA ofrece una transparencia y brillo comparables ofreciendo una rigidez alta (500.000 psi) y un potencial para disminuir el calibre en aproximadamente un 15%. Al mismo tiempo, las películas de PLA proporcionan una excelente barrera a los sabores y aromas. Los polímeros biodegradables están llamando con mayor fuerza la atención de los productores y esto se manifiesta en la mayor oferta de este tipo de resinas.

Biomax® de DuPont® puede ser empleado para hacer envases termoformados para los servicios de comidas rápidas. Está fabricado con un poliéster modificado con características de hidro-biodegradabilidad.

Una nueva película termoformable de capas múltiples emplea una capa que tiene un desempeño superior en la conservación de comidas congeladas, mejorando los resultados obtenidos con estructuras más costosas con base en nylon o con EVA/ionómero/EVA. La marca de la película es Flexform B® y es fabricada por Rollprint Packaging Products®, de Addison, Illinois. Puede ser procesada en la mayoría de los equipos de formación, llenado y sellado, y resiste el encogimiento asociado con el nylon. El material ofrece tenacidad y resistencia a la punción. También ofrece una capacidad de estirarse de manera uniforme, dando un gran potencial para disminuir el calibre.

#### A.2.2 El termoformado en la industria automotriz<sup>(d)</sup>.

La industria automotriz está respondiendo a las tendencias del mercado consumidor instalando paneles termoformados de ASA/polycarbonato en lámina a dos capas de acrílico, una transparente y la otra pigmentada. En su interior se está inyectando un poliuretano reforzado con fibra de vidrio larga. Estos paneles luego son instalados en varios diseños de automotores.

El uso de materiales plásticos termoformados e inyectados para construir piezas del cuerpo de los automotores dan la oportunidad de personalizar un poco los productos, ya que estas piezas pueden tener características variables producidas a baja escala pero sobre una plataforma única. En este sentido, el proceso de termoformación ofrece una ventaja competitiva porque se adapta muy bien a los procesos de bajo volumen de producción. Ya algunas empresas productoras de equipos de termoformación, como Geiss, están mejorando los sistemas de acabado para catalogarlos dentro de la Clase A de partes para la industria automotriz porque el atraso para alcanzar este nivel de calidad se ha debido más a los problemas de desarrollo de los procesos que a la calidad de los materiales.

Los plásticos termoformados le permiten a los diseñadores de automotores crear partes, componentes y sistemas novedosos. Así, el modelo Trailblazer 2003 de General Motors cuenta con paneles para exteriores fabricados con películas pintadas de alto brillo y con nivel de calidad Clase A. Estos paneles de bajo costo pasaron a sustituir el proceso de pintura con ahorros entre el 7 y 10% en los costos de producción. Por otro lado, no existe emisión de aromáticos volátiles. Las películas pintadas se laminan a sustratos de olefinas termoplásticas extruídas, el producto luego se corta al tamaño deseado, se termoforma, recorta y ensambla.

Esta forma de producción ofrece la ventaja de acelerar el proceso de desarrollo y facilita la ejecución de cambios. Las películas pintadas y laminadas no se astillan, tienen una excelente resistencia a la intemperie y a agentes químicos. Por otro lado, el laminado tiene una buena resistencia al impacto a baja temperatura y no adquiere el acabado de piel de naranja. Otro ejemplo lo constituyen los biseles para los modelos Dodge Neon de Daimler Chrysler de este año y el año pasado, fabricados con coextrusiones de 4 capas e incorporando una película pintada de alto brillo. Se ha demostrado que el color es más durable que la pintura metálica convencional. La estructura está formada por una capa estructural de polipropileno, una capa de adhesivo, una de ionómero pigmentado con el color, y otra de recubrimiento con protección contra la luz ultravioleta. La coextrusión es cortada y termoformada. Un robot posiciona la parte termoformada en un molde de inyección donde se le adhiere una estructura de polipropileno.

GE Plastics ha desarrollado paneles para la carrocería exterior de los llamados vehículos eléctricos vecinales, NEV (del inglés *neighborhood electric vehicles*). Estos son vehículos de baja velocidad diseñados para reemplazar los carros repartidores de correo, microbuses y transportes para canchas de golf. Uno de éstos es el fabricado por Global Electric Motorcars LLC, una subsidiaria de DaimlerChrysler. La carrocería debe ser brillante, que retenga colores de alta calidad a la intemperie y cuyos requerimientos generales se acercan a aquellos de la Clase A de las normas para automotores. El material de GE se extruyó en estructuras de dos y tres capas, las cuales contienen un sustrato de ABS, una capa de color en ASA y una capa de brillo en base acrílica. La capa de ASA contiene el color sólido o metálico y proporciona la protección contra la luz ultravioleta. La capa de brillo es transparente y acentúa el acabado de la capa de color a la vez que imparte resistencia contra el rayado. Los paneles de dos capas no contienen capa de brillo pero cuenta con resistencia a la intemperie y un buen balance de rigidez y tenacidad. Otra posibilidad es la de hacer las coextrusiones en TPO.

Bayer Corporation también ha trabajado en la fabricación de láminas termoformadas de ABS/ASA para sustituir los compuestos de fibra de vidrio en aplicaciones no relacionadas con las de los automotores convencionales. Como en el caso de GE, estas coextrusiones imparten brillo, acabado superficial suave y resistencia a la intemperie. La superficie es compatible con pinturas tipo SMC. Estas láminas son de menor peso y evitan la contaminación con solventes orgánicos volátiles provenientes de la pintura tradicional.

Los moldeadores por termoformación están logrando ventajas en la fabricación de paneles exteriores de automotores y vehículos utilitarios, desplazando de esta manera al acero, aluminio, compuestos reforzados con fibra de vidrio y en algunos casos, no se requiere la

combinación con procesos de inyección. El mejor uso que los termoformadores le están dando a materiales como el TPO es un factor que ha ayudado a la obtención de estas ventajas. El TPO es un material de baja densidad, relativamente económico, pero que ha presentado problemas debido a su baja resistencia mecánica en estado fundido.

Un resultado exitoso en la termoformación de TPO viene de la planta Thermoform S.A. que fabrica partes para Renault en Cajicá, Colombia, en donde se logró formar un parachoques con un espesor de 0,24 pulgadas con salidas negativas severas de una pulgada a cada extremo. Renault decidió cambiar de piezas inyectadas a termoformadas usando TPO con el fin de disminuir los costos de producción y los de los moldes, para un número de unidades que era apenas de 7000 partes por año. Aquí también hubo ahorros de tiempo porque el molde de termoformación se entregó mucho más rápido de lo que le hubiera tomado uno de inyección. Para el desarrollo de este proyecto hubo necesidad de escoger una termoformadora de cámara aislada para garantizar una distribución uniforme del espesor de las paredes. El molde también tuvo características especiales, pues contó con secciones móviles en cada extremo.

Por otro lado, Solvay Engeneering Polymers®, una compañía que fabrica compuestos de TPO anunció que sus productos ya se están usando para fabricar una variedad de paneles que son aditamentos para vehículos que ya están en el mercado. En este caso, los mercados no son muy grandes pero sí el número de referencias y modelos, por lo que el proceso de termoformación se adapta bien a la fabricación de este tipo de piezas. Un ejemplo de aplicación es la fabricación de tableros para vehículos de Ford, con un TPO de Solvay® y que se ofrece en 50 colores diferentes aplicados con pintura, por ser el más barato de los procedimientos.

Otro ejemplo es la fabricación de salpicaderas para camiones fabricadas con un compuesto con base de Dexflex E118®, un TPO de Solvay®. Este material resiste los impactos aún a baja temperatura y pintado se asemeja a la calidad que se obtiene con compuestos reforzados con vidrio, que son los que se usan comúnmente en esta aplicación.

Un panel para el techo de la carrocería de un modelo de automóvil de DaimlerChrysler fue producido mediante una combinación novedosa del proceso de moldeo de películas decoradas, PFM (del inglés *paintless film molding*) y del proceso de inyección de fibra larga, LFI (del inglés *long fiber injection*), lanzado recientemente al mercado por Krauss-Maffei®. El proceso de termoformación se empleó para crear los insertos de la película, la cual era subsecuentemente soportada sobre el poliuretano reforzado con la fibra larga de vidrio.

El proceso de fabricación es el siguiente: el proceso LFI corta cuerdas de vidrio y deposita la resina y el refuerzo en un molde abierto por medio de un robot de movimiento transversal. La película es realmente una lámina de 0,5 pulgadas de espesor coextruída con la estructura ABS/ASA/PMMA, la cual se recorta con un sistema robotizado y es llevada al molde de inyección. Esta estructura es más rígida que el aluminio y sin embargo, pesa un 30% menos. Se espera que estructuras como ésta podrán ser usadas en varias partes del exterior de la carrocería de los automotores en el futuro.

### A.2.3 Aplicaciones en el transporte de dispositivos electrónicos<sup>(d)</sup>

Los productores de bandejas protectoras rígidas usadas para transportar discos duros de computadoras, semiconductores y otros aparatos electrónicos sensibles, tienen ahora la oportunidad de beneficiarse con la tecnología más reciente. Esta cubre los aspectos técnicos para fabricar coextrusiones hechas de PETG Eastar® y algunos grados de PET antiestático Eastat®. Estas láminas multicapa pueden proteger las partes electrónicas contra las descargas electrostáticas, ESD, al tiempo que también evitan la contaminación con partículas de carbono proveniente de los rellenos de carbón conductor. Cuando se usa para empaques de partes electrónicas y eléctricas esta coextrusión es más efectiva que otros materiales actualmente usados para fabricar las bandejas, normalmente monocapas de materiales costosos, tipo ESD.

Por otra parte, un polímero aleado inherentemente disipativo, IDP, puede ser usado en las capas superficiales de coextrusiones en tres capas, junto con Eastar 6763® en el centro. El centro proporciona resistencia mecánica y facilita la termoformación, mientras que las capas externas dan la protección contra las descargas electrostáticas a bajo costo. Esto también abre las puertas a la reducción del calibre.

De una manera alternativa las capas de material inherentemente disipativo pueden ser coextruidas alrededor de una capa central de Eastat GSP32®, copoliéster conductor que tiene negro de humo como relleno. Esta última coextrusión permite hacer bandejas con resistencias superficial y volumétrica bajas, al tiempo que la capa de negro de humo encapsulada sella las partículas y evita la evolución de gases corrosivos que pueden afectar los componentes sensibles electrónicos.

También, el uso de una capa de poliéster en el centro mejora la facilidad de formación e incrementa el campo de aplicaciones para hacer diseños con detalles más precisos (como costillas y guías) y una mayor profundidad de empaque, lo cual beneficia el ajuste de las piezas que se deben proteger durante el transporte.

Por último debe recalarse que existen muchas nuevas tecnologías para fabricar polipropilenos que se ajustan a las necesidades muy específicas del mercado. Las propiedades de los nuevos homopolímeros y copolímeros destacan con valores muy importantes de reología, propiedades mecánicas y ópticas. La rigidez es ahora mayor en todo el rango de índices de fluidez o pesos moleculares, dando lugar a mayores temperaturas de deflexión al calor. Las temperaturas de fundición son ahora más altas. La mayor cristalinidad permite reducir los espesores de las láminas para termoformación.

### A.3 Maquinaria.

Las empresas de maquinaria, por su parte, también deben marchar al ritmo de las tendencias del mercado, G.N. Plastics®, por ejemplo, ofrece maquinaria de termoformación con diseño novedoso, que combina los dos pasos críticos de formación y corte en una sola operación. La precisión en la colocación de la lámina y el corte de la misma ofrecido por las máquinas de G.N. las hace aptas para procesar materiales preimpresos. Las máquinas termoformadoras de G.N. producen envases de plástico

uniformes y de alta calidad en una variedad de materiales termoplásticos de rodillo que incluyen OPS, PVC, HIPS, PET, PP y otros materiales termoformables de calidad. El proceso de fabricación de las máquinas es controlado por computadora, garantizando calidad consistente en el producto final.

### A.3.1 Equipos auxiliares de interés para la termoformación.

Un sistema para la determinación de la temperatura de la superficie de la lámina antes de entrar en la unidad de formado, en tiempo real, es ahora ofrecido por Raytec®. El modelo TF100, es un equipo que realiza las mediciones de temperatura sin entrar en contacto con la lámina. Para ello se emplea una cámara infrarroja para rastrear la temperatura a lo largo de 256 puntos en línea a través de la lámina, a medida que sale del horno de calentamiento un programa computarizado traduce los datos digitales en un mapa térmico a color, el cual es proyectado en una pantalla. El mapa de color puede ser relacionado con las zonas de calentamiento en el horno y realizar los ajustes que sean necesarios.

Un nuevo sistema de halado de extrusión para permitir la termoformación en línea, controla la temperatura de la lámina para asegurar un mayor brillo superficial. Esto lo hace manteniendo la lámina a una temperatura suficientemente baja pero a la vez, lo suficientemente caliente para permitir la alimentación directa de la unidad de formación sin la necesidad de pasar por un horno de recalentamiento. La unidad de halado está diseñada para ahorrar espacio y energía. La marca de la unidad es Uni-Rail Conveyor® y puede ser reconfigurado removiendo los rodillos de transporte para instalar baños antiestáticos, medidores de espesor por barrido, así como cortadores de bordes. Si se instala en unidades de extrusión de PTL, se puede integrar con rodillos de pulimento actuados de manera hidráulica para ajustar el calibre de la lámina.

### A.3.2 Generalidades

Opciones con resinas de alta resistencia en fundido. En este caso, la atención generalmente se centra en el polipropileno, el cual es termoformado en un punto cercano al de fusión y, por lo tanto, requiere de características especiales de resistencia en fundido para mejorar las propiedades del producto formado.

Basell® ha sido históricamente el proveedor de mayor escala de polipropileno de alta resistencia en fundido y sus productos han sido empleados por la industria automotriz. Basell® incorpora ramificaciones largas en el polipropileno por medio de irradiación con rayos de electrones, para desarrollar la propiedad de resistencia en fundido en el material. Adicionalmente, ofrece una variedad de homopolímeros y copolímeros con esta característica. Los productos se han empleado en la termoformación de tableros y paneles para el interior de automotores. Otra aplicación exitosa ha ocurrido con el material espumado en puertas y recubrimientos en la cabina de los automotores. El material no espumado puede contener refuerzos de materiales y vidrio. Otros sectores de aplicaciones son la construcción de botes y elementos para piscinas.

#### A.4 Una nueva aplicación para la termoformación

El proceso de recubrimientos de piezas de madera con membranas ha sido usado en la industria para efectos de decoración. Hoy, el proceso llama la atención de la industria de termoformación porque también se pueden emplear láminas de mayor espesor en esta aplicación, como aleaciones de acrílico y PVC resistentes a la llama, como lo hace la empresa Kleerdex Co., con su producto Kydex.

Esta modificación le abre las puertas de nuevas oportunidades a los proveedores de lámina y del equipo de termoformación. Las aplicaciones se están dando en piezas para las industrias de fabricación de muebles de oficina, de hospitales, de paneles para construir paredes, así como sistemas de exhibición y otros sistemas de paneles grandes. El proceso se puede desarrollar en máquinas de recubrimiento convencional especializadas o en termoformadoras tradicionales.

#### **BIBLIOGRAFÍA.**

- (a) N. McCauley, E. Harkin-Jones, y W. Murphy,  
Plastics Engineering, julio de 1996, pág. 33.
- (b) Stewart Barton,  
Plastics Technology, septiembre de 1996, pág. 53.
- (c) Carlos Serrano-Consultor Editorial, Mayo 2001  
Plastics Technology
- (d) [www.tecnologíadelplastico.com.mx](http://www.tecnologíadelplastico.com.mx)

*B.1 Mecanismos de corte de material.*

Una múltiple variedad de cortes se hacen presentes en las piezas termoformadas, los métodos de corte que son más efectivos en el corte de piezas complejas redundan en mejor costo. El espesor de la lámina, el tipo de plástico, el tamaño de la pieza, el tipo de tolerancia dimensional, el nivel aceptable de aspereza de la superficie del corte, la velocidad de corte y el equipo a utilizar son factores importantes para la elección de un método en particular. La siguiente tabla nos muestra algunos de estos factores a considerar:

Clasificación	Tipo de corte	Profundidad de corte	Fluctuación de la fuerza de corte	Rugosidad de la superficie	Tipo de deformación	Material	Velocidad de corte	Comentarios
Flujo continuo	Continuo	~1	Pequeña	Pequeña	Elástico	PE, PTFE, FEP, PP	Lenta	Alta deformación elástica
Corte continuo	Continuo	> 1	Pequeña	Irregular (marcas)	Plástico	PS, ABS	Media alta	Desgarramiento continuo
Corte simple - discontinuo	Discontinuo	> 1 irregular	Moderada	Irregular	Plástico	PMMA	Media	Fractura plástica
Complejo - discontinuo	Discontinuo	~1 irregular	Larga	Muy irregular ondulaciones	Elástico	PMMA, PS	Alta	Fractura plástica, esfuerzos (compresión y de tensión).
Rompimiento - discontinuo	Discontinuo	> 1 irregular	Muy larga	Marcas de mutilado	Fractura elástica, quebradizo	PMMA, PS	Alta	Fractura elástica quebradiza.
Complejo - discontinuo (corte con rompimiento)	Discontinuo	viruta	Muy larga	Desgarre	Fractura quebradiza	Baja elongación.	Alta	Fractura plástica, esfuerzos (compresión y de tensión).

Tabla B.1 Clasificación del maquinado de los plásticos

El equipo puede ser tipo manual, o automatizado y hasta con láser. Rara vez la pieza final no requiere del corte, como en el caso de anuncios luminosos. Se debe seleccionar el equipo y la técnica adecuados, entre algunos tenemos:

*a) Sierras y bandas eléctricas.*- son relativamente rápidas, de bajo costo, pero limitadas a un solo plano de corte, pueden conseguirse horizontales o verticales. Las bandas de tipo vertical pueden cortar en una sola dirección y en zonas curvas. Debido a su dificultad para automatizarlas deben operarse de manera manual con operadores con la habilidad de obtener piezas de calidad. Con las sierras de tipo horizontal, las piezas a cortar deberán colocarse en una mesa, la cual puede automatizarse, es de fácil operación y muy rápida.

Dados de acero.- es un rápido método de corte, los dados son contruidos con la dureza, la geometría y el tipo de ensamble requerido para la pieza a cortar. Pueden ser forzados hidráulica, neumática y mecánicamente contra el material. Teniendo como límite de corte menos de 0.125 in de espesor, usándose especialmente en el empaque por blister, y con un solo plano de corte.

*b) Sierra circular.*- deberá tener dientes rectos para favorecer el enfriamiento y no reblandecer el material. Los dientes de carburo de tungsteno brindan un corte excelente y mayor duración entre afiladas. La alimentación de corte debe ser lenta para evitar el

calentamiento o estrellamiento del material. Debe operarse a velocidades relativamente altas y antes de iniciar el corte, asegurándose de que haya desarrollado la máxima velocidad. Mientras mayor sea el espesor del material que se va a cortar, mayor deberá ser el diámetro de la sierra y menor el número de dientes por centímetro (mínimo 2 dientes por cm.). Cuando se utilice una sierra circular de mano, es necesario sujetar firmemente la lámina y alimentar con presión y velocidad uniformes para evitar estrellamientos.

ESPESOR DE LA LÁMINA (mm)	DISCO				
	DIAMETRO		ESPESOR		No. DIENTES
	(mm)	(in)	(mm)	(in)	
1.5 - 3		8		1/16 - 1/32	96
3 - 4		10		3/32 - 1/8	82 - 96
5 - 10		10		1/8	82 - 96
12 - 15		12		1/8	82 - 96
18 - 21		12		1/8	48 - 52
25 - 52		12 - 14		1/8 - 5/32	48 - 52

Tabla B. 2 Especificaciones de corte con sierra circular, viajera o radial

c) *Sierra cinta.*- es el equipo indicado para hacer curvas en hojas planas y para refiletear piezas formadas. Tiene una velocidad de operación variable hasta de 5000 pies/min. (2300 - 5000 rpm) y con una profundidad de garganta mínima de 10 in. Es conveniente utilizar las cintas especiales para cortar metal o para plásticos; también es necesario ajustar la guía lo más cercana al material para evitar estrellamientos en la línea de corte y reducir al mínimo la vibración en la sierra. En las siguientes tablas se enlistan las especificaciones de corte con sierra cinta.

ESPESOR DE LÁMINA (mm)	CINTA			MOTOR	
	ANCHO MIN		DIENTES POR in	HP	RPM
	(mm)	(in)			
1.5 - 3		3/16	18	1	
4 - 6		3/16	14	1.5	DE
8 - 12		¼	10	1.5	2500
15 - 25		3/8	8	1.5 - 2	A
25 - 52		3/8	8	2	3500

Tabla B.3 Especificación de corte con sierra cinta

LAMINA RADIO MINIMO A CORTAR (mm)	CINTA				
	ANCHO		ESPESOR		DIENTES POR in
	(mm)	(in)	(mm)	(in)	
12		3/16		0.028	7
13 - 19		¼		0.028	7
20 - 38		3/8		0.028	6
39 - 57		½		0.032	5
58 - 76		5/8		0.032	5
77 - 114		¾		0.032	4
115 - 203		1		0.035	4
204 - 305		1 ¼		0.035	3
306 - 500		1 1/2		0.035	3

**Tabla B.4 Especificación de corte radial con sierra cinta**

*d) Router.-* La lámina acrílica puede ser cortada con router portátil o fijo (eléctrico o neumático). Se recomienda utilizar un router eléctrico de mínimo 1.5 HP y de 20,000 a 30,000 RPM, procurando utilizar brocas o cortadores con pastillas de carburo de tungsteno con un diámetro de 1/4 o 3/8 in e idealmente de 1/2 in para evitar que la vibración producida rompa la broca. Este método brinda un corte sumamente uniforme y sirve tanto para dar forma, como para realizar agujeros de gran diámetro. Se puede utilizar el router fijo a una mesa y con guía copiadora para diseños intrincados. Los routers por funcionamiento de aire, proveen mayores revoluciones por minuto (alrededor de los 35000 rpm) mejorando el corte y la rapidez, en tanto que los del tipo eléctrico, tienen un rango de velocidad de los 18000 a los 25000 rpm. Y como desarrollo, la turbina de aire alcanza los 60000 rpm. A una sierra circular o router eventualmente se le puede cambiar la herramienta de corte por un disco abrasivo normal o inclusive de diamante; este tipo de disco es conveniente utilizarlo sobre todo cuando la pieza formada de acrílico se refuerza con fibra de vidrio, como sucede con las tinas, lavabos, casetas telefónicas, etc.

*e) Equipos automáticos.-* Este tipo de equipos de corte se utiliza cuando se requiere un nivel de automatización alto; generalmente este equipo cuenta con sistema de cómputo y software especializado, como CAD-CAM-CAE, con el que se diseña el patrón de corte para posteriormente enviar la información a un periférico, que en este caso pueden ser routers de 1 a 5 cabezales, sistema de agua a presión o láser. La capacidad de corte no está limitada a una dirección o plano, prácticamente se puede realizar cualquier tipo de corte o perforación.

*f) Corte con agua a presión.-* El sistema abrasivo de corte con agua a presión elimina muchos de los problemas asociados con la maquinaria y operaciones de corte convencional. Se concentra un chorro muy fino de agua a presión 50,000 Psi, a una velocidad de aproximadamente 3 m/min. y con una precisión de +/- 1 mm. Usando una combinación de agua altamente presurizada y materiales abrasivos como polvo de sílice, el chorro con agua puede cortar todos los materiales sin producir calentamiento y dejando un excepcional acabado en la superficie de corte. Las ventajas que ofrece este sistema de corte en el acrílico son: la eliminación de distorsión por calentamiento, se puede realizar cualquier ángulo de corte por su tipo multidireccional integrado a sistemas computacionales, elimina operaciones secundarias como lijado y reduce el material de desperdicio por tener una área de corte muy reducida.

*g) Corte con láser.-* El corte con láser es una técnica ya usada por otros sectores industriales desde hace varios años y tiene como características principales:

- Alta precisión de corte
- Flexibilidad de manufactura
- Reducción de costos

Este sistema de corte con láser ofrece versatilidad de aplicación, ya que además de su empleo directo en el corte de láminas acrílicas, ofrece la posibilidad de procesado en muchos otros tipos de materiales. Es posible cortar, soldar y desbastar superficies de hasta 30 mm de espesor, debido a que la energía láser se concentra en un solo punto y la generación de calor se puede limitar a una zona mínima con lo cual no hay deformación por calor ni cambios estructurales en el material. También se obtienen cortes finos con cantos precisos, lo cual es muy recomendable para piezas de acrílico con formas muy intrincadas.

Se pueden efectuar barrenos desde 0.1 mm de diámetro, a una velocidad de hasta 150,000 perforaciones por hora. Un equipo láser podrá cortar hasta 1/2" de acrílico a una velocidad de 30 cm/min.

*h) Suajado.-* Esta técnica no es muy empleada debido a que presenta limitaciones; en acrílico sólo es posible suajar piezas termoformadas cuando éstas aún están calientes y tienen espesores no mayores a 2.0 mm, siendo recomendable que las cuchillas estén a una temperatura entre 40 y 60° C. Aún así la calidad de corte no es muy buena. Este tipo de técnica de corte funciona mejor en plásticos como acetato, poliestireno y P.V.C. espumado.

*i) Ruedas de abrasivos.-* Estas proveen menor calentamiento del material (de 1/3 a 1/2 del calor producido) y producen en la pieza un acabado mas fino (liso), comparado con el de las sierras. Por lo general, incluyen abrasivos como el óxido de aluminio (alúmina), carburo de silicio, carburo de tungsteno y diamante. Este tipo de ruedas abrasivas necesita altas velocidades de corte, y su superficie rugosa, por lo general es de fina a burda. A continuación, se tienen los tipos de ruedas abrasivas que se pueden emplear para diferentes materiales.

MATERIAL	RUGOSIDAD DE LA SUPERFICIE (µm)			
	RUEDA ABRASIVA		SIERRA CIRCULAR	
	A	B	C	D
SAN	32	23	8	200
ABS	28	16	10	200
PA – 610 (Nylon)	34	16	6	36
PC	8	6	5	25

Velocidad periférica 2500 m/min

A: tamaño de grano 36 carburo de silicio, resina de grado medio.

B: tamaño de grano 36 oxido de aluminio, resina de grado medio.

C: sierra, 300 mm de Dia., 2 mm de espesor, 2.3 dientes/cm, 0° de ángulo de salida, 60° de ángulo de relieve.

D: igual que el C, pero con 0.2 mm entre dientes.

Tabla B.5 Operación de corte y rugosidades

Para las condiciones donde se requiere que el material sea desbastado, utilizando una fresa o cortador vertical, se tiene la tabla B.6, donde se indican las características y los parámetros de operación de los cortadores:

Material	Angulo de ataque (grados)	Angulo de hélice (grados)	Angulo de salida (grados)	Angulo de Corte (grados)	Velocidad de alimentación	Velocidad de corte RPM	Seco/húmedo	Condición de acabado	Nivel de dificultad	Comentarios
PE	70-90	10-20	9-15	0	0.18-0.25	2000-4000	Bueno	De tres puntos	0	Alta elasticidad
PVC	120	27	-	-	0.3	2000	Húmedo	Rebabas muy largas	6	Orificios de entrada menores a los de salida
PMMA	55 - 140	NA	12 – 20	NA	0.05	2000	Agua /aceite	Pulido	3	Extracción con fresado, fractura al

PS	60 - 90	40 - 50	12 - 15	0	(seco) 0.4 (húmedo) 0.025 - 0.4	4000 500 - 2000	Húmedo -	Amplio y alto pulido -	8 -	liberar Fácil de maquinar
ABS elasticida d baja media alta	70 - 90	10 - 20	9 - 15	0	0.025 - 0.4	500	NA	pulido	4	Plastifica a la entrada
	70 - 90	10 - 20	9 - 15	0	0.05 - 0.4	500 - 1000	NA	pulido	4	
	70 - 90	10 - 20	9 - 15	0	0.05 - 0.4	500 - 1000	NA	pulido	5	
SAN	70 - 90	10 - 20	9 - 15	0	0.2 - 0.4	500	Húmedo	pulido	5	Más elástico que el AES
PTFE	70 - 90	10 - 20	9 - 15	0	0.025 - 0.1	500 - 2000	Seco	profundo y alto pulido	1	Alta elasticidad
PA-6 (nylon)	70 - 90	*	9 - 15	*	0.1 - 0.4	500 - 2000	Seco	pulido	3	Herramienta de carburo Cambio de dimensiones
	70 - 90	*	9 - 15	*	0.2 - 0.4	500 - 1000	Seco	fresado especial	3	
PA 66	70 - 90	10 - 20	9 - 15	0	0.05 - 0.2	500	Húmedo	NA	2	Mellas resistentes
PC	60 - 90	NA	10 - 15	NA	0.05 - 0.4	500 - 4000	Seco	Profundo y alto pulido	2	Fractura al sacarlo a bajas velocidades
POM (acetal)	*	*	*	*	0.2 - 0.4	500 - 4000	Seco	NA	1	Alta elasticidad

Tabla B. 6 Condiciones de fresado de plásticos.

<i>DEFECTO</i>	<i>CAUSA POSIBLE</i>	<i>SOLUCION SUGERIDA</i>
Burbuja o ampolla en la hoja	Humedad excesiva.	Presecar la hoja, calentar los dos lados de la hoja a 60°C (140°F)
	Calentamiento muy rápido	Reducir la temperatura del horno. Incrementar la distancia entre la hoja y el calefactor.
	Calentamiento no uniforme.	Verificar y arreglar el horno. Verificar elementos calefactores.
Detalles y formas incompletas.	Vacío insuficiente.	Eliminar obstrucciones el en sistema de vacío. Incrementar número de perforaciones y aumentar su diámetro. Mayor capacidad de tanques y bomba de vacío. Fuga de la línea.
	Desplazamiento del vacío.	Verificar el sistema de vacío por posibles fugas. Utilizar canales de vacío en áreas posibles.
	Calentamiento insuficiente de la hoja.	Aumentar la temperatura o tiempo de calentamiento.
Cambio de color en la hoja.	Calentamiento excesivo.	Reducir tiempo de calentamiento. Disminuir la temperatura del horno.
	Baja temperatura en el molde.	Calentar el molde.
	Baja temperatura de la ayuda mecánica.	Calentar ayuda mecánica.
	La hoja de adelgaza demasiado.	Incrementa el espesor de la hoja.
	Enfriamiento de la hoja antes de completar su forma.	Colocar la hoja más rápidamente en el molde. Aumentar la velocidad de vacío. Calentar el molde y la ayuda mecánica.
	Inadecuado diseño del molde.	Disminuir la profundidad del molde. Mejorar el flujo de aire de vacío. Usar radios de curvatura mayores.
	Material no adecuado.	Cambio de material.
Alabeo excesivo o pandeo de la hoja.	Hoja muy caliente	Disminuir el tiempo de calentamiento. Disminuir la temperatura del horno.
	Hoja demasiado grande en área.	Si es posible, reducir el tamaño de la hoja, utilizar pantallas. Principalmente en el centro de la hoja (Solo para hornos con calentamiento infrarrojo)

<i>DEFECTO</i>	<i>CAUSA POSIBLE</i>	<i>SOLUCION SUGERIDA</i>
Marcas por enfriamiento en la hoja formada.	Hoja demasiado caliente.  Ayuda mecánica con insuficiente temperatura.  Baja temperatura del molde (El encogimiento cesa cuando hace contacto con el molde o ayuda fría)	Disminuir la temperatura del molde. Disminuir el tiempo de calentamiento.  Elevar la temperatura de la ayuda. Usar fieltro o franela suave en la superficie de la ayuda.  Elevar la temperatura del molde y/o ayuda, sin exceder los rangos de temperatura. Suavizar o redondear el molde en áreas críticas.
Pequeñas arrugas o marcas circulares.	Hoja muy caliente.  Barrenos de vacío muy grandes.	Disminuir la temperatura del horno. Disminuir tiempo de calentamiento.  Rellenar y barrenar nuevamente a un diámetro más pequeño.
Variación en el pandeo de la hoja.	No hay uniformidad de temperatura en la hoja.	Verificar que el horno no tenga corrientes de aire, es necesario incorporar deflectores.
Arrugas durante el formado.	Excesivo calentamiento de la hoja.  Excesivo pandeo de la hoja.  Vacío insuficiente.	Disminuir temperatura del horno. Disminuir tiempo de calentamiento, en la medida de lo posible incrementar la distancia entre calefactores y la hoja (solo en hornos de calentamiento por radiación infrarroja)  Disminuir el rango de temperatura de moldeo.  Verificar el sistema de vacío. Incrementar orificios de vacío o canales.
Líneas o zonas muy brillantes.	Hoja sobrecalentada en el área de brillo.	Utilizar pantallas para disminuir el calor en la zona, en la medida de lo posible, incrementar la distancia entre calefactores y la hoja (solo en hornos de calentamiento por radiación infrarroja) Disminuir el tiempo de calentamiento.
Mala apariencia de la superficie de la pieza.	Defecto causado por aire atrapado sobre la superficie lisa del molde.  Vacío insuficiente.	Sand-blastear la superficie del molde.  Incrementar el número de orificios de vacío. Si las marcas aparecen aisladas, incrementar el número de orificios de vacío en la zona afectada.

<i>DEFECTO</i>	<i>CAUSA POSIBLE</i>	<i>SOLUCION SUGERIDA</i>
Mala apariencia de la superficie de la pieza.	Excesiva temperatura del molde. Insuficiente temperatura del molde. Superficie del molde demasiado áspera o rugosa. Hoja sucia.	Disminuir la temperatura del molde. Incrementar la temperatura del molde. Suavizar la superficie del molde ó hacer otro molde con otro material. Limpiar la hoja.
Distorsión excesiva o post-encogimiento después de desmoldar la pieza.	Pieza desmoldada demasiado rápido.	Prolongar el ciclo de enfriamiento. Pasar la pieza a una plantilla 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.
Excesivo adelgazamiento del espesor de la pared de la pieza.	Técnica de formado inadecuada. Variación en el espesor del material. Calentamiento desigual de la hoja. La hoja está a una temperatura excesiva. Molde frío. La hoja no está firmemente sujeta en el marco.	Utilizar otra técnica de formado. Verificar que el material se encuentre dentro de las normas de calidad y/o solicitar reclamación del material. Verificar la operación del horno. Disminuir la temperatura del horno. Disminuir el tiempo de calentamiento. Calentar el molde. Incrementar presión de cierre. Verificar posible variación en el espesor de la hoja.
Torcedura de las piezas.	Pieza no enfriada convenientemente. Distribución desigual del espesor de la pared. Diseño del molde inadecuado. Temperatura insuficiente del molde.	Ajustar el ciclo de enfriamiento. Usar ayuda mecánica o técnica de preestiramiento. Posible calentamiento desigual de la hoja. En la medida de lo posible, modificar las áreas planas con una pequeña curvatura. Incrementar temperatura del molde.

<i>DEFECTO</i>	<i>CAUSA POSIBLE</i>	<i>SOLUCION SUGERIDA</i>
Marcas de encogimiento en las esquinas.	Superficie del molde demasiado lisa. Vacío insuficiente.	Sand-blastear la superficie del molde. Verificar el sistema de vacío, agregar más orificios de vacío.
Pre-estiramiento de la burbuja no uniforme.	Insuficiente temperatura de la hoja. Espesor desigual de la hoja. Presión de aire insuficiente.	Verificar condición de operación del horno. Mayor tiempo de calentamiento a una menor temperatura. Incorporar un sistema de distribución de aire con deflectores.
Esquinas de espesor delgado en formados de profundidad.	Técnica de formado inadecuada. Hoja de espesor delgado. Calentamiento no uniforme de la hoja. Calentamiento inadecuado del molde.	Cambiar a otra técnica de formado. Incrementar espesor de la hoja. Verificar la operación del horno. Utilizar pantallas para cambiar la distribución del calor. Cambiar la temperatura del molde.
La pieza se amarra a la ayuda mecánica.	Ayuda mecánica (madera) Ayuda mecánica (metal)	Aplicar agente desmoldante. Cubrir con fieltro o franela suave. Aplicar agente desmoldante. Bajar la temperatura de la ayuda. Cubrir con fieltro o franela.
La pieza se amarra al molde.	Alta temperatura de la pieza. El ángulo de salida del molde es insuficiente. Molde construido en madera.	Rediseñar la pieza. Dar mayor ángulo de salida, entre 1 y 3° ó cambiar a molde hembra. Aplicar agente desmoldante.
Las esquinas de la pieza formada se estrellan una vez en servicio.	Inadecuado diseño de la pieza. Concentración de esfuerzos en la pieza.	Rediseñar la pieza. Aumentar el radio de curvatura del molde. Aumentar la temperatura del termoformado. Asegurarse de que la pieza ha sido completamente formada antes de que se enfría por debajo de la temperatura de moldeo.

## C. 2 Normas

<i>Resistencia de materiales y pruebas en plásticos</i>	
<b>PRUEBA</b>	<b>NÓRMAS</b>
Tensión en plásticos	ASTM-D-638, NMX E-082-1990,
	NMX-E-134-1990, NMX E-164-1986
	NMX-T-023-1979, NMX T-067-1994,
	NMX-T-111-1990, NMX T-115-1990,
	NMX-T-164-1994, DIN 53455,
DIN 53441, DIN 53444, DIN 53452	
Tensión en películas de plásticos	ASTM-D-882
Flexión en plásticos	ASTM-D-790 BMX E-088-1979
	NMX-E-183-1990, NMX E-210-1994
Compresión en plásticos	ASTM-D-695, ASTM D-1621
	NMX-E-083-1979, NMX E-089-1994,
	NMX-E-076-1973, NMX E-138-1986,
NMX-T-001-1972, NMX T-002-1972	
Resistencia al Impacto (Izod y Charpy)	ASTM-D-256 ISO 179, ISO 180
	NMX-E-029-1993, NMX E-058-1970,
	NMX-E-090-1979, NMX E-186-1990,
	NMX-E-214-1996, DIN 51230,
DIN 53753, DIN 53448	
Impacto por caída libre	ASTM-D -709, ASTM-D-1922
	ISO 7765
Impacto por dardo en películas de plásticos	ASTM-D-1709, ASTM-D-2444,
	ASTM-D-3029 ISO 6603-1-2,
	ISO 7765-1-2 NMX E-099-1990,
DIN 53443	
Coeficiente de Fricción	ASTM-D-1894, ASTM D-882,
	ASTM-D-638 ISO 37, ISO R 524
	NMX-E-005-1980, NMX E-106-1981
DIN 53375	
HDT/VICAT	ASTM-D-648, ASTM D-1525,
	ASTM-E-608, ASTM E-644,
	ASTM-E-1137, DIN 43760,
	DIN 53460, DIN 53461, ISO 75,
	ISO 306
Fragilidad	ASTM-D-746, ASTM-D-2137,
	DIN 53546, ISO 974

Dilatómetro para plásticos	ASTM-D-696
Densidad (columna)	ASTM-D-4883 NMX E-004-1990,
	ASTM-D-1505, DIN 53479
Índice de Fluidez	ASTM-D-1238 ISO 1133, DIN 53735
	NMX-E-113-1985
Punto de Fusión	ASTM-D-789, ASTM D-2117
	ISO 1218, ISO 3146, DIN 53736
Block-Reblock	ASTM-D-3354 NMX T-166-1994
Medición de Flameabilidad	ASTM-D-635
Pruebas de dureza Shore	ASTM-D-2240 NMX T-024-1994,
	NMX-E-085-1994, NMX T-160-1994,
	DIN 53505, DIN 53519
Método de prueba para micro - tensión en especímenes de plástico	ASTM-D-1708

<http://www.cientec.com.mx/normas2.htm>

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA  
DE MEXICO**

FACULTAD DE INGENIERIA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECANICA

MAQUINA DE TERMOFORMADO DE PLASTICOS  
CON BASTIDOR AJUSTABLE

**COTIZACION DE EQUIPO Y  
MATERIALES**

CANTIDAD	UNIDAD	DESCRIPCION DEL ARTICULO	COSTO UNITARIO	TOTAL	POSIBLE PROVEEDOR
1		BOMBA DE VACIO ESIVACH H200 800l/h, 735 mm Hg, Diam. Succ. 1 in, 1200 rpm, 2 Hp, CON MOTOR ACOPLADO (2 Hp, 1200 rpm).	\$ 12900.00 MN	\$ 12900.00 MN	<b>EQUIPOS Y SISTEMAS DE VACIO S.A.</b> EMILIO PORTES GIL 33 Col. LA PROVIDENCIA C.P. 02440 , CIUDAD DE MEXICO, DISTRITO FEDERAL  Tel. (55)5318-6231,(55)5318-6322
1		FILTRO DE SUCCION	\$ 1100.00 MN	\$ 1100.00 MN	
1		SILENCIADOR	\$ 450.00 MN	\$ 450.00 MN	
1		GUARDABANDAS	\$ 400.00 MN	\$ 400.00 MN	
1		VACUOMETRO	\$ 480.00 MN	\$ 480.00 MN	
4	LITROS	ACEITE	\$ 57.50 MN	\$ 230.00 MN	
20		RESISTENCIAS DE CERAMICA INFRARROJA POTENCIA 250, 400, 650 Y 1000 Watts, 240 V MODELO CRB	\$ 32.90 Dis (9.90 peso/dl)	\$ 658.00 Dis	<b>TEMPCO MEXICO S.A. DE C.V.</b> AMADO NERVO 60 Col. SAN FRANCISCO TETECALA C.P. 02730 , AZCAPOTZALCO, DISTRITO FEDERAL  Tel. 55)5561-6808 Fax (55)5561-6889
20		REFLECTOR PARA RESISTENCIA INFRARROJA MODELO CRK00007	\$ 31.90 Dis	\$ 638.00 Dis	

CANTIDAD	UNIDAD	DESCRIPCION DEL ARTICULO	COSTO UNITARIO	TOTAL	POSIBLE PROVEEDOR
1		CONTROL DE TEMPERATURA DIGITAL DOBLE DISPLAY, ENTRADA TERMOPAR J O K, SERIE 553M	\$ 1760.00 MN	\$ 1760.00 MN	<b>TEMPCO MEXICO S.A. DE C.V.</b> AMADO NERVO 60 Col. SAN FRANCISCO TETECALA C.P. 02730 , AZCAPOTZALCO, DISTRITO FEDERAL Tel. 55)5561-6808 Fax (55)5561-6889
1		TERMOPAR TIPO J CON DIAMETRO DE 3/16" POR 1/8", TERMINALES DE 2 m CUBIERTAS CON MALLA DE AC. INOX	\$ 98.00 MN	\$ 98.00 MN	
3	TRAMO 6 m	PTR (PERFIL TUBULAR REFORZADO) 1 in, CALIBRE 14	\$ 180.00 MN	\$ 540.00 MN	CASA ORTIZ FERRETERIA AV. REVOLUCION 733, COL MIXCOAC, MEXICO D.F. C.P. 03710 TEL: 5563 - 3334, FAX 5611 - 1975
2	HOJA 1.16x3.5 m	LAMINA NEGRA CALIBRE 18	\$ 600.00 MN	\$ 1200.00 MN	
3	HOJA 1.0x4.4 m	LAMINA DE PLASTICO (PVC, PE, ACRILICO)	\$ 220.00 MN	\$ 660.00 MN	
1	VOL. LITROS	TANQUE DE ARRANQUE 10 LITROS	\$ 150.00 MN	\$ 150.00 MN	
			TOTAL	\$32,798.40	
			TOTAL + IVA	\$37,718.16	



**TEMPCO México,**  
S.A. de C.V.

Amado Nervo No. 60-Bis  
Col. San Francisco Tetecala  
Deleg. Azcapotzalco  
02730, México D.F.

Tel.: (55) 5561-6808  
01-800-716-7994  
Fax: (55) 5561-6889  
E-mail: tempcomexico@infosel.net.mx  
http://www.tempcomexico.com

## Cotización

Casa Matriz:  
TEMPCO Electric  
Heater Corp.  
Wood Dale Il., USA

### Fabricantes de:

- Resistencias Eléctricas
- Calentadoras
  - Cartuchos Alta y Baja Concentración
  - Bandas:
    - Mica
    - Cerámica
  - Tubulares:
    - Radiación
    - Inmersión
    - Pre-Calentadores
  - Infrarrojas de:
    - Cerámica
    - Cuarzo
  - Ahogadas en:
    - Aluminio
    - Bronce
  - Tiras
  - Hule Silicón
  - "Coil Heaters"
  - Traza Eléctrica
  - Cerámica para Hornos
- Termopares
- Controles de Temperatura:
  - Analógicos
  - Digitales

### Distribuidores de:

- Athena Controls Inc.
  - Controles de Temperatura:
    - Tablero
    - Colada Caliente
- Industrial Sensor Inc. (ISI)
  - Transductores e Indicadores de Presión
- Mercotac Inc.
  - Conectores Rotatorios
- Alta Temperatura
  - Cables
  - "Espaguettis"
  - Conectores Eléctricos
- Relays de:
  - Mercurio
  - Estado Sólido

**MANTENEMOS STOCK  
DE NUESTROS  
PRODUCTOS**

Atención a: GABRIEL SOTO

Depto: Proyectos

UNAM  
CIRCUITO INTERIOR S/N  
COPIILCO  
COYOACAN

C.P.: 04360

Tel.: 5637 9018

Fax: .

Fecha: 27/08/2002

Vigencia: 15 días

6

Producto	Cantidad	Unidad	Precio Unitario	Tiempo de Entrega
CONTROL DE TEMPERATURA DIGITAL DOBLE DISPLAY, ENTRADA PARA TERMOPAR J O K, SERIE 553M	1.00	Pieza	1760.00 M.N.	1 Días
TERMOPAR TIPO J CON DIAMETRO DE 3/16" POR 1 1/8", TERMINALES DE 2 METROS CUBIERTAS CON MALLA DE ACERO INOX.	1.00	Pieza	98.00 M.N.	1 Días

Los precios no incluyen I.V.A.

Para aclaraciones favor de comunicarse a nuestras oficinas con:

**Eduardo Cárdenas**

**"Ingeniería en Sistemas de Control y Calentamiento Eléctrico"**



**TEMPCO México,**  
S.A. de C.V.

Amado Nervo No. 60-Bis  
Col. San Francisco Tetecala  
Deleg. Azcapotzalco  
02730, México D.F.

Tel.: (55) 5561-6808  
01-800-716-7994  
Fax: (55) 5561-6889  
E-mail: tempcomexico@infosel.net.mx  
http://www.tempcomexico.com

## Cotización

**Atención a:** GABRIEL SOTO

**Depto:** Proyectos

UNAM  
CIRCUITO INTERIOR S/N  
COPILCO  
COYOACAN

**C.P.:** 04360

**Tel.:** 5637 9018

**Fax:** .

**Fecha:** 27/08/2002

**Vigencia:** 15 días

6

Producto	Cantidad	Unidad	Precio Unitario	Tiempo de Entrega
RESISTENCIA DE CERAMICA INFRARROJA POTENCIA 250W, 400, 650 Y 1000W 240V MODELO CRB	1.00	Pieza	32.90 Dls.	1 Días
REFLECTOR PARA RESISTENCIA INFRARROJA MODELO CRK00007	1.00	Pieza	31.90 Dls.	1 Días
BASTIDOR PARA 3 RESISTENCIAS INFRARROJAS MODELO CRK00003	1.00	Pieza	190.00 Dls.	3 Semanas
RESISTENCIA DE CERAMICA INFRARROJA CON TERMOPAR TIPO K INTEGRADO MODELO CRB	1.00	Pieza	45.95 Dls.	1 Días

Los precios no incluyen I.V.A.

Para aclaraciones favor de comunicarse a nuestras oficinas con:

**Eduardo Cárdenas**

**"Ingeniería en Sistemas de Control y Calentamiento Eléctrico"**

**Casa Matriz:**  
TEMPCO Electric  
Heater Corp.  
Wood Dale II., USA

### Fabricantes de:

- Resistencias Eléctricas
- Calentadoras
  - Cartuchos Alta y Baja Concentración
  - Bandas:
    - Mica
    - Cerámica
  - Tubulares:
    - Radiación
    - Inmersión
    - Pre-Calentadores
  - Infrarrojas de:
    - Cerámica
    - Cuarzo
  - Ahogadas en:
    - Aluminio
    - Bronce
  - Tiras
  - Hule Silicón
  - "Coil Heaters"
  - Traza Eléctrica
  - Cerámica para Hornos
- Termopares
- Controles de Temperatura:
  - Analógicos
  - Digitales

### Distribuidores de:

- Athena Controls Inc.
  - Controles de Temperatura:
    - Tablero
    - Colada Caliente
- Industrial Sensor Inc. (ISI)
  - Transductores e Indicadores de Presión
- Mercotac Inc.
  - Conectores Rotatorios
- Alta Temperatura
  - Cables
  - "Espaguetis"
  - Conectores Eléctricos
- Relays de:
  - Mercurio
  - Estado Sólido

**MANTENEMOS STOCK  
DE NUESTROS  
PRODUCTOS**

# EQUIPOS Y SISTEMAS DE VACIO, S.A.

EMILIO PORTES GIL (ESQ. LAURO VILLAR)  
 COL. LA PROVIDENCIA AZCA, SZALCO, MEXICO, D.F. C.P. 02440  
 TEL. 53-18-62-31 5318-63-22 FAX 5318-62-31



México, D.F. a 28 de Agosto del 2002

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO  
 FACULTAD DE INGENIERIA  
 Circuito Interior s/n  
 Av. Universidad No. 3000  
 Méx.co, D.F.

At'n.: ING. GABRIEL SOTO

- Cotización No. 8684

Bomba rotatoria de aletas deslizantes para vacío, con lubricador automático de presión, con las siguientes características:

Marca	ESIVAC	ESIVAC
Modelo	H-150	H-200
Fabricación	Nacional	Nacional
Desplazamiento	480 LPM	500 LPM
Vacío	735 mm Hg snm	730 mm Hg snm
Diámetro de succión	3/4" Ø NPT	1" Ø NPT
Vel. de la bomba	1350 RPM	1200 RPM
Potencia del motor	1 HP	2 HP
Precio con motor	\$8,910.00	\$12,900.00
Tiempo de entrega	3 a 4 semanas aproximadamente	
Condiciones de pago	50% con su pedido; resto antes de embarque.	
<b>Accesorios:</b>		
Filtro	\$800.00	\$1,100.00
Silenciador	\$400.00	\$450.00
Guardabandas	\$350.00	\$400.00
Vacuómetro (en glicerina) 2 1/2" Ø	\$450.00	\$480.00
Aceite ESIVAC Tipo AC-2	\$230.00	\$230.00

El motor es trifásico, TCCVE, 220/440 volts, 4 polos, 1800 rpm. en 60 Hz.  
 Los precios en esta cotización tiene una vigencia de 30 días, excepto si hubiera algún cambio significativo en el mercado nacional y se le deberá de aumentar el 15% IVA. LAB nuestra planta.

No incluye embalaje instalación ni partes eléctricas no cotizadas.  
 La garantía de éste equipo es de seis meses por defectos de fabricación.

Servicio de reparación refacciones en existencia.

**ATENCIÓN**  
 EQUIPOS Y SISTEMAS DE VACIO, S.A.

ING. HECTOR MALERA THOMAS.

# Acriláminas

ECATEPEC, EDO. MEX. A 30 DE AGOSTO 2002

ARAGON S.A. DE C.V.

AV. CENTRAL No. 202 Y 204 (FRENTE A GIGANTE ARAGON)  
3a. SECCION VALLE DE ARAGON, EDO. DE MEXICO

AN'T: ING. MAGDALENA  
TEL: 56 22 80 55

PRESENTAMOS A SU AMABLE CONSIDERACION, LA SIGUIENTE  
COTIZACION: LAMINA LISA POLYACRIL REFORZADA CON FIBRA DE  
VIDRIO, EN COLOR BLANCO LECHOSO, AMARILLO, VERDE Y CRISTAL.  
RESISTENTE A LA INTEMPERIE

CANTIDAD	DESCRIPCION	PRECIO UNITARIO
1	ROLLO LAMINA LISA 90X25.00MTS.	\$1,631.00
1	ROLLO LAMINA LISA 1.22X25.00MTS.	\$2,211.00
1	ROLLO LAMINA LISA 1.45X25.00MTS.	\$2,628.00
1	LAMINA ACRILICA 1.20X1.80.3MM COLOR HUMO Y CRISTAL	\$680.00
1	LAMINA ACRILICA 1.80X2.40.3MM COLOR HUMO Y CRISTAL	\$1,371.00

La mejor solución para su construcción

\*\* ESTE PRECIO ES NETO, INCLUYE EL 15% DE I.V.A.

\*\* PRECIOS NETOS DE PRODUCTOS PREVIDO MISO LAMINA DIFUSORA,  
LAMINA DECORATIVA PARA REJAS VARIEDAD EN CANALES Y COLORES,  
FERRETERIA, TUBERIA Y CONEXIONES

TEL. 780-01-56 710-35-82 FAX: 780-82-85

# Plasti-mundo S.A. de C.V.

MEXICO D.F. 02 DE SEPT. DE 2001

MATERIALES INKJET FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNAM.

PLOTTERS INKJET Y DE RECORTE

AT°N. ING. MAGDALENO TRUJILLO B.

PLOTTERS BASE SOLVENTE

A CONTINUACION PONEMOS A SU CONSIDERACION NUESTRA COTIZACION PARA EL SIGUIENTE MATERIAL.

SOFTWARE DE DISEÑO

LONAS Y VINILOS

PVC ESPUMADO

1 PZA. LAMINA DE P.V.C. BLANCO DE 2 MM. DE ESPESOR DE 1.20 X 2.40 A RAZON DE \$ 12.00 USD. MAS I.V.A.

LAMINAS DE ACRILICO

1 PZA. LAMINA DE ACRILICO CRISTAL DE 3 MM. DE ESPESOR DE 120 X 180 A RAZON DE \$ 1,192.00 MAS I.V.A.

TUBOS Y VARILLAS DE ACRILICO

1 PZA. LAMINA DE POLIESTIRENO ( DIFUSOR DE LUZ ) CRISTAL DE 2.8 MM DE ESPESOR APROX. DE .61 X 1.22 A RAZON DE \$ 77.00 MAS I.V.A. Y DE 1.22 X 2.50 A RAZON DE \$ 338.00 MAS I.V.A.

RESINAS EPOXICAS

RESINAS POLIESTER

## ESPECIFICACIONES.

LAMINAS DE POLICARBONATO

- 1.- TIEMPO DE ENTREGA : DE INMEDIATO
- 2.- CONDICIONES DE PAGO: EN EFECTIVO O DEPOSITO EN CUENTA
- 3.- PRECIOS LAB AREA METROPOLITANA EN LA CD. DE MEXICO Y SUJETOS A CAMBIO SIN PREVIO AVISO.

LAMINAS Y REJILLAS PARA ILUMINACION

- 4.- UNA VEZ ORDENADO EL PEDIDO, NO SE ACEPTA LA CANCELACION TOTAL O PARCIAL.

ESTIRENO A.I.

- 5.- EL PRECIO EN DOLARES ( EN LA PRIMER PARTIDA ) AMERICANOS SE FACTURARA AL TIPO DE CAMBIO BANCARIO A LA VENTA DEL BANCO BANAMEX.

DOMOS

ARTICULOS DE ACRILICO

PEGAMENTO PARA ACRILICO

A T E N T A M E N T E,

TANHIA D. GARCIA LOPEZ.

www.plastimundo.com.mx

e mail: plastimundo@compuserve.com.mx



SUCURSAL  
División del Norte No. 2951, col. el Rosedal,  
MEXICO, D.F. 04330  
Tels.: 5689-3815 5689-3805  
FOX: 5549-0479



MATRIZ  
Patriotismo No. 173, Tacubaya,  
MEXICO, D.F. 11870  
Teléfono y Fax: 5271-9233



SUCURSAL  
Av. Francisco I. Madero No. 1480 Pte.  
esquina con America, col. Centro,  
Monterrey, N.L. 64000  
Tels.: (018) 372-7004 Fax: (018) 372-7044

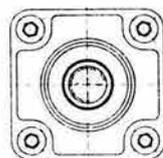
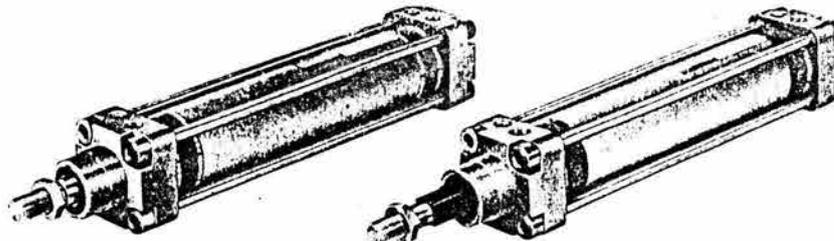
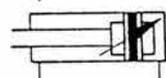
# Cilindros de doble efecto

con amortiguación regulable en ambos fines de recorrido

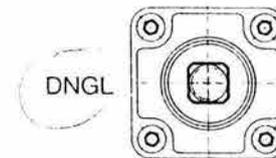
Tipo DNG-...-PPV-A

con émbolo cuadrado antigiro

Tipo DNGL-...-PPV-A



DNG



DNGL

Esta serie de cilindros cumple con las normas DIN ISO 6431, VDMA 24562 y NFE 49003.1.

El émbolo del cilindro está provisto de un imán permanente, con el que son activados los detectores de proximidad.

Versiones especiales:

S2	Dobie vástago	S6	Juntas resistentes a la temperatura máx. 150 °C
S3	Vástago anticorrosivo	S8	Recubrimiento de plástico + S3

Tipo DNGL en S2 y S6

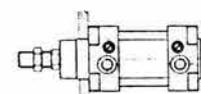
Accesorios ver hoja 3.8/1-1.

El émbolo del cilindro lleva incorporado un imán permanente sobre cuyo campo magnético son accionados los detectores; en el perfil de aluminio se pueden sujetar uno o varios. Por medio de estos detectores se pueden conocer las posiciones finales o intermedias del cilindro.

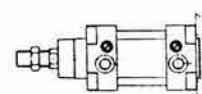
Ver finales de carrera sin contacto en página 3.9/1-1.

Montaje de los cilindros sin fijación adicional

Fijación anterior

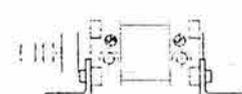


Fijación posterior

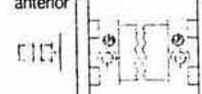


Variantes de montaje con elementos adicionales de fijación

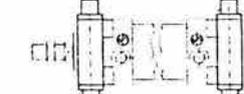
Fijación por pies tipo HNG



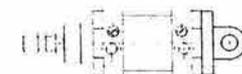
Fijación por brida tipo FNG



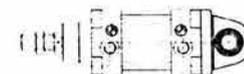
Fijación por pivote oscilante tipo ZNG



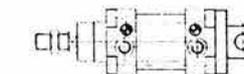
Brida oscilante tipo SNG  
SNGB



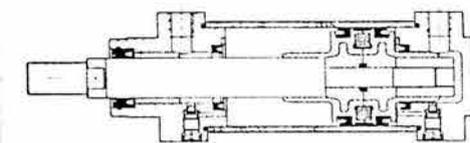
Brida oscilante tipo SSNG  
con apoyo esférico



Brida oscilante tipo SNGL

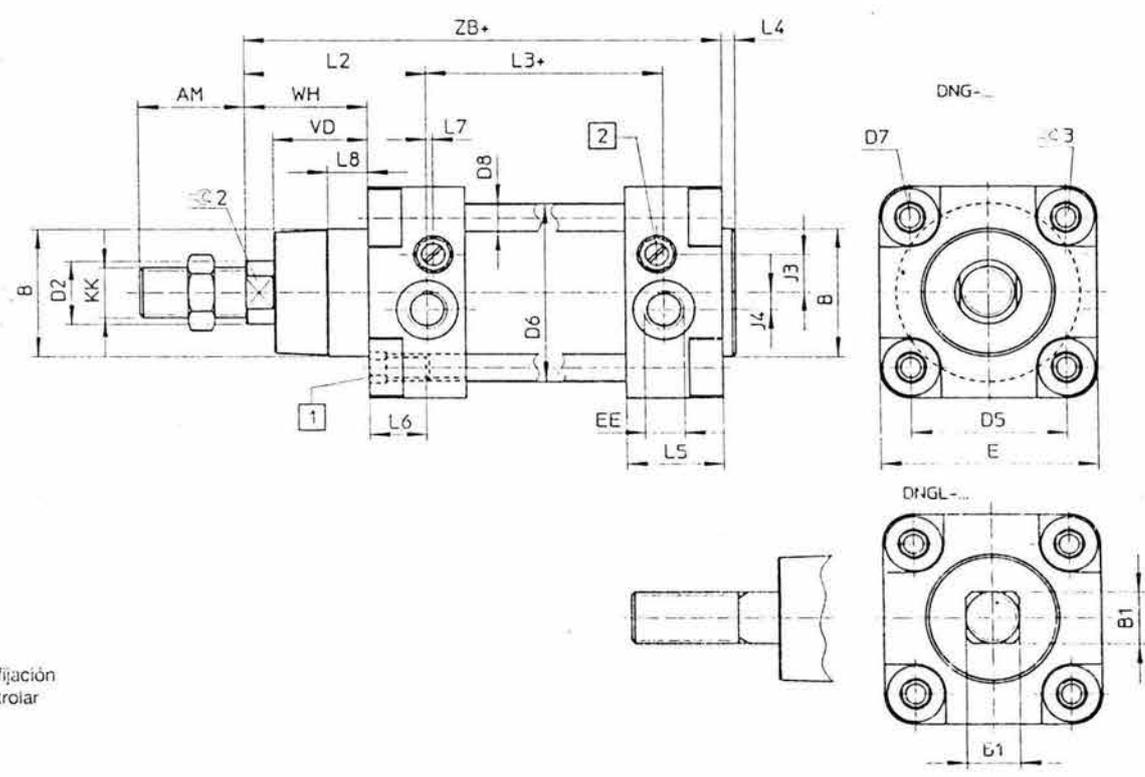


Nota: Caballetes ver hoja 3.1/80-1.



Referencia ver pág. 3.1/40-7		Nº de artículo + DNG + Ø émbolo + Amortiguación + Detección <i>Ejemplo de pedido: Ø émbolo 63 mm, carrera 200 mm, amortiguación regulable de finales de carrera = 36364 DNG-63-200-PPV-A</i>								
Fluido		Aire comprimido filtrado, con o sin lubricación								
Función		Cilindro de émbolo con fijación por tracción								
Presión de funcionamiento		12 bar (Ø de émbolo desde 160 hasta 320 mm: 10 bar)								
Temperaturas de funcionamiento		-20 hasta +80 °C (acatar valores mínimos y máximos de los detectores de proximidad)								
Material		Culatas: Al; Camisa del cilindro: Al (Ø 250 y 320; X 5 Cr Ni Mo 17 12 2); Vástago: X 20 Cr 13 (Ø 250 y 320; C 45 cromado); tirante: X 5 Cr Ni 18 10 (Ø 160 y 200; X 20 Cr 13, Ø 250 y 320; 34 Cr Mo 4); Juntas: Poliuretano								
Peso		Ver dorso								
Ø del émbolo mm	Carreras estándar mm	Longitud de carrera min.-máx. mm	Fuerza de empuje a 6 bar		Fuerza de retorno a 6 bar		Conexiones	Longitud de amortiguación mm		
			Valores teóricos		Valores teóricos					
		Tipo DNG	Tipo DNGL	N	(= kp)	N	(= kp)			
32	25, 40, 50, 80,	10 hasta 2000	10 hasta 300	482	(48,2)	415	(41,5)	G 1/8	20	
40	100, 125, 160,		10 hasta 400	753	(75,3)	633	(63,3)	G 1/4	20	
50	200, 250, 320,		10 hasta 500	1178	(117,8)	990	(99,0)	G 1/4	32	
63	400, 500		10 hasta 500	1870	(187,0)	1682	(168,2)	G 3/8	32	
80			10 hasta 600	3015	(301,5)	2720	(272,0)	G 3/8	36	
100			10 hasta 600	4712	(471,2)	4418	(441,8)	G 1/2	36	
125					7360	(736,0)	6880	(688,0)	G 1/2	40
160					12064	(1206,4)	11310	(1131,0)	G 3/4	40
200					18850	(1885,0)	18096	(1809,6)	G 3/4	50
250					29450	(2945,0)	28270	(2827,0)	G 1	60
320				48250	(4825,0)	46380	(4638,0)	G 1	66	

Tipo DNG-...-PPV-A  
DNGL-...-PPV-A



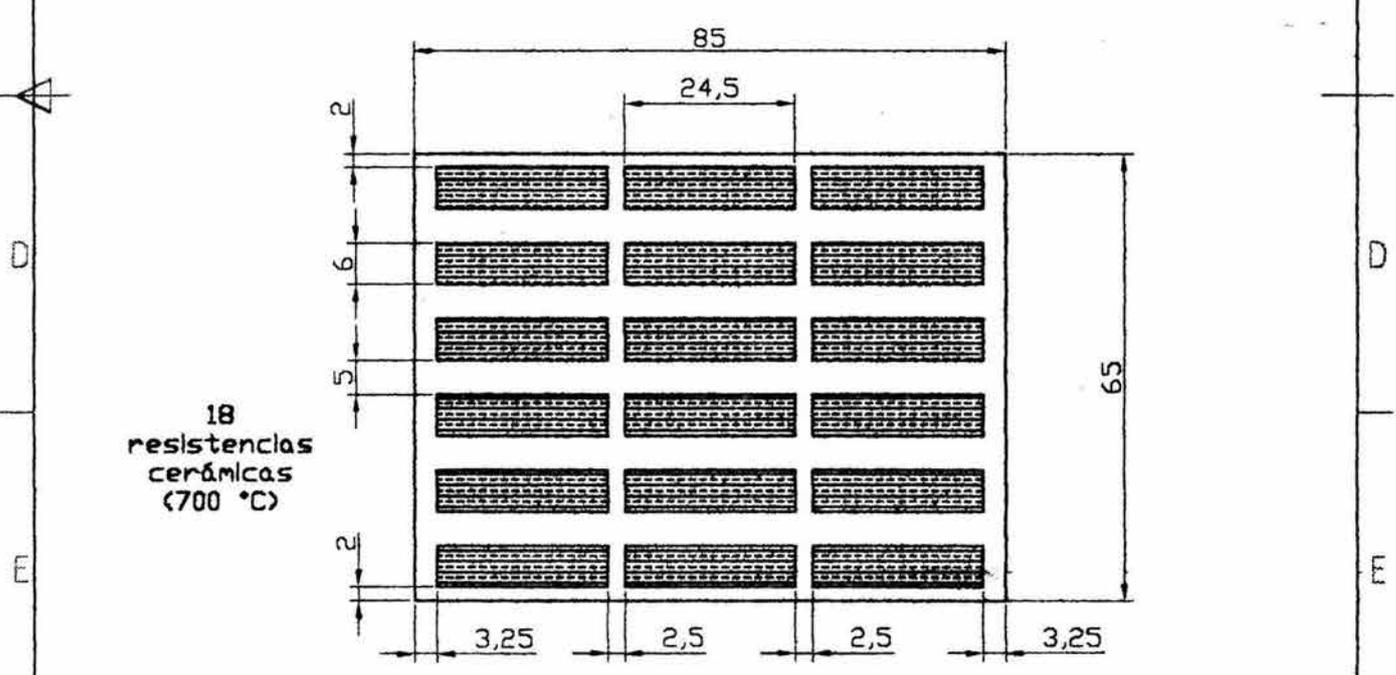
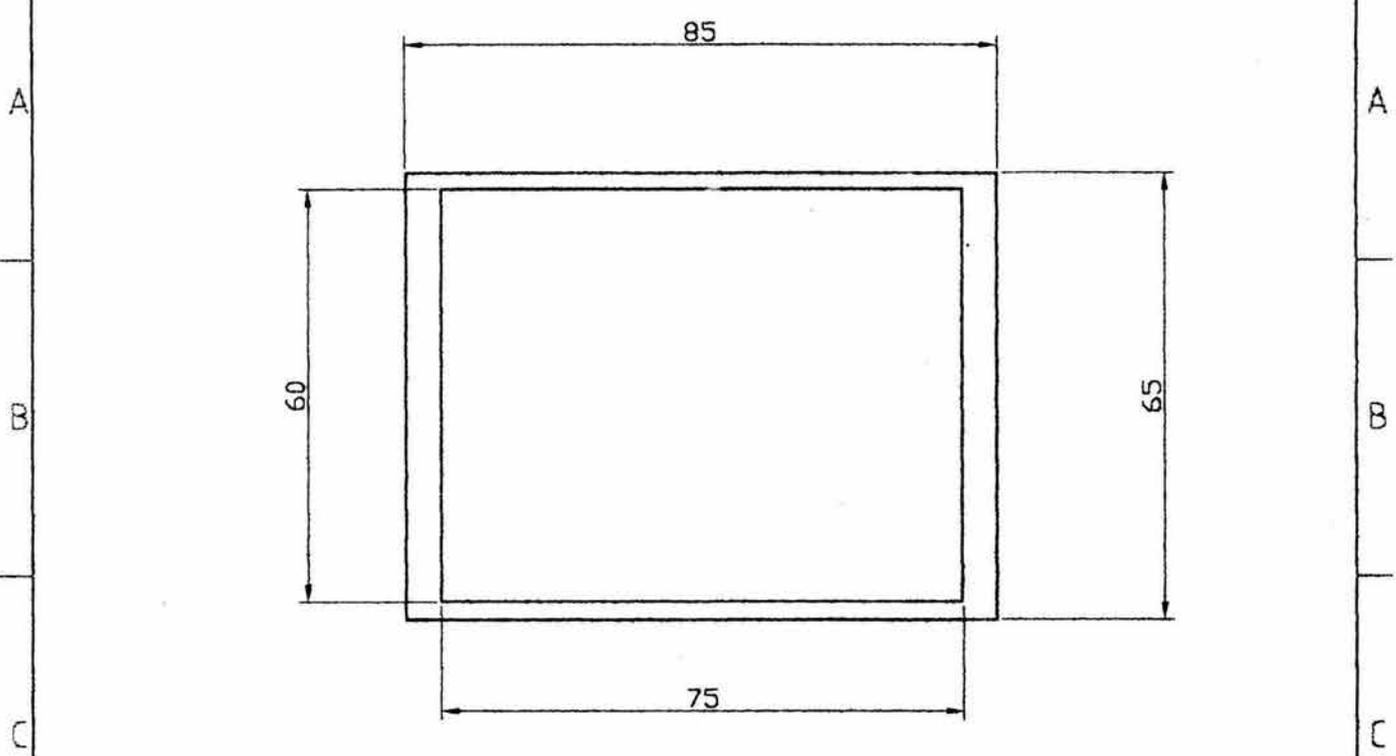
- ① Tuerca tensora con rosca interior para elementos de fijación
- ② Tornillo regulador para controlar la amortiguación
- + = carrera

Ø del émbolo mm	AM	B d11 Ø	B <sub>1</sub>	D <sub>2</sub> f8 Ø	D <sub>5</sub> Ø	D <sub>6</sub> Ø	D <sub>7</sub> Ø	D <sub>8</sub> Ø	E	EE	J <sub>3</sub>	J <sub>4</sub>	KK	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	L <sub>4</sub>	L <sub>5</sub>	L <sub>6</sub>	L <sub>7</sub>	L <sub>8</sub>	②-③	VD	WH	ZB	
32	22	30	10	12	32,5	37	M6	6	50	G 1/8	7	-	M10×1,25	35	68	4	26	17	5,8	10,5	10	6	19	26	120
40	24	35	12	16	38	45	M6	6	55	G 1/4	9,5	2,5	M12×1,25	41	77	4	26	16,5	5,3	10,5	13	6	21,5	30	135
50	32	40	16	20	46,5	55	M8	8	65	G 3/8	12	5,5	M16×1,5	54,5	71	4	29	17	2	12	17	8	28,5	37	143
63	32	45	16	20	56,5	68	M8	8	75	G 3/8	14	6	M16×1,5	55	85	4	35	19,5	5	12,5	17	8	28,5	37	158
80	40	45	20	25	72	86	M10	10	100	G 3/8	15	7	M20×1,5	63	94	4	38,5	20	8	16,5	22	17	34,5	46	174
100	40	55	20	25	89	107	M10	10	120	G 1/2	13	8	M20×1,5	69	102	4	42	20	13	15,5	22	17	37,5	51	189
125	54	60	-	32	110	133	M12	12	145	G 1/2	13	8	M27×2	83	124	6	48,5	20	14	20,5	27	19	46	65	225
160	72	65	-	40	140	168	M16	16	186	G 3/4	22	22	M36×2	105,5	129	6	50,5	24	-	-	36	32	55	80	260
200	72	75	-	40	175	210	M16	16	210	G 3/4	22	22	M36×2	118	134	6	46	24	-	-	36	32	65	95	275
250	84	90	-	50	220	254	M20	18,3	270	G 1	25	25	M42×2	136	138	10	52	25,5	-	-	46	36	67	105	305
320	96	110	-	63	270	325	M24	21,9	340	G 1	30	30	M48×2	151	158	10	56	28,5	-	-	55	46	82	120	340

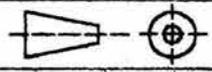
Peso

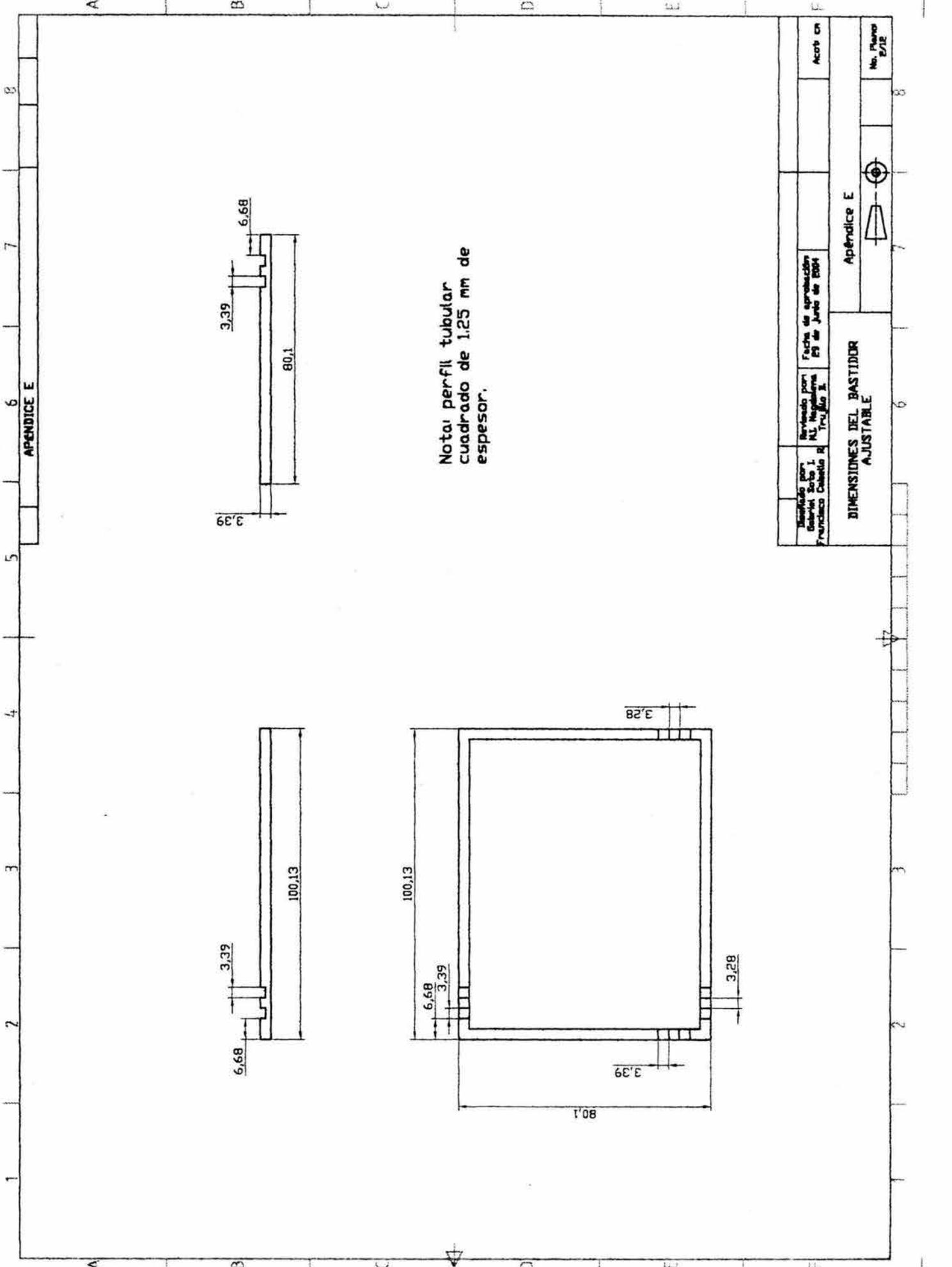
Ø del émbolo mm	Cilindro básico kg		Fijaciones Peso kg/Material							
	Tipo DNG-...-PPV-A	DNGL-...-PPV-A	Tipo HNG-...-PPV-A	Tipo FNG-...-PPV-A	Tipo ZNG-...-PPV-A	Tipo LNZ-...-PPV-A	Tipo SNG-...-PPV-A	Tipo SSNG-...-PPV-A	Tipo SNGB-...-PPV-A	Tipo SINGL-...-PPV-A
	Peso básico	Peso por 10 mm de carrera	Acero cincado	Acero cincado	Acero cincado	Al	GD-Al	GGG-40	GD-Al	GD-Al
32	0,560	0,003	0,225	0,245	0,190	0,090	0,190	0,195	0,125	0,075
40	0,790	0,003	0,270	0,290	0,330	0,145	0,270	0,255	0,175	0,106
50	1,250	0,005	0,400	0,520	0,535	0,145	0,445	0,430	0,243	0,183
63	1,720	0,005	0,480	0,690	0,800	0,190	0,675	0,565	0,380	0,270
80	2,870	0,008	1,080	1,660	1,390	0,190	1,265	0,940	0,610	0,503
100	4,100	0,010	1,250	2,395	2,745	0,340	1,790	1,510	1,040	0,767
125	7,305	0,014	2,025	4,560	5,100	0,340	4,000	3,100	1,750	1,433
160	17,264	0,019	2,200	6,200		1,900	6,558		3,100	2,252
200	20,114	0,025	3,795	8,200		1,900	9,678		9,900	3,306
250			8,000	13,100						
320			13,000	21,500		7,500				

1 2 3 4  
**APÉNDICE E**



Diseñado por: Gabriel Soto I. Francisco Cabello		Revisado por: M.I. Magdalena Trujillo B.		Fecha de aprobación: 29 de junio de 2004		Acot. en	
ARREGLO DE RESISTENCIAS CERAMICAS AREAS PARA EL ARMAZÓN Y PARA EL ENSAMBLE				Apéndice E		No. Plano 1/12	





APÉNDICE E

Nota: perfil tubular cuadrado de 1.25 mm de espesor.

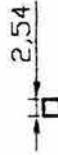
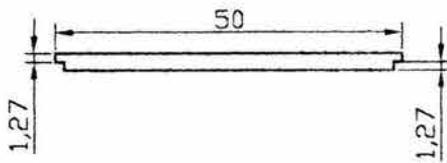
DIMENSIONES DEL BASTIDOR AJUSTABLE

Elaborado por: Gisela Soto I. Francisco Cabeza R.	Revisado por: M. Magallanes Trujillo S.	Fecha de aprobación: 29 de Julio de 2004	Acorde con:
Apéndice E			No. Plano E/12

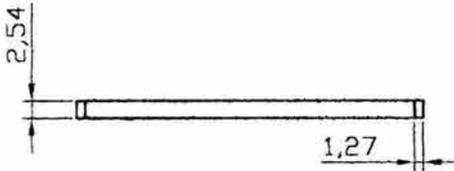


1 2 3 4

APÉNDICE E



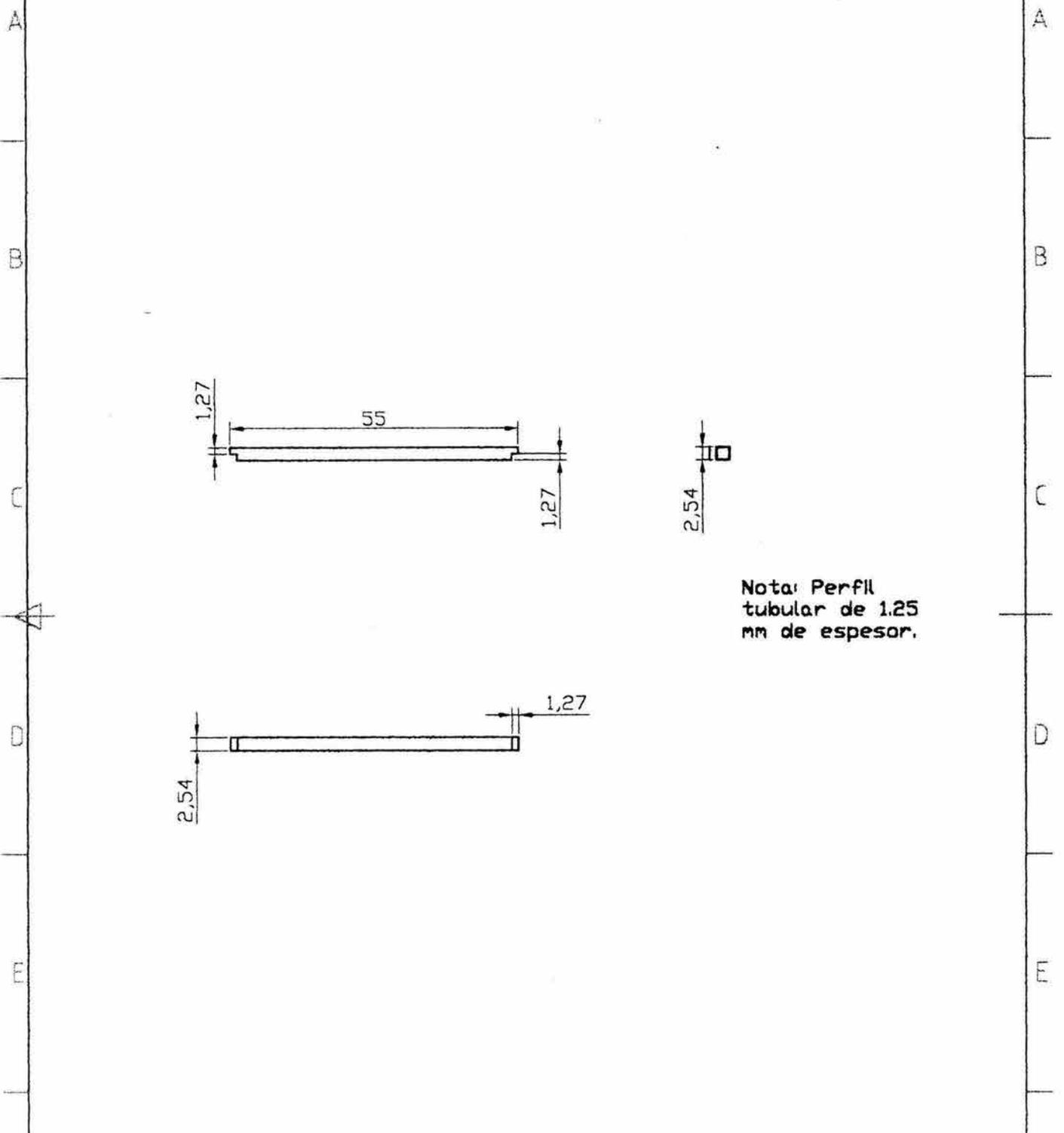
Nota: Perfil tubular  
de 1,25 mm de  
espesor.



Diseñado por: Gabriel Soto I. Francisco Cabello R.		Revisado por: M.I. Magdalena Trujillo B.		Fecha de aprobación: 29 de junio de 2004		Acotación	
DIMENSIONES DE LAS BARRAS CORTAS PARA EL AJUSTE DEL BASTIDOR				Apéndice E			
						No. Plano: 3/12	

1 2 3 4

APÉNDICE E

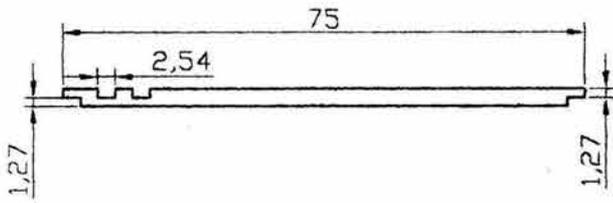


Nota: Perfil  
tubular de 1.25  
mm de espesor.

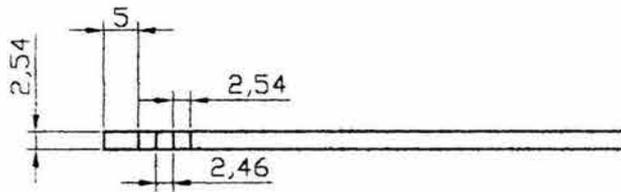
Diseñado por: Gabriel Soto I. Francisco Cabello R.		Revisado por: M.I. Magdalena Trujillo B.	Fecha de aprobación: 29 de Junio de 2004	Acor: cm	
DIMENSIONES DE LAS BARRAS MEDIANAS PARA EL AJUSTE DEL BASTIDOR			Apéndice E		
					No. Plano: 4/12

1 2 3 4

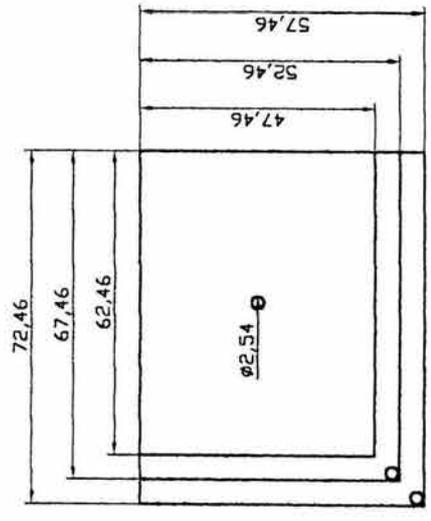
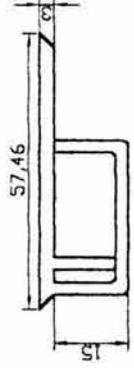
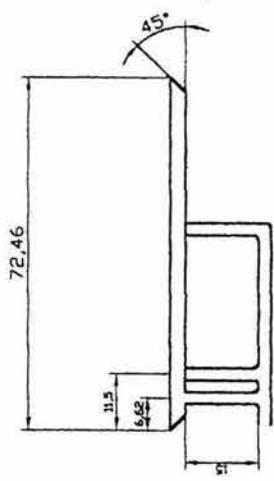
APÉNDICE E



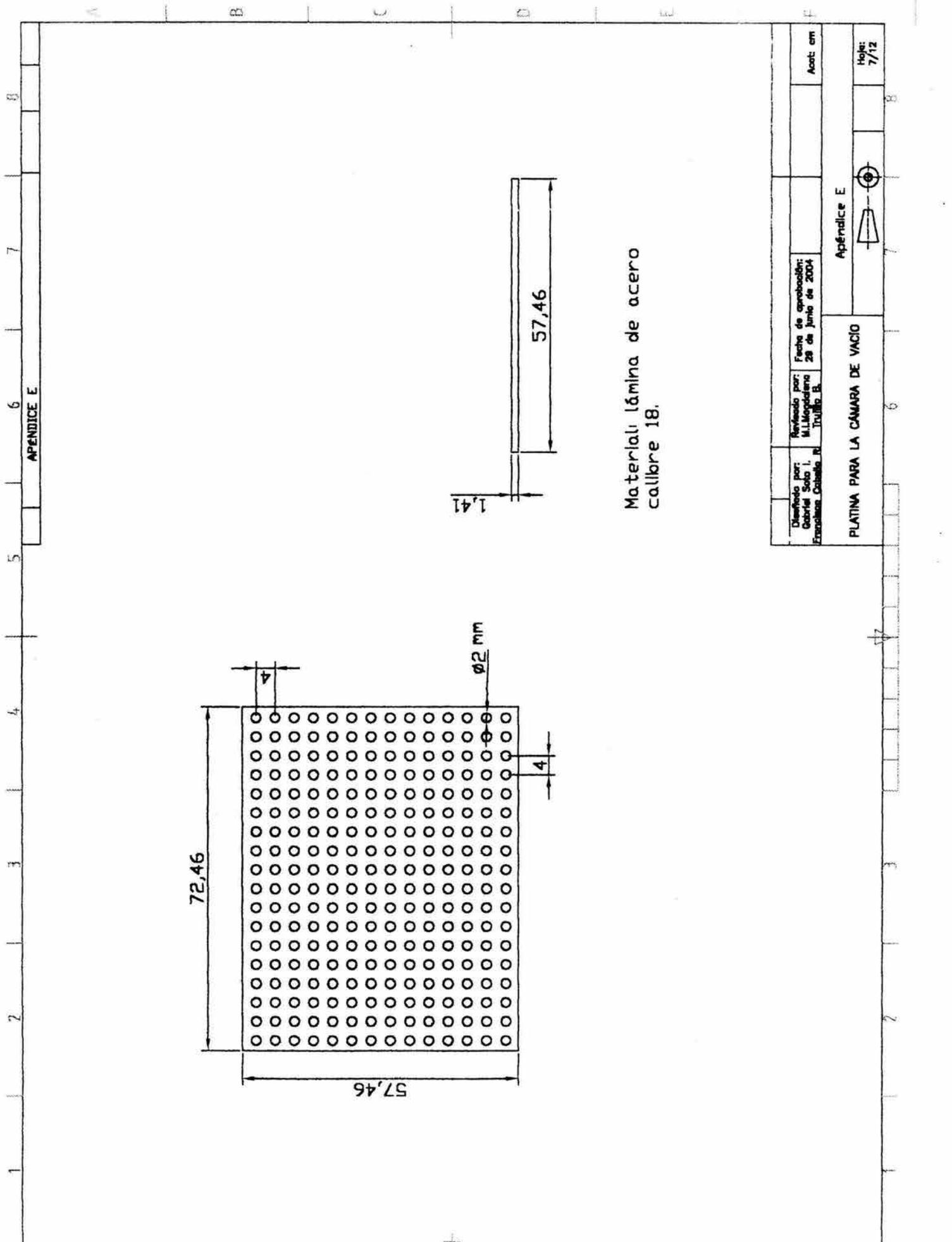
Nota: Perfil tubular  
de 1,25 mm de  
espesor.



Diseñado por: Gabriel Soto I. Francisco Cabello R.		Revisado por: M.I. Magdalena Trujillo B.	Fecha de aprobación: 29 de Junio de 2004	Acotado en
DIMENSIONES DE LAS BARRAS LARGAS PARA EL AJUSTE DEL BASTIDOR			Apéndice E	
			No. Plano: 5/12	



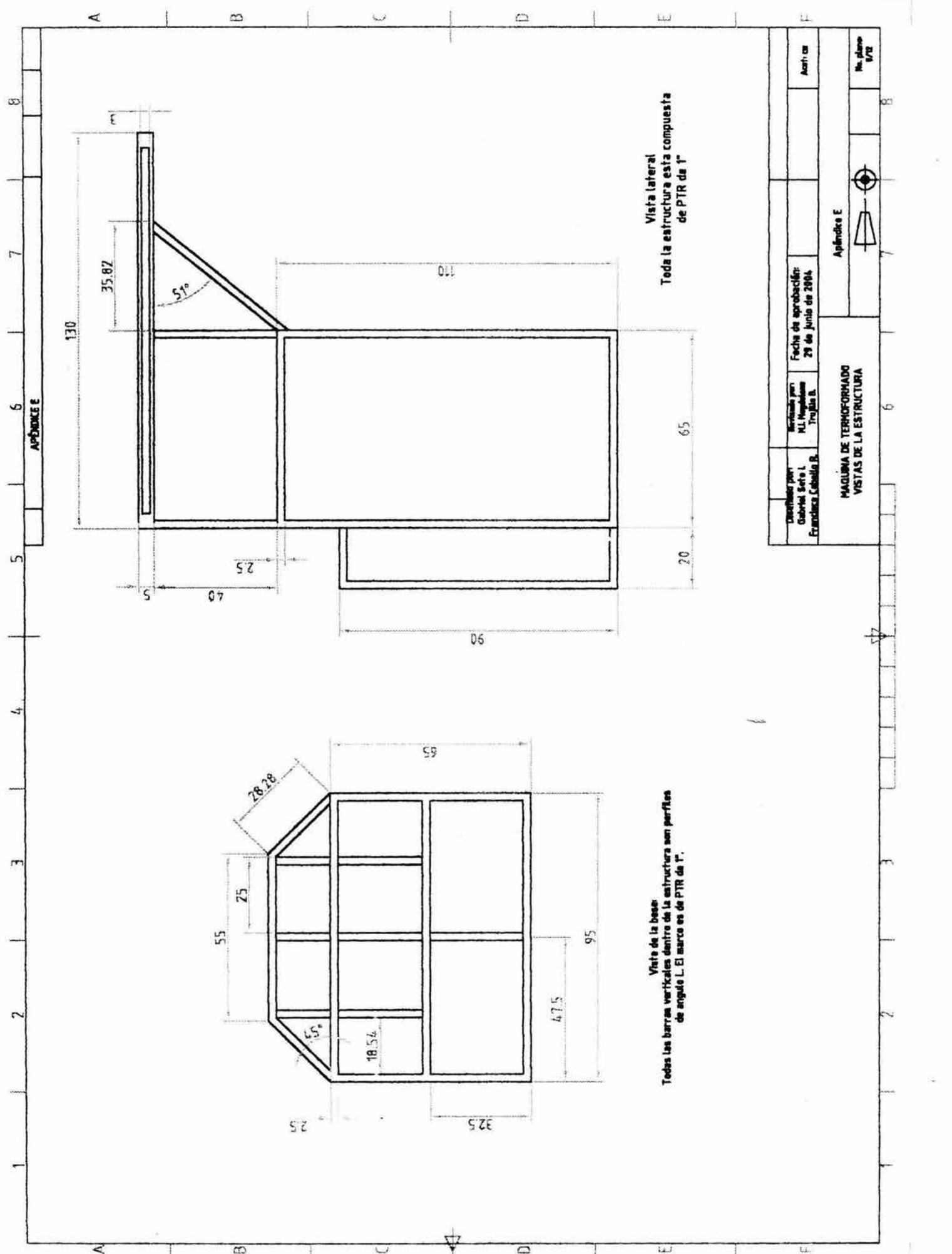
Elaborado por: Guillermo Soto L. Francisco Cabeza R.	Revisado por: M. E. Rodríguez Trujillo S.	Fecha de aprobación: 27 de Junio de 2004	Accto. en
DIMENSIONES DE LA CÁMARA DE VACÍO			Apéndice E
			No. Plano 6/72



APÉNDICE E

Material: lámina de acero  
calibre 18.

Diseñado por: Gabriel Soto I. Francisco Caballero R.	Revisado por: M.L. Moyadama Trujillo B.	Fecha de aprobación: 28 de Junio de 2004	Acot. cm
PLATINA PARA LA CÁMARA DE VACÍO			Hoja: 7/12
Apéndice E			

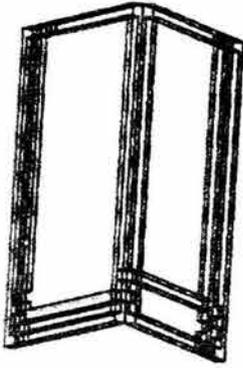


Vista de la base  
 Todas las barras verticales dentro de la estructura son perfiles  
 de ángulo L. El marco es de PTR da 1".

Vista lateral  
 Toda la estructura esta compuesta  
 de PTR da 1"

Diseñado por: Gabriel Soto L. Francisca Caballero B.	Revisado por: M.L. Hernández Trojes B.	Fecha de aprobación: 29 de Junio de 2004	Asesor:  	No. plano: 6/72
<b>MACQUINA DE TERNIFORMADO          VISTAS DE LA ESTRUCTURA</b>			Apéndice E	

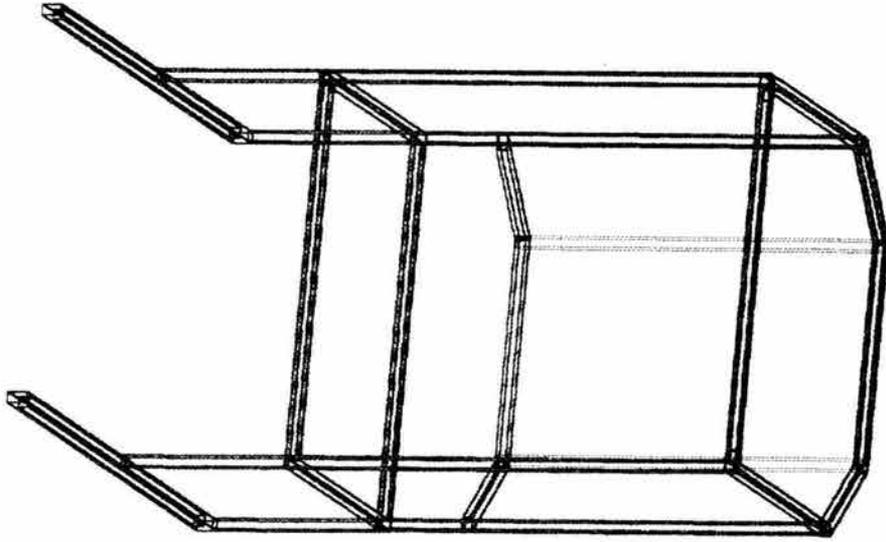




Bastidor ajustable



Cámara de vacío



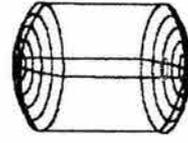
Estructura del armazón



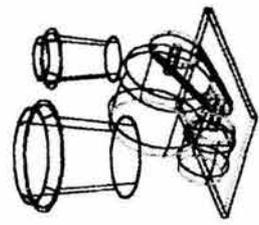
Sistema de resistencias cerámicas



Panel de controles



Tanque de almacenamiento

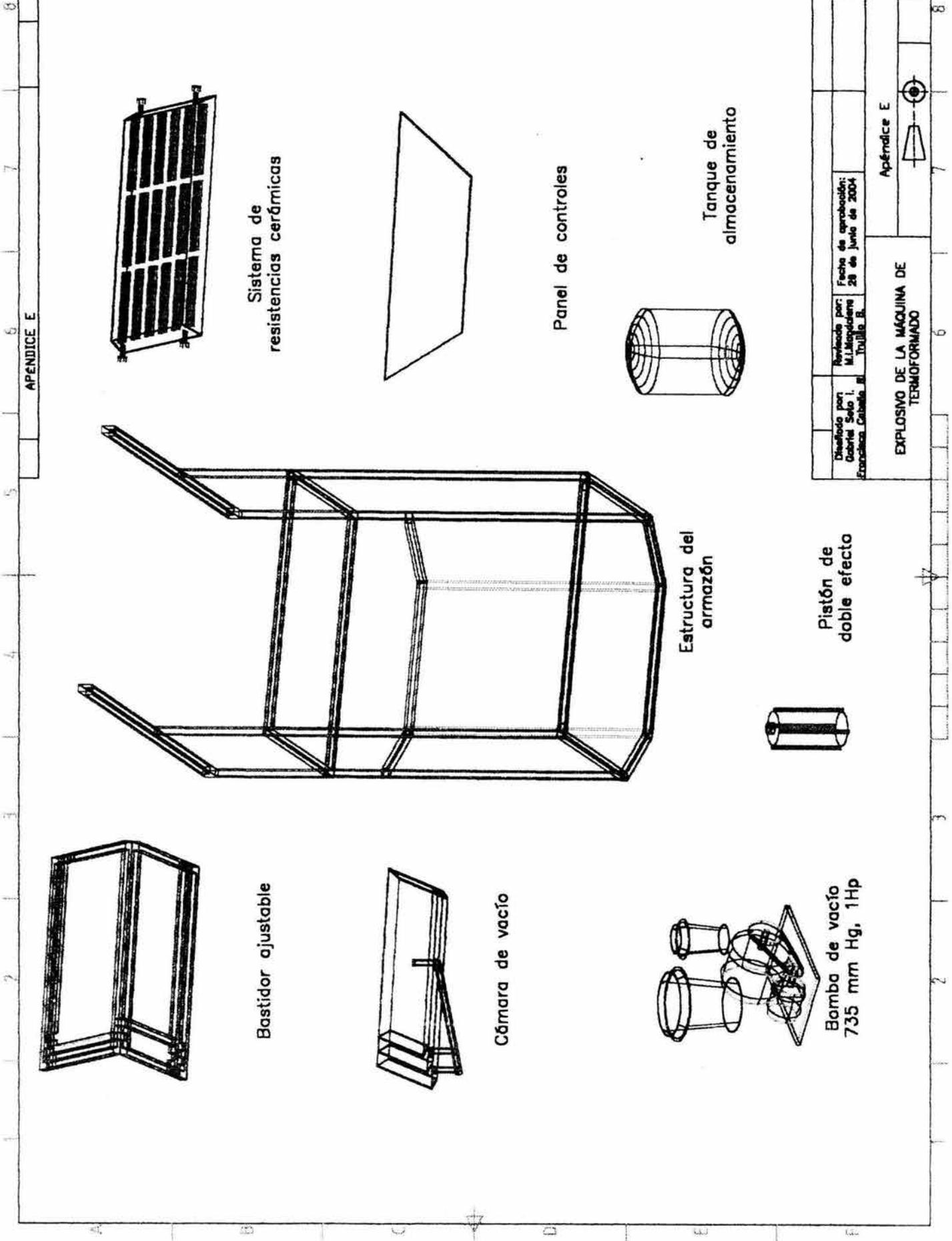


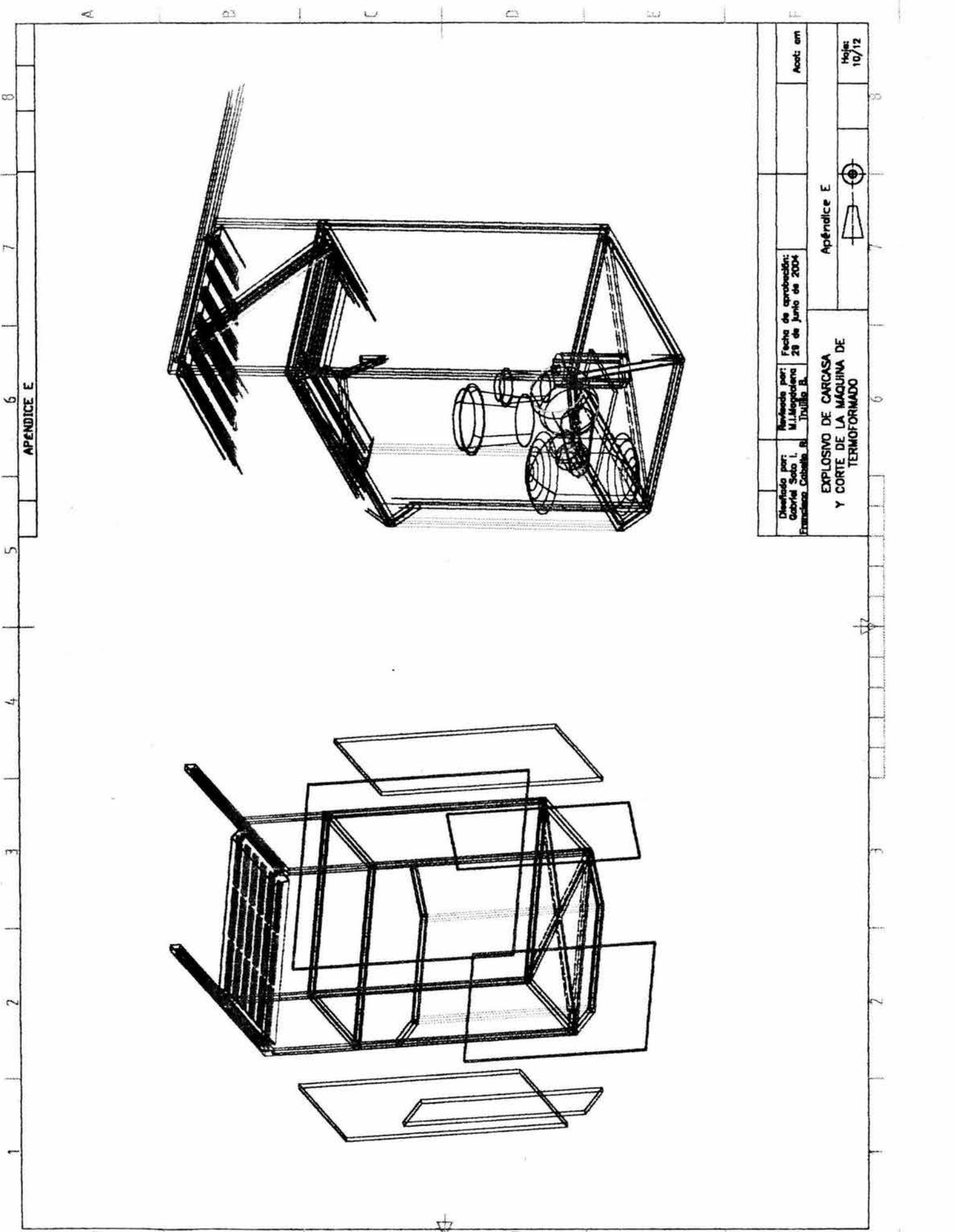
Bomba de vacío  
735 mm Hg, 1Hp



Pistón de doble efecto

Diseñado por: Gabriel Soto I. Francisco Caballero B.	Revisado por: M. Manóvilare Toujilla B.	Fecha de aprobación: 28 de junio de 2004	Ausc: em
EXPLOSIVO DE LA MÁQUINA DE TERMOFORMADO			Apéndice E
			Hoja: 9/12



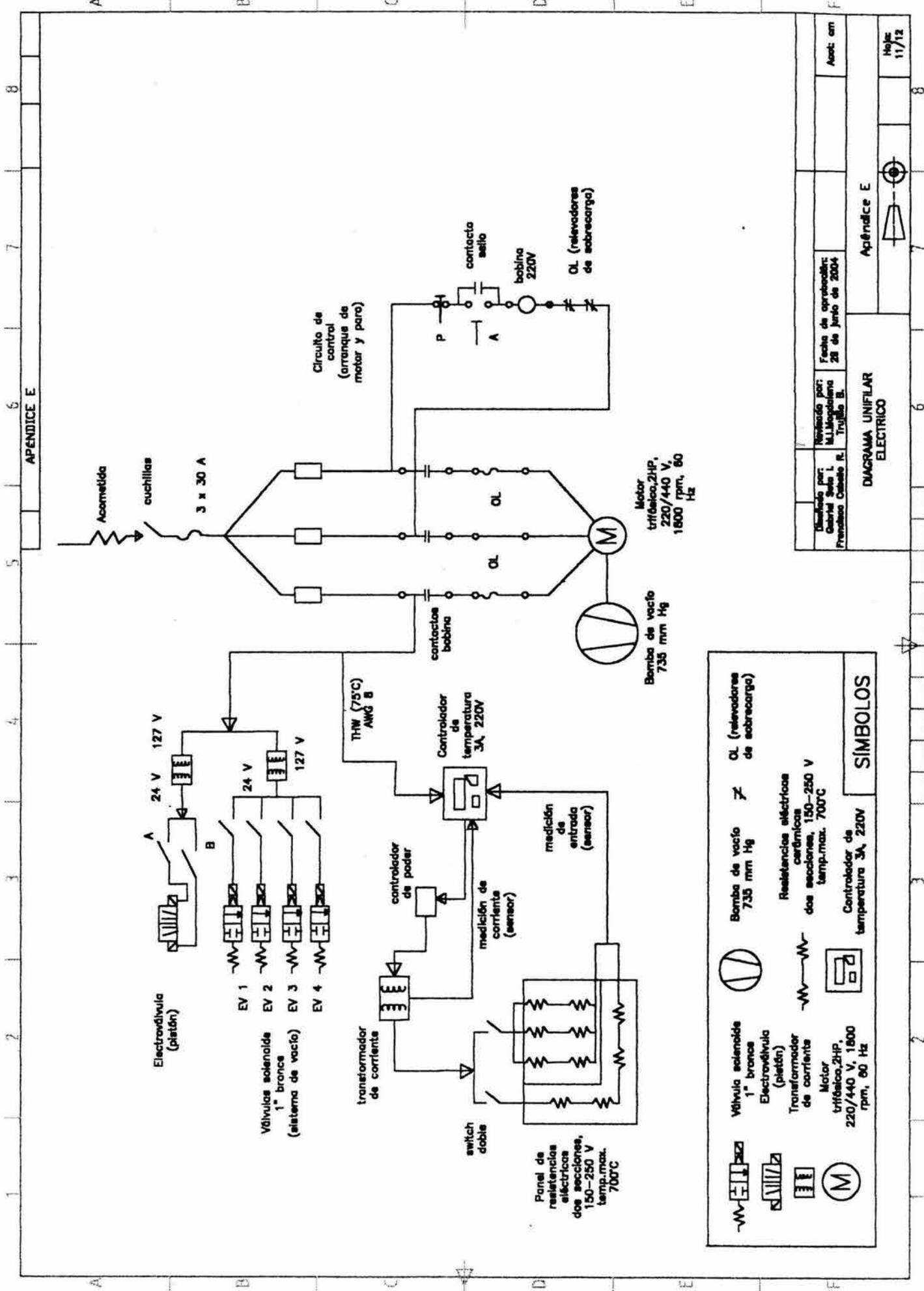


APÉNDICE E

Diseñado por: Gabriel Soto I. Francisco Cabello R.	Revisado por: M.J. Murguía Trujillo R.	Fecha de aprobación: 28 de Junio de 2004	Aprob. am
<b>EXPLOSIVO DE CARGASA          Y CORTE DE LA MÁQUINA DE          TERMOFORMADO</b>			Hojas 10/12

Apéndice E

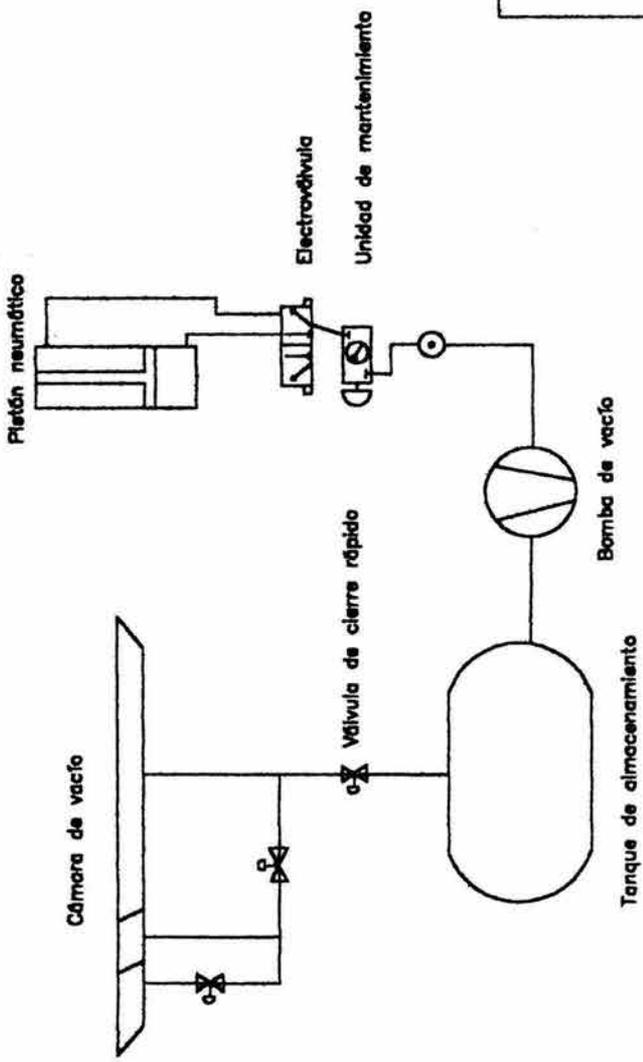




APENDICE E

Elaborado por: Gabriel Salas I. Freddy Castro R.	Revisado por: M. Magallana Trujillo B.	Fecha de aprobación: 28 de junio de 2004	Anot. en
DIAGRAMA UNIFILAR ELECTRICO			Apéndice E
			Hoja 11/12

SIMBOLOS	
	Bomba de vacío 735 mm Hg
	Resistencias eléctricas cerámicas dos secciones, 150-250 V temp. max. 700°C
	switch doble
	transformador de corrientes
	controlador de poder
	Controlador de temperatura 3A, 220V
	Válvula solenoide 1° bronce Electroválvula (plástico)
	Motor trifásico, 2HP, 220/440 V, 1800 rpm, 60 Hz
	OL (relevadores de sobrecarga)



NOTA: La tubería que una la bomba de vacío con la unidad de mantenimiento debe tener una pendiente de al menos 2° para evitar condensación.

### SIMBOLOS



Bomba de vacío



Electroválvula



Pistón neumático de doble efecto.



Tanque de almacenamiento



Unidad de mantenimiento



Válvula de cierre rápido

**Especificaciones del equipo**

- Válvulas: De cierre rápido (solenoidal o de bola) para un diámetro de una pulgada.
- Electroválvula de 24 V con un diámetro de 12mm para vacío.
- Tubería: Para cámara de vacío, tanque de almacenamiento y bomba de vacío emplear tubo de una pulgada y para las válvulas y el pistón usar manguera plástica de 12mm.
- Bomba de vacío: 735 mm Hg, diámetro de succión de una pulgada capacidad de 800 l/h.
- Tanque de almacenamiento (arranque) 10 litros.
- Pistón neumático de doble efecto Carrera 10-200 mm, diámetro del émbolo de 32 mm

Diseñado por: Gabriel Soto I. Francisco Ceballos R.	Revisado por: M.J. Magallanes Trujillo B.	Fecha de aprobación: 28 de junio de 2004	Anot: cm
<b>DIAGRAMA DE CONEXIÓN NEUMÁTICO Y DE VACÍO</b>			Apéndice E
			
			Hoja: 12/12