LA MANUFACTURA DE PIEZAS PLASTICAS

GRANDES POR TERMOFORMADO

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

FACULTAD DE CIENCIAS Y HUMANIDADES

DEPARTAMENTO DE QUIMICA

SECCION INGENIERIA QUIMICA

LA MANUFACTURA DE PIEZAS PLASTICAS GRANDES POR TERMOFORMADO

ANA ETHEL NAVAS PAIZ

Trabajo de graduación presentado para optar
al grado académico de
Licenciatura en Ingeniería Química

GUATEMALA

OCTUBRE DE 1992

Vo. Bo. :

(f) _____

Ingeniera Ana Guisela Alvarado Rodas
Asesor

Tribunal:

(f) _____

Ingeniero Oscar Gil Girón

(f) _____

Ingeniero Arturo Estrada

(f) _____

Ingeniero Eduardo Calderón

Fecha de aprobación: 15 de octubre de 1992

A mis padres,
Ana María y Eduardo†;
a mi esposo
Luis Arturo; y
a mis hijos
Luis Eduardo y María del Pilar.

RESUMEN

El presente trabajo muestra los resultados obtenidos del análisis teórico de la manufactura de una pieza plástica grande por medio del proceso de termoformado y de su ejecución en la práctica. El producto escogido para llevar a cabo este análisis es una canaleta para el transporte de agua pluvial hecha con polietileno de alta densidad.

Por medio del desarrollo experimental se determinó que:

- El proceso de moldeo por termoformado de piezas grandes, se puede considerar como una alternativa de manufactura, cuando se requiere de bajos volúmenes de producción (menos de 100,000 piezas). Sin embargo los volúmenes de producción deben ser lo suficientemente altos para que los costos de optimización del proceso y del molde se diluyan en el costo total de fabricación.
- El proceso de moldeo por termoformado es un proceso muy versátil debido a la gran rapidez y facilidad con la que se pueden construir los moldes, en comparación a otros procesos utilizados para la transformación de materiales plásticos tales como el moldeo por inyección y soplado.
- Los moldes de madera, como el utilizado en el ejemplo de esta tésis, pueden emplearse satisfactoriamente en el moldeo por termoformado cuando las corridas de producción son cortas (menos de 500 piezas).
- Según los resultados obtenidos en el balance de materiales, la cantidad de material reprocesable fue del 45%. Debido a este alto porcentaje de material sobrante, se considera indispensable tener una alternativa de uso para el mismo, y así poder lograr una alta eficiencia en el proceso.

CONTENIDO

Páginas

Páginas

Páginas

1. INTRODUCCION

El número de industrias que se dedican a la elaboración de productos de materiales termoplásticos en Guatemala, ocupa un renglón significativo en la producción del país. Sin embargo, el alto desarrollo que la técnica en este tipo de procesos ha alcanzado en otros países, principalmente en Europa y los Estados Unidos, no ha surgido aquí, dando por el contrario, lugar al desarrollo de un proceso casí completamente empírico. Esto debido a que paralelamente a los avances de esa técnica y las exigencias de mercado, se requiere de una continua inversión en los recursos humanos y de maquinaria, que no siempre ha sido posible realizar.

Una de estas técnicas para la transformación de termoplásticos es el proceso de termoformado. Esta técnica consiste en sujetar y calentar una lámina termoplástica hasta que ésta alcance un grado altamente flexible y de estiramiento, luego con una fuerza mínima de aire, ésta toma la forma de la superficie de un molde. Esta fuerza de aire, ya sea positiva o negativa, se logra por medio de pequeños orificios distribuidos a través de la superficie del molde. La lámina formada es enfriada hasta que ésta alcanza su estado de rigidez otra vez, y luego es sometida a un proceso de acabados en donde se le corta el material en exceso.

Actualmente el proceso de termoformado de piezas grandes en Guatemala es un campo que aún no ha sido explotado ni desarrollado. Con ello se ha visto restringida la producción de una serie de piezas plásticas que en principio o se importan o simplemente se desconocen en el mercado nacio-

nal. Este tipo de piezas tiene la particularidad de que no es posible su reproducción económica por medio de otros procesos de moldeo de plástico.

El termoformado de piezas grandes llenaría este vacío por las siguientes razones:

1. Bajos costos iniciales de inversión en maquinaria y aparelajes.
2. Sencillez del proceso.
3. Bajos costos del artículo.
4. Bajos costos de moldes.
5. Posibilidad de obtener piezas de paredes delgadas y de grandes áreas de superficie.

El presente trabajo persigue, en primer lugar, dar a conocer este tipo de proceso al lector; segundo, analizar teóricamente el moldeo de una pieza por medio del proceso de termoformado; tercero ejecutarlo en la práctica y cuarto evaluar sus implicaciones. El producto escogido para llevar acabo este análisis es una canaleta para el transporte de agua pluvial hecha de polietileno de alta densidad.

II. GENERALIDADES

El termoformado (también conocido como formado de láminas, o formado al vacío) es una técnica en la cual, la lámina termoplástica se calienta hasta suavizarse y luego se moldea a bajas presiones, utilizando un molde con la forma del artículo requerido. Una gran variedad de técnicas especializadas han sido desarrolladas para varias aplicaciones, y la mayoría de materiales termoplásticos pueden ser moldeados por este método.

El proceso de termoformado ofrece un formado rápido y uniforme; por lo tanto se presta para corridas de producción de larga duración y automatizadas. Con sus ciclos de moldeo relativamente rápidos y costos de moldes comparativamente bajos, el proceso de termoformado a menudo es escogido como el proceso de manufactura más efectivo, respecto de costos, sobre todos los otros procesos de moldeo. Los desperdicios creados por los sobrantes pueden ser reprocesados y reciclados junto con los artículos defectuosos, siempre y cuando se cuente con la línea de extrusión de lámina y todos sus accesorios. El termoformado tiene las siguientes ventajas sobre otros métodos de fabricación de termoplásticos:

1. Piezas de áreas grandes pueden ser creados sin la alta inversión de un molde, debido a las bajas presiones de trabajo involucradas.
2. Pueden formarse piezas de paredes muy delgadas, las cuales no pueden producirse por ningún otro método.
3. Los moldes pueden fabricarse muy rápido, por lo tanto se reduce el tiempo de iniciación para la fabricación de un nuevo artículo.
4. Nuevos métodos, muy sofisticados, de termoformado han reducido el

costo a tal punto, que muchas veces es el método más económico para formar un termoplástico.

Los pasos típicos en el proceso de termoformado son: Sujetar con presión, calentar, dar forma, enfriamiento y terminado. La lámina de termoformado está categorizada vagamente como de calibre delgado (calibres menores de 0.25 mm) y de calibres gruesos (calibres mayores de 0.25 mm). La lámina de calibre grueso puede dividirse aun en lámina de calibre medio (0.25 mm a 1.5 mm) y lámina de calibre grueso (más de 1.5 mm). La lámina de calibre delgado, por lo general se suple en rollos. La lámina de calibre grueso se suple en forma de plancha cortada, apilada y paletizada. La mayoría de aplicaciones de empaque utiliza lámina de calibre delgado. Las prensas de termoformado que utilizan lámina en rollo se llaman formadoras continuas de lámina. La lámina de calibre grueso suple a las prensas de termoformado una por una. Estas prensas se llaman formadoras de lámina cortada. Existen dos tipos básicos de formadoras de lámina cortada: Las formadoras estacionarias, las cuales calientan y forman lámina por lámina y las formadoras rotativas, que aceptan una lámina en una estación, calientan en una segunda y forman en una tercera.

Existen tres formas básicas de calentar la lámina: a) Calentamiento por contacto, en donde una placa caliente se coloca contra la lámina, este proceso se utiliza en casos muy especializados; b) La lámina de calibre grueso se calienta frecuentemente en hornos de aire caliente por medio de una convección forzada; c) La lámina delgada se calienta por lo general pasándola a través de bancos de resistencias de radiación infrarroja.

Combinaciones de calentamiento por medio de radiación y convección también son utilizadas. La mayoría de plásticos que se termoforman hoy en día (PS, PVC, ABS), son formables a temperaturas relativamente bajas (120 - 230ºC). Las temperaturas de las resistencias se seleccionan con base en la optimización de la cantidad de energía transferida a la lámina por unidad de tiempo.(3)

Existen tres tipos básicos de configuraciones de moldes: a) La lámina es formada por lo general, sobre un molde macho y b) dentro de un molde hembra. c) En algunos casos, la lámina es formada por medio de una combinación de molde macho y molde hembra (figura 2.1).

Algunas veces, la lámina es pre-estirada previo a ser formada, expandiéndola por medio de presión de aire, a este proceso se le llama formado por burbuja. Otras veces la lámina puede estirarse previo a ser moldeada por medio de una asistencia mecánica conocida como tapón.(2)

El formado por vacío utiliza un diferencial de presión a lo largo de la lámina de hasta una atmósfera. Usualmente, el vacío aplicado es del orden de 0.05 a 0.10 MPa. En el formado por presión, el aire suple la presión. Aunque se pueden utilizar presiones de formado de hasta 3.45 MPa. El rango típico de presión de formado es de 0.14 a 0.55 MPa, considerando a 1.38 MPa como el límite práctico superior. El formado por presión puede combinarse con el formado por vacío para ganar presión diferencial adicional. El formado por presión se utiliza para formado de lámina de calibre grueso con moldes hembra. Lógicamente, para presiones de formado más altas se re-

quiere de la fabricación de un molde más resistente. Esto por lo consiguiente incrementa el costo del molde y el tiempo de fabricación.

Las piezas de lámina de calibre delgado pueden recortarse en el molde o en una línea separada. Las piezas de lámina de calibre grueso, usualmente son removidas del molde y recortadas con routers y sierras en otra estación de trabajo.

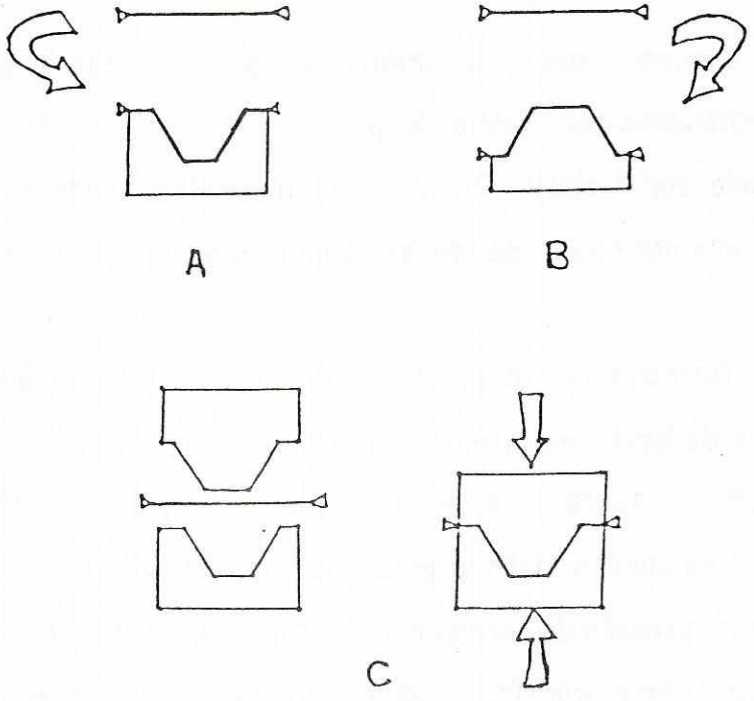

Figura 2.1 Definiciones de configuraciones de moldes. A: Molde hembra (formado negativo). B: Molde macho (Formado positivo.).C: Combinación de un molde macho.

A. Materia prima

En el proceso de termoformado se pueden transformar los materiales termoplásticos. Estos materiales pueden llevarse a un estado plástico por medio de temperatura, solidificándose nuevamente por enfriamiento. Este proceso puede repetirse, teoricamente, un número indefinido de veces.

Existe un gran número de materiales en lámina disponibles para termoformar. El primer requisito para un buen material de termoformado es su resistencia a rasgarse mientras se encuentra caliente. La fuerza del material en lámina, debe permitir que se le dé forma por medio de una baja presión y, al mismo tiempo, prevenir un pandeo excesivo. Otras propiedades deseables son un bajo encogimiento cuando ocurre el enfriamiento y un rango amplio de temperatura de formado. A continuación se presentan los materiales más utilizados en el proceso de termoformado.

1. Poliestireno de alto impacto:

Este material es el más utilizado en el proceso de termoformado debido a su bajo precio, fácil formabilidad y la gran variedad de tipos disponibles. En su estado normal, este material es blanco translúcido y puede pigmentarse fácilmente. Si el calor aplicado en el proceso de formado es uniforme a través de la lámina, el material se alargará muy uniformemente y dará como resultado una distribución de material fácilmente controlable y un buen producto final. La lámina de poliestireno de alto impacto se produce por medio de extrusión; por lo tanto es posible hacer

una lámina de poliestireno de alto impacto con una orientación muy baja y uniforme.

2. Materiales celulósicos:

El acetato de celulosa es uno de los materiales más antiguos disponible en lámina, y ha sido utilizado desde los años treintas como protectores transparentes y muchas otras aplicaciones donde se requería de una transparencia muy buena. Hoy en día, el acetato de celulosa, el butirato acetato de celulosa y el propianato de celulosa se utilizan primordialmente en empaque blister debido a su buena resistencia al impacto, alta transparencia y fácil formado. Los fabricantes del butirato acetato de celulosa han logrado una gran estabilidad en el material, a tal punto que es recomendado para rótulos exteriores como también para páneles arquitectónicos, donde una buena resistencia a la intemperie es un factor muy importante. Debido a su alto precio, los materiales celulósicos actualmente son reemplazados en el campo de empaque blister, por el PVC rígido. (8)

3. Estireno butadieno acrilonitrilo (ABS):

Este material tiene propiedades físicas superiores a la mayoría de materiales utilizados en el termoformado, especialmente al poliestireno de alto impacto. Tiene mucho más resistencia química, mejor resistencia al impacto a bajas temperaturas y una superficie más brillante, la cual es muy atractiva para muchas aplicaciones. También soporta la intemperie

mejor que el polietireno de alto impacto. La formabilidad del ABS es muy similar a la del poliestireno de alto impacto, con excepción de que tiene cierta cantidad de higroscopía y, por lo tanto, debe mantenerse en un almacenaje seco antes de ser formado.

Muchas películas poliméricas pueden laminarse a la lámina de ABS, por medio de una simple aplicación de calor y presión en la estación de salida de el extruder. Estos laminados pueden modificar las propiedades del ABS. Recientemente una película de acrílico ha sido desarrollada, la cual se lamina fácilmente al ABS, dándole así una considerable resistencia a la intemperie. Este tipo de laminado ha abierto una gran variedad de aplicaciones al ABS, en el campo de artículos de uso a la intemperie, tales como lanchas, equipo para deportes, casas móviles, etc. La película de PVC también puede laminarse al ABS por medio de la misma técnica de calentamiento y presión; debido a que las películas de PVC pueden grabarse, imprimirse y decorarse fácilmente. Un gran número de efectos decorativos están disponibles para el termoformado de láminas de ABS. La película de PVC también mejora la resistencia al rayado de la lámina (ej: para equipaje) y le da un mayor tiempo de vida. (8)

4. Polímeros de olefinas:

El polietileno de alta densidad, el cual es de gran importancia en la industria del termoformado, combina sus excelentes propiedades, tales como un rango muy amplio de temperaturas de uso, desde -56 hasta 104 ºC, buena rigidez, dureza superficial, buena resistencia al impacto, una super-

ficie brillante atractiva y una buena resistencia a los químicos, con un bajo costo en relación a otras láminas plásticas. Sin embargo, el material tiene una importante desventaja: Es mucho más difícil de moldear y requiere de mejores conocimientos y técnicas por parte del fabricante. Esto se debe a su baja conductividad térmica, la cual, aunque confiere una excelente capacidad aislante, también hace necesario en el termoformado calentar la lámina por ambos lados, por arriba y por abajo, para obtener una temperatura lo suficientemente uniforme a través de toda la lámina, especialmente en los calibres más gruesos. Se necesita un control de temperatura del molde muy preciso, debido al alto grado de encogimiento del material cuando éste se enfría y el peligro de torcimiento si la misma no se mantiene a un cierto nivel. La lámina de polietileno de alta densidad es compatible con todas las técnicas de termoformado. Sin embargo para los moldes debe utilizarse un material muy conductivo, como por ejemplo aluminio, para poder controlar adecuadamente el enfriamiento de las piezas. Al molde deben hacérsele canales para circular un medio con temperatura controlada y así poder mantener una temperatura de superficie de 65 ºC (+6 ºC), dependiendo del ciclo y del espesor de la lámina.

En el polietileno existe un gran número de tipos disponibles, estos difieren en su comportamiento en el formado como también en otras propiedades. Por ejemplo un material con una densidad de 0.960 y un índice de fundición entre 0.1 - 0.15 es ideal para formar debido a que tendrá muy poca comba cuando sea calentado, y la pieza terminada tendrá una gran resistencia al impacto. Como usos finales de las piezas de polietileno se tiene el empaque de artículos deportivos y para el manejo de piezas, como por ejemplo en la industria automotriz. Se termoforma una

hembra de la pieza para el manejo de la pieza dentro de la planta, y para transportarla de planta en planta.

Otros polímeros de etileno adecuados para termoformar son los copolímeros con buteno, los cuales tienen una mejor resistencia al agrietamiento y mejores propiedades eléctricas. Los copolímeros del acetato vinílico de etileno son utilizados donde su naturaleza de gran estiramiento es ventajosa. El polipropileno y los copolímeros de propileno tienen limitadas aplicaciones en termoformado a pesar que poseen excelentes propiedades, tales como, excelente resistencia al calor, muy buena dureza de superficie, resistencia al rayado y excelente resistencia química. Las desventajas del polipropileno en estas aplicaciones son: a) Su limitada resistencia al agrietamiento a temperaturas bajas, lo cual en la mayoría de aplicaciones es un factor muy importante y b) también un alto grado de encogimiento. (8)

5. Polímeros del metil metacrilato:

El poli metil metacrilato puede manufacturarse en lámina, ya sea por medio de fundición o extrusión, y tiene muchas aplicaciones en rótulos exteriores y difusores de luz. Generalmente la industria de rótulos exteriores utiliza lámina fundida, mientras que la industria de iluminación utiliza lámina extruida debido a su bajo costo y mejor formabilidad. Existen dos copolímeros del acrílico adecuados para termoformar; uno de ellos es el metil metacrilato con acrilonitrilo, el cual es un material transparente y resistente al impacto con muy bajas permeabilidades y ex-

celentes rangos de temperatura de uso, tanto bajos como altos. Debido a que este material es insaboro, incoloro y no-tóxico, tiene aplicaciones significativas en el empaque de comida, como también en otros campos especializados. Otro copolímero utilizado en el termoformado es el PVC - acrílico modificado, el cual es una mezcla con una excelente resistencia al impacto a través de un amplio rango de temperaturas, como también excelente formabilidad y resistencia química. (8)

6. Policarbonatos:

La lámina de policarbonato es un material transparente con una gran resistencia al impacto, la cual tiene aplicaciones donde la combinación de transparencia y resistencia es crítica. El policarbonato absorbe humedad; por lo tanto es necesario el presecado de la lámina antes de termoformarla. Además de transparencia y una gran resistencia al impacto, el material posee una alta resistencia al calor. (8)

7. Polímeros de cloruro de vinilo:

La lámina de cloruro de polivinilo posee excelentes propiedades de transparencia y al mismo tiempo gran tolerancia para absorber grandes cantidades de pigmento. También es permeable a gases y a la humedad extremadamente baja, lo cual hace que la lámina sea adecuada para el empaque de carne y otros alimentos sensibles al oxígeno; también existe la posibilidad de estabilizar el cloruro de polivinilo para uso en exteriores.

B. Maquinaria

Desde el punto de vista de máquina y equipo, el proceso de termoformado puede analizarse como constituido por: a) Una fuente de calentamiento; b) una estación de formado, incluyendo la estructura de la máquina, la mesa de formado con su sistema de propulsión y el sistema de expulsión; c) un sistema de vacío y presión de aire; d) un sistema para sujetar la lámina y un mecanismo para su transporte; e) un sistema electrónico para automatización; f) equipo adicional (materia prima, manejo de desperdicios, cortes).

1. Fuentes de Calentamiento:

Las técnicas de calentamiento incluyen:

a. Cables de calentamiento de níquel - cromo.
b. Barras metálicas.
c. Resistencias de cerámica.
d. Placas radiantes de gas.
e. Resistencias de cuarzo.
f. Lámparas de calentamiento.
g. Placas de vidrio de cuarzo.

La temperatura de superficie de las resistencias usualmente se mide con termocoplas. Los cables de calentamiento y las resistencias de barras metálicas tienen un bajo costo, sin embargo se oxidan rápidamente y, por lo tanto, pierden su eficiencia de calentamiento. Las resistencias de

cuarzo son bastante eficientes, no se deterioran significativamente durante su uso, sin embargo tienen un alto costo. (10)

La lámina también puede calentarse por contacto directo por medio de una placa metálica caliente (calentamiento por contacto), o por medio de un horno de aire caliente (calentamiento por convección).

Independientemente de la técnica utilizada, es necesario mantener un control preciso de la temperatura de la lámina, antes de que ésta sea formada, para así poder obtener una calidad óptima de las piezas formadas. Es muy importante que la fuente de calentamiento esté localizada a una distancia adecuada de la lámina para prevenir un sobre calentamiento de la superficie. Este exceso se caracteriza por un cambio de color, burbujas o rompimiento de la lámina. Una lámina fría puede causar que la lámina se salga de las pinzas sujetadoras durante el proceso de formado, o que la pieza no se forme en su totalidad. Aun cuando se puede lograr una temperatura precisa y uniforme en la fuente de calentamiento, la temperatura de la lámina puede ser no-uniforme, ya que pequeñas corrientes de aire causadas por una ventana o puerta abierta, pueden alterar drásticamente la temperatura de la lámina. Por lo tanto deben tomarse precauciones para proteger el equipo de corrientes de aire.

En algunas aplicaciones, la pieza formada tendrá un espesor de pared no-uniforme, aun cuando la lámina haya sido calentada uniformemente. El estiramiento desigual de la lámina se debe al diseño de la parte. En estos casos especiales, un calentamiento no-uniforme controlado de la lámina

puede dar como resultado una pieza formada con un espesor de pared más uniforme. En este procedimiento, conocido como calentamiento por medio de sombras, un elemento retardante hecho de algún material no inflamable (malla de alambre, etc.) se coloca entre la lámina y la fuente de calentamiento. Esto disminuirá el flujo de calor en ciertas áreas de la lámina. Sin embargo, este procedimiento puede ser eliminado con equipo más moderno y costoso, el cual controla eléctricamente cada zona de calentamiento del horno.

2. Estación de formado:

La estación de formado, además de incluir un sistema de enfriamiento y de expulsión de la pieza, debe incluir lo siguiente:

a. Un sistema fácil para el ajuste del molde y su mantenimiento.
b. Un espacio adecuado para la colocación de un contra molde.
c. Conexiones para los controles de temperatura del molde.
d. Area libre para el enfriamiento de la superficie por medio de ventiladores.
e. Líneas de acceso para el vacío y la presión de aire.
f. Area de ventilación del molde.
g. Sistema de expulsión (este puede ser integrado al molde).
h. Una estructura reforzada para poder cargar moldes pesados.

El sistema de propulsión que sube y baja la mesa es la clave para el desempeño de la estación de formado. Dependiendo de la aplicación, la unidad de propulsión puede ser tan simple como la que es movida por medio

de cilindros neumáticos o tan complejo como un cierre hidromecánico como el utilizado en máquinas de moldeo por inyección. La mayoría de sistemas de propulsión de formado por vacío están diseñados para cerrar y amordazar a presiones máximas de 0.14 a 0.28 MPa. (2)

El formado es la parte del proceso en donde la lámina ya suavizada por calor, es forzada a tomar la forma de un molde. Existen tres maneras básicas para lograr esto: Primero, utilizando vacío para halar la lámina contra la superficie del molde. Segundo, utilizando presión positiva de aire para empujar la lámina contra la superficie del molde. Tercero, se puede utilizar una fuerza mecánica. Una combinación de cualquiera de estos procesos puede utilizarse, dependiendo del diseño de la pieza.

3. Sistema de Vacío:

La clave para una aspiración eficiente está en una tubería adecuadamente dimensionada entre el tanque de compensación y la cavidad del molde. Un sistema de vacío adecuadamente diseñado requiere de una bomba de vacío capaz de aspirar de 28 a 29 pulgadas de mercurio, en el tanque de vacío, previo al ciclo de formado. La tubería entre el tanque de compensación y el molde debe tener el mínimo de codos. Deberán eliminarse tuberías largas, constrictores del flujo, válvulas desconectoras y restrictivas. Se recomienda usar válvulas rotativas de bola, las cuales actúan rápidamente.

Se puede obtener un buen estimado del tiempo requerido para evacuar la cavidad de un molde de la siguiente manera: (10)

(2.1) $0 = (V/So)\ln[(P - Po)/(P - Po)]$

donde: 0 = tiempo para evacuar cavidad, V = volumen de cavidad

P = presión inicial de la cavidad (absoluta)

P = presión del tanque de vacío, P = presión final de la cavidad

So= velocidad de evacuación

La velocidad de evacuación de la bomba de vacío se da como "Sp". Por lo tanto:

(2.2) $1/So = 1/Sp + 1/C$

donde "C" es la conductancia acumulativa del sistema entre la bomba y la cavidad del molde (tanque de vacío, conectores de la tubería, válvulas, etc.). Esto puede escribirse como:

(2.3) $1/C = 1/C + 1/C + 1/C + \ldots\ldots\ldots + 1/Cn$

para "n" resistencias en serie. Para cualquier elemento, la conductancia está relacionada con la resistencia del flujo por medio de la siguiente ecuación:

(2.4) $C = q'/\Delta P$

q' = w/ = razón del flujo del volumen, Pa m /S . Donde "ΔP" es la caida de presión, "w" es la razón de flujo de masa y " " es la densidad del gas (Kg/m Pa). Para una tubería redonda:

(2.5) $Cp = F'(\pi D/8L)\ (RT/M)$

donde: D = diametro de la tubería, L = largo de la tubería

R = constante universal de gases, M = peso molecular del gas

T = temperatura del gas, F' = 1 (para tubería de vacío típicas)

"L" puede incluir resistencias equivalentes para constricciones, codos, válvulas etc. Típicamente, L = Le = nD donde "n" representa estas constricciones en diámetros de tuberías equivalentes. Para aire a T=25ºC,

$Cp = 10.67(D/L) = 10.67\ (D/n)(m/s)$. Si la capacitancia del tanque de vacío es "Ct", entonces $1/C = 1/Ct + 1/Cp$ y $1/So = 1/Sp + 1/Ct + 1/Cp$

Usualmente la resistencia entre el tanque de vacío y la cavidad del molde no debe exceder la resistencia del tanque de vacío, ó $1/Cp \leq 1/Ct$, y esta resistencia combinada no deberá exceder la resistencia de la bomba, $1/Sp$, ó $1/Sp \leq (1/Ct + 1/Cp)$. El fabricante usualmente especifica la capacidad de la bomba de vacío, "Sp", en l/min.

Si se conoce la resistencia de la bomba, $1/Sp$, y se siguen los lineamientos anteriores, el diámetro de la tubería que conecta la bomba al tanque de vacío y a la cavidad del molde se puede calcular de la siguiente manera:

$(1/Sp) = 1/Ct + 1/Cp = 2/Cp = 2/[10.67(D/Le)]$ por lo tanto;

$D = 0.572\ (SpLe) = 0.433\ (Sp\ n)$. En las líneas de vacío se requiere de tubería corta y de diámetros grandes para minimizar pérdidas de presión.

El tiempo "Or" para recuperar la presión del tanque de vacío, al valor "Po", puede calcularse con la misma ecuación. El volumen del tanque de vacío se substituye como "V", la presión final del tanque al finalizar la evacuación es "P", la presión inicial "Po", es la presión de vacío de la bomba y "P" es la presión final del tanque de vacío deseada. El tiempo del ciclo total es, $O = O + Or$. Para la mayoría de casos, $Or \leq O$, y por lo tanto, el tiempo del ciclo total se asume igual a dos veces el tiempo de aspiración.

4. Sistema de presión:

La acción neumática (cilindros de aire) usualmente requiere de presiónes de aire de trabajo de 0.6 MPa. El consumo de aire depende del tamaño de la prensa y del tipo de formado que se está utilizando. Típicamente el rango del flujo de aire es de 1000 a 7000 l/min = 1 - 7 m /min. El aire usualmente llega de 0.7 - 1.4 MPa. El aire debe ser muy seco (punto de rocío a -40ºC) y absolutamente libre de aceite, particularmente si es utilizado como aire para la instrumentación para el pre-estiramiento ó para el formado por presión. El aire del pre-estiramiento llega a la cavidad del molde a presiones muy bajas, de 0.0035 a 0.035 MPa y a una razón de flujo cuidadosamente controlada. El aire de formado por presión llega a la caja de presión con una magnitud de 0.014 a 0.55 MPa, también a razones de flujo cuidadosamente controladas. (3)

5. Sistema de sujeción:

Este es el primer paso en el proceso de termoformado. Se requiere que la lámina sea contenida firmemente en la estructura de formado. Aunque existe una gran variedad de sistemas de sujeción, su requerimiento clave es el de contener la lámina termoplástica con suficiente fuerza para prevenir que ésta se salga de la estructura de formado durante las etapas de calentamiento y formado.

6. Controles del proceso:

La repetitividad del proceso siempre ha sido una preocupación de los termoformadores. Se desean controles precisos de: La temperatura de la lámina (de superficie y promedio); la temperatura del molde; la presión de pre-estiramiento; los niveles de pre-inflado; la velocidad de estiramiento con asistencia de tapón o inflado; la presión de formado; el control sobre los cambios de temperatura de la lámina; el inflado de burbujas; la posición inicial y final del tapón y de la aspiración. Las termoformadoras modernas incluyen variables programables tales como altura del molde, ajustes de luz del molde, velocidades de cerrado programables en pasos múltiples, control sobre la comba de la lámina, y secuencias de formado programables.

7. Corte de piezas:

El corte de los excesos de la pieza termoformada tradicionalmente se hace en una estación separada. Dichos cortes pueden hacerse por medio de dados neumáticos o hidroneumáticos, routers, sierras y punzones. El corte manual se utiliza únicamente para piezas grandes, prototipos y en corridas cortas.

8. Tipos de máquinas:

Para el temoformado de piezas grandes, por lo general, se utilizan máquinas con capacidad para acomodar un molde con un tamaño desde 92 x 122 cm y formar una pieza con una profundidad de 25 cm, hasta máquinas

con capacidad para acomodar moldes con un tamaño máximo de 185 x 244 cm y formar una pieza con una profundidad de 91.5 cm. Las máquinas termoformadoras que utilizan como alimentación láminas individuales, se dividen en las siguientes tres categorías: a) Máquinas de una sola estación; b) máquinas con movimiento alternativo; y c) máquinas rotatorias. (2)

a. Máquinas de una estación:

En una termoformadora de una estación, la sujetación, el calentamiento, el formado, el enfriamiento y la descarga de la lámina se hace todo en una estación estacionaria. Una vez la lámina es sujetada, ésta permanece estacionaria. Para llevar la lámina a una temperatura de formado, el banco de resistencias es corrido debajo y/o arriba de la lámina. Después que se remueve el banco de resistencias, el molde se mueve mecánicamente y se pone en contacto con la lámina caliente, seguido de una aplicación de vacío y/o presión para formar la pieza. La pieza es enfriada en el mismo lugar. Se retracta el molde y se descarga la pieza (figura 2.2).

b. Máquinas con estaciones alternas:

En una termoformadora con estaciones alternas, la lámina es sujetada a un marco movible localizado a un costado del banco de resistencias estacionarias. El marco con la lámina sujetada es movilizado mecánicamente hacia el banco u horno de resistencias. Cuando la lámina alcanza la temperatura de formado, esta es movilizada de regreso a la es-

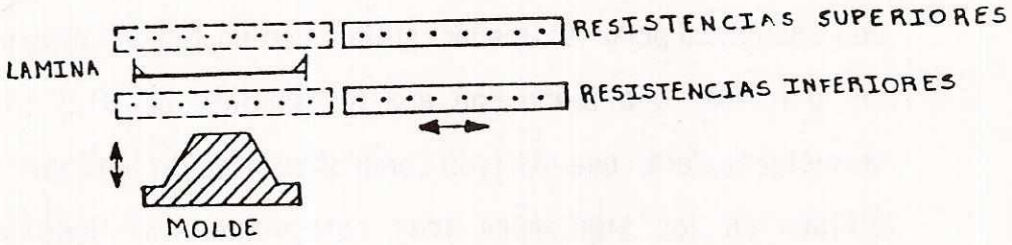

Figura 2.2. Termoformadora de una estación.

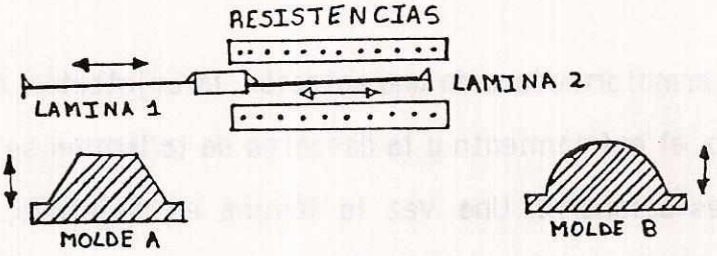

Figura 2.3 Termoformadora con estaciones alternas.

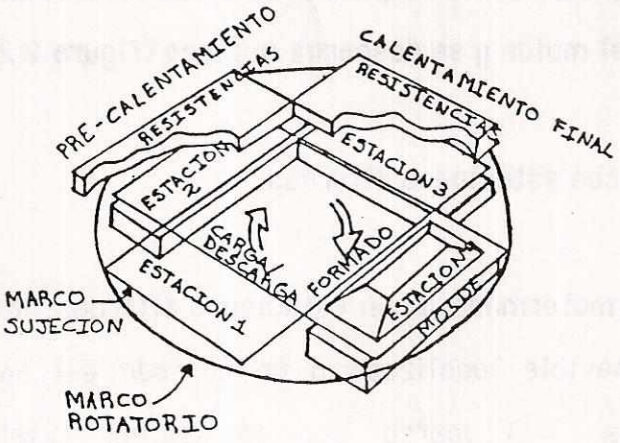

Figura 2.4 Máquinas rotatorias.

tación de carga. Aquí se mueve el molde mecánicamente hasta ponerse en contacto con la lámina caliente y formarse la pieza. Luego se enfría la pieza. Después se retracta el molde y se descarga la pieza.

Existe la posibilidad que haya dos moldes, uno en cada lado del banco de resistencias, para que mientras una lámina se caliente, la otra es formada, enfriada y descargada. En este caso, dos láminas con movimiento alternativo, incrementan la productividad sobre una termoformadora de un solo molde. Esto se logra sin el gasto de un segundo horno de resistencias (figura 2.3).

c. Máquinas rotatorias:

El termoformado rotatorio se utiliza en aplicaciones que requieren altas velocidades de producción. Las termoformadoras utilizadas más comúnmente son las de tres y cuatro estaciones (existen también las termoformadoras de cinco estaciones, sin embargo estas son utilizadas en raras ocasiones).

Las velocidades de producción se incrementán, ya que existen dos, tres y cuatro láminas en el proceso de formado al mismo tiempo. Una rotatoria de tres estaciones tendrá la productividad aproximada de una termoformadora con movimiento alternativo con dos moldes. Una termoformadora rotatoria con dos estaciones de calentamiento (rotatoria de cuatro o cinco estaciones) operará a velocidades de producción significativamente altas. Generalmente, la velocidad de producción de las

termoformadoras con movimiento alternativo y de las rotatorias de tres estaciones, está limitada por el tiempo de calentamiento necesario para que la lámina alcance su temperatura de formado. Las termoformadoras rotatorias con dos estaciones de calentamiento (de cuatro o cinco estaciones) están diseñadas para que la lámina sea calentada uniformemente en la estación de precalentamiento y después sea calentada a la temperatura de formado en la segunda estación de calentamiento. Esto permite compartir la carga de calentamiento en dos hornos independientes de resistencias. Con este tipo de diseño, las termoformadoras tienen su limitante en el tiempo de enfriamiento. Por lo tanto, la velocidad de producción está limitada por el tiempo de enfriamiento de la pieza después de formada (figura 2.4). Las termoformadoras de cinco estaciones no son utilizadas comúnmente. La estación adicional para la descarga proporciona más tiempo de enfriamiento.

Los cortes finales de las piezas formadas no son considerados como parte del equipo de termoformado. Sin embargo exiten termoformadoras que tienen equipo integrado para cortar los excesos de la pieza, ya sea en la estación de formado o en la estación de descarga, si se trata de una termoformadora de cinco estaciones. Con máquinas de tres o cuatro estaciones, se realiza en la estación de formado. Las ventajas de cortar en la termoformadora son: La parte todavía está bastante caliente y por lo tanto se puede cortar facilmente: La parte final se maneja mejor ya sin los excesos.

C. Técnicas de termoformado

El termoformado, en su expresión más simple, es el estiramiento de una lámina termoplástica para darle una forma final. Cuando la lámina es estirada contra el molde, ésta deja de aspirarse. Como resultado, la parte final tiene paredes gruesas donde la lámina tuvo el primer contacto con el molde y paredes delgadas donde tuvo el último contacto (Figura 2.5). En muchas aplicaciones, particularmente en formado de lámina de calibre delgado, la cantidad de estiramiento de la lámina es poco. Si se requiere de una gran cantidad de estiramiento o se requiere de la utilización de una lámina de calibre grueso, las técnicas simples de estiramiento no son suficientes. Los métodos de formado pueden dividirse en técnicas de un paso, pasos múltiples y otras variaciones. (4)

1. Técnicas de formado de un paso:

a. Formado por entapizado:

En el formado por entapizado (figura 2.6), la lámina sujetada y calentada desciende sobre el molde macho, o el molde macho asciende a través de la lámina. La lámina en contacto con el molde no se estira. Mientras el molde penetra y estira la lámina, el aire atrapado entre la lámina y el molde es evacuado. Se utiliza vacio o presión de aire para producir el diferencial de presión para forzar la lámina contra el molde macho. En el formado por entapizado, la parte formada tiene el fondo grueso; y las paredes laterales son delgadas. La parte más delgada es el borde del molde.

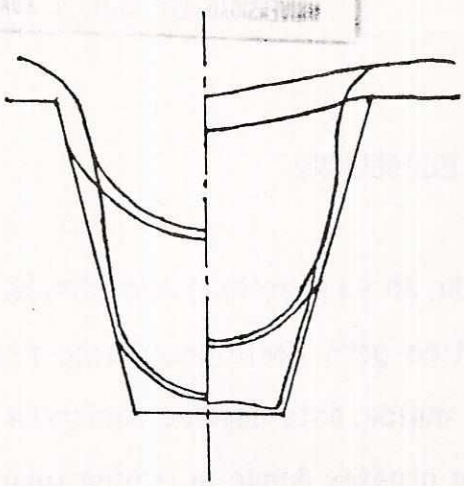

Figura 2.5 Variaciones en el espesor de la pared, durante el estiramiento por medio de un formado por vacío con molde hembra.

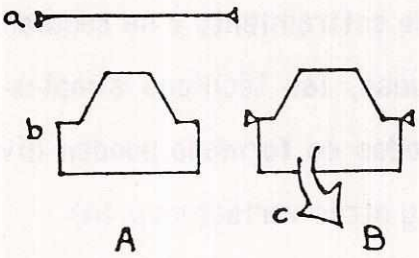

Figura 2.6 Formado por entapizado. A: Lámina precalentada previo al formado. B: Lámina formada sobre molde macho a: Lámina precalentada y sujetada. b: Molde macho con orificios de vacío. c: Vacío.

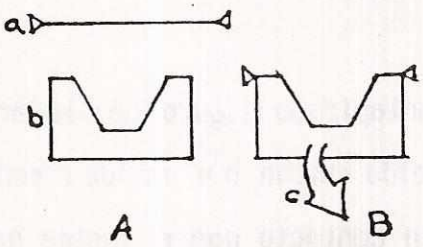

Figura 2.7 Formado por vacío. A: Lámina precalentada previo al formado.B: Lámina formada sobre molde hembra.a:Lámina precalentada y sujetada.b: Molde hembra con orificios de vacío.c: Vacío

b. Formado por vacío:

En el formado por vacío (figura 2.7), la lámina sujetada y calentada es sellada contra el borde de un molde hembra. Luego se le aplica vacío. Este diferencial de presión aspira la lámina contra la superficie del molde. Conforme el plástico va haciendo contacto con el molde, éste se enfría. Las áreas de la lámina que hacen contacto con el molde, al final serán las más delgadas. Por lo tanto, la parte formada tendrá un borde grueso y sus partes más delgadas serán las esquinas del fondo.

c. Formado por presión:

El formado por presión (figura 2.8) es similar al formado por vacío, excepto que la presión de aire positiva forma el diferencial para empujar la lámina en las esquinas del molde. Debido a que se pueden utilizar presiones de aire de hasta 1.4 MPa, se debe proveer de una caja de presión sobre la superficie libre de la lámina. El formado por presión se utiliza para formar materiales de calibres delgados difíciles de moldear, tales como el PP y para formar partes de calibres gruesos altamente detalladas.

d. Soplado libre:

En el soplado libre (figura 2.9), la lámina sujetada y calentada es estirada con aire, dándole asi una forma libre. La cantidad de presión de aire es controlada a traves de una fotocelda que detecta la altura de la burbuja en expansión. Ya que el aire está levemente más frío que la lámina,

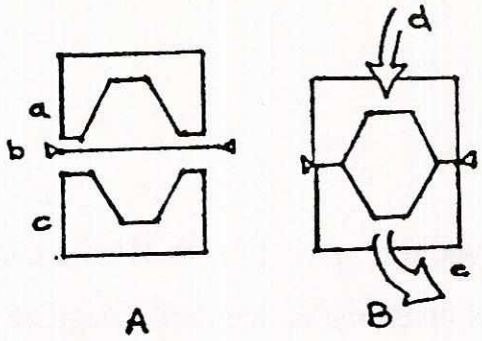

Figura 2.8 Formado por presión. A: Lámina precalentada previo al formado. B: Lámina formada sobre molde hembra . a: Cajón de presión. b: Lámina precalentada y sujetada. C: Molde hembra con orificios de vacío. d: Presión de aire. e: Vacío.

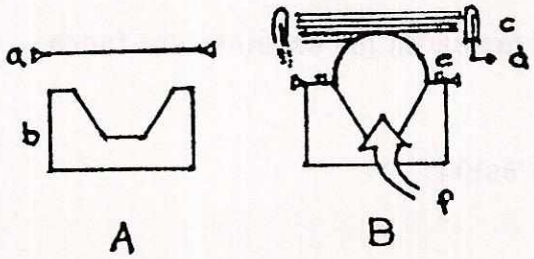

Figura 2.9 Soplado libre. A: Lámina precalentada previo al formado. B: Lámina solpada, la altura de la burbuja se determina por medio de una fotocelda. a: Lámina precalentada y sujetada. b: Cajón de presión. c: Fotocelda. d: Señal enviada a presión de aire.e: Anillo sujetador. f: presión de aire.

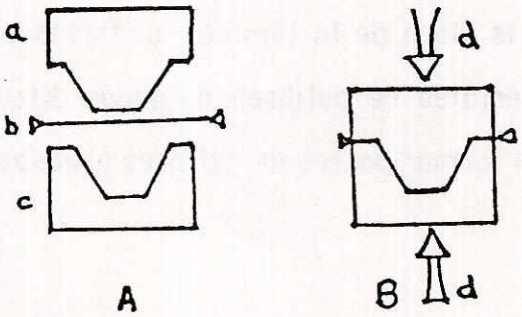

Figura 2.10 Moldeo por medio de molde hembra y molde macho. A: Lámina precalentada previo al formado. B: Lámina formada por medio de un movimiento simultaneo de dos moldes. a: Molde macho . b: Lámina precalentada y sujetada. c: Molde hembra. d: Fuerza aplicada.

la lámina se enfría con la forma libremente soplada. Debido a que la lámina no toca una superficie sólida durante el formado,esta se mantiene libre de marcas. El espesor de las paredes de la burbuja se mantiene bastante uniforme, excepto alrededor del área de sujetación.

e. Moldeo por medio de molde hembra y macho:

El moldeo por medio de molde hembra y macho (figura 2.10) es una manera común de formar polímeros relativamente rígidos. La lámina sujetada y calentada es colocada entre el molde macho y hembra. Mientras el molde se cierra, se puede aplicar vacío a la parte hembra del molde para ayudar en el moldeo. El espesor de las paredes depende de las tolerancias entre las dos partes del molde. Es posible lograr un considerable movimiento del material si las fuerzas aplicadas son relativamente grandes. Sin embargo, por lo general, las presiones aplicadas no son más grandes que 1MPa y usualmente alrededor de 0.34 MPa.

2. Técnicas de formado de pasos múltiples:

a. Formado por ondulación y entapizado:

El formado por ondulación y entapizado (figura 2.11) comienza con una lámina sujetada y calentada, que es expandida en una burbuja con presión de aire. Las presiones típicas de aire para inflar son de 0.014 hasta 0.055 MPa. Luego se inserta un molde macho en la burbuja; la presión de aire se mantiene constante y se aplica vacío si se requiere. La parte final tendrá

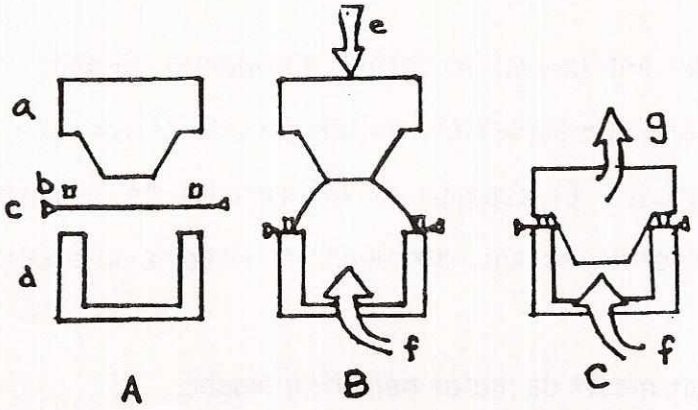

Figura 2.11 Formado por ondulación y entapizado. A: Lámina precalentada previo al formado. B: Ondulación formada, molde macho penetra la burbuja . C: Formación de la pieza en molde macho por medio de vacío y presión de aire. a: Molde macho con orificios de vacío . b: Anillo sujetador . c: Lámina precalentada y sujetada. d: Cajón de presión . e: Molde macho en movimiento f: Presión de aire. g: Vacío

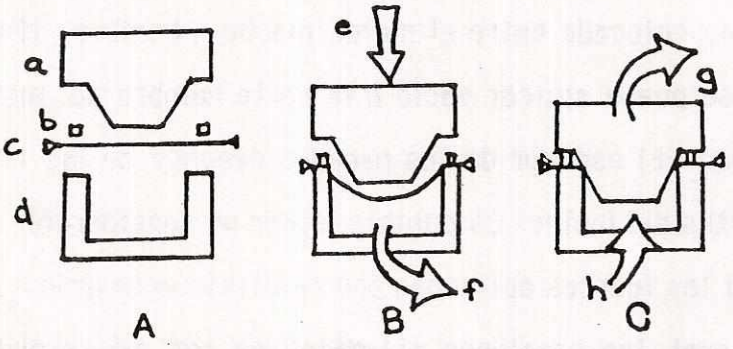

Figura 2.12 Formado por vacío y regreso instantaneo. A: Lámina precalentada previo al formado. B: Lámina estirada por medio de vacío, molde macho penetra la cavidad de la burbuja. C: Aplicación de vacío y presión para forzar la lámina en contra del molde macho: Molde mácho con orificios de vacío. b: Anillo sujetador. c: Lámina precalentada y sujetada. d: Cajón de presión y vacío. e: Molde macho en movimiento . f: Vacío parcial para pre-estirar la lámina. g: Vacío. h: Presión de aire.

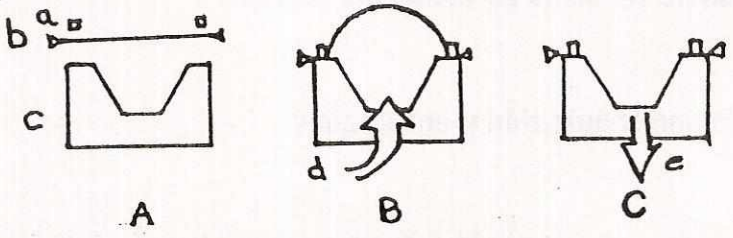

Figura 2.13 Formado por ondulación y vacío. A: Lámina precalentada previo al formado. B: Lámina prestirada con presión de aire. C: Lámina formada por medio de vacío en molde hembra. a: Anillo sujetador . b: Lámina precalentada y sujetada. c: Molde hembra con orificios de presión y vacío. d: Presión de aire. e: Vacio.

un espesor de pared mucho más uniforme que una parte formada por medio del formado sólo por entapizado.

b. Formado por vacío y regreso instantáneo:

El formado por vacío y regreso instantáneo (figura 2.12) comienza con una lámina sujetada y calentada, la cual es pre-estirada por medio de aspiración en una caja rectangular grande con vacío. Luego el molde macho penetra la lámina y se aplica vacío a través del molde macho. El vacío por debajo de la lámina se corta y se aplica aire en sustitución del vacío, si se requiere. La parte final tendrá un espesor de pared muy uniforme.

c. Formado por ondulación y vacío:

El formado por ondulación y vacío (figura 2.13) se utiliza para formar partes muy profundas, la lámina sujetada y calentada puede pre-estirarse, soplando una burbuja en el sentido contrario de la cavidad hembra, con presión de aire, y luego jalándola contra las paredes del molde hembra aplicándole vacío.

d. Formado por vacío y asistencia de tapón:

El formado por vacío y asistencia de un tapón (figura 2.14) comienza con una lámina sujetada y calentada, la cual es pre-estirada presionando un tapón en la lámina y bajándola en la cavidad del molde hembra. En este momento se aplica vacío para jalar la lámina contra la superficie del mol-

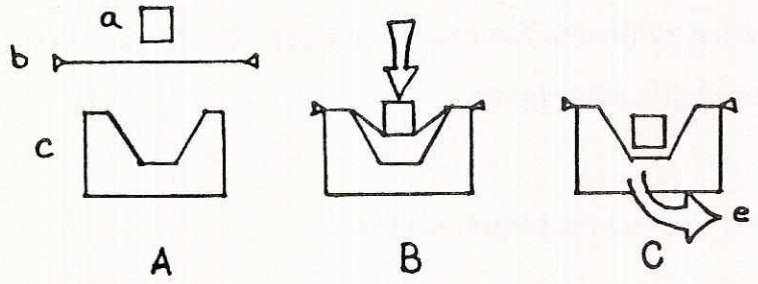

Figura 2.14 Formado por vacío y asistencia de tapón. A: Lámina precalentada previo al formado. B: lámina estirada con tapón. C: Lámina formada por medio de vacío en molde hembra. a: Tapón. b: lámina precalentada y sujetada. c: Molde hembra con orificios de vacío d: Tapón en movimiento. e: Vacío.

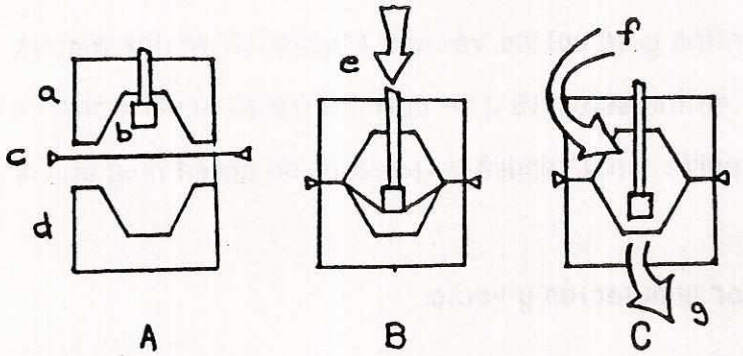

Figura 2.15 Formado por presión y asistencia de tapón . A: Lámina precalentada al formado. B: Lámina estirada con tapón. C: Lámina formada en el molde hembra, por medio de presión de aire. a: Cajón de presion. b: Tapón . c: Lámina precalentada y sujetada. d: Molde hembra con orificios de escape. e: Tapón en movimiento. f: Presión de aire. g: Escapa de aire.

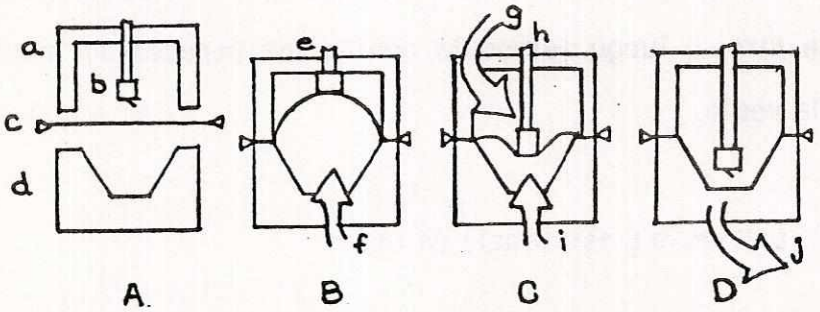

Figura 2.16 Formado por presión , asistencia de tapón y aspiración reversa. A: Lámina precalentada previo al formado. B: Lámina pre-estirada con presión de aire. C: Tapón penetra la lámina, mientras la presión del aire continúa constante. D: Lámina formada en molde hembra por medio de vacío. a: Cajón de presión. b: Tapón. c: Lámina precalentada y sujetada. d: molde con orificios de presión de aire y vacío .e: El tapón empieza a moverse cuando la burbuja lo toca. f: Presión de aire. g: Presión de aire h: El Tapón penetra la burbuja. i: Continúa la presión de aire. j: Vacío.

de y así completar la formación de la pieza. El espesor de las paredes de la pieza puede variar conforme el diseño del tapón. Las áreas del tapón que toquen la lámina, primero serán áreas más gruesas, debido al efecto de enfriamiento. Consecuentemente, el diseño del tapón es uno de los factores más importantes que determinará la geometría de la parte que se quiere producir por medio de esta técnica.

e. Formado por presión y asistencia de tapón:

El formado por presión y asistencia de un tapón (figura 2.15) comienza con una lámina sujetada y calentada, la cual es pre-estirada presionando el tapón en la lámina y bajándola en la cavidad del molde hembra; al mismo tiempo el aire por debajo de la lámina es evacuado. En este momento, a través del tapón se aplica presión de aire para forzar la lámina contra la superficie del molde hembra. Aquellas áreas de la lámina que entren en contacto primero con el aire serán enfriadas antes. En algunos casos se hace necesario utilizar aire caliente. Las temperaturas del tapón también son importantes.

f. Formado por presión, asistencia de tapón y aspiración reversa:

El formado por presión, aspiración reversa y asistencia de un tapón (figura 2.16), comienza con una lámina sujetada y calentada, la cual es pre-estirada soplando una burbuja, con presión de aire, en el sentido contrario de la cavidad. El tapón penetra la lámina, mientras la presión de aire todavia está siendo aplicada por debajo de la lámina; al mismo tiempo

se aplica aire con presión de formado por encima de la lámina. Luego se corta totalmente la presión de aire y se aplica vacío, jalando así la lámina hacia la superficie del molde hembra.

g. Formado por asistencia de tapón y aspiración reversa:

El formado por aspiración reversa por vacío con asistencia de un tapón (figura 2.17), comienza con una lámina sujetada y calentada, la cual es pre-estirada soplando una burbuja en el sentido contrario de la cavidad, con presión de aire. El tapón penetra la lámina mientras la presión de aire todavía está siendo aplicada. Luego se corta la presión de aire y se aplica vacío, jalando así la lámina hacia la superficie del molde hembra.

h. Formado por inmersión en una burbuja de presión de aire:

El formado por inmersión en una burbuja de presión de aire (figura 2.18), comienza con una lámina sujetada y calentada, la cual es pre-estirada soplando una burbuja en el sentido contrario de la cavidad, con presión de aire. El molde macho penetra la lámina, mientras la presión de aire forza la lámina contra la superficie del molde macho. Esta técnica puede tener la variante de aplicar vacío a través del molde macho, cuando así se requiera.

Todas las técnicas descritas previamente han sido desarolladas para pre-estirar la lámina previo al formado, logrando así un espesor de pared más uniforme y aspiraciones más profundas.

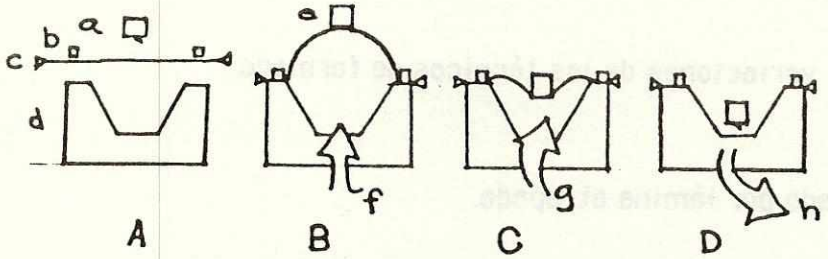

Figura 2.17 Formado por asistencia de tapón y aspiración reversa. A: Lámina precalentada previo al formado. B: Formación de burbuja. C: El tapón penetra la burbuja, mientras la presión de aire continúa constante. D: Lámina formada en molde hembra por medio de vacío. a: Tapón. b: Anillo sujetador . c: Lámina precalentada y sujetada. d: Molde hembra con orificios de presión de aire y de vacío. e: El Tapón empieza a moverse cuando lo toca la burbuja. f: Presión de aire. g: Presión de aire continúa, mientras penetra el tapón. h: Vacío.

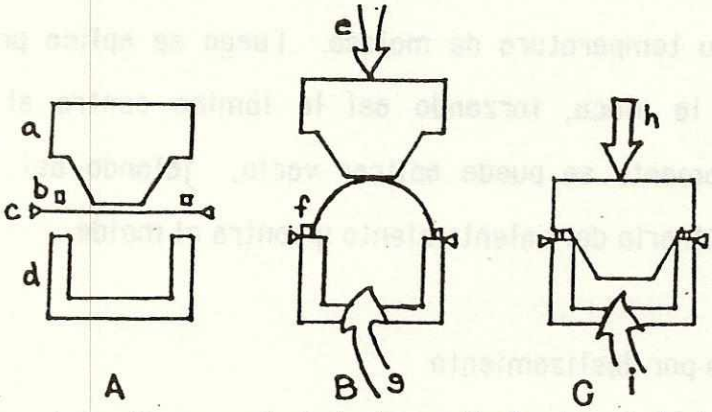

Figura 2.18 Formado por inmersión en una burbuja de presión de aire. A: Lámina precalentada previo al formado. B: Molde macho penetra la burbuja. C: Se aplica presión de aire para forzar la lámina en contra del molde macho. a: Molde macho. b: Anillo sujetador. c: Lámina precalentada y sujetada. d: cajón de presión. e: Molde macho penetra la burbuja. f: Lámina sujetada para contener la presión de aire interna: Presión de aire. h: Molde macho hace sello con anillo sujetador. i: Continúa la presión.

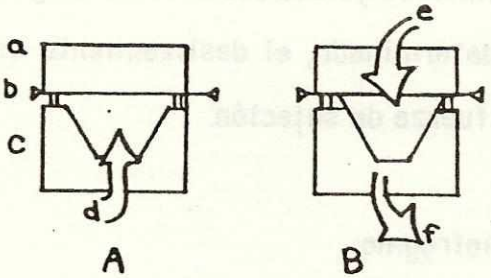

Figura 2.19 Formado por lámina atrapada. A: Calentamiento por medio de contacto; la lámina se mantiene en contacto con el banco de resistencias por medio de presión de aire. B: Formado por presión o vacío; la lámina es alejada del banco de resistencias por medio de presión de aire. a: Calentamiento por contacto, por medio de una placa porosa b: Lámina en marco sujetador. c: Molde vacío y presión de: Presión de aire.e: Presión de aire atraves de la placa porosa.f: Vacío.

3. Otras variaciones de las técnicas de formado:

a. Formado por lámina atrapada:

El formado por lámina atrapada (figura 2.19) es para láminas altamente orientadas (OPS) o muy sensibles a la temperatura (PP,PE). La lámina sujetada es colocada contra una placa porosa y es calentada hasta que alcanza su temperatura de moldeo. Luego se aplica presión de aire a través de la placa, forzando así la lámina contra el molde hembra. Alternativamente se puede aplicar vacío, jalando así la lámina en el sentido contrario del calentamiento y contra el molde.

b. Formado por deslizamiento:

En el formado por deslizamiento (figura 2.20), la lámina caliente, inicialmente no está sujetada con fuerza. Mientras la presión diferencial es aplicada, la lámina es jalada sobre el borde y hacia dentro de la cavidad. A un tiempo predeterminado, el deslizamiento es detenido por medio del incremento en la fuerza de sujeción.

c. Formado por diafragma:

En el formado por diafragma (figura 2.21), los plásticos quebradizos, tales como el PET y el PA (nylon), pueden formarse sin que estos se rompan. Un diafragma de neopreno con paredes gruesas y tibias, es colocado contra la lámina plástica sujetada y calentada e inflada, ya sea

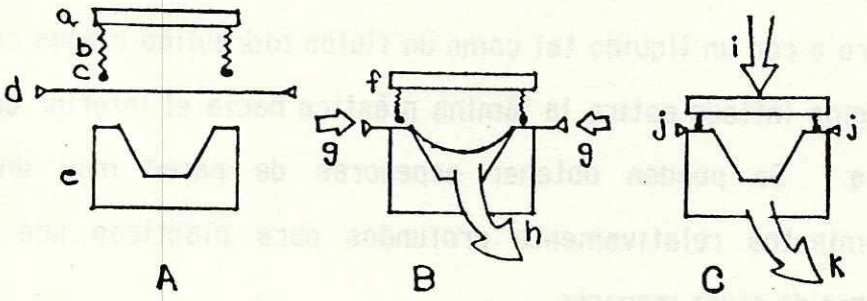

Figura 2.20 Formado por deslizamiento. A: Lámina precalentada previo al formado. B: la aplicación de vacío aspira el exceso de lámina sobre el borde. C: La placa sujetadora de resortes, detiene el deslizamiento, el vacío continúa aspirando la lámina. a: Placa sujetadora.b: resortes. c: cojínes de baja fricción.d: Lámina precalentada y sujetada.e:Molde hembra con orificios de vacío. f: Placa sujetadora permite el deslizamiento de la lámina.g: Lámina deslizandose hacia la cavidad del molde hembra.h: Vacío. i: Placa sujetadora detiene el deslizamiento de la lámina.j: Las pinzas sujetadoras de la lámina también detienen el deslizamiento.K: Continúa el vacío.

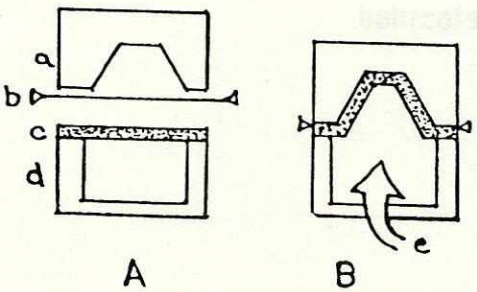

Figura 2.21 Formado por diafragma. A: Lámina precalentada previo al formado.B: Estiramiento de la lámina por medio del diafragma, en un molde hembra. a: Molde hembra con orificios de vacío. b: Lámina precalentada y sujetada.c: Diafragma flexible de neopreno, de alta temperatura y paredes gruesas, de: Cajón de presión. e: Presión de aire

con aire o con un líquido tal como un fluido hidráulico o agua caliente. El diafragma inflado estira la lámina plástica hacia el interior de un molde hembra. Se pueden obtener espesores de pared muy uniformes y estiramientos relativamente profundos para plásticos que no pueden formarse de otras maneras.

El reto de lograr espesores de pared más uniformes incluso en estiramientos muy profundos ha incentivado el desarrollo de estos procedimientos de pasos múltiples. Sin embargo, entre más sofisticado se convierten estos procesos, se torna más difícil adaptarlos a procesos de formado de alta velocidad.

D. Parámetros y factores en el diseño de piezas grandes

1. Parámetros de diseño:

El diseño de piezas depende de una variedad de parámetros, entre los que están incluidos los requerimientos de la pieza acabada, capacidades del equipo y las características del material. Los parámetros claves son los siguientes: (11)

a. Requerimientos de la pieza acabada:

i. Tamaño - largo, ancho y profundidad;

ii. Peso;

iii. Espesor - uniformidad del calibre, distribución total del material, cambios deseados de calibre;

iv. Aberturas - profundidad de estiramiento, orificios;

v. Factores de formas - curvaturas, costillas en las esquinas, protuberancias;

vi. Emparejamiento con un ajuste adecuado - piezas que deben casar;

vii. Angulos de succión;

viii. Detalles de la superficie - textura, acabado brillante o mate, diseños, leyendas.

ix. Impresiones previas al moldeo;

x. Propiedades ópticas - claridad, translucidez, opacidad.

b. Equipo o capacidades del proceso.

i. Tamaño de la estructura de sujetación;

ii. Espacio libre para remover la pieza formada;

iii. Disponibilidad de vacío y/o presión;

iv. Capacidad de calentamiento y control de patrones;

v. Fuerza y velocidad del molde macho o tapón;

vi. Capacidad de manejo de las piezas.

c. Características de las láminas termoplásticas:

i. Propiedades poliméricas reológicas - fuerza de fundición, alcanzabilidad;

ii. Módulo de elasticidad y tensión de elongación (manejo de piezas);

iii. Tendencias a combarse, coeficiente de expansión lineal;

iv. Tiempo de preparación, temperatura de deflección bajo carga, tendencia de marcas por enfriamiento;

v. Coeficientes de calor específico y transferencia de calor;

vi. Uniformidad - cantidad de reprocesado utilizable y su calidad;

vii. Sensibilidad al calor - tendencias a degradarse si se sobrecalienta;

viii. Factibilidad de secar la lámina.

2. Factores influyentes sobre el diseño de la pieza:

El diseño de un producto frecuentemente determinará cúal técnica de termoformado deberá usarse. Algunos de los factores más significativos relacionados primordialmente con el diseño de piezas y algunos con el diseño de moldes se discutirán a continuación: (11)

a. Razón de estiramiento:

La razón de estiramiento es la proporción del espesor promedio de la lámina dividido por el espesor promedio de la pieza. La razón a la cual es estirado un material termoplástico es un factor importante en la determinación de la mejor técnica de termoformado. La razón de estiramiento es un factor primordial en el control del espesor final promedio de la pieza formada. Para razones de estiramiento moderadas (<1:1), el formado por entapizado de un molde macho dará espesores de pared más uniformes que un simple formado por vacío en un molde hembra. Para estiramientos muy profundos o para razones de profundidad-con-ancho que excedan 1:1, se sugiere formado con molde hembra y asistencia de tapón para obtener la distribución de material más uniforme. La utilización de un pre-estiramiento por medio de una burbuja puede extender la proporción de estiramiento para ciertas técnicas.

b. Reproducción de detalles:

Para la reproducción de detalles en la pieza se pueden lograr resultados equivalentes con los métodos de formado por vacío con un molde hembra y formado por entapizado con un molde macho. Ya que la superficie de la lámina que está en contacto con el molde recibe la impresión más detallada, es por lo tanto el diseño de la parte el que determinará la técnica a utilizarse, siempre y cuando las otras variables sean iguales. Como regla general, el método de entapizado de un molde macho deberá utilizarse para detalles necesarios dentro de la pieza, y el método de vacío

con molde hembra para detalles necesarios fuera de la pieza. Es importante conocer que el grado de brillantez producido en una superficie lisa depende de las propiedades del material plástico utilizado; y no de la calidad de la superficie del molde. Sin embargo un acabado deficiente en la superficie del molde puede dañar o afear el acabado de la superficie de la pieza plástica que se esté formando.

c. Costillaje:

Otra consideración de diseño importante es el costillaje en las piezas formadas. Las costillas pueden colocarse para darle rigidez a la pieza, como también para mejorar el aspecto del diseño en sí. Por medio de un costillaje apropiado, lámina de calibre delgado, puede usarse satisfactoriamente para un rango amplio de aplicaciones que requieran de rigidez, dando como resultado una reducción en el costo del material, como también en el tiempo del ciclo de calentamiento.

d. Filetes:

Para poder producir piezas con su máxima fuerza y tiempo de servicio, debe utilizarse radios de filetes adecuados. El radio debe ser, por lo menos, igual al espesor de la lámina y nunca menor a 0.8 mm.

e. Concentración de esfuerzos:

La falta de filetes adecuados dará como resultado una concentración

excesivo de esfuerzos mecánicos. La experiencia ha demostrado que el tiempo de vida de servicio y el esfuerzo estructural de una pieza puede ser tan sólo un 30% de lo diseñado, cuando el factor de concentración de esfuerzos es alto. En una pieza estructural que tenga cualquier tipo de incisión, ranura o cualquier cambio abrupto en la sección transversal, los esfuerzos máximos en esa región ocurrirán inmediatamente en la incisión, ranura o en el cambio de sección transversal (figura 2.22). Este será más alto que el esfuerzo calculado con base a asumpciones simples de distribución de esfuerzos. La proporción de este esfuerzo máximo con relación al esfuerzo nominal basado en simples distribuciones de esfuerzos es el factor de concentración de esfuerzos "K", para esa forma en particular. Esta es una constante, independiente del material, excepto para materiales no-isotrópicos como la madera: $K = \frac{\text{Esfuerzo Máximo}}{\text{Esfuerzo Nominal}}$

Por lo tanto puede demostrarse que el esfuerzo máximo (o real) en una pieza dada bajo carga es mayor que el esfuerzo nominal (o calculado) por un factor "K". Para muchas partes simples de sección plana sin filetes, el valor de "K" puede ser tan alto como 3.0 bajo cargas que causen curvatura (figura 2.23).

f. Calentamiento local de moldes:

Este tipo de calentamiento permite más control sobre la distribución del material en la pieza. Esto puede lograrse cuando se insertan resistencias eléctricas tipo cartucho. Esta técnica es sólo efectiva con

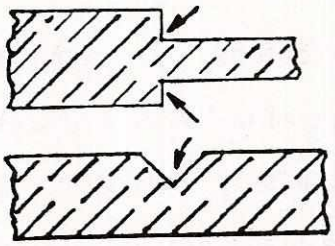

Figura 2.22 Concentración de esfuerzos. Se debe minimizar el uso de ; cambios abruptos en la sección transversal; y de esquinas muy pronunciadas.

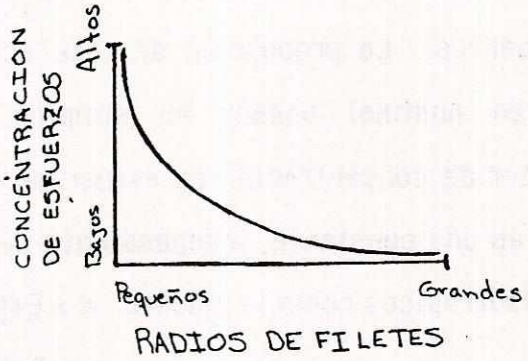

Figura 2.23 Gráfica de: Concentración de Esfuerzos vr. Radios de Filetes.

Figura 2.24 Calentamiento local de moldes.

moldes metálicos, debido a su conductividad térmica.

La temperatura más alta de esta sección del molde permitirá que la lámina termoplástica continúe estirándose sin que se enfríe o se fije. Una posición típica para calentamiento local sería en el radio de las esquinas del molde rectangular mostrado en la figura 2.24.

g. Encogimiento:

El encogimiento es un factor vital en el formado de precisión de piezas grandes y deben considerarse tolerancias adecuadas en el diseño de la pieza para artículos formados por medio de vacío. Existen tres formas básicas de encogimiento, las cuales se exponen a continuación:

i. Encogimiento por acción del moldeo:

Cuando un material termoplástico es calentado y se le da forma por medio de un molde, ocurre encogimiento del material durante el ciclo de enfriamiento. Las dimensiones de la parte formada, después de que la superficie alcance una temperatura a la cual se puede descargar la pieza, serán ligeramente menores en comparación a las dimensiones alcanzadas por la pieza cuando ésta acaba de ser moldeada. Esta diferencia se conoce como encogimiento por acción del moldeo; usualmente esta se da en términos de "milímetros por milímetro por ºC". Esta varía en relación a factores de procesamiento y diseño como también con el material utilizado.

La experiencia nos indica que el encogimiento,con relación a las dimensiones finales de la parte, es menos crítico en el formado por entapizado con molde macho. Esto se debe al hecho de que durante el ciclo de enfriamiento, el material se encoge sobre el molde rígido, logrando así retardar la acción de encogimiento. Aunque este fenómeno mejora las dimensiones finales de la pieza, se requiere de moldes con ángulos de desmoldeo apropiados para poder extraer la pieza del molde. Lo contrario ocurre en el formado por vacío con moldes hembra, el material se encoge en dirección opuesta de la superficie del molde, contra la resistencia despreciable del aire exterior.

ii. Encogimiento después del moldeo:

Después de descargar la pieza, ésta se encogerá debido a la pérdida de calor, ya que la pieza pasará de una temperatura de descarga a una temperatura ambiente. La parte caliente continuará encogiéndose, mientras el centro del plástico se enfría. Este encogimiento se detiene cuando se alcanza un equilibrio de temperatura en el material.

iii. Encogimiento y expansión durante el servicio:

Esta es la expansión o contracción normal de las dimensiones de un objeto, la cual se da debido a cambios de temperatura y humedad. Esto se considera un factor significativo sólo donde las tolerancias son extremadamente críticas, o donde el plástico formado esté sujetado rígidamente a un material con un coeficiente de expansión marcadamente

diferente. Cada tipo de material termoplástico tiene un coeficiente de expansión o contracción térmico diferente. Estos datos pueden encontrarse en cualquier manual standard de ingeniería. Sin embargo, cuando un trabajo requiere de especificaciones muy precisas, puede hacerse necesario suplementar estos datos con pruebas reales de uso final.

h. Rebordes:

Se pueden formar secciones con rebordes cuando se utilizan secciones del molde con una articulación de bisagra, secciones con levas y con piezas sueltas en el molde.

i. Insertos:

En algunos diseños es deseable formar un reborde y/o reforzar la pieza formada en cierta sección. En este caso, un inserto generalmente una tira o barra de metal es colocada alrededor de ésta. La sección de metal por lo tanto se convierte en parte integral del moldeo. Esto se utiliza frecuentemente en piezas grandes y son llamados "insertos huerfanos". Debe evitarse utilizar materiales termoplásticos con un coeficiente de expansión térmico significativamente diferente al del metal a utilizarse.

j. Factores de disposición:

Cuando se están formando partes múltiples en un molde, el espaciamiento entre las partes debe ser el suficiente para evitar un sobre-estiramien-

to o dobleces, en la lámina, entre cada parte y las pinzas de sujeción.

k. Estimación de costos de materiales:

El siguiente es un método simple para obtener un costo aproximado del material por pieza.

a. Obtener el costo de la lámina termoplástica.
b. Dividir el costo de la lámina por el número de partes/lámina. En este caso se asume que el desperdicio no tiene uso alguno.
c. El costo del material puede refinarse estimando el valor del desperdicio por pieza. Este valor se substrae del valor obtenido en el inciso b.

E. Diseño de moldes

El molde de termoformado puede ser tan simple como un trozo de madera pulido sobre el cual es entapizada una lámina calentada o tan complicado como un molde con elementos móviles, secciones articuladas y medios sofisticados de aislar, estirar y recortar la lámina formada dentro del molde. La selección de los materiales apropiados para el molde depende en un alto grado del tiempo y la severidad del servicio. Si se quiere fabricar pocas piezas, y el plástico puede ser deformado a relativamente bajas temperaturas con vacío, los materiales para el molde pueden ser madera o yeso. Por otro lado, si se van a fabricar miles de piezas y se requiere de altas temperaturas y presiones para lograr el diseño de la parte final, los materiales del molde deben ser duraderos. En este caso se recomienda

utilizar aluminio y acero.

Independientemente de los materiales utilizados, cada molde debe tener ciertas características. Se deben tomar las medidas necesarias para poder sujetar la lámina contra la superficie del molde. Se deben hacer orificios de vacío en aquellas áreas en las cuales la lámina es estirada de último. La superficie del molde debe mantenerse sin ningún tipo de adhesividad durante su contacto con la lámina y libre de estática después que la lámina sea removida. La superficie del molde debe ser lo suficientemente dura para poder retener su forma y textura durante su tiempo de vida. Las dimensiones del molde no deben cambiar, ya sea durante el proceso de fabricación (expansión térmica) o durante su almacenaje (absorción de humedad).

La selección del material apropiado para el molde debe tomar en cuenta también las consideraciones económicas. Sin embargo, el costo es únicamente un factor, también debe considerarse lo siguiente: Facilidad de fabricación, reparación, mantenimiento, durabilidad, requerimientos para su almacenaje, peso del molde, disponibilidad de los materiales del molde y la familiaridad del personal de taller con el material. Todos los factores mencionadas anteriormente actuarán como un conjunto para determinar el material adecuado del molde. (6)

1. Moldes prototipo:

Los moldes prototipo están diseñados para producir pocas piezas. Estos

se utilizan, ya sea para ensayar el diseño de una pieza o para producir decenas o centenas de piezas en una corrida corta de producción. Muchas aplicaciones con láminas de calibres gruesos, tales como rótulos, exhibidores, piscinas, contenedores, bañeras y otros, son fabricados exclusivamente en moldes prototipo.

Para los moldes prototipo se utiliza madera, yeso, plástico y aleaciones de zinc o metales blancos. Cada uno de estos materiales tiene sus ventajas y desventajas. A continuación se da una breve descripción de cada uno de ellos.

a. Madera.

Para moldes prototipos y corridas de producción cortas se utilizan maderas duras. La madera debe secarse totalmente por medio de un horno antes de trabajarla, para minimizar la liberación de esfuerzos. Para la fabricación de moldes se utilizan las técnicas convencionales para trabajar madera. Para pegar las piezas de madera deben utilizarse adhesivos epóxicos o termofijadores.

Es imprescindible que el molde de madera ya ensamblado sea secado con cuidado y totalmente antes de aplicarle un acabado. El calentamiento rápido y cíclico debido al contacto con la lámina caliente puede halar humedad de madera secada incorrectamente, causando agrietamiento. Después de un secado total, la superficie puede sellarse con un barniz resitente a la temperatura.

La madera también puede utilizarse como un componente de moldes hechos de materiales más permanentes. Debido a que la madera se puede trabajar rapidamente, se pueden fabricar tapones temporales durante las pruebas de los moldes prototipo para determinar la distribución óptima del material.

b. Yeso:

Los yesos son materiales cálcicos inorgánicos que reaccionan hidrolíticamente y se endurecen cuando son mezclados con agua. Los moldes se fabrican vaciando la mezcla de yeso-agua a un patrón de la pieza que se quiere fabricar. Debido a que la reacción hidrolítica es exotérmica (100 ºC), el patrón no puede ser muy frágil. Por lo general, las superficies de los patrones son cubiertas con un agente desmoldeante como el alcohol polivinílico.

Los orificios de vacío se hacen por medio de alambres recubiertos con un agente desmoldeante, los cuales se colocan perpendiculares a la superficie del patrón, antes del vaciado. Durante el vaciado, debe tenerse mucho cuidado para evitar la formación de burbujas. Si la viscosidad de la mezcla es demasiado alta, el aire quedará atrapado fácilmente; por otro lado, una mezcla con demasiada agua produce un molde con propiedades físicas más bajas. El curado de la mezcla, en el patrón, toma alrededor de 30 a 60 minutos. Después que se ha removido el molde de yeso del patrón y los alambres de vacío, el molde debe almacenarse en un área seca durante varios días.

c. Plástico:

Los moldes de plástico se utilizan, en particular, en el formado de láminas de calibres gruesos, donde: La acumulación de calor sobre la superficie del molde es intermitente; el molde es rara vez calentado para facilitar el formado; la pieza a ser formada tiene un área de superficie grande; se utiliza el formado por vacío o entapizado; se necesiten relativamente pocas piezas (≈100).

Para las aplicaciones donde las temperaturas de superficie de los moldes no exceden 60ºC y se utilice formado por vacío o entapizado, las resinas termofijas, tales como las epóxicas y las de poliéster insaturado, junto con la fibra de vidrio, son materiales adecuados para la fabricación de moldes. Estos moldes tienen una excelente estabilidad dimensional, buena resistencia a la abrasión y una superficie lisa no-porosa. Además, los moldes de plástico pueden prepararse y repararse cuando sea necesario, a un costo muy bajo.

d. Metal blanco:

La soldadura de metales depende del establecimiento de un arco intensamente caliente, el cual puede ser inducido entre superficies metálicas eléctricamente aisladas, energizadas con potencia DC de bajo voltaje y alto amperaje. El arco derrite a la mayoría de metales comunes. Al soplar aire caliente a altas velocidades en el arco, el metal fundido se divide en gotas muy pequeñas. Las gotas fundidas pueden ser transportadas

distancias cortas antes de que éstas se enfríen abajo de su temperatura de fusión. Algunos sistemas establecen el arco eléctrico entre alambres metálicos, los cuales son alimentados de una manera controlada a la zona de rociado. Por medio de un control preciso de la velocidad de los alambres de metal, se logra un rociado metálico fino y uniforme, que puede utilizarse para revestir una superficie. Aunque la mayoría de metales pueden ser rociados, el zinc y las aleaciones de zinc ofrecen un buen balance de flexibilidad en el rociado, relativamente bajas temperaturas de fundición, un tamaño pequeño de la gota, y buena dureza y fuerza.

Aunque los moldes de metal rociado se utilizan en el formado por vacío durante años sin ningún desgaste considerable, el formado por presión disminuye considerablemente el tiempo de vida de los moldes (≈100 piezas). Para propósitos prácticos, los moldes de metal rociado de metales ferrosos o no ferrosos se clasifican como permanentes. Algunos moldes que han sido rociados con aluminio, cobre, níquel, acero con bajo contenido de carbón, estaño y zinc han fabricado hasta 500,000 piezas sin ninguna evidencia de deterioro.

e. Níquel:

Los moldes prototipo también pueden fabricarse a partir de una superficie delgada de níquel electroformada, la cual es reforzada con zinc rociado, metal fundido o un epóxico de metal fundido. El níquel utilizado debe ser de un grado de electroplastia muy puro (99.95% con trazas de cobalto. La superficie del patrón debe ser conductiva. La superficie de los

los patrones debe ser rociada con un barniz. Mientras todavía está pegajosa, se le rocía una capa muy delgada de grafito en polvo. Debe permitirse un tiempo de curado.

La superficie del patrón es sumergida en un baño frío de revestimiento. Después que una capa uniforme de alrededor de 1.5 mm de espesor se ha acumulado sobre la superficie del patrón, éste y la capa de níquel pueden removerse para aplicar un refuerzo adicional de metal rociado o plástico fundido. O puede sumergirse en un segundo baño de revestimiento, donde se le aplica cobre hasta lograr un espesor de alrededor de 10 mm. Normalmente la superficie de estos moldes es opaca y no puede pulirse. Sin embargo es apropiada para utilizarse en el termoformado de piezas a bajas presiones.

2. Moldes para producciones largas:

Para el formado a altas velocidades, formado con dados, formado a presión, formado con un molde caliente, y el formado de láminas compuestas, deben utilizarse moldes con un tiempo de vida largo. Por esta razón se seleccionan metales que requieran de poco mantenimiento, con una buena dureza de superficie y que sufran poco desgaste. Este tipo de moldes tienen un costo alto y por lo tanto pueden justificarse solamente con base en un servicio extremo o severo, requerimientos de fidelidad y exactitud a través de gran cantidad de ciclos, y otras características, tales como acción de deslizamiento o corte por medio de troquel en el lugar del formado, lo cual no puede lograrse de ningún otro modo. A conti-

nuación se da una breve descripción de los materiales que se pueden utilizar para este tipo de moldes.

a. Aluminio:

El aluminio se utiliza frecuentemente para moldes de termoformado, debido a que se puede maquinar con facilidad, tiene una conductividad térmica muy alta lo que permite que el calor de la lámina plástica formada sea removido rápido y es un metal liviano y fuerte. Los moldes para termoformado pueden hacerse a partir de una placa maquinada, o de el metal fundido.

b. Acero:

El trato más severo de cualquier proceso de termoformado no puede igualar las temperaturas típicas, presiones, desgastes o el número de piezas requeridas de un proceso standard de moldeo por inyección. Como resultado, los moldes de termoformado no necesitan construirse del mismo acero que se especifica para moldes de moldeo por inyección. Sin embargo es recomendable que cuando se perfile una corrida de producción grande y el compromiso de calidad, tolerancias y repetitibilidad sean requeridos, se especifiquen aceros para el molde adecuados para tales fines.

3. Orificios de escape:

Cuando la lámina plástica caliente es estirada hacia dentro del molde, el

aire atrapado debe ser evacuado. Normalmente se hacen pequeños orificios en la superficie del molde en los puntos donde la última porción de la lámina que está siendo estirada, hace contacto. El número y el diametro de estos orificios de escape (o de vacío) deben determinarse antes del diseño del molde. Si el diámetro del orificio de escape es demasiado grande, el plástico caliente será estirado por estos, produciendo así un abultamiento poco vistoso en la pieza terminada. Si el estiramiento local es excesivo, la lámina se romperá. Si se hacen muy pocos orificios o si el área de escape es demasiado pequeña, la velocidad de estiramiento será controlada por la velocidad del aire que fluye desde la burbuja atrapada. Si la velocidad es demasiado lenta, la lámina puede enfriarse antes de que se logre obtener una pieza con la forma completa del molde.

El diámetro de los orificios de escape del molde depende de varios factores, incluyendo el módulo de elasticidad de la lámina plástica caliente, el espesor de la lámina sobre el orificio y la profundidad de estiramiento permitida en el orificio de escape.

Los orificios de escape deben barrenarse perpendicular al plano del molde. Para cada orificio de escape, un orificio de 6 mm de diámetro debe hacerse por el lado reverso a una distancia de 6 mm de la superficie primaria del molde.

Una vez se ha establecido el diámetro del orificio de escape, el número requerido se puede determinar fácilmente. De medidas muy básicas, se puede determinar el volumen de aire capturado en la cavidad del molde en

el instante que la lámina caliente sella contra el borde del molde. Este volumen "V" debe ser removido de la cavidad durante un tiempo corto razonable "O". Por lo tanto, la velocidad del flujo de aire volumétrico a través de los orificios de escape debe ser igual o exceder el valor "V/O". Cuando la proporción de la presión interna con la presión externa excede el valor de 0.52, la velocidad de evacuación de aire alcanza la velocidad sónica "C", alrededor de 335 m/s. El área de superficie de los orificios de escape está dada por $\pi Nd/4$, donde "N" es el número de orificios. Por lo tanto: $CN\pi d/4 = \beta V/O$

donde "β" es una constante que representa un factor de seguridad para prevenir que la velocidad de escape del aire alcance proporciones de colapso ($\beta \approx 10$). Para determinar el número de orificios, la ecuación puede replantearse como: $N = 4\beta V/OC\pi d$. Estos orificios deben colocarse en las regiones donde se lleva a cabo la última parte del estiramiento. (10)

III. DESARROLLO DEL PROYECTO

En este capítulo se tiene como objetivo analizar teóricamente el moldeo de una pieza por medio del proceso de termoformado y, en el siguiente, ejecutarlo en la práctica. Además, se desarrollará un breve análisis económico del costo de producción de esta pieza; asimismo se comparará el proceso de termoformado con otros procesos de transformación de termoplásticos.

El producto que se escogió para llevar a cabo este análisis es una canaleta para el transporte de agua pluvial hecha de polietileno de alta densidad. Este tipo de producto está dirigido para utilizarse en bodegas de áreas grandes y por lo general se fabrican a partir de lámina galvanizada o esmaltada.

Las canaletas de lámina galvanizada tienen un costo de fabricación muy bajo; sin embargo su tiempo de vida también es relativamente corto. Las canaletas de lámina esmaltada tienen un tiempo de vida útil mayor a las de lámina galvanizada, sin embargo tienen un costo mucho mayor. Como sustituto para este artículo se tiene como proyecto fabricar una canaleta de polietileno de alta densidad, la cual tiene un costo y un tiempo de vida relativamente alto.

A. Maquinaria utilizada

Para ejecutar este proyecto se cuenta con una máquina termoformadora

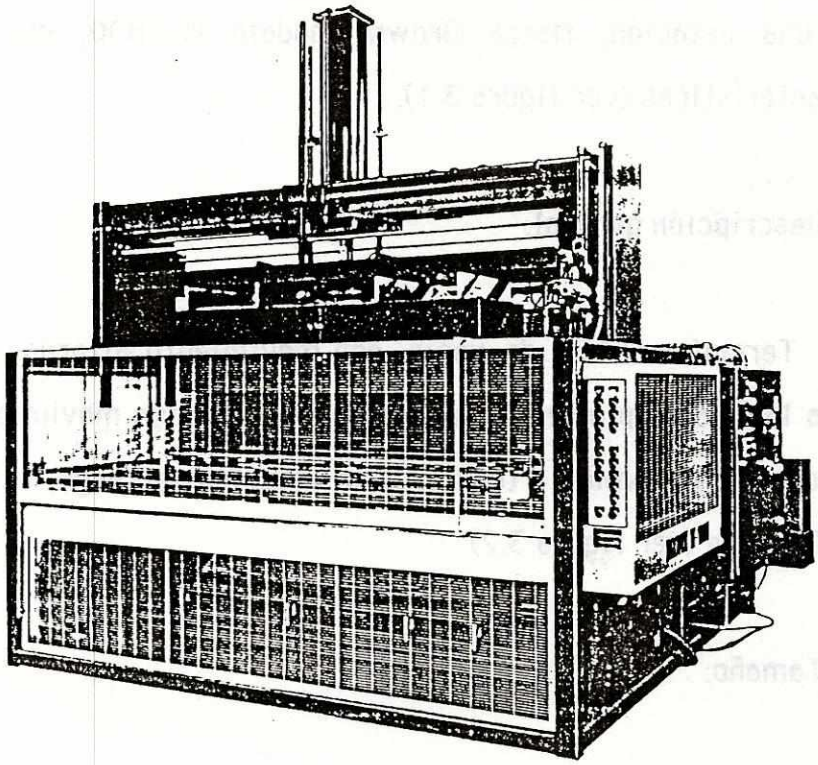

Figura 3.1 Termoformadora de una estación Brown M-1800

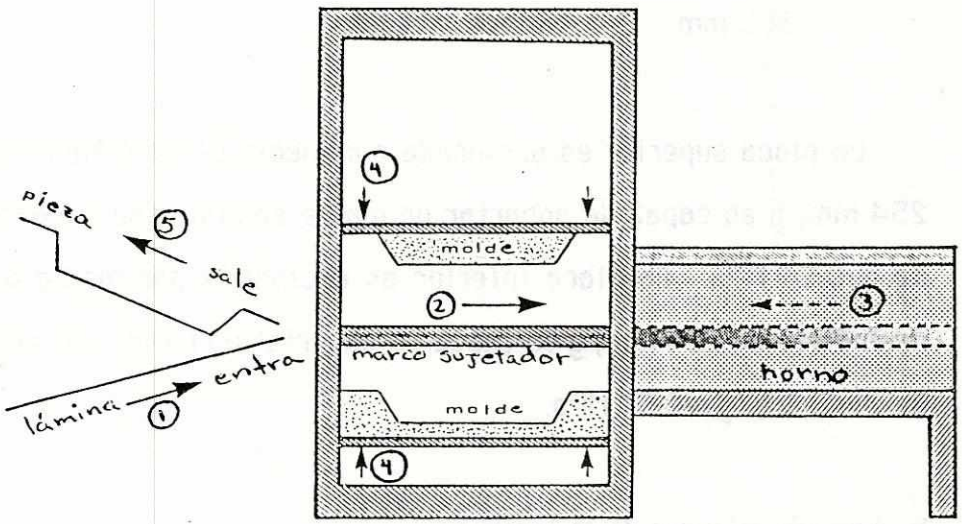

Figura 3.2 Secuencia de proceso en el moldeo por termoformado en máquina de una estación

de una estación, Marca Brown, Modelo M-1800, con las siguientes características (ver figura 3.1).

1. Descripción general:

Termoformadora de vacío, con movimiento alterno, de una estación, para lámina en plancha. Un carro horizontal con movimiento alterno para conducir a la lámina a través de la estación de carga, de calentamiento y de formado (ver figura 3.2)

2. Tamaño:

a. Tamaño máximo del molde:

1825 mm * 2440 mm

Espacio libre para pandeo de lámina:

305 mm

La placa superior es accionada por medio de un cilindro neumático de 254 mm, y es capaz de soportar un molde con un peso máximo de 1227.27 Kg a 0.54 MPa. La placa inferior es accionada por medio de un cilindro neumático de 254 mm, y es capaz de soportar un molde con un peso máximo de 2045.45 Kg a 0.54 MPa.

b. Tamaño máximo de la lámina:

1875 mm * 2490 mm

c. Profundidad de estiramiento:

La placa superior tiene un recorrido vertical máximo de 1600.2 mm.

La placa inferior tiene un recorrido vertical máximo de 762.0 mm.

3. Especificaciones:

A continuación se dan las especificaciones de los componentes con los que cuenta la máquina termoformadora en consideración.

a. Estructura sujetadora de lámina:

Las barras sujetadoras operan por medio de cilindros de aire y tienen pines con resortes para sujetar la lámina, en el lado que hace contacto con la lámina.

b. Horno:

Los bancos de resistencias inferiores y superiores poseen resistencias eléctricas tubulares de metal. El horno está dividido en tres zonas de calentamiento. Además, cada banco de resistencias posee una malla protectora, la cual permite un calentamiento variable para el control del espesor del material. La distancia entre los bancos de resistencias y la línea de la lámina, también es variable.

Para el control del pandeo de la lámina, el horno posee una fotocelda, la

cual es ajustada a la altura deseada. Cuando el pandeo de la lámina rompe el haz de luz, el carro sale del horno.

c. Controles de las resistencias del horno:

Cada banco de resistencias posee tres zonas de calentamiento, las cuales están controladas por medio de controladores de porcentaje de tiempo de 0-15 segundos.

d. Sistema de aire en el horno:

En el horno existe una fotocelda de seguridad, la que al detectar un pandeo excesivo de la lámina, emite una señal para que se active una corriente de aire en el banco inferior de resistencias, mientras que simultáneamente se emite otra señal para que se apaguen los bancos de resistencias.

e. Estación de formado:

La estación de formado cuenta con una placa superior y una inferior, estas son accionadas por medio de cilindros neumáticos. Cada placa tiene un control de velocidad de carrera. Además tienen un sistema de engranajes para asegurar su paralelismo y estabilidad. También se cuenta con un sistema de seguridad para poder instalar moldes y darle mantenimiento a la máquina.

f. Ventiladores de enfriamiento:

La estación de formado cuenta con cuatro ventiladores de alto volumen de 0.19 KW y 406 mm de diametro, con posición ajustable. Estos ventiladores se encuentran localizados directamente arriba del área de formado.

g. Bomba de vacío:

La máquina cuenta con una bomba de vacío con una capacidad de 3.73 KW y 1783.91 L/min.

h. Sistema eléctrico:

El sistema eléctrico al cual se encuentra conectada la máquina cuenta con las siguientes características:
Potencia primaria: 440 Voltios, 3 fases, 60 Hz.
Potencia de control secundario: 220 Voltios, 1 fase, 60 Hz.

i. Control eléctrico de secuencias:

El control eléctrico de secuencias de la máquina es un control programable en memoria de estado sólido.

B. <u>Material utilizado</u>

El polietileno de alta densidad es el material que mejor se adecua a los requerimientos de la pieza que se quiere fabricar. Los materiales que se

pudieran considerar para la fabricación de dichas canaletas son; el polietileno de alta densidad, el cloruro de polivinilo y el polipropileno debido a su bajo costo, su largo tiempo de vida y a su alta resistencia al impacto. En la siguiente tabla se pueden observar algunas de sus propiedades químicas y físicas y una comparación de sus costos.(8)

Tabla No. 3.1

Material	Módulo de Flexión (0.07 MPa)	Gravedad Específica (g/cm)	Temp. de Formado ºC	Calor Específico (cal/g ºC)	Precio en (c/cm)
Polietileno de alta densidad	200	0.95	146	0.55	1.30
Cloruro de polivinilo	400	1.50	138	0.35	2.66
Polipro-pileno	225	0.90	163	0.46	2.08

Una de las consideraciones más importantes en la selección de materiales son las propiedades mecánicas. El módulo de elasticidad bajo flexión es una de las mejores expresiones de rigidez relativa y seguramente el dato de más valor en conexión con algunas de las propiedades térmicas y propiedades de impacto. Como se puede observar en la tabla anterior

el cloruro de polivinilo tiene un módulo de flexión mucho mayor que la del polietileno de alta densidad y que la del polipropileno. Esto implica que probablemente se puede utilizar una lámina de menor calibre si se utilizara cloruro de polivinilo en vez de polietileno de alta densidad o de polipropileno.

La gravedad específica se utiliza para calcular qué cantidad de material se requiere para producir una lámina de cierto material y de cierto calibre. Debido a que los termoplásticos, por lo general, se venden por unidad de peso, esta variable está directamente relacionada con el precio de la lámina. Como se puede observar en la tabla, el cloruro de polivinilo tiene una gravedad específica mucho mayor que la del polietileno de alta densidad y que la del polipropileno. Esto implica que se requiere de una mayor cantidad de material (en peso) para fabricar una lámina de cloruro de polivinilo, que para fabricar una lámina de polietileno de alta densidad o de polipropileno de la misma dimensión y calibre.

La temperatura de formado indica la temperatura a la cual el material estará lo suficientemente suave como para poder formarlo. Como se puede observar en la tabla, dicha temperatura es mucho más alta para el polipropileno que para el cloruro de polivinilo y que para el polietileno de alta densidad.

Existen muchas propiedades térmicas que se pueden considerar, sin embargo una de las más importantes es el calor específico. El calor específico se define como la cantidad de calor requerido para incrementar la tem-

peratura de una sustancia en un grado. La gravedad específica en conjunto con el peso específico sirven para calcular el calor requerido para calentar una lámina termoplástica de cierto tamaño y de determinado material.

El precio del material es uno de los factores clave en el costeo de productos termoformados. El costo de la lámina es sustancial cuando el producto termoformado se produce en volúmenes bajos y con láminas de calibres gruesos. Como se puede observar en la tabla, el cloruro de polivinilo y el polipropileno tienen un precio bastante superior al del polietileno de alta densidad, por lo tanto se descarta la utilización de los mismos. El polietileno de alta densidad y el polipropileno tienen propiedades bastante similares; sin embargo el polipropileno tiene la desventaja de ser un material con una resistencia al agrietamiento bastante limitada a temperatuaras bajas, como también un alto grado de encogimiento durante el enfriamiento en el molde. Debido a estas razones, el polipropileno es un material con aplicaciones muy limitadas en el termoformado y, por lo tanto, se considera al polietileno de alta densidad como el material idóneo para esta aplicación. El material, además debe incluir un aditivo que le proporcione protección a los rayos ultravioleta, ya que el producto a fabricarse tiene su aplicación en exteriores.

Para optimizar al máximo el uso de la máquina termoformadora, se utilizan láminas con una dimensión de : 1879.6mm * 2489.2mm, con un calibre de 3mm (ver pg.70 Razón de estiramiento). Es necesario mantener una existencia continua de este material para este tipo de aplicaciones, ya que este material no se produce localmente.

C. Diseño de la pieza

A continuación se presentan las característica importantes que se consideraron en el diseño de la canaleta para el transporte de agua pluvial.

1. Desarrollo de la canaleta:

La firma constructora de la bodega especificó las medidas de la canaleta, según la figura 3.3.

Después de un análisis de la forma y de la capacidad de la canaleta se presentó una contrapropuesta, según se indica en la figura 3.4. Dicha contrapropuesta se hizo con base en las siguientes consideraciones.

Las esquinas se redondearon para evitar concentración de esfuerzos y para poder obtener un mejor flujo del material durante el moldeo. Para el cálculo del radio de las esquinas se tomaron en cuenta los siguientes parámetros:

a. Mantener constante el volumen de la canaleta.
b. La canaleta puede tener una altura máxima de 18.5 cm, debido a restricciones del fabricante en la estructura de la bodega.
c. La parte inferior de la canaleta debe permanecer con el mismo diseño (en "V") debido a la localización de los bocatubos para las bajadas de agua (figura 3.5).
d. La parte inferior de la canaleta debe permanecer plana, para que los pescantes, que también son planos, tengan una superficie de apoyo.

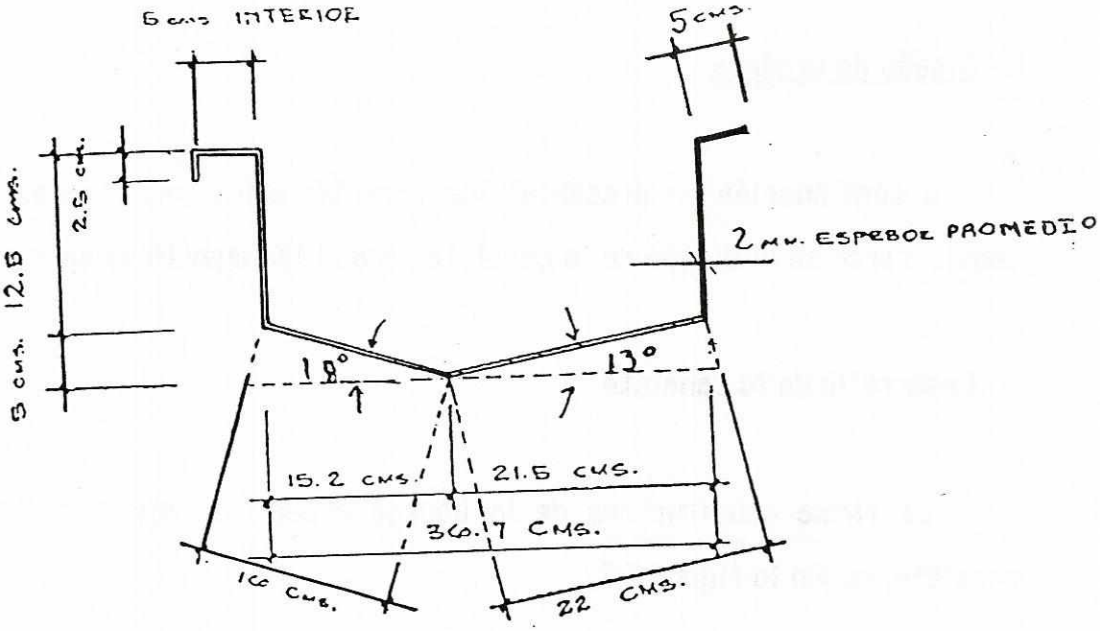

Figura 3.3 Dimensiones de canaleta y diseño, especificado por firma constructora

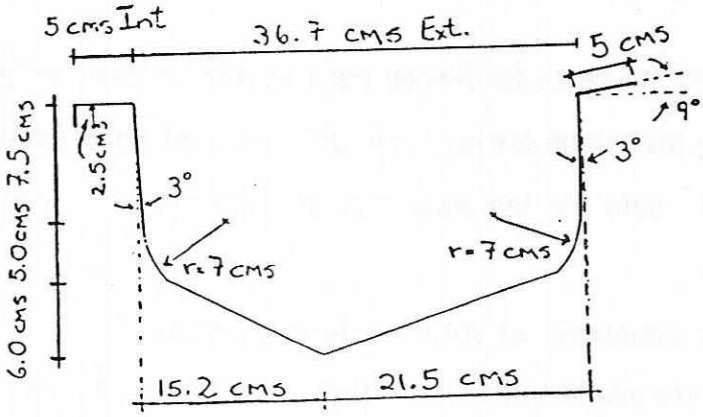

Figura 3.4 Contrapropuesta de canaleta; dimensiones y diseño para moldeo por termoformado

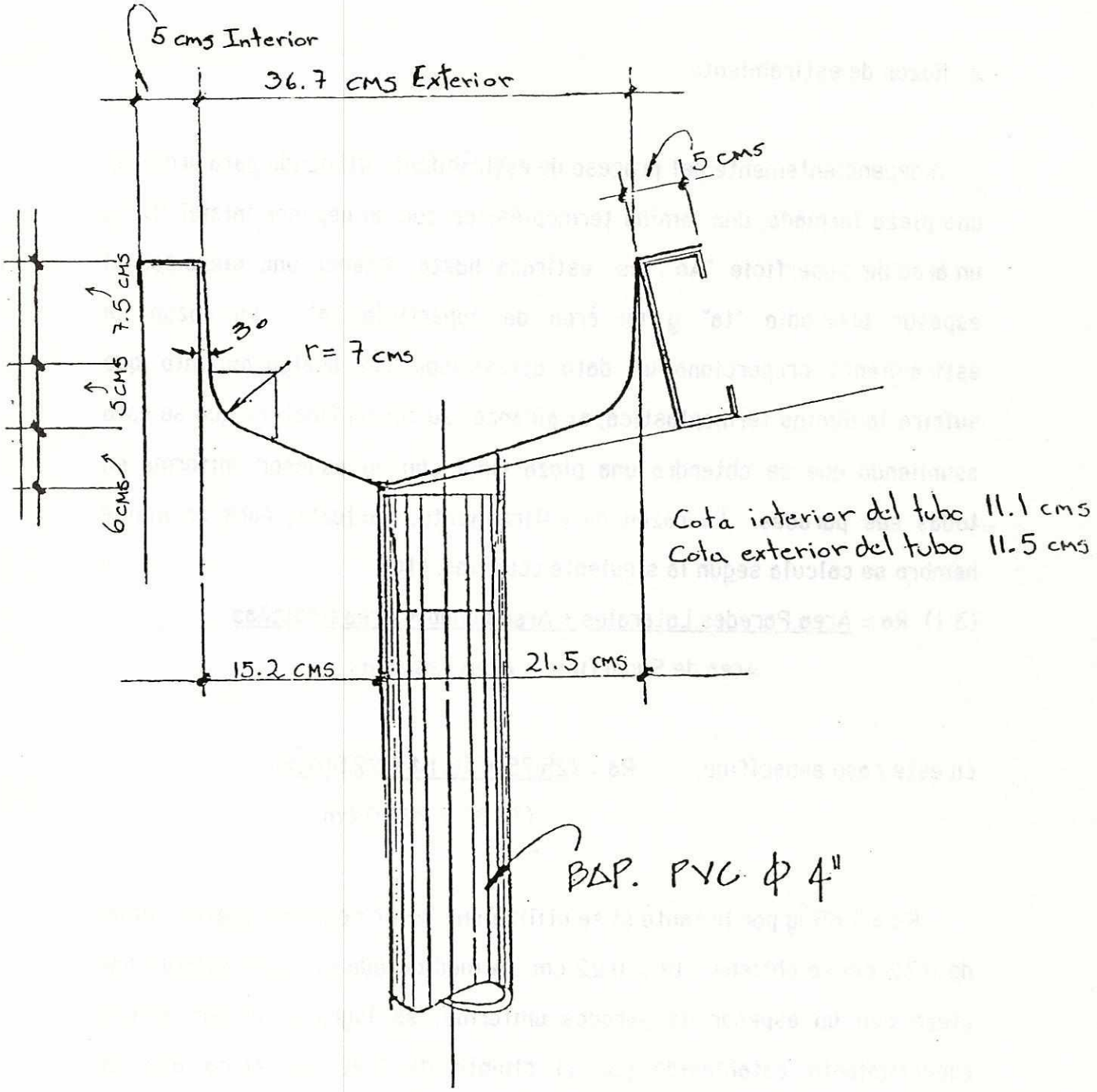

Figura 3.5 Localización de bocatubos para bajadas de agua

2. Razón de estiramiento:

Independientemente del proceso de estiramiento utilizado para producir una pieza formada, una lámina termoplástica con un espesor inicial "to" y un área de superficie "Ao", es estirada hasta obtener una pieza con un espesor promedio "ta" y un área de superficie "A". La razón de estiramiento proporciona un dato aproximado del adelgazamiento que sufrirá la lámina termoplástica, al alcanzar su forma final, ya que se está asumiendo que se obtendrá una pieza final con un espesor uniforme en todas sus paredes. La razón de estiramiento, Ra=to/ta, para un molde hembra se calcula según la siguiente ecuación: (10)

$$(3.1)\quad Ra = \frac{\text{Area Paredes Laterales + Area Fondo + Area Pestañas}}{\text{Area de Superficie + Area Pestañas}}$$

En este caso específico, $Ra = \frac{(25.75 + 39.14 + 22.50)cm}{(37.80 + 22.50)cm}$

Ra = 1.45 y por lo tanto si se utiliza una lámina con un espesor inicial de 0.32 cm se obtiene; ta = 0.22 cm. A medida que se logre obtener una pieza con un espesor de paredes uniforme, se logrará cumplir con el requerimiento establecido por el cliente de 0.20 cm como espesor promedio para las paredes de la pieza.

3. Fijación entre canaleta y canaleta:

Para la fijación de una canaleta con otra se opta por el sistema de ve-

nos, el cual ha sido utilizado eficazmente durante muchos años en los tragaluces tipo cañón de plástico acrílico. En un extremo de la canaleta se forma una vena gruesa y en el otro una vena delgada. Por lo tanto la vena gruesa de una canaleta encaja con la vena delgada de la siguiente canaleta. Las pestañas que sirven de traslape entre vena y vena se deben soldar con una pistola de aire caliente y presión para proporcionar un sello.

D. Diseño y fabricación del molde

1. Diseño:

En el diseño de la pieza muchas veces el acabado de la superficie vista es muy importante, lo cual puede influir en determinar qué tipo de molde debe utilizarse. En este caso, la canaleta irá instalada a una altura aproximada de 10 mt, por el lado exterior de una bodega, por lo que cualquier marca en la superficie exterior será de mínima importancia.

En este tipo de artículo, uno de los factores más importantes es la uniformidad en el espesor de las paredes, ya que es un producto con un tiempo de vida muy largo (mayor de 10 años). Un espesor de pared muy pequeño en cierta sección, de la pieza podría significar un rompimiento prematuro en esa sección debido a la degradación del plástico por su exposición continua a los rayos ultravioleta, o por el contacto físico con algún objeto punzante.

Debido a que la razón de estiramiento 1.45 (calculada en la sección Ra-

zón de estiramiento pg.70) es mayor que 1, se recomienda hacer un formado con molde hembra y asistencia de tapón macho, para obtener la distribución de material más adecuada. Por lo tanto, para este diseño específico, el tipo de molde es un molde hembra con vacío y un tapón macho. El molde hembra con vacío proporciona una buena distribución del material hacia las paredes de la canaleta, y el tapón macho le da una superficie de apoyo solida al fondo, ayuda al formado de las venas y además termina de crear el sello necesario para el vacío.

a. Encogimiento:

Para el polietileno de alta densidad, en termoformado, se recomienda utilizar un factor de encogimiento del 3 al 4%. En este caso el molde se diseña un 3% más grande, tanto en el ancho como en la altura. Esto se hace con base en la experiencia de termoformado que se tiene de otras piezas de similares características. Debido a que los canales van en línea recta, uno tras otro, el encogimiento que pudiera sufrir la pieza en este sentido, no es un factor de importancia; por lo tanto no se considera ningún porcentaje de holgura en este sentido.

b. Tamaño de molde:

El tamaño del molde hembra se diseña con base en los datos de encogimiento anteriormente mencionados, al tamaño de la lámina y al tamaño del área de moldeo de la máquina.

Cada cavidad tiene un ancho total de 48.6 cm. La lámina tiene un ancho

útil de 241.92 cm. Por lo general se recomienda que exista una distancia de 5 cm como mínimo entre el molde y el marco sujetador, y entre cada cavidad del molde. Según las consideraciones anteriores se calcula un máximo de cuatro cavidades en el molde con una separación entre cavidad de 9.6 cm, y una distancia de 9.6 cm entre el molde y el marco sujetador.

El largo del canal se diseña con base en el largo de la lámina y tomando en consideración que el gradiente de temperatura es mucho mayor en las orillas del horno, se considera necesario dejar un margen más amplio en este sentido a lo recomendado. El largo útil de la lámina es de 180.96 cm. Se deja un margen de 7.21 cm entre el molde y el marco sujetador, por lo que el largo del molde será de 166.54 cm. La distancia de centro de vena a centro de vena es de 160.00 cm. Estas dimensiones y el arreglo final del molde pueden observarse en la figura 3.6 y 3.7.

El contra molde o molde tapón macho se diseña con una dimensión menor a la del molde hembra. Esto se debe a que es necesario considerar una holgura entre ambos moldes para el material termoplástico. Esta holgura debe ser mayor al espesor del material, en este caso dicha holgura será de 0.5 cm de cada lado. Sus dimensiones y el arreglo final pueden observarse en la figura 3.8 y 3.9.

c. Orificios de escape:

i. Tamaño:

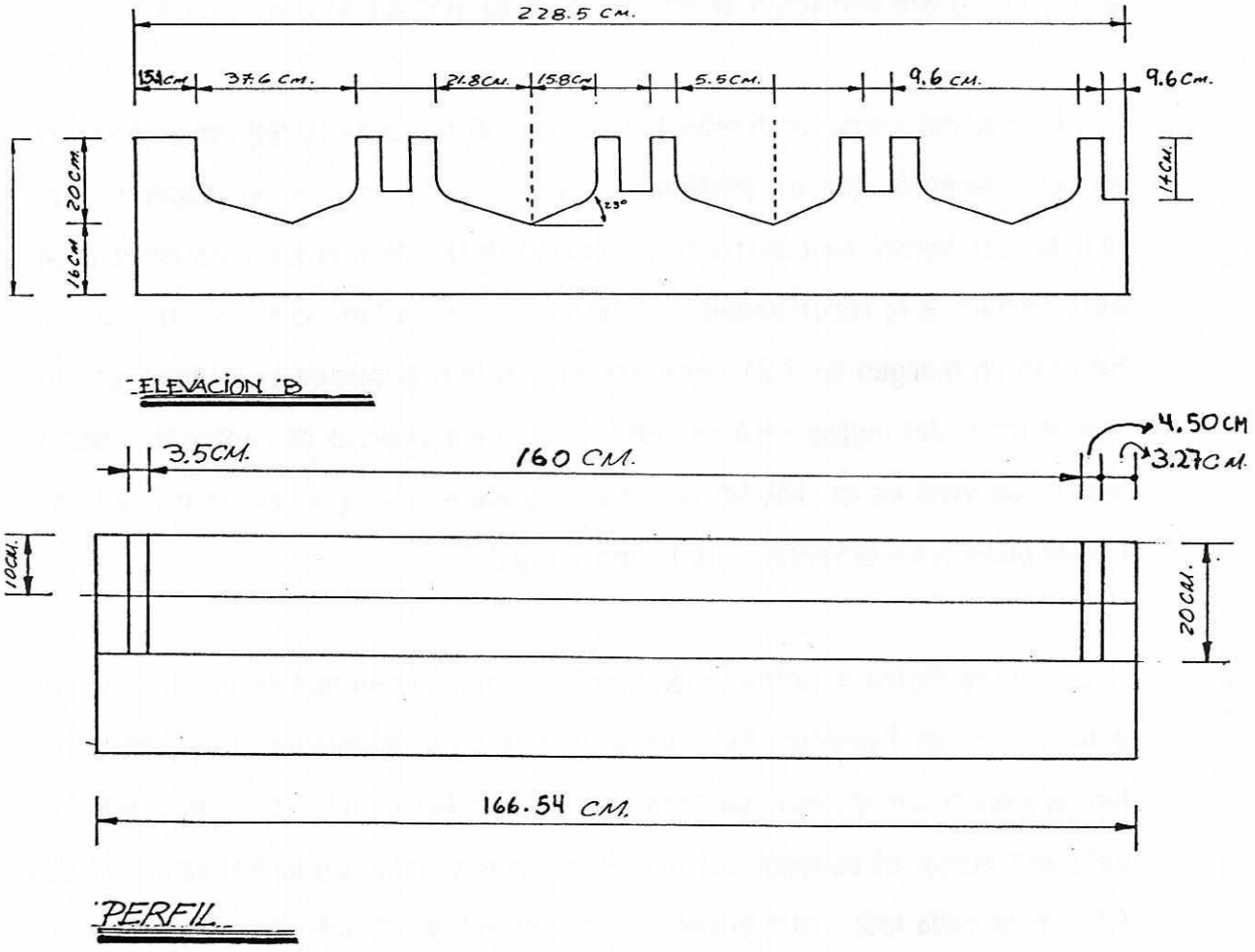

Figura 3.6 Dimensiones y diseño de molde para canaleta

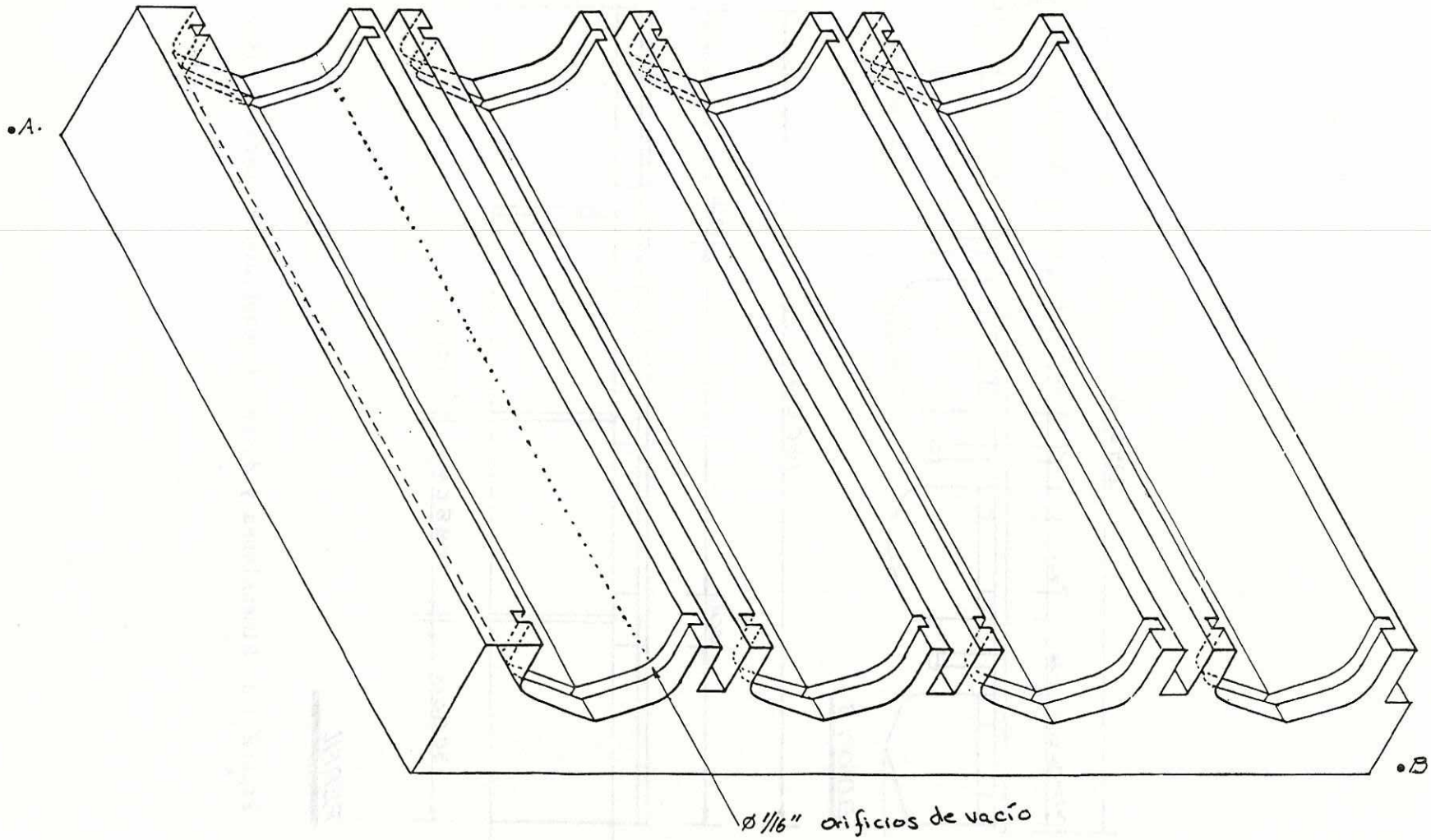

Figura 3.7 Arreglo final del molde para canaleta

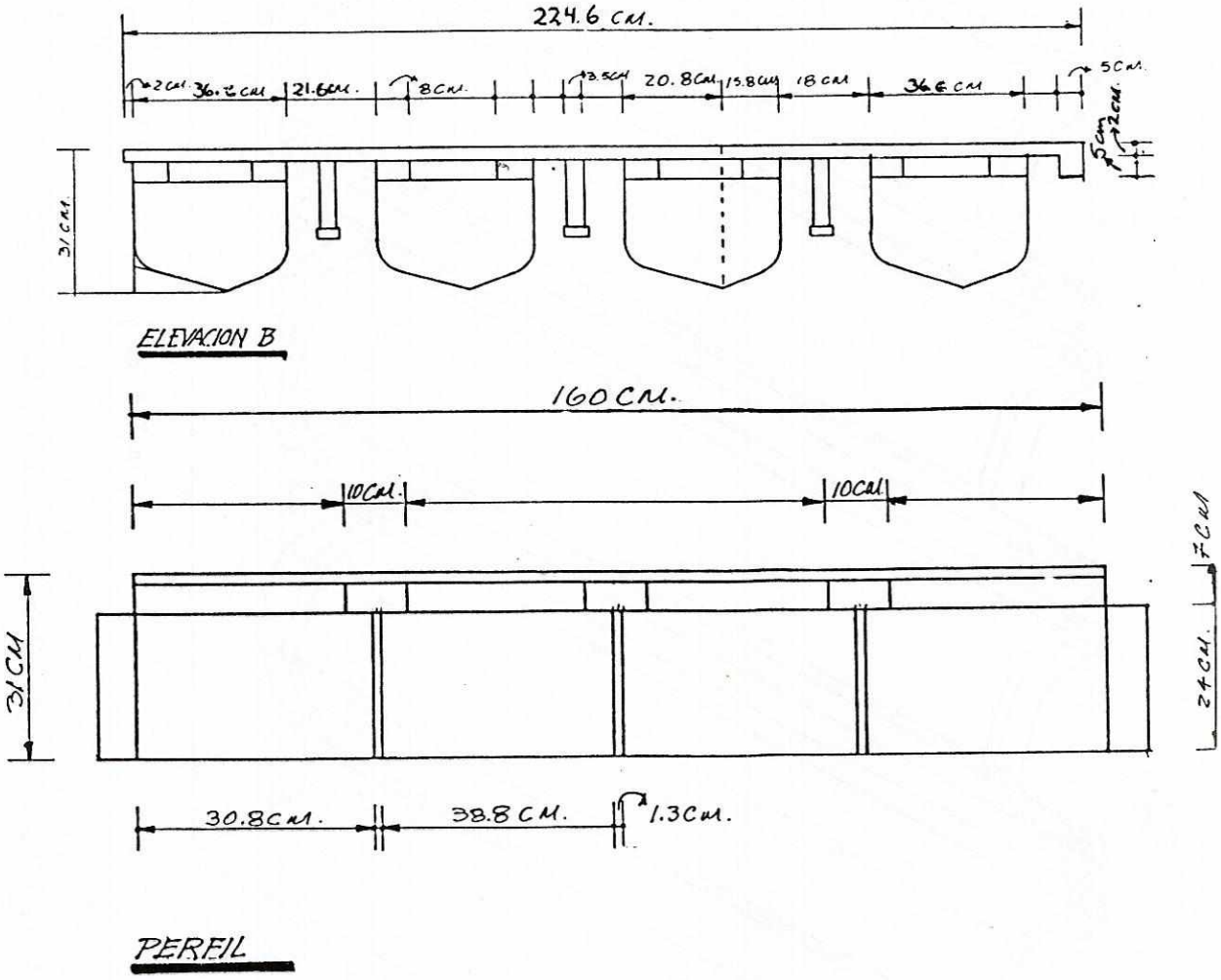

Figura 3.8 Dimensiones y diseño de contramolde para canaleta

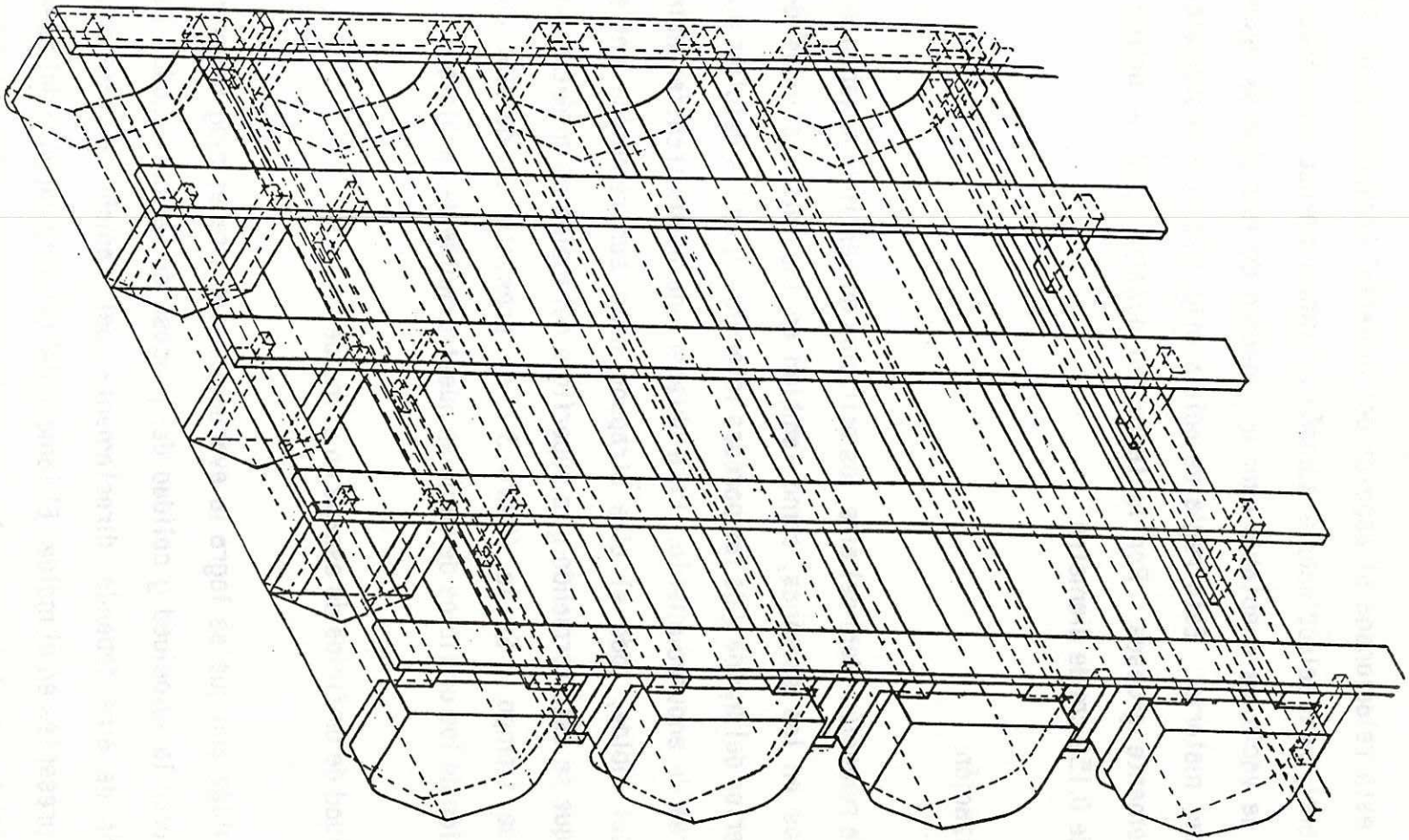

Figura 3.9 Arreglo final de contramolde para canaleta

La apariencia de marcas no deseadas, que dejan los orificios de vacío en la pieza, está relacionada al espesor del material termoplástico. Como regla general, para seleccionar el tamaño máximo de broca para hacer los orificios de vacío, es aceptable usar una medida de la mitad del espesor original del material. Esta regla se aplica muy bien para materiales lo suficientemente gruesos. Por lo tanto, en nuestro caso se utiliza un orificio de 0.159 cm de diametro.

ii. Localización:

Para la remoción ideal del aire, los orificios de ventilación deben estar localizados en las esquinas, como también en las intersecciones de la parte inferior del molde y de las paredes laterales, y en los detalles de las estructuras de endurecimiento. Para obtener una buena transferencia de detalle del molde, todo el aire atrapado debe ser removido entre el plástico que se está formando y la superficie del molde en un determinado período de tiempo. En la figura 3.7 se presenta un detalle de la localización de los orificios de vacío en nuestro molde de canaleta.

iii. Cantidad de orificios de escape en el molde:

La rapidez con que se logra la evacuación del aire es muy importante para mejorar la velocidad y calidad del proceso de termoformado. Dicha evacuación de aire depende directamente del tamaño y cantidad de orificios presentes en el molde. El tamaño del orificio depende del espesor de la lámina termoplástica y en lograr minimizar la transferencia de las

impresiones no deseadas de los orificios. Por lo tanto la única variable que se puede manejar es el número de orificios.

Para determinar el número de orificios necesarios en el molde, se debe determinar la capacidad de volumen del molde. Este valor representa el desplazamiento de aire que ocurrirá cuando se lleve a cabo el termoformado. En nuestro caso, para cada canaleta individual se tiene un volumen de ; V = 93,304 cm

Este volumen (V) debe ser removido de la cavidad durante un período razonable de tiempo (ø). Por lo tanto, el número de orificios (N) necesarios se calcula según la siguiente ecuación: (3.2) $N = 4\beta V/øC\pi d$

en donde: β = factor de seguridad

d = diametro del orificio

C = velocidad del aire

Con V = 93,304 cm, ø = 1.5 s, d = 1.59 mm, C = 335 m/s y β = 10, el número de orificios requeridos es N = 936 por cavidad. El factor de seguridad es necesario para evitar que la velocidad de escape del aire, limite la velocidad de estiramiento.

Los orificios pequeños no penetran la totalidad del cuerpo del molde. Hacer este tipo de orificios tomaría una gran cantidad de tiempo, y además por su tamaño se taparían muy fácilmente. En este caso, el molde es hueco en su interior, lo cual crea una cámara de aire o canales de aire interconectados. En las áreas donde se requiera, se hace un orificio más grande, de 6 mm de diámetro, en el lado interno del molde hasta una

distancia aproximada de 6 mm de la superficie principal del molde. De esta manera los orificios más pequeños se barrenan únicamente a través de una masa pequeña, y por medio de los orificios más grandes se alcanza la cámara de aire principal. Los canales de aire más grandes, los cuales se conectan con los orificios más pequeños, proporcionan mejores velocidades de flujo, menos probabilidad de taparse y, por lo tanto, una vida de servicio más larga para el molde.

2. Fabricación:

La elección del material adecuado para la fabricación del molde depende, en alto grado, del volumen requerido de piezas, así como de la habilidad del material para soportar la severidad de las condiciones del proceso. Cuando se van a fabricar pocas piezas y el plástico utilizado puede ser deformado a temperaturas relativamente bajas con vacío, el material a utilizarse puede ser madera.

Los moldes de madera están diseñados para producir pocas piezas (10 - 100). La madera debe estar seca antes de utilizarse, para minimizar la liberación de esfuerzos durante el moldeo. Una de las mayores ventajas en la utilización de madera es que para la fabricación de dichos moldes se utilizan técnicas convencionales de carpintería. Además, cualquier alteración al molde, durante la fase experimental, puede hacerse fácilmente. Otras ventajas que se pueden mencionar es su bajo costo y su relativamente corto tiempo de fabricación. Entre las principales desventajas se pueden mencionar, su reacción a la humedad, la cual causa

cambios dimensionales del molde, y la retención de calor debido a la baja conductividad térmica de la madera, lo cual limita la velocidad del moldeo. Para la fabricación de la canaleta en específico, la cantidad de piezas a moldear será como máximo 30 unidades, no se requiere de gran exactitud en sus dimensiones y de altas velocidades en el tiempo de moldeo, por lo que se seleccionó la madera como material ideal para la fabricación de este molde.

En la fabricación del molde se utilizó pino seco 12.70 mm de espesor para las piezas de la estructura interna. Para la base de la estructura y del molde se utilizó plywood de 19.05 mm de espesor. Para lograr la forma final se utilizó plywood de 3mm de espesor, como superficie exterior del molde.

Para redondear las esquinas y lograr los acabados finales se utilizó masilla automotriz. Las uniones de madera se sellan en el lado interno del molde, por medio de silicón. Para las uniones de madera se utilizaron clavos de 25.4, 38.1 y 50.8 mm de largo, tornillos #10*50.8 mm, grapas corrugadas de 25.4 * 12.7 mm,y cola blanca.

En la placa inferior del molde se deja un agujero para la conexión del vacío. La conexión se hace por medio de un flashing de metal de 38.10 mm de diámetro. El tiempo de servicio de este molde se calcula que es de 50 piezas; después de esta cantidad de piezas fabricadas deberá hacerse una revisión de la madera quebrada o rajada, clavos sueltos, masilla quebrada y orificios tapados.

IV. RESULTADOS Y DISCUSION

En este capítulo se ejecutará el moldeo de la pieza en consideración, se presentarán los resultados, se analizarán los costos de fabricación de la misma y se hará una breve comparación del proceso de termoformado con otros procesos de transformación de termoplásticos

A. Instalación del molde

El molde hembra se instala en la placa inferior de la máquina. El molde debe estar centrado y fijado adecuadamente en la placa inferior para que no sufra ningún desplazamiento durante el moldeo. Esta fijación puede hacerse por medio de guías de madera o de metal, atornilladas a la placa metálica de la máquina. La manguera del vacío se conecta a través de la parte inferior del molde.

Se gradúa el marco sujetador de la lámina según el tamaño del molde. Por lo general se recomienda dejar una luz de aproximadamente 5 cm entre el molde y el marco sujetador. Luego se gradúa la carrera del molde, en este caso se requiere que la parte superior del molde alcance el rostro superior del marco sujetador.

El contra molde o tapón macho se instala en la placa superior de la máquina. El contra molde debe estar centrado conforme el molde hembra y se fija por medio de barras de metal, las cuales están fijas en la placa de la máquina. Estas barras se atornillan a la base del molde de madera. Di-

chas barras deben estar separadas a una distancia equidistante para que el contra molde ejerza una presión uniforme sobre la lámina termoplástica que se esté moldeando. Luego se gradúa la carrera del contra molde. Por lo general se deja una luz equivalente al espesor original del material entre el molde y el contra molde.

B. Programación del ciclo de la máquina

Tabla No. 4.1

No.	Función	Tiempo programado
1	Ciclo del horno	200 s
2	Ciclo de formado	640 s
3	Placa superior baja	2 s
4	Placa superior sube	425 s
5	Placa inferior sube	1 s
6	Placa inferior baja	635 s
7	Vacío se enciende	0.5 s
8	Vacío se apaga	100 s
9	Expulsión por aire	630 s
	Placa inferior, se enciende	
10	Expulsión por aire	640 s
	Placa inferior, se apaga	
11	Ventiladores se encienden	15 s
12	Ventiladores se apagan	640 s

No.1 Ciclo del horno

El ciclo del horno para este caso se maneja por medio de la fotocelda que controla el pandeo alcanzado por la lámina termoplástica, durante su ciclo de calentamiento en el horno. Sin embargo, además de la optimización de la altura de la fotocelda, el tiempo del ciclo del horno debe programarse con una cantidad de segundos un poco mayor a la determinada por la fotocelda. Esta cantidad servirá como un segundo factor de seguridad, ya que si por alguna razón el mecanismo de la fotocelda falla, automáticamente al cumplirse la cantidad de tiempo programado para el ciclo del horno, el carro sujetador de la lámina termoplástica saldrá del horno.

La programación del tiempo para el ciclo del horno únicamente se utiliza en la fabricación de pocas piezas (1-10 unidades), o sea para corridas cortas, o cuando el material tiene un rango amplio de temperatura de moldeo, y la pieza es fácil de moldear.

Para la optimización del ciclo del horno se utilizaron cuatro láminas de polietileno de alta densidad, se empezó con una altura de fotocelda de 17.2 cm y se optimizó con 19.3 cm. Con la fotocelda ya optimizada, el ciclo del horno tenía un rango de temperatura entre 140 y 150 segundos, por lo que el tiempo de seguridad se programó en 200 segundos.

No.2 Ciclo de formado

El ciclo de formado, se define como el ciclo total, por lo tanto este dato depende de todos los demás tiempos en el ciclo. Al concluir este tiempo, el ciclo automático de la máquina se da por terminado.

No.3 Placa superior baja

La programación de este tiempo le indica a la máquina cúando se quiere que el contra molde baje. La optimización de esta secuencia se hace con un ciclo en seco, y depende del tiempo en que la placa inferior logra subir. En este caso el tiempo se optimizó en 2 segundos.

No.4 Placa superior sube

Como ya se indicó anteriormente, el contra molde sirve únicamente para terminar de formar un sello de vacío y para darle solidez y detalle a ciertas partes. Por lo tanto, cuando el plástico ha alcanzado un estado de rigidez, el contra molde ya no es de utilidad en la etapa del formado, por lo que para poder acelerar el enfriamiento de la pieza, se programa el ciclo para que la placa superior suba a los 425 segundos. Esto permite que el aire de los ventiladores y del medio ambiente tengan un contacto directo con la pieza y consecuentemente acelerar el ciclo de enfriamiento.

No.5 Placa inferior sube

La placa inferior, o sea el molde hembra, se programa para que suba un segundo después que la lámina ha salido del horno. Al igual que con la programación de la placa superior, la optimización de esta secuencia se hace con un ciclo en seco, y depende de la coordinación que se quiera alcanzar en el moldeo. En este caso específico se pretende lograr una buena distribución del material a través de la pieza, por medio del vacío del molde hembra. Por lo tanto, el molde hembra debe llegar primero en la secuencia y, aproximadamente, un segundo más tarde el contra molde.

No.6 Placa inferior baja

La placa inferior baja al final del ciclo de formado. La placa inferior sirve durante todo el ciclo de enfriamiento para mantener la forma de la pieza. Inclusive después de sacar la pieza de la máquina es recomendable tener en esqueleto de apoyo con la forma de la pieza para que ahí termine de alcanzar sus dimensiones finales. La pieza no alcanza sus dimensiones finales, sino hasta algunas horas después, este período de tiempo depende del tipo de material y de su calibre.

No.7 Vacío enciende

El vacío se enciende cinco décimas de segundo antes que la placa inferior empiece a subir. Esto se debe a que durante el movimiento de la placa inferior hacia la lámina termoplástica se crea una bolsa de aire entre el molde y la lámina. El vacío en una secuencia prematura ayuda a evacuar dicha masa de aire, que de lo contrario no tendría por donde escapar y que, por lo tanto, causaría un rompimiento de la lámina termoplástica. Cuando el molde hembra hace contacto con la lámina termoplástica se crea un sello, el cual permite que el vacío actúe para distribuir parcialmente el material dentro de la cavidad. Cuando se alcanza la distribución requerida, entra en la secuencia el contra molde, el cual termina de hacer el sello, le da más solidez al fondo de la canaleta y más detalle a las venas.

El vacío continúa ejerciendo una fuerza sobre la pieza durante 100 segundos. Esto se hace con el objeto de utilizar el vacío para ayudar a mantener la pieza en su lugar y lograr un mejor moldeo.

No.8 Vacío se apaga

El vacío se programa para que se apague cuando se considera que la pieza ha alcanzado un estado rígido en el cual ya no sufrirá cambios en su forma. En este caso específico, el período es bastante prolongado (100 seg.) ya que el polietileno de alta densidad enfría muy lentamente.

No.9/No.10 Expulsión por aire, placa inferior encendido/apagado

La expulsión por aire se logra por medio de la inyección de aire a través de los orificios de ventilación que existen en el molde hembra. La presión de aire libera o expulsa la pieza de la presión que pudieran estar ejerciendo las cavidades del molde sobre la pieza. Esto se programa en la secuencia 10 segundos antes que se termine el ciclo total o sea que empieza a los 630 segundos y termina a los 640 segundos.

No.11/No.12 Ventiladores se encienden/apagan

Los ventiladores tienen como función ayudar en el enfriamiento de la pieza moldeada. Estos se programan para que se enciendan a los 15 segundos de haber iniciado el ciclo de moldeo y para que se apaguen al final del mismo.

C. <u>Optimización del ciclo de calentamiento</u>

1. Malla

Para mejorar el control del pandeo de la lámina, se coloca una malla entre una sección del banco inferior de resistencias del horno y la lámina

termoplástica. Esta malla tiene como objetivo bloquear parcialmente el calor entre las resistencias y la lámina termoplástica, en un área al centro del horno de aproximadamente 60 * 40 cm. Esto logra que el pandeo máximo requerido por la lámina, se alcance durante un período mayor de tiempo, permitiendo así que el resto del material se caliente adecuadamente.

2. Bancos de resistencias

Como se mencionó anteriormente, todo el horno está dividido en seis zonas individuales de calentamiento, tres secciones en la parte superior y tres secciones en la parte inferior. Estas zonas se controlan por medio de controladores de porcentaje de tiempo. Por lo general en el moldeo de láminas de polietileno de alta densidad de este espesor (3 mm), estas zonas se programan como se detalla a continuación:

Zona superior			Zona inferior		
Derecha	Central	Izquierda	Derecha	Central	Izquierda
68%	66%	68%	62%	30%	62%

Los laterales derecho e izquierdo del horno en la parte superior se fijan a 68%, esta fijación es la más álta, ya que los laterales son los que disipan más calor, tanto por radiación como por convección. Siempre en la parte superior, al centro, se fijan las resistencias en 66%. Esta fijación es un poco menor al centro para que la lámina descienda a una velocidad más lenta y ,por ende, permanezca toda ella más tiempo dentro del horno.

Los laterales derecho e izquierdo del horno en la parte inferior se fijan a 62%, esta fijación es menor a la de los laterales superiores, ya que conforme la lámina se calienta, ésta se pandea y desciende. Al descender, la superficie de la lámina estará mucho más cerca de las resistencias inferiores que de las superiores, por lo que se requiere de una menor temperatura para que el estiramiento en sus partes laterales no sea prematuro y de este modo afecte el calentamiento en conjunto de toda la lámina. En la parte inferior al centro, se fijan las resistencias en 30%. Esta zona se mantiene bastante fría, ya que es la sección del horno que estará más cerca de la lámina a medida que ésta se va calentando y descendiendo en el horno. Esta zona se debe ajustar de tal manera que su temperatura sea suficiente para permitir el calentamiento adecuado de la parte central de la lámina, pero sin llegar a crear un estiramiento prematuro al centro de la lámina. Como ya se mencionó anteriormente, al centro de esta zona se coloca una malla, la cual ayuda a controlar la temperatura al centro de la misma. Se hace necesario la utilización de la malla, ya que no existen más subdivisiones en los bancos de resistencias que nos proporcionen un mejor control del calentamiento de la lámina.

3. Fotocelda

La fotocelda se prefijó a una distancia de 17.2 cm, con base en experiencias previas que se han tenido con el moldeo de polietielno de alta densidad de estas dimensiones. Al terminar el ciclo de moldeo, con este calentamiento se obtuvo una pieza final con una altura total de 13.5 cm, lo cual indica que la lámina se encontraba demasiado dura y por consiguiente

fría cuando se moldeó, y por esta razón la pieza no alcanzó la altura requerida. Se procedió a bajar la fotocelda utilizando intervalos pequeños, y permitir así un mayor tiempo de calentamiento de la lámina. A medida que esto se hizo, se fue incrementando la altura de la pieza hasta alcanzar la medida deseada de 18.5 cm.

El ajuste de la fotocelda y su receptor requiere de un tiempo bastante prolongado, alrededor de 30 minutos, por lo que su utilización sólo se justifica cuando se hacen corridas de más de 10 piezas y se esté utilizando un material con un rango de temperatura de formado muy limitado, tal y como lo es el polietileno de alta densidad. En la tabla No.4.2, se puede observar que los tiempos del ciclo de calentamiento, durante la optimización del ciclo, son bastante similares a los del ciclo ya optimizado; sin embargo las diferencias en las alturas de las piezas son bastante considerables (5 cms). Esto nos indica que el rango de formado para el polietileno de alta densidad es bastante limitado.

Una vez se ha optimizado el ciclo del horno, es corregido cualquier defecto que pudiera haber existido en el molde y se han optimizado los parámetros de la estación de formado, se procede a fabricar toda la producción requerida. A pesar de que aparentemente se tienen todos los parámetros del moldeo controlados, es necesario revisar periódicamente las dimensiones de las piezas conforme se fabrican, para poder controlar a tiempo cambios en las condiciones del moldeo o del calentamiento.

D. Moldeo

Antes de empezar el moldeo es necesario revisar los orificios de vacío para evacuar cualquiera que estuviera obstruido. Debido al tamaño tan pequeño de dichos orificios estos se obstruyen a menudo con cualquier basura que pudiera haber existido en el molde durante el proceso de instalación.

Antes de cada moldeo es necesario limpiar adecuadamente cada lámina termoplástica que se va a utilizar. Esto es esencial, ya que cualquier suciedad que exista sobre la superficie de la misma se impregnará permanentemente en la pieza moldeada.

Instalado el molde, con un ciclo de moldeo y calentamiento optimizado con base en las primeras piezas que se van moldeando, se procede a moldear la producción completa.

A continuación se presenta una tabla en donde se observan los datos más importantes obtenidos en el moldeo.

En donde:

- No. de moldeo; se refiere al número de pieza moldeada en su secuencia correspondiente.

- T1; se refiere a la temperatura de referencia en el horno al momento de ingresar la lámina termoplástica.

- T2; se refiere a la temperatura de referencia en el horno al momento de

terminar el ciclo de calentamiento de la lámina termoplástica. Tanto la temperatura T1 como la T2 se tomaron a un costado del horno, al centro de ambos bancos de resistencias de calentamiento por medio de un termómetro de reloj con un rango de temperatura de 10-260ºC y un vástago de 210 mm de largo. Dichas temperaturas se utilizan únicamente para registrar un cambio y no como una temperatura real promedio del horno existente durante el ciclo de calentamiento.

- t; se refiere al tiempo que permaneció la lámina en el horno, el cual depende del tiempo que la lámina tome en romper el haz de de la fotocelda.

- D1; distancia, desde un punto de referencia, hasta el emisor de la fotocelda.

- D2; distancia, desde un punto de referencia, hasta el receptor de la fotocelda.

- Altura, que se refiere a la altura total alcanzada por la canaleta en cada moldeo.

- Espesor(1), que se refiere al espesor promedio de ambos faldones de la canaleta. Se tomó medidas del espesor de cada faldón de la canaleta. Dichas medidas se hicieron cada centímetro a lo largo de todo el faldón.

- Espesor(2), que se refiere al espesor promedio de ambas secciones del fondo de la canaleta. Para obtener esta medida, se tomó medidas del espe-

sor de cada sección del fondo de la canaleta. Dichas medidas se hicieron cada centímetro a lo largo de todo el recorrido del fondo.

Todas las medidas anteriores de distancia se hicieron por medio de un calibrador vernier.

Tabla No.4.2

No. de Moldeo	T1 (ºC)	T2 (ºC)	t (s)	D1 (cm)	D2 (cm)	Altura (cm)	Espesor(1) (mm)	Espesor (2) (mm)
1	190	180	144.2	17.5	17.2	13.5	--	--
2	190	180	147.5	18.0	17.7	14.8	--	--
3	190	185	149.1	18.5	18.2	16.0	--	--
4	190	185	150.3	19.0	18.7	17.3	--	--
5	190	185	151.4	19.5	19.2	18.5	2.02	1.90
6	190	180	151.4	19.5	19.2	18.5	2.05	2.01
7	190	185	156.0	19.5	19.2	18.4	2.12	2.11
8	190	180	149.9	19.5	19.2	18.5	2.05	2.20
9	190	180	157.3	19.5	19.2	18.5	2.09	2.12
10	190	185	153.3	19.5	19.2	18.4	2.12	2.12
11	190	180	153.2	19.5	19.2	18.5	2.12	2.12
12	190	180	150.4	19.5	19.2	18.5	2.09	2.08
13	190	180	159.0	19.5	19.2	18.5	2.09	2.08
14	190	180	159.0	19.5	19.2	18.4	2.12	2.10
15	190	180	156.9	19.5	19.2	18.5	2.12	2.11
16	190	180	160.8	19.5	19.2	18.4	2.09	2.10
17	190	180	156.4	19.5	19.2	18.5	2.09	2.10
18	190	180	163.9	19.5	19.2	18.5	2.12	2.11
19	190	180	155.8	19.5	19.2	18.5	2.12	2.10
20	190	180	156.1	19.5	19.2	18.5	2.09	2.10
21	190	180	156.3	19.5	19.2	18.4	2.10	2.08
22	190	180	158.9	19.5	19.2	18.4	2.14	2.12
23	190	180	157.5	19.5	19.2	18.5	2.13	2.12
24	190	180	159.1	19.5	19.2	18.4	2.10	2.09
25	190	180	159.1	19.5	19.2	18.5	2.09	2.10

Como se puede observar de la tabla anterior, existe una estrecha relación entre la altura alcanzada por la pieza y las diferentes distancias registradas para la fotocelda (ver figura 4.1), o sea que la altura de la pieza aumenta a medida que aumenta la distancia de la fotocelda. También se puede observar que la altura de la pieza permanece constante a una distancia constante de fotocelda siempre y cuando todas las demás variables, que pudieran influir en un cambio de altura en la pieza, permanezcan constantes. Además se puede observar que el tiempo total que la lámina termoplástica permanece en el horno, no tiene ninguna relación con la altura total alcanzada por la pieza (ver figura 4.2). Esta variación de tiempos se debe a que el horno está parcialmente abierto, por lo que está expuesto constantemente a las variaciones de temperaturas y corrientes de aire que pudieran darse a sus alrededores durante todo el ciclo de calentamiento.

La fotocelda detecta la misma distancia de pandeo en la lámina termoplástica para cada moldeo, por lo que no se depende de un conocimiento preciso de la temperatura de la lámina , ni de un tiempo exacto para poder realizar efectivamente cada moldeo. En corridas de producción largas, es necesario controlar del ajuste de la distancia de la fotocelda cada cierto tiempo, ya que debido al constante movimiento de la máquina, pueden surgir desajustes de la misma.

Como se puede observar de la tabulación, existen variaciones de 1mm en algunas de las alturas reportadas, lo cual equivale a un 0.54% de la altura total. Debido al tipo de artículo, estas diferencias no se consideran signi-

Distancia de Fotocelda vrs. Altura de la pieza

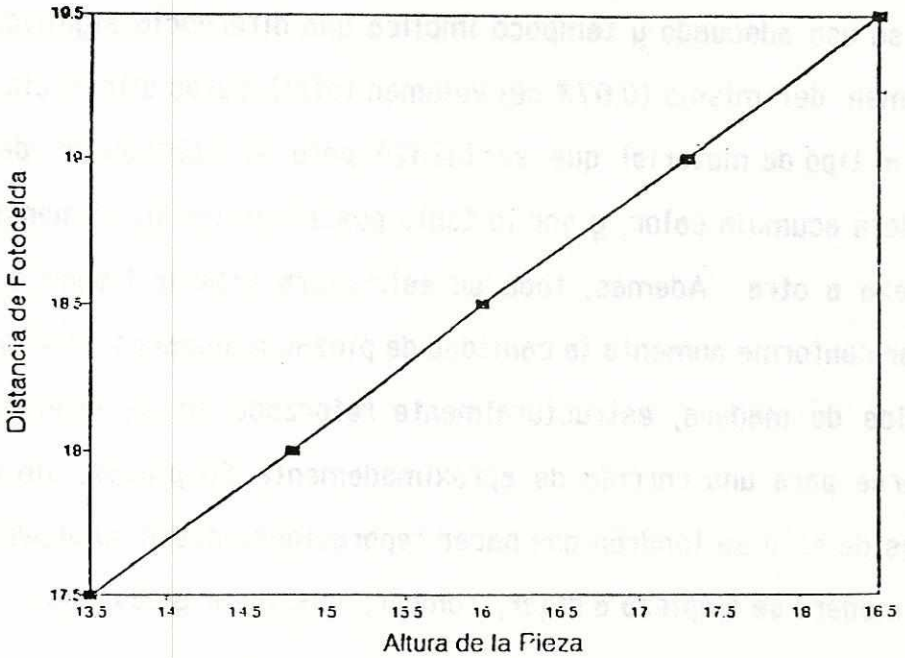

Figura 4.1

Altura de la pieza vrs. Tiempo total en el horno

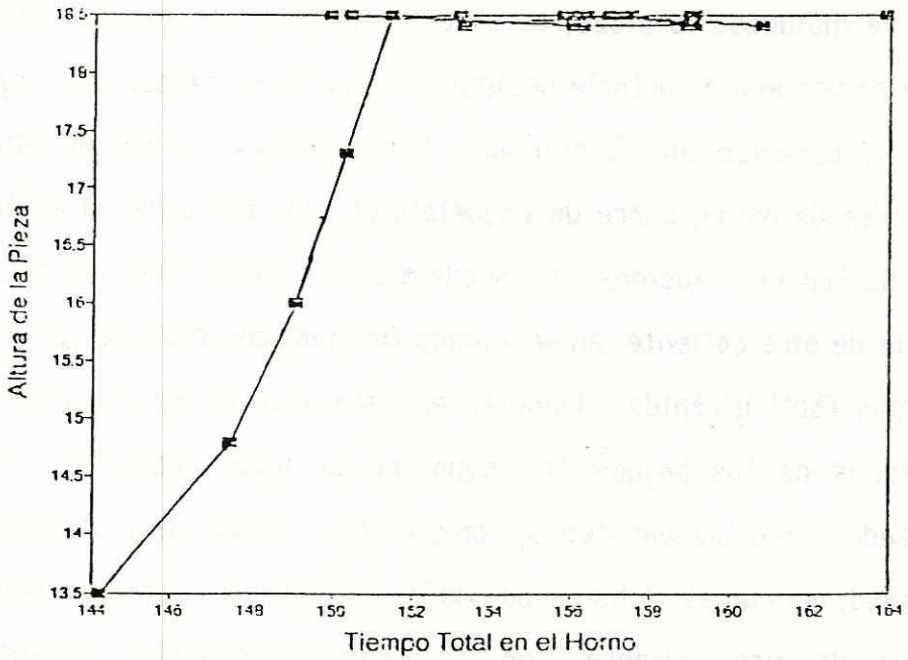

Figura 4.2

ficativas, ya que no se requiere de gran precisión en sus medidas para lograr su uso adecuado y tampoco implica una diferencia significativa en el volumen del mismo (0.67% del volumen total). Estas diferencias surgen debido al tipo de material que se utilizó para la fabricación del molde. La madera acumula calor, y por lo tanto pueden variar las dimensiones de una pieza a otra. Además, toda su estructura interna tiende a ceder y cambiar conforme aumenta la cantidad de piezas moldeadas. Por lo general un molde de madera, estructuralmente reforzado en su interior, puede utilizarse para una corrida de aproximadamente 50 piezas, sin embargo despues de esto se tendrán que hacer reparaciones sobre su superficie, ya que la madera se empieza a rajar, romper, desclavar y despegar.

E. Acabados

Ya moldeada la pieza, ésta se transfiere a la sección de acabados, donde se procede a cortarle cualquier material en exceso que haya servido para su sujeción en el moldeo. Estos cortes se hacen con simples caladoras de mano, sobre un esqueleto con la forma del artículo, el cual sirve de soporte. Además se procede a unir las canaletas por medio de una pistola de aire caliente, en secciones funcionales, para que su instalación sea más fácil y rápida. También en esta sección se procede a unir los bocatubos de las bajadas de agua, en el lugar requerido. Los tubos utilizados para los bocatubos, también son hechos de polietileno de alta densidad, los cuales se hacen de una lámina lisa unida simplemente con una pistola de aire caliente, con el diámetro requerido. El material de desperdicio se vende a otra empresa.

F. Guía de problemas

A pesar del cuidado que se tenga para eliminar aquellos elementos del proceso que interfieren con la producción de piezas de buena calidad, los problemas aún surgen durante la puesta en marcha de cualquier producción normal de termoformado. A continuación se identifican algunos problemas que ocurren a menudo, sus posibles causas y se sugieren cursos de acción apropiados para corregir o eliminar el problema. Esta guía puede ser de mucha utilidad para identificar los posibles problemas en el termoformado, cuando aun no se cuenta con una gran experiencia en el ramo.(2)

PROBLEMA	POSIBLES CAUSAS	SOLUCIONES SUGERIDAS
Pérdida de detalle al formar	- Lámina termoplástica fría	- Incrementar temperatura de resistencias o incrementar el tiempo del ciclo de calentamiento
	- Caida del nivel de presión del formado	- Revisar las razones que ocasionen una caída de presión o de vacío
	- Orificios de ventilación tapados	- Limpiar orificios de ventilación
Formado con detalles sobre marcados	- Lámina termoplástica sobre marcada	- Reducir el nivel de calentamiento de las resistencias
	- Excesivo nivel de presión	- Reducir el nivel de presión de la fuerza de formado

PROBLEMA	POSIBLES CAUSAS	SOLUCIONES SUGERIDAS
Adelgazamiento excesivo del plástico durante el formado	- Lámina termoplástica sobre calentada	- Revisar y ajustar el nivel de temperatura de las resistencia
	- Utilización de la técnica más sencilla de termoformado sin ayuda de un tapón macho	- Mejorar el método de termoformado, utilizando un tapón macho o contra molde
	- Intentar razones de estiramiento más profundas de lo que la técnica del proceso permite	- Utilizar un molde macho y un contorno o pestaña tibio
	- Espesor de lámina termoplástica insuficiente	- Utilizar una lámina de un mayor espesor
Pequeñas burbujas	- Calentamiento demasiado rápido	- Bajar temperatura de calentamiento - Incrementar la distancia entre la fuente de calentamiento y la lámina
	- Humedad excesiva	- Presecar lámina - Precalentar lámina - Calentar lámina por ambos lados
	- Calentamiento disparejo	- Revisar fuente de calentamiento
Formado incompleto, definición pobre	- Lámina demasiado fría	- Calentar lámina más tiempo - Subir temperatura de resistencias - Utilizar más resistencias

PROBLEMA	POSIBLES CAUSAS	SOLUCIONES SUGERIDAS
		- Si el problema está localizado, revisar banco de resistencias
	- Marco sujetador de lámina frío, antes de colocar lámina	- Precalentar marco
	- El vacío, no se está aplicando lo suficientemente rápido	- Utilizar más orificios de vacío - Tanque de almacenamiento o bomba demasiado pequeña - Línea de vacío o válvulas demasiado pequeñas - Demasiadas vueltas en la línea de vacío - Fugas de vacío
	- Insuficiente vacío	- Revisar obstrucciones en orificios de vacío - Incrementar el número de orificios de vacío - Incrementar el diametro de los orificios de vacío - Revisar sellos de vacío
	- Presión aplicada demasiado baja	- Incrementar presión de aire - Utilizar un tapón macho
- Lámina rasgada	- Superficie de lámina demasiado caliente	- Disminuir el ciclo de calentamiento - Bajar temperatura de resistencias

PROBLEMA	POSIBLES CAUSAS	SOLUCIONES SUGERIDAS
Encogimiento después del formado. Distorsión. Partes combas	- Tiempo en el molde demasiado corto	- Incrementar el tiempo del ciclo de enfriamiento
	- Pobre distribución del material en las paredes de la pieza	- Utilizar pre-estiramiento o asistencia de tapón macho - Calibre de lámina fuera de especificaciones - Orificios de vacío en el lugar equivocado
	- Diseño pobre del molde	- Incrementar el área de los orificios de vacío - Orificios de vacío tapados
	- Diseño pobre de la pieza	- Areas grandes y lisas deben incluir costillas/corrugado - Coronar áreas con radios grandes
	- Parte fue removida del molde demasiado rápido	- Incrementar ciclo de enfriamiento
	- Parte fue formada en frío	- Incrementar temperatura de la lámina - Incrementar el área de los orificios de vacío y la velocidad en el formado
Arrugas	- Lámina muy caliente	- Disminuir el ciclo de calentamiento - Incrementar la distancia entre las resistencias y la lámina - Disminuir la temperatura de las resistencias
	- Insuficiente vacío	- Revisar el sistema de vacío - Aumentar número de orificios

PROBLEMA	POSIBLES CAUSAS	SOLUCIONES SUGERIDAS
	- Excesiva razón de estiramiento	- Rediseñar molde
	- Diseño de molde muy pobre	- Utilizar un tapón o anillo de asistencia - Utilizar molde hembra en vez de molde macho - Incrementar radios y ángulos - En un molde de varias cavidades, distanciarlas más - Aumentar velocidad de penetración del tapón o del molde durante el moldeo
Pequeñas bombitas en la pieza	- Lámina demasiado caliente	- Reducir ciclo de calentamiento - Reducir temperatura de resistencias
	- Orificios de vacío demasiado grandes	- Tapar orificios actuales y hacer orificios más pequeños
Pandeo excesivo de la lámina en el calentamiento	- Lámina demasiado caliente	- Reducir ciclo calentamiento - Reducir temperatura de resistencias
	- Indice de fluidez muy alto	- Utilizar una lámina con un índice de fluidez más bajo
	- Area de lámina muy grande	- Reducir temperatura de la lámina al centro - Utilizar bandas contra pandeo

PROBLEMA	POSIBLES CAUSAS	SOLUCIONES SUGERIDAS
Burbuaja pre-estirada no uniforme	- Lámina descalibrada	- Cambiar proveedor
	- Calentamiento disparejo	- Revisar eficiencia de resistencias
	- Corrientes de aire periódicas	- Cerrar área de formado en su totalidad
	- Presión de aire dispareja	- Revisar flujo de aire
Esquinas demasiado delgadas	- Técnica de formado incorrecta	- Intentar la asistencia de tapón macho
	- Lámina demasiado delgada	- Utilizar lámina de un calibre más grueso
	- Variación de temperatura en la lámina	- Revisar la distribución del material - Intentar el calentamiento cubriendo con malla ciertas áreas del horno - Incrementar la velocidad del ciclo de moldeo
	- Material incorrecto	- Utilizar una resina más dura - Utilizar una resina más elástica
Piezas se pegan al molde	- Temperatura de la pieza demasiado alta	- Incrementar el ciclo de enfriamiento - Bajar temperatura del molde - Reducir el tiempo del ciclo de calentamiento

PROBLEMA	POSIBLES CAUSAS	SOLUCIONES SUGERIDAS
	- Angulo de desmoldeo en el molde macho inadecuado	- Retrabajar en el molde para obtener un mayor ángulo de desmoldeo - Utilizar un molde hembra
	- Pieza se pega en un área específica	- Temperatura dispareja en el molde - Temperatura de la lámina dispareja antes de ser formada - Orificios de vacío inadecuados - Lubricar
	- Encogimiento excesivo	- Utilizar un molde hembra
Lámina se rasga mientras se está formando	- Diseño del molde	- Incrementar los radios de las esquinas
	- Lámina demasiado caliente	- Disminuir temperatura de la lámina - Precalentar lámina y luego llevarla a su temperatura de formado muy lentamente - El espesor de la lámina puede no ser uniforme
	- Lámina demasiado fría	- Incrementar el tiempo de calentamiento - Pre-calentar lámina
	- Material inadecuado	- Profundidad de moldeo es excesivo para este tipo de material - Cambiar técnica de formado

PROBLEMA	POSIBLES CAUSAS	SOLUCIONES SUGERIDAS
	- Condiciones de formado inadecuadas	- Disminuir velocidad de penetración del tapón - Aumentar velocidad de inflado - Aumentar velocidad de evacuación
Lámina se safa del marco sujetador	- Marco sujetador sobre calentado	- No sobre calentar marco sujetador
	- Orillas del molde se encuentran muy cerca al marco sujetador	- Aumentar el tamaño de la lámina, o sea la distancia entre la orilla del molde y el marco sujetador
	- Pieza extremadamente profunda	- Aplicar calor adicional a la lámina termoplástica para mejorar el estiramiento
Mala distribución del material	- Pandeo inadecuado de la lámina	- Montar el molde en la placa superior - Utilizar bandas de pandeo - Incrementar la velocidad de moldeo
	- Variación en el espesor de la lámina	- Contactar al proveedor
	- Partes frías o calientes	- Revisar resistencias - Bloquear calentamiento con malla
	- Corrientes de aire	- Cerrar área de moldeo

PROBLEMA	POSIBLES CAUSAS	SOLUCIONES SUGERIDAS
	- Pandeo excesivo	- Reducir la temperatura la lámina - Usar resina más elástica - Bloquear calentamiento con malla
	- Lámina se safa de marco sujetador	- Lámina fría - Incrementar el área de la lámina que el marco sujeta - Incrementar presión del marco sujetador - Calentar marco sujetador antes de colocar lámina

G. Análisis económico

1. Costos de fabricación de canaleta de polietileno:

Se requiere de la fabricación de 130 mts lineales de canaleta, lo cual equivale a 84 canaletas de 1.55 mts de largo.

a. Material:

Tamaño de lámina utilizada: 187.96 cm * 248.96 cm * 0.32 cm

Volumen: 14,971.84 cm

Costo del material: ¢1.30/cm

Costo de lámina: Q194.63

Peso de canaleta: 2326.12 g

b. Costo de operar máquina:

Costo hora máquina: Q73.00/h (incluye energía eléctrica y mano de obra)

Tiempo del ciclo de moldeo: 18 min

Número de ciclos de moldeo realizados: 25

Tiempo total de ciclos de moldeo: 7.5 h

Costo de operar máquina: Q547.5

Tiempo de instalación del molde: 8 h (2 personas)

Costo hora hombre: Q4.25/h

Costo de instalación de molde: Q68.00

Costo total de operar máquina: Q615.50

c. Costo de molde:

Costo de materiales: Q830.00

Costo mano de obra: Q680.00

Costo total de molde: Q1510.00

d. Balance de materiales:

Total de láminas idealmente requeridas: 21 (0% de optimización)

Total de láminas usadas: 25

Peso total de láminas moldeadas: 355,581.22 g

Peso total de 84 canaletas: 195,394.08 g

Peso total de material reprocesable: 160,187.14 g

Porcentaje de material reprocesable: 45.05%

Eficiencia en el uso total de láminas: 84%

e. Costo de materiales:

Costo total de láminas moldeadas: Q4865.75

Costo de material reprocesable: ¢0.22/g

Costo total del material reprocesable: Q352.41

Costo total del material utilizado: Q4513.34 (costo más alto)

f. Costo de acabados:

Tiempo total de acabados: 56 h

Costo total de acabados: Q238.00

g. Costo unitario:

Costo total del material utilizado: Q4513.34

Costo total de operar máquina: Q615.50

Costo total de molde: Q1510.00

Costo total de acabados: Q238.00

Costo total de manufactura: Q6876.84

Costo por unidad: Q81.87/unidad

Costo por metro lineal: Q52.82/mt lineal

Tiempo de vida útil aproximado: Más de 10 años

Para propósitos de comparación se calculará el costo de fabricación de una canaleta de lámina galvanizada y lámina esmaltada, ambos materiales comunmente utilizados para este tipo de artículo.

2. Costo de fabricación de canaleta de lámina galvanizada:

Perímetro de canaleta: 77.5 cm

Tamaño de lámina galvanizada: 91.44 cm * 243.84 cm calibre 24

Costo de lámina galvanizada: Q55.60

Costo de lámina galvanizada por canaleta: Q55.60

Costo de dobleces: Q5.00/doblez

Número de dobleces por canaleta: 6

Costo total de dobleces: Q30.00

Costo de cortes: Q5.00/corte

Número de cortes por canaleta: 1

Costo total de cortes: Q5.00

Costo total de canaleta: Q90.60

Costo por metro lineal: Q37.13/mt lineal

Tiempo de vida útil: Aproximadamente 6 años

3. Costo de fabricación de canaleta de lámina esmaltada:

Perímetro de canaleta: 77.5 cm

Tamaño de lámina esmaltada: 91.44 cm * 243.84 cm calibre 24

Costo de lámina esmaltada: Q97.54

Costo de lámina esmaltada por canaleta: Q97.54

Costo de dobleces: Q5.00/doblez

Número de dobleces por canaleta: 6

Costo total de dobleces: Q30.00

Costo de cortes: Q5.00/corte

Número de cortes por canaleta: 1

Costo total de cortes: Q5.00

Costo total de canaleta: Q132.54

Costo por metro lineal: Q54.36/mt lineal

Tiempo de vida útil: Más de 10 años

En la siguiente tabla se comparan las ventajas y desventajas de las canaletas, según su material de fabricación:

Tabla 4.2

Propiedad	Canaleta polietileno alta densidad	Canaleta de lámina galvanizada	Canaleta de lámina esmaltada
Costo mt/lineal	Q52.82	Q37.13	Q54.36
Vida útil	+10 años	≈6 años	+10 años
Ventajas	Mayor aislamiento de calor	Velocidad de instalación	Velocidad de instalación
	Muy liviana	Muy liviana	Muy liviana
	Apariencia	Bajo costo	Apariencia
	Mayor aislamiento de ruido		
Desventajas	Precio	Se corroe	Precio
	Velocidad de Instalación	Ruido excesivo durante lluvias	Ruido excesivo durante lluvias
		Transmite calor excesivo	Transmite calor excesivo
		Apariencia	

Comparando los costos de los materiales para la fabricación de la canaleta analizados anteriormente, se obtienen los siguientes resultados:

- Canaleta de lámina galvanizada: La canaleta de lámina galvanizada es un 29.70% más barata que la canaleta de lámina de polietileno de alta densi-

dad. Sin embargo esta diferencia en precio no es significativa cuando se considera que el tiempo de vida útil de la canaleta de polietileno puede llegar a ser del doble o más.

- Canaleta de lámina esmaltada: La canaleta de lámina esmaltada es un 2.92% más cara que la canaleta de lámina de polietileno de alta densidad. Dicha diferencia en precio no es significativa, ya que ambos materiales tienen cualidades de durabilidad bastante altas, y por lo tanto será necesario evaluar cada caso en específico para determinar la mejor opción a utilizar.

H. Comparación del proceso de termoformado con otros procesos

El termoformado es una tecnología competitiva. El termoformado de láminas de calibres gruesos compite con el roto moldeo, el moldeo por inyección, el moldeo por soplado, procesos con fibra de vidrio y formado con lámina de metal. En algunas áreas, tales como cajas para equipo, cajas y contenedores, el termoformado compite directamente con el moldeo por inyección, moldeo por soplado y roto moldeo. Las características comparativas de estos procesos se presentan en la tabla No.4.3 . (9)

Generalmente, cuando se compara con estos procesos, el termoformado se caracteriza por tener costos más altos de material plástico y pérdidas en desperdicio, y costos más bajos en equipo y moldes.

Por lo general, independientemente del artículo que se esté consideran-

do, el termoformado es más económico para la producción de relativamente pocas unidades, debido a su bajo costo en equipo y moldes. El moldeo por inyección es más económico para velocidades altas de producción debido a sus bajos costos de material y mano de obra.

Tabla No.4.3

Características generales comparativos de procesos plásticos

Característica	Termoformado	Moldeo por Inyección	Moldeo por Soplado	Roto moldeo
Materia prima	Lámina extruida	Grano	Grano	Polvo
Costo de materiales	Costo incluye proceso de extrusión	Estandard	Estandard	Precio incluye molienda
Tipos de materiales	Bajo contenido de hule	Todo tipo	Restringido	Muy restringido
Reutilización del desperdicio	Económicamente requerido	Inmediato	Inmediato	Materiales termicamente no sensibles
Color	Láminas de color	Concentrados	Concentrado	Mezcla seca
Método de sujetar la pieza	Mecánico Vacío	Hidráulico Mecánico	Mecánico	Mecánico
Método de enfriamiento	Corrientes de aire	Circulación refrigerante	Circulación refrigerante	Inmersión en agua

Característica	Termoformado	Moldeo por Inyección	Moldeo por Soplado	Roto moldeo
Forma de liberar la pieza	Aire	Pines Expulsores	Aire	Manual/ aire
Vida útil de moldes, 1000 piezas	10-100	1000-100,000	100-1000	10
Presión de operación, atm.	-1 - 5	100 - 1000	5 - 50	0
Temperatura de operación, ºC	20 - 200	150 - 300	100 - 250	200 - 350
Parte del ciclo controlable	Calentamiento/enfriamiento	Enfriamiento	Soplado	Calentamiento
Métodos de llenado	Manual	Automático	Automático	Manual
Remoción de pieza	Manual	Automático	Automático	Manual
Concentración de esfuerzos	Alto	Muy alto	Alto	Muy poco
Acabado superficial	Bueno	Excelente	Muy bueno	Bueno
Costo moldes	El más bajo	El más alto	Alto	Alto
Desperdicio	25-50%	8%	15%	11%

En el caso específico de la canaleta, su fabricación puede realizarse únicamente por medio del método de moldeo por termoformado o por inyección, debido a la geometría del mismo. Sin embargo para realizarse por medio del método de moldeo por inyección, es preciso realizar una gran inversión en moldes y maquinaria debido al gran tamaño de la pieza que quiere producirse. La máquina de inyección necesaria tendría que tener una capacidad de 1400 Kgf/cm, la cual tiene un costo aproximado de cinco millones y medio de quetzales, y el molde tendría un costo de aproximadamente un millón y medio de quetzales. Lo anterior evidencia que la factibilidad de realizar tal pieza, por medio del moldeo por inyección, requiere de que se tenga una gran infraestructura y una gran capacidad económica y por lo mismo un gran mercado para poder amortizar la inversión con un producto de esta naturaleza.

En el proceso de termoformado sin embargo, la inversión que se requiere en maquinaria es de alrededor de setecientos cincuenta mil quetzales, y el costo de un molde de aluminio con enfriamiento para disminuir costos y tiempo de producción tiene un costo aproximado de sesenta mil quetzales. El costo del equipo y aparelaje necesario para producir la pieza por medio del moldeo por termoformado equivale a un 11.6% del costo del equipo necesario para realizar el mismo proyecto por medio del moldeo por inyección.

V. CONCLUSIONES

- El proceso de termoformado es un proceso muy versátil debido a la gran rapidez y facilidad con la cual se pueden construir los moldes. La manufactura de los mismos requiere de aproximadamente un 10% del tiempo total que se requiere para la fabricación de un molde para otros procesos como el moldeo por inyección y soplado. Además su costo es dé aproximadamente un 6.7% del costo de los moldes de estos otros procesos.

- El proceso de moldeo por termoformado puede considerarse como una alternativa de manufactura cuando se requiere de volúmenes bajos de producción (menos de 100,000 piezas), siempre y cuando el diseño de la pieza permita su producción por medio de este proceso. Además puede utilizarse para la fabricación de piezas prototipo, las cuales se fabricarán en línea por medio de otros procesos más productivos, según el volumen de producción requerido, tales como inyección y soplado.

- Es de suma importancia controlar los espesores de pared de la pieza para que el producto tenga un adecuado tiempo de vida útil. Este control se logra mediante un adecuado diseño del molde y un adecuado control de los parámetros de optimización del proceso.

- Cuando las corridas de producción son cortas (menos de 500 piezas), pueden utilizarse moldes de madera satisfactoriamente, como el caso que ocupa esta tésis. Cuando se requiere de producciones más largas y de mucha precisión, tanto en las medidas de la pieza como en la reproducción

de las mismas, es necesario utilizar moldes de aluminio o una aleación de aluminio con sistemas de enfriamiento más eficientes.

- El polietileno de alta densidad, el material escogido para la fabricación de la pieza en este caso, es un material difícil de termoformar, ya que tiene una temperatura de formado sumamente corta y la lámina se pandea rápidamente durante su calentamiento. Además es un material que no retiene sus propiedades físicas originales, por lo que se puede termoformar una sola vez, lo cual implica un mayor desperdicio durante la fase de optimización del ciclo. Sin embargo, a pesar de sus desventajas de procesabilidad, en este caso en específico, ha sido el que mejor se adecua a los parámetros de diseño requeridos, tales como alta resistencia al impacto, un alto tiempo de vida útil, resistencia a la absorción de agua y bajo peso.

- La eficiencia del uso del material (número de láminas), el parámetro económico más importante a considerarse en este tipo de proceso, fue del 84%, lo cual se considera un porcentaje de eficiencia bastante aceptable; sin embargo este pudiera mejorar, si se lograran hacer corridas de producción más largas de la realizada en este caso en específico.

- El reciclaje del material se considera un parámetro de suma importancia, ya que en este caso en específico, la cantidad de material a reciclarse es de un 45% del total del material utilizado. Por lo tanto, para que el termoformado sea un proceso de alta rentabilidad, se considera indispensable tener una alternativa de manufactura la cual utilice todo el material sobrante de dicho proceso.

VII. BIBLIOGRAFIA

1. Flinn, R. y P. Trojan. Materiales de Ingeniería y sus Aplicaciones.
   1979 Boston (U.S.A.), Houghton Mifflin & Co. 205 pp.

2. Florian, J. Practical Thermoforming Principles and Aplications.
   1987 New York, Marcel Dekker, Inc. 371 pp.

3. Gruenwald, G. Thermoforming a Plastics Processing Guide. Pennsylvania
   1987 (U.S.A), Technomic Publishing Company, Inc. 222 pp.

4. Modern Plastics Enciclopedia. New York, McGraw-Hill
   1990 679 pp.

5. Mulcahy, Ch. y E. Berns. " Thermoforming Takes on More Engineering
   1990 Applications". Plastics Engineering. (U.S.A.) 1/90: 21-25.

6. Plastic Engineering Handbook. Society of the Plastic Industry. 4a. ed.
   1976 New York, Van Nostrand Reinhold. 780 pp.

7. Rogers, J. "Engineered Thermoforming". Plastics Technology.
   1989 (U.S.A.) 8/89: 1-4.

8. Schwartz, S. and S. Goodman. Plastics Materials & Processes.
   1982 New York, Van Nostrand Reinhold Company Inc. 965 pp.

9. Serrano, C. "El Proceso de Termoformado Amplia su Campo de
   Aplicación". Tecnología del Plástico (Colombia); No.43: 5-6

10. Throne, J. Thermoforming. New York, Hanser Publishers.
    1987 298 pp.

11. Anónimo. "Thermoforming Lustran ABS, Lustrex Polystyrene,and Cadon
    Sin fecha Engineering Thermoplastics". Monsanto Bulletin #6547.
    37 pp.

VI. RECOMENDACIONES

- En el proceso de termoformado, la temperatura en el horno debe permanecer constante durante el calentamiento del material plástico, con el objeto de que las dimensiones de la pieza resultante no difieran de una corrida a otra.

- Si se desea tener un mejor control del calentamiento de la lámina plástica, es necesario tener un horno subdividido en áreas más pequeñas, lo cual puede lograrse utilizando en el mismo resistencias más pequeñas, las cuales pueden manejarse a través de un control electrónico programable.

- El proceso de termoformado es muy versátil y tiene un campo de aplicación muy amplio; sin embargo el tipo de maquinaria que se tenga disponible será el factor limitante para determinar el tipo de material que se pueda transformar y el tipo y cantidad de piezas que se puedan producir.

- El diseño de la pieza a termoformarse debe estudiarse cuidadosamente, ya que este es un factor limitante en la determinación, tanto del tipo de material termoplástico requerido como el espesor del mismo, lo cual tendrá un impacto directo en el costo de la pieza.

- En termoformado, los moldes de madera se utilizan para corridas cortas y para fabricar piezas que no requieren precisión. Cuando se requiere de corridas largas y de piezas de precisión se recomienda utilizar moldes metálicos que permitan reproducciones precisas y alta productividad.

A P E N D Í C E A

ALTURA EN CANALETA (Cms)	ESPESOR DE PARED DE CANALETAS SEGUN NUMERO DE MOLDEO (mm)																				
	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
1.5	2.72	2.71	2.74	2.73	2.73	2.70	2.69	2.72	2.71	2.74	2.71	2.68	2.69	2.72	2.73	2.70	2.72	2.75	2.74	2.70	2.72
2.5	2.57	2.56	2.60	2.56	2,59	2.56	2.53	2.58	2.55	2.60	2.57	2.52	2.55	2.58	2.59	2.52	2.57	2.61	2.60	2.55	2.58
3.5	2.44	2.45	2.47	2.43	2.46	2.44	2.43	2.47	2.45	2.46	2.46	2.43	2.45	2.45	2.46	2.43	2.45	2.47	2.49	2.44	2.43
4.5	2.21	2.22	2.24	2.19	2.23	2.20	2.19	2.24	2.11	2.22	2.24	2.21	2.20	2.22	2.25	2.19	2.22	2.25	2.25	2.20	2.23
5.5	2.11	2.11	2.13	2.10	2.12	2.08	2.09	2.13	2.09	2.11	2.12	2.10	2.09	2.13	2.12	2.10	2.08	2.13	2.12	2.10	2.09
6.5	2.02	2.03	2.02	1.82	2.01	1.99	1.98	2.00	1.98	2.02	2.02	1.97	1.98	2.02	2.01	1.97	2.00	2.03	2.02	1.97	2.00
7.5	1.81	1.79	1.94	1.47	1.93	1.89	1.90	1.92	1.88	1.94	1.91	1.90	1.89	1.93	1.91	1.91	1.90	1.95	1.94	1.92	1.89
8.5	1.70	1.72	1.84	1.64	1.84	1.80	1.81	1.83	1.81	1.84	1.82	1.80	1.81	1.84	1.82	1.82	1.81	1.86	1.85	1.83	1.81
9.5	1.61	1.65	1.74	1.72	1.76	1.74	1.75	1.77	1.73	1.75	1.78	1.76	1.75	1.75	1.76	1.74	1.75	1.76	1.79	1.75	1.73
10.5	1.56	1.64	1.81	1.80	1.84	1.82	1.80	1.83	1.83	1.83	1.83	1.81	1.82	1.85	1.82	1.81	1.82	1.85	1.84	1.80	1.80
11.5	1.69	1.82	1.93	2.00	1.93	1.90	1.91	1.92	1.89	1.92	1.93	1.90	1.91	1.94	1.91	1.90	1.89	1.95	1.91	1.90	1.89
12.5	1.81	1.91	2.01	2.10	2.02	1.98	1.99	2.03	1.97	2.03	2.02	2.00	1.99	2.03	2.02	1.98	1.97	2.04	2.05	1.99	1.96
13.5	1.91	2.00	2.11	2.20	2.12	2.09	2.08	2.12	2.09	2.11	2.12	2.10	2.10	2.12	2.11	2.09	2.08	2.12	2.13	2.10	2.09
14.5	1.91	2.01	2.12	2.20	2.12	2.08	2.08	2.13	2.09	2.10	2.11	2.09	2.10	2.12	2.10	2.10	2.08	2.13	2.12	2.10	2.09
15.5	1.91	2.02	2.11	2.20	2.11	2.09	2.08	2.12	2.09	2.10	2.10	2.10	2.11	2.11	2.11	2.09	2.09	2.13	2.12	2.09	2.10
16.5	1.90	2.02	2.11	2.20	2.12	2.09	2.09	2.13	2.08	2.11	2.10	2.10	2.11	2.11	2.11	2.09	2.09	2.12	2.11	2.09	2.10
17.5	1.90	2.00	2.11	2.20	2.11	2.09	2.09	2.13	2.08	2.10	2.11	2.09	2.10	2.11	2.10	2.10	2.08	2.13	2.11	2.09	2.09
18.5	1.90	2.01	2.12	2.20	2.12	2.09	2.09	2.12	2.08	2.10	2.12	2.09	2.11	2.11	2.10	2.10	2.08	2.12	2.11	2.09	2.10