



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Análisis térmico en un molde para una maceta elaborada  
por medio del proceso de rotomoldeo**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO MECÁNICO**

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

**JESÚS RAFAEL GONZÁLEZ PARRA**



**DIRECTOR DE TESIS:  
M. EN I. JESÚS VICENTE GONZÁLEZ SOSA  
2013**



Dedico este trabajo:

A mis padres:

María Dolores Parra García y Rafael González Bautista

A mi hermana:

Mariana Itzel González Parra

A ti:

Ana América Ramírez Guerra

A mis tíos:

Martín Parra, Jesús Parra, Senorina Parra, Jorge Parra,  
Inés González, María Elena González, Rosario González,  
Álvaro Torres

A mis primos:

Gerardo, Eduardo, Irma, Jorge, Toño, Jimena, Kóchill,  
Estefany, Amaury, Mónica, Nancy, Marisol.

A mis amigos:

Manuel Ramírez Álvarez,, Rodrigo Rojo, Cesar Apolinar,  
Rodrigo Navarrete, Víctor, Kimena, Ricardo, Marcelo

A Jesús Vicente, Rodolfo Toledo, Ángel Rojas por su apoyo en  
cada etapa de mi formación universitaria.



## **Planteamiento del Problema.**

Al realizar un análisis energético de la etapa de calentamiento dentro del proceso de rotomoldeo se observa que existe una enorme cantidad de pérdidas energéticas esto se puede observar cuando se utiliza el horno de convección, lo cual disminuye la eficiencia del proceso. Dado lo anterior es posible utilizar otro mecanismo de transferencia de calor que ofrezca una mayor eficiencia. Tal es el caso de la conducción.

## **Hipótesis.**

Si la etapa de calentamiento para el proceso de rotomoldeo se realizará por medio de resistencias eléctricas colocadas directamente sobre la superficie del molde ¿Qué ventajas ofrecería sobre el calentamiento en un horno de convección?

## **Objetivo.**

Establecer un análisis con fundamentos térmicos en un molde para el proceso de rotomoldeo, el cual en base a los parámetros empleados en el equipo necesario durante la etapa de calentamiento se obtendrá la energía requerida para la realización de dicho proceso.

## **Alcances.**

Proporcionar un análisis térmico empleando el análisis de sistemas concentrados para la etapa de calentamiento, en conjunto con la comparación económica entre los medios que se emplean en el calentamiento de los moldes en el proceso.

# Índice

Introducción

## Capítulo 1

Proceso de Rotomoldeo.....	1
1.1 Descripción del proceso .....	2
1.2 Ventajas y desventajas del rotomoldeo.....	5
1.3 Materiales usados en el proceso de rotomoldeo.....	7
1.4 Aplicaciones del proceso de rotomoldeo.....	9

## Capítulo 2

Moldes Para Proceso Rotacional.....	12
2.1 Tipos de moldes.....	12
2.2 Elementos fundamentales de los moldes.....	16
2.3 Maquinaria y Parámetros controlables en los moldes.....	23

## Capítulo 3

Método de Análisis en los moldes rotacionales.....	32
3.1 Análisis existente en los moldes de rotomoldeo.....	32
3.2 Ventajas y desventajas del análisis.....	38
3.3 Comparativa de análisis.....	39

## Capítulo 4

Análisis en un molde para maceta.....	41
4.1 Condiciones de análisis.....	41
4.2 Análisis térmico del molde.....	45
4.3 Análisis térmico del horno.....	49
4.4 Balance energético del horno.....	52
4.5 Balance energético del quemador.....	54
4.6 Resumen de Resultados.....	56
Conclusiones.....	62
Referencias.....	64

## Introducción

El proceso de rotomoldeo es un proceso de manufactura económico que utiliza resinas en polvo o líquidas para producir artículos plásticos huecos y sin costura, de cualquier geometría y tamaño. Es mayoritariamente más económico que los procesos convencionales por los cuales serían producidos artículos huecos como los envases plásticos producidos por el proceso de soplado además de ser capaz de producir piezas de gran tamaño que por otros métodos de manufactura resultaría muy complejo realizar como es el caso de grandes contenedores.

En el presente trabajo se describe de forma general el desarrollo de un proyecto denominado *“Análisis térmico en un molde para una maceta elaborada por medio del proceso de rotomoldeo”* en donde se plantea un sistema común de rotomoldeo el cual por medio de su análisis, con base en los parámetros de control reportados en la literatura se obtendrán las pérdidas energéticas del proceso en la etapa de calentamiento y se realizará una comparación con otros procesos de conformado y diferentes mecanismos de transferencia de calor.

En general el trabajo esta compuesto por 5 capítulos, iniciando con una descripción del proceso así como sus aplicaciones y ventajas, útil para aquellas personas que no estén relacionadas con el tema a tratar.

En el siguiente capítulo se desarrollara la parte de los moldes empleados en el proceso, los moldes son una parte muy importante ya que además de determinar la forma del producto, son responsables de que la pieza tenga la transferencia de calor adecuada, además de su diseño para soportar las condiciones a las que se ven sometidos, en éste capítulo se describirá los diversos materiales empleados en su manufactura, los componentes principales de éstos y los parámetros controlables en los moldes.

A continuación se dará una explicación acerca de los diferentes tipos de máquinas y se detallará un poco sobre las etapas del proceso, así como una introducción a los métodos de análisis empleados actualmente en la industria para realizar el proceso de rotomoldeo.

En la penultima sección se realizará el análisis térmico del proceso para la elaboración de un producto, se obtendrán las perdidas energéticas que involucra cada sección del proceso, únicamente en la etapa de calentamiento debido a que ésta etapa se puede realizar por medio de otros mecanismos de transferencia de calor no solo el mayormente empleado que es la convección, además de que esta información no es de fácil acceso en la industria.

Para finalizar se presentarán las conclusiones obtenidas del presente trabajo.

# Capítulo 1

## Proceso de Rotomoldeo

El rotomoldeo es un proceso simple que consta de cuatro etapas el cual emplea un molde cerrado de paredes delgadas y fabricado con materiales que posean una alta capacidad de transferencia de calor. En el molde se requiere una entrada para la alimentación de materia prima, también debe ser diseñado para separarse en secciones y de ésta forma retirar las piezas solidificadas en su interior.

Para él proceso, se coloca una cantidad conocida de plástico pulverizado en el interior del molde, que rota simultáneamente en dos ejes perpendiculares; con la rotación lenta del molde, el material se adhiere a las paredes calientes y cubre toda la superficie homogéneamente. Este principio de operación hace que el material pueda adquirir una diversidad importante de configuraciones para formar piezas de diferentes tamaños, y queda distribuido en toda la superficie con un espesor uniforme.

Es necesario comprender que el rotomoldeo no hace uso de la fuerza centrífuga que lanzaría el material hacia las paredes del molde, ya que las velocidades de rotación son relativamente bajas, y el polímero comienza a mezclarse de manera regular, como ya se mencionó adhiriéndose a la pared del molde, por otro lado la relación de velocidad entre la rotación de los ejes se ha comprobado de manera experimental que es de 4:1 entre el eje mayor y menor, ya que esta relación permite la formación de una capa de espesor uniforme en la mayor parte de las formas moldeadas.



## 1.1 Descripción del Proceso

### Primera etapa

#### Llenado del molde.

Se introduce la cantidad necesaria de material plástico a procesar, que generalmente es un termoplástico en polvo finamente molido; sin embargo, también se pueden procesar dispersiones de termoplásticos en solventes no volátiles y algunas resinas termoestables. Debido a las características del proceso existe una pérdida mínima de materia prima por lo cual la cantidad de material introducido es el peso deseado de la pieza final. El material es depositado en el molde abierto, a temperatura ambiente en la mayoría de los casos y cubierto previamente en su interior con un agente desmoldante, Figura 1.1. Luego el molde es cerrado y llevado a un sistema de calentamiento.

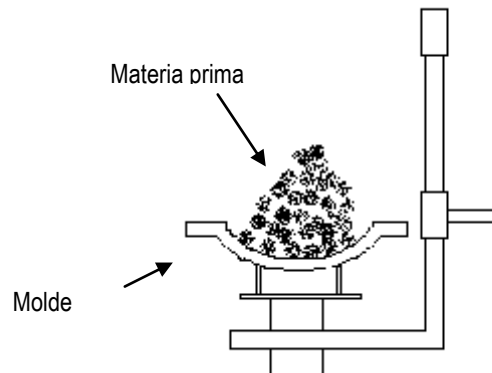


Figura.1.1.Llenado del molde

En la imagen anterior se muestra el llenado de la mitad de un molde con material polimerico siendo esta la primera etapa del proceso de rotomoldeo, posteriormente se añadirá la otra mitad del molde para llevarlo a la siguiente etapa del proceso.

### Segunda Etapa

#### Calentamiento del molde

Una vez preparado el molde, se somete a un flujo de calor y simultáneamente se hace rotar sobre dos ejes perpendiculares a fin de permitir que el material se vaya adhiriendo poco a poco a la pared interna, las partículas en el proceso de rotomoldeo no se funden solo se sinterizan\* en los puntos de contacto, hasta formar una red tridimensional porosa, Figura 1.2.

\* La sinterización es un proceso que une material sólido, y no implica que el material pase al estado líquido y luego se resolidifique.

La etapa de calentamiento del molde y la sinterización de las partículas toma normalmente entre 13 y 33 minutos, para un molde de aluminio<sup>[1]</sup>, para otro tipo de material es posible que se tengan etapas de una duración mayor. La duración de ésta etapa está directamente relacionada con el espesor de la pared en la pieza final, pues conforme el plástico se deposita sobre las paredes del molde, debido a su baja conductividad térmica, actúa como un aislante que disminuye la transferencia de calor hacia el material que todavía no se ha incorporado a las paredes. Además este proceso es importante ya que si la pieza no ha sido calentada lo suficiente no alcanzará sus propiedades mecánicas, y si esta mucho tiempo en el horno el polímero se degradará.

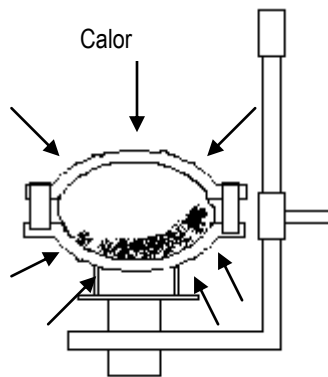


Figura.1.2. Calentamiento del molde

En la Figura 1.2 se muestra de forma ilustrativa la etapa de calentamiento del molde, el cual se somete a un flujo de calor mientras se mantiene rotando en sus 2 ejes para lograr así que el polímero se adhiera a la superficie y se deposite de manera adecuada en todas las regiones del interior del molde obteniendo así la forma deseada.

### Tercera Etapa

#### Enfriamiento del molde

Cuando todo el material plástico ha tomado la forma interna del molde, se procede a enfriarlo para que se endurezca y termine con las características buscadas, durante ésta etapa continúa la rotación, para garantizar uniformidad en la totalidad de la pieza, Figura 1.3. Como medio de enfriamiento es posible usar agua fría dispersada en gotas sobre la superficie del molde, una corriente de aire con alto nivel de humedad o aire frío.

Durante ésta etapa se adquieren las propiedades mecánicas del material y depende de la velocidad de enfriamiento ya que a una velocidad rápida de enfriamiento, las propiedades obtenidas varían completamente de las que se obtendrían al realizar un enfriamiento a una velocidad lenta, por ejemplo al enfriar de manera lenta se aumenta la dureza y reduce la resistencia al impacto de la pieza, un enfriamiento rápido conlleva a una pieza con mayor rigidez y menor dureza.

Además el enfriamiento debe ser tan rápido como sea posible sin provocar que las paredes del artículo se separen del molde debido al vacío provocado en el interior, causando la aparición de deformaciones. La rotación uniforme en ésta etapa del proceso es tan importante como durante el calentamiento, pues garantiza la existencia de tensiones internas, alabeo o deformaciones mínimas en los artículos. La etapa de enfriamiento es muy importante debido a que según las características químicas que posee el polímero se producen efectos sobre las propiedades físicas del producto, siendo este efecto nulo si se utilizan polímeros amorfos, y dando especial cuidado al uso de polímeros cristalinos ya que se debe producir la menor distorsión en los cristales.

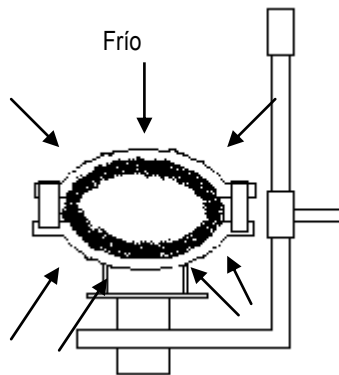


Figura.1.3. Enfriamiento del molde

En la figura anterior se muestra la etapa de enfriamiento del molde, la cual puede ser dejando enfriar a temperatura ambiente y de forma natural o aplicando aire frío, aire saturado, dispersiones de agua fría, para lograr la velocidad de enfriamiento necesaria y obtener así las propiedades mecánicas de la pieza.

## Cuarta etapa

### Vaciado del molde

Cuando la pieza se ha solidificado y enfriado hasta una temperatura a la cual sea manipulable, se procede a sacarla del molde y se puede iniciar una nueva producción. Ésta última etapa, aparentemente muy sencilla, puede llegar a requerir métodos de alta tecnología cuando las piezas fabricadas tienen diseños intrincados o son de gran tamaño, Figura 1.4.

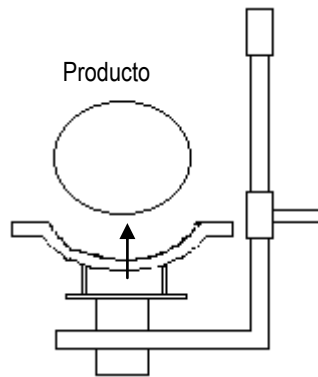


Figura.1.4. Vaciado del molde

El vaciado del molde se muestra de forma esquemática en la Figura 1.4 en ésta etapa del proceso se retira la pieza del molde, en ocasiones ésta acción puede ser muy complicada debido a la geometría del producto moldeado.

En general el rotomoldeo parece un proceso de manufactura sencillo, sin embargo, puede llegar a ser tan complejo como se requiera debido a la geometría y configuración del molde, las características de la pieza a fabricar, los materiales empleados. Aun así las etapas por las que debe pasar serán las mismas esto ha llevado a la generación de una variedad de máquinas de diferentes tamaños y formas, que llevan a cabo el proceso, desde equipos de gran tamaño hasta las más reducidas.

## 1.2 Ventajas y desventajas del rotomoldeo

El moldeo rotacional tiene cuatro ventajas básicas que lo diferencian de otras técnicas de procesamiento de plásticos:

1. Su capacidad de producir partes huecas de una pieza y de tamaño extremadamente grande.
2. Es un proceso de baja presión, el equipo y moldes requeridos son de costo relativamente bajo, lo que permite la producción de cantidades pequeñas de partes grandes.
3. En relación a su tamaño, las partes rotomoldeadas tienen paredes delgadas que permiten ahorros tanto en tiempos de producción como en costos de material.

4. Las paredes rotomoldeadas tienen niveles de esfuerzos residuales relativamente bajos en comparación con otros procesos para la producción de partes plásticas. Esto representa una ventaja porque con ello se mejora tanto la resistencia al impacto como la resistencia a agentes químicos. Estas dos propiedades son de gran importancia para almacenamiento de productos químicos.

El rotomoldeo es un proceso que resulta atractivo debido a que:

- ◆ Se puede manufacturar una pieza hueca sin líneas de soldadura o juntas
- ◆ El producto final está libre de esfuerzos residuales
- ◆ Los moldes son relativamente baratos y fáciles de manufacturar
- ◆ Permite la producción de cantidades pequeñas siendo económicamente viable
- ◆ No hay material de desperdicio ya que se emplea en fabricar la pieza
- ◆ Es posible fabricar productos multicapa
- ◆ Una sola máquina es capaz de moldear diferentes productos al mismo tiempo
- ◆ Es relativamente fácil la colocación de insertos y diseños gráficos en el molde

Las desventajas que llega a presentar el proceso, son las siguientes:

1. El tiempo de manufactura es muy largo, recordemos que el molde debe calentarse y después enfriarse mayoritariamente por convección.
2. Se debe realizar una buena elección de los materiales poliméricos.
3. Los costos del material son relativamente altos, debido a que debe estar en un polvo fino para el caso de usar polímeros sólidos.
4. Algunas características geométricas son muy difíciles de moldear.

En la siguiente tabla se muestra una comparación entre el moldeo por soplado, el termoformado y el moldeo rotacional.

Tabla 1.2.A

Se muestra una comparación entre diversos procesos de manufactura

Factor	Moldeo Soplado	Termoformado	Rotomoldeo
Volumen[cm <sup>3</sup> ]	10 <sup>1</sup> -10 <sup>6</sup>	5x10 <sup>1</sup> -5x10 <sup>6</sup>	10 <sup>1</sup> -10 <sup>8</sup>
Polímeros disponibles	Limitado	Amplio	Limitado
Material de alimentación	Pellets	Hoja	Líquido/polvo
Costo de preparación del material	Ninguno	Más del 100%	Alrededor del 100%
Fibras de refuerzo	Sí	Sí	Sí, pero complicado
Materiales para los moldes	Acero/aluminio	Aluminio	Acero/aluminio
Presión del Molde	<1 MPa	<0.3 MPa	<0.1 MPa
Costo del molde	Alto	Moderado	Moderado
Tolerancia del espesor de la pared	10%-20%	10%-20%	10%-20%
Uniformidad del espesor de pared	Tiende a ser no uniforme	Tiende a ser no uniforme	Alta posibilidad de uniformidad
Insertos	Factible	No	Sí
Orientación en la parte	Alta	Muy alta	Ninguna
Esfuerzos residuales	Moderados	Alto	Bajo
Detalle de la parte	Muy bueno	Bueno con presión	Adecuado
Diseños en el molde	Sí	Posible	Sí
Tiempo del ciclo	Rápido	Rápido	Lento
Trabajo intenso	No	Moderado	Sí

[1]

La Tabla 1.2 muestra una comparativa entre diferentes procesos de manufactura en la cual se pueden notar algunas ventajas y desventajas del proceso de rotomoldeo contra otros procesos de manufactura convencionales.

### 1.3 Materiales utilizados en el proceso de rotomoldeo

Se utilizan materiales tanto líquidos como sólidos, el material sólido es pulverizado y el tamaño preferido para las partículas de resina es de 35 mallas, mantenido dentro de límites muy estrechos. Sin embargo, los tamaños de malla comunes van de 16 a 50 mallas correspondiendo a tamaños de partícula de 1.9 y 0.3 mm. <sup>[6]</sup>

El uso de refuerzo de fibras de vidrio puede mejorar las propiedades físicas de lo moldeado. Se pueden emplear longitudes hasta de 6 mm, pero con fibras más cortas de 0.8 a 3 mm se favorecen cargas hasta de 10 a 15% adicional. El contenido de vidrio está limitado por la saliente de fibras desnudas de la superficie de las paredes interiores y/o puenteo a través de líneas o ángulos de superficie. Las arcillas y el asbesto también tienen uso limitado como rellenos y diluyentes de resina.

El polietileno es el material más utilizado en el rotomoldeo. Se usan todas las variedades de densidad, baja, media y alta, dependiendo de la aplicación. El polietileno se procesa con facilidad por el sistema de moldeo rotacional. Cuando el polietileno es de alta densidad y tiene enlaces reticulares posee mayor resistencia a las altas temperaturas y a otros medios ambientales adversos. El plastisol vinílico ocupa el segundo lugar entre los materiales más empleados para el moldeo rotacional. Por ser líquido, se puede alimentar en cantidades medidas automáticamente a los moldes vacíos. Es fácilmente procesable y se puede moldear con detalles superficiales complicados. Se usa en piezas que requieren de alguna flexibilidad.

Otros materiales utilizados en el moldeo rotacional son nylon, policarbonato, acetato butirato de celulosa, acetato de etileno vinílico, acetal, polipropileno, poliestireno, acrilonitrilo butadieno estireno (ABS). Algunos de estos materiales requieren mucho cuidado para efectuar un moldeo satisfactorio. Por ejemplo, el ABS y el estireno son menos satisfactorios que otros materiales para llenar secciones profundas y angostas.

El poliuretano en forma de líquido de dos partes es el plástico termofijo (termoestable, termoendurecible) más común para moldeo rotacional. También se emplean epóxicos y poliésteres.

En la Tabla 1.3 se muestran los materiales más comunes en el rotomoldeo.

Tabla 1.3 Materiales usados en el moldeo rotacional

Polímero	Porcentaje de Moldeo
LDPE	86
LLDPE	69
HDPE	33
Polipropileno	22
Nylon*	21
Policarbonato	20

\* Todos los tipos

[1]

En la tabla anterior se muestra un porcentaje de los materiales más empleados en la industria del rotomoldeo, estos materiales se ven limitados debido a las condiciones del proceso.

#### 1.4 Aplicaciones del proceso de rotomoldeo

La principal característica que presentan las piezas elaboradas a través del proceso de rotomoldeo es que son esencialmente huecas. Con la tecnología actual mejorada, es posible obtener piezas largas y angostas, pero las superficies del moldeo deben estar lo suficientemente apartadas para evitar punteo.

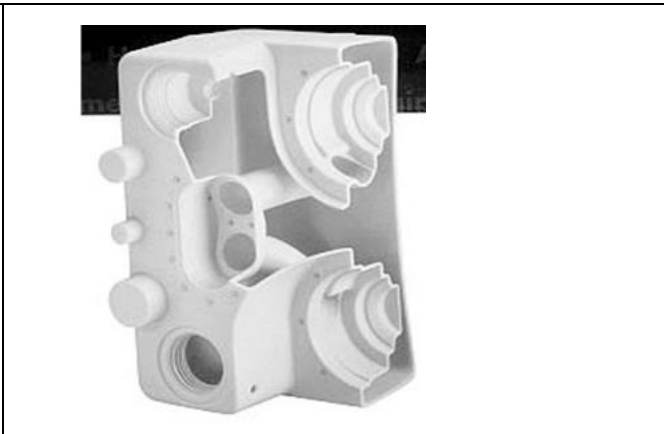
También es posible fabricar por medio de éste procedimiento aplicaciones de corte técnico o de alto desempeño físico, presentando geometrías extremadamente complejas, moldeados con roscas e insertos metálicos, diseñados por computadora para resistir distorsiones por presiones internas o con alta resistencia a fuertes impactos.

El campo de acción del rotomoldeo es el siguiente <sup>[5]</sup>:

- Recipientes para productos alimentarios y agrícolas
- Componentes de máquinas e instalaciones para agricultura:
- Fuentes energéticas, reciclados y servicios para la comunidad:
- Recipientes para el transporte y almacenamiento de diferentes materiales
- Instalaciones y servicios industriales
- Aplicaciones para industrias manufactureras
- Transportes y señalizaciones
- Náutica y puertos
- Juegos y artículos publicitarios

En la siguiente página se muestra una serie de productos manufacturados por rotomoldeo.





Todas las imágenes han sido tomadas de [2].

## Referencias

- [1] Crawford, Throne. *“Rotational Molding Technology”*, Plastic Design Library William Andrew Publishing 2002
- [2] Crawford, Kearns. *“Practical Guide to Rotational Moulding”*, Smithers Rapra Press 1998
- [5] <http://www.rotomachinery.com/content/view/28/39/lang,es/>
- [6] Alonso Grañena, Ángela. *“Proceso de diseño y fabricación de una luminaria por rotomoldeo”* Universidad de Zaragoza, Septiembre 2011

## Capítulo 2

### Moldes para proceso rotacional

Los moldes en el rotomoldeo son como una cáscara delgada diferentes a los empleados en la inyección de plásticos o en el soplado, debido a que no están sometidos a grandes presiones, además de que deben facilitar la transferencia de calor tanto durante la etapa de calentamiento como en la de enfriamiento, para ésto se debe manipular el espesor del molde logrando que posea las características mecánicas necesarias y al mismo tiempo permita una rápida transferencia de calor.

También se debe tener cuidado en la elección correcta del material con el cual esté constituido, dado que esto afectará el tiempo de permanencia en la etapa de calentamiento y enfriamiento, también el tamaño y la complejidad de la pieza a moldear son factores determinantes para la elaboración del molde.

#### 2.1 Tipos de moldes

Existen diferentes tipos de moldes que se emplean en la industria de rotomoldeo.

- A. Moldes de aluminio vaciado
- B. Moldes de lámina soldada
- C. Moldes electroformados
- D. Moldes maquinados
- E. Moldes formados por roció de metal

**A. Moldes de aluminio vaciado:** Los moldes con cavidades de aluminio vaciado son el tipo de molde más comúnmente usado en rotomoldeo cuando se busca alta calidad en las piezas a fabricar. Existen dos tipos de cavidades vaciadas: de yeso y de arena. Las cavidades vaciadas usando yeso son más caras, pero también de mejor calidad. Estas cavidades proporcionan mejor respetabilidad dimensional y detalles finos. Se pueden vaciar en espesores de pared tan delgados como 4.75 mm. Las cavidades vaciadas usando arena son más económicas, pero los vaciados son más porosos. El vaciado de arena no proporciona el detalle ni la repetibilidad de las dimensiones que si son posibles con las de yeso. Existen excepciones, pero los vaciados de arena tienen un espesor mínimo de pared de aproximadamente 6.35 mm.



Figura 2.1.A Molde Aluminio vaciado  
[1]

En la Figura 2.1.A se muestra la mitad de un molde de aluminio el cual es empleado por su alta transferencia de calor, se puede observar la cavidad formada así como la línea de partición y las sujeciones que llevará hacia el marco del molde siendo éstas las protuberancias inferiores.

**B. Moldes de lámina soldada:** Las cavidades fabricadas con lámina metálica son el segundo tipo de molde más común usado en rotomoldeo. Su mayor aplicación es en cavidades grandes de forma relativamente simple. Es difícil definir los costos relativos de una cavidad de lámina en comparación con una cavidad de aluminio vaciado. Por ejemplo, una cavidad para un tambor de 208 L puede ser hecha por vaciado o por lámina. Si se requieren varias cavidades, el vaciado sería la solución más económica. Si se requiere únicamente una cavidad, la lámina de metal sería más rápida y de menor costo. Los metales más comunes utilizados para la fabricación de este tipo de molde son el acero al carbono y acero inoxidable. El espesor de lámina de aceros al carbono e inoxidables utilizada para moldes de rotomoldeo, generalmente fluctúa entre 1.3 y 3.6 mm, siendo el espesor más común el de 2.0 mm. El espesor de lámina de aluminio varía de 2.0 a 6.4 mm.



Figura 2.1.B Molde de lámina  
[2]

La Figura 2.1.B muestra un molde de lámina empleado para la fabricación de recipientes contenedores, en esta imagen se observa con claridad los dispositivos de sujeción en el contorno del molde empleados para mantener unidas firmemente ambas secciones del molde.

**C. Moldes electroformados:** Las cavidades electroformadas son quizá las cavidades más costosas para usar en rotomoldeo. Las cavidades electroformadas son principalmente usadas para formas muy complicadas que requieren detalles muy finos en el acabado de la superficie y/o muescas profundas. Los materiales más comúnmente usados son níquel y cobre o mezclas de los dos. Las cavidades de cobre para moldear PVC son mejores si se les aplica una chapa de níquel. Algunas cavidades están hechas de cromo, o recubiertas con cromo. Su espesor está normalmente en el rango de 2.0 a 3.8 mm. Las cavidades electroformadas tienen la desventaja, al igual que las cavidades por vaciado, de requerir un patrón. El electroformado es un proceso excelente para hacer moldes de cavidades múltiples dimensionalmente precisas. Una de las ventajas del proceso de electroformado es su habilidad para producir cavidades con muescas muy profundas.

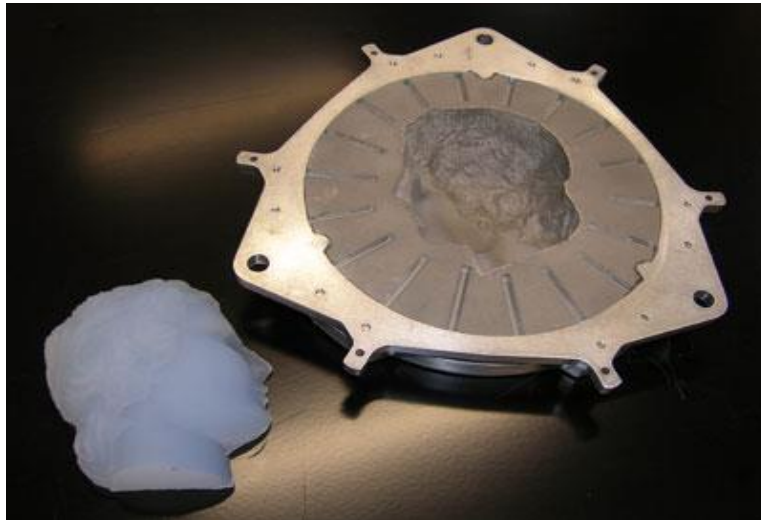


Figura 2.1.C Molde electroformado  
[3]

En la Figura 2.1.C se muestra una sección de un molde fabricado por el proceso de electroformado se observa que ambas secciones se fijarán por medio de tornillos para mantener las piezas en su correcta posición, también se observa como las regiones de sujeción se encuentran en la parte más lejana de la cavidad para interferir de forma mínima con la transferencia de calor en la pieza.

**D. Moldes maquinados:** Las cavidades maquinadas de acero al carbono, aluminio o acero inoxidable proporcionan el nivel más alto de precisión de los valores de moldes usados por rotomoldeadores. También son del tipo de cavidades más caro, excepto para formas simples y sencillas muy fáciles de maquinar. Al igual que los moldes fabricados, pueden ser entregadas rápidamente y no hay necesidad de esperar que se construya y apruebe un patrón. Los moldes maquinados pueden proporcionar el más alto nivel de pulido de superficies. También pueden ser texturizados, grabados, tratados con chorro de arena. La mayor desventaja de cavidades maquinadas es que son económicamente posibles únicamente para formas simples.

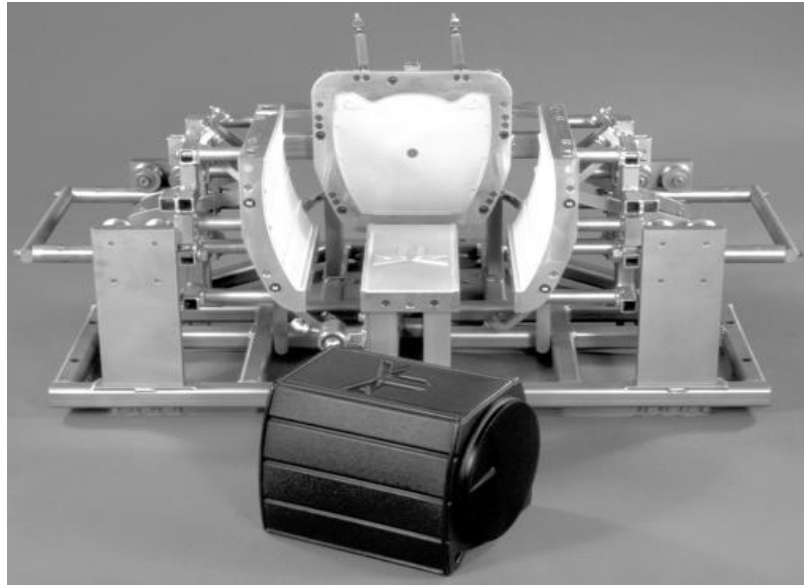


Figura 2.1.D Molde maquinado por CNC  
[1]

En la figura anterior se muestran las secciones de un molde, el cual ha sido maquinado por medio de máquinas de control numérico, se puede notar un mejor acabado en la superficie del molde, así como un ensamblaje preciso en cada uno de los elementos que lo componen.

## 2.2 Elementos fundamentales de los moldes

En rotomoldeo se refiere como molde o herramental, como en ocasiones se le llama, a una unidad completa. Todos los moldes llevan cuatro partes básicas:

- La cavidad
- La estructura de sujeción
- La placa de montaje
- Los mecanismos de cierre

Sin embargo en ocasiones también pueden llevar:

- Insertos
- Roscas
- Tubos de Ventilación

### Estructura de Sujeción

El montar cada mitad del molde en un marco permite que las fuerzas sean dirigidas hacia el marco y no hacia el molde, lo que conlleva a que el molde no se dañe sin embargo por mas sujeciones que tenga el molde y parezca estar firmemente colocado, cada sujeción representa un sumidero de calor durante el calentamiento y una fuente de calor durante el enfriamiento por lo tanto el número de sujeciones y el tamaño debe ser lo más pequeño posible, es por eso que en la mayoría de los casos los puntos de sujeción del molde se encuentran en los extremos de la línea de partición en donde una alteración del proceso no sería tan perjudicial para el producto moldeado. En la Figura 2.2 se muestra un molde sujeto a su marco.



Fig. 2.2 Marco sujeto a la mitad de un molde  
[1]

En la Figura 2.2 se muestra una sección de un molde montada a su respectivo marco, éste marco permite que todas las fuerzas generadas en la manipulación y en el montaje no afecten el molde evitando así deformaciones, además de que su interferencia en los procesos de transferencia de calor es casi nulo.

### Líneas de partición

La mayoría de los moldes se componen de dos partes pero si el diseño es intrincado es posible que el molde este dividido en tres o cuatro piezas, la interfaz que existe entre las secciones del molde se denomina como línea de partición, en diseños simples la línea de partición puede ser recta pero en otros como juguetes la línea de partición debe ser cuidadosamente distribuida a lo largo de la pieza, además el molde debe permanecer siempre unido de forma correcta, por lo que existen tres tipos de diseños comunes para conseguir esto.



### A. Pestañas de acoplamiento

En éste caso se añaden al molde unas pestañas de acoplamiento por medio de soldadura o se consideran al realizar la fundición del molde, las cuales definen la línea de partición como la formada por las mitades del molde, es importante que éstas pestañas de acoplamiento sean lo más delgadas posible ya que durante el proceso de calentamiento funcionarían como sumideros de calor.

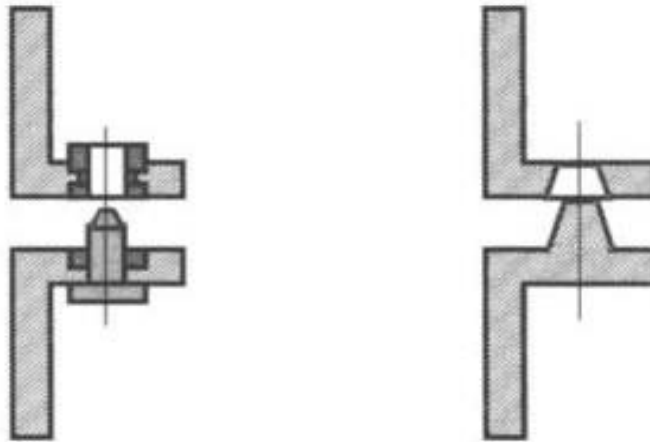


Figura.2.2.A Pestañas de acoplamiento  
[1]

En la Figura 2.2.A se muestran los tipos de pestañas de acoplamiento empleadas en los moldes de rotomoldeo, variando éstas en forma y costo de elaboración, éstos elementos no deben interferir con el proceso de transferencia de calor, por lo cual deben colocarse en regiones donde no se vea comprometida la transferencia hacia la pieza.

### B. Juntas

En la Figura 2.2.B (A) se muestra una junta en ángulo recto y en la figura 2.2.B (B) una junta con chaflán, la cual requiere menos mantenimiento pero es mas cara debido a que se obtiene por medio de un maquinado, si la línea de partición no fuese recta esta junta tendría que diseñarse dentro de la fundición del molde para posteriormente darle el maquinado necesario para que quede dentro de la tolerancia requerida, se debe tener cuidado en la cantidad de metal que se emplea ya que si es demasiada puede afectar el proceso tanto de calentamiento como de enfriamiento.

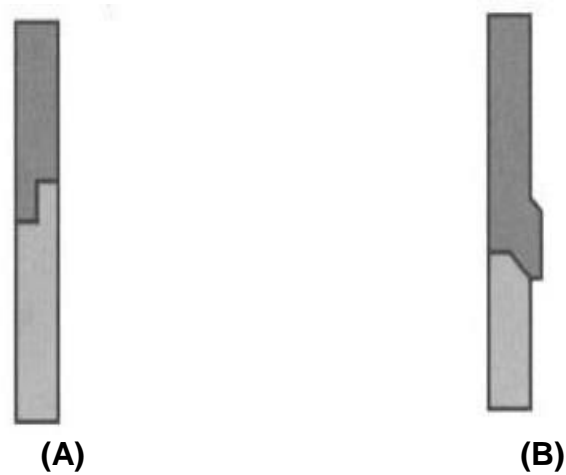


Figura.2.2.B Juntas de ángulo recto [1]

Las imágenes mostradas en la Figura 2.2.B corresponden al tipo de Línea de Partición por juntas, siendo la junta en ángulo recto y la del tipo junta con chaflán, ambas juntas permiten el cierre preciso del molde y la ubicación de cada una de sus secciones en el lugar indicado.

### C. Cóncavo- Convexo

Es la línea de partición más común, aunque también la más cara para manufacturar y dar mantenimiento, sin embargo, por su forma provee de la mayor precisión al cerrar el molde.

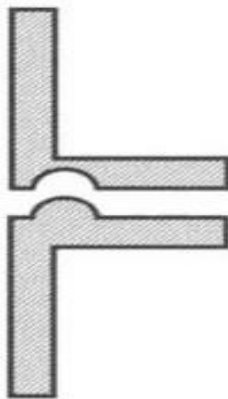


Figura.2.2.C Cóncavo-Convexo [1]

En la Figura anterior se muestra el tipo de Línea de Partición conformada por una sección cóncava y otra convexa, las cuales permiten el cierre preciso de las secciones de un molde de rotomoldeo.

## Mecanismos de Cierre

El molde debe ser cerrado para así minimizar la expansión térmica que pudiese sufrir, los mecanismos de cierre se montan al marco para evitar que se dañe la línea de partición, por un apriete excesivo de los mecanismos de cierre existen 2 tipos de mecanismos empleados con regularidad, el primero de ellos Figura 2.2.D aplica una fuerza de cierre para minimizar la distancia que separa a las mitades del molde a través de un mecanismo, el segundo Figura 2.2.E cierra las mitades del molde empleando un tornillo en J ajustable, en este caso los extremos del mecanismo de cierre están soldados al marco del molde.

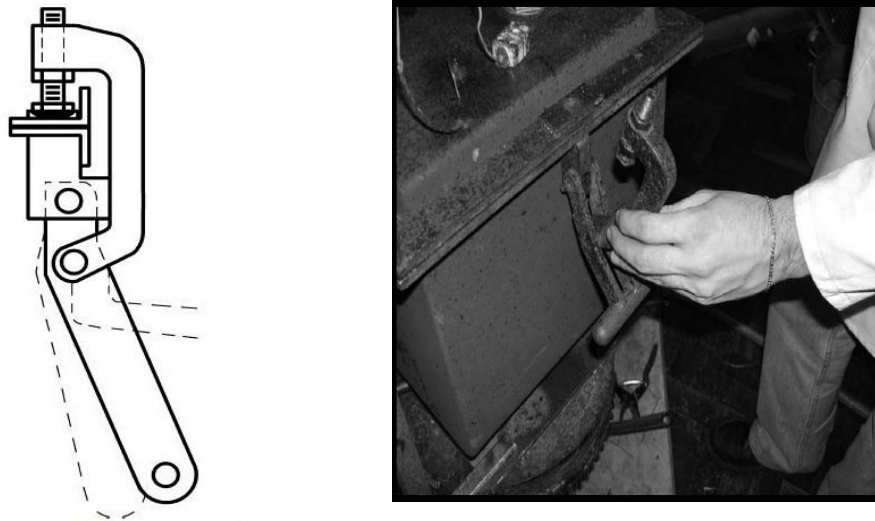


Figura 2.2.D Mecanismo de cierre [1] y [2]

En la Figura 2.2.D se muestra uno de los mecanismo de cierre empleado en el rotomoldeo éste mecanismo proporciona una fuerza de cierre obligando a que se minimice la distancia entre ambas partes del molde, también se observa en la imagen de la derecha su disposición en un molde.

En la siguiente Figura 2.2.E se observa el segundo tipo de mecanismo de cierre en ésta ocasión se trata de un mecanismo con tornillo en J el cual aplica un fuerza de cierre por medio de un resorte lo cual minimiza el daño que se podría ocasionar al molde por un exceso en la fuerza de cierre.

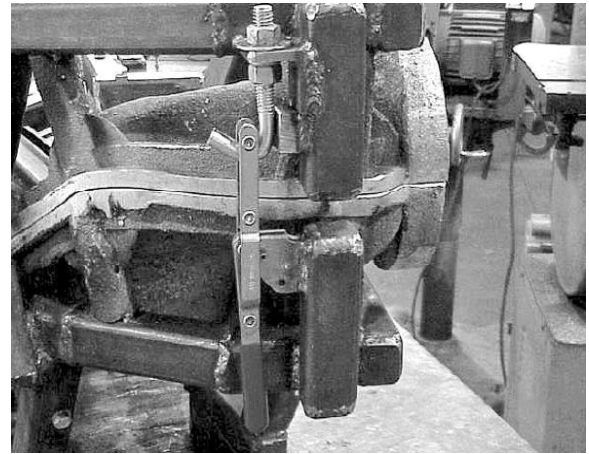
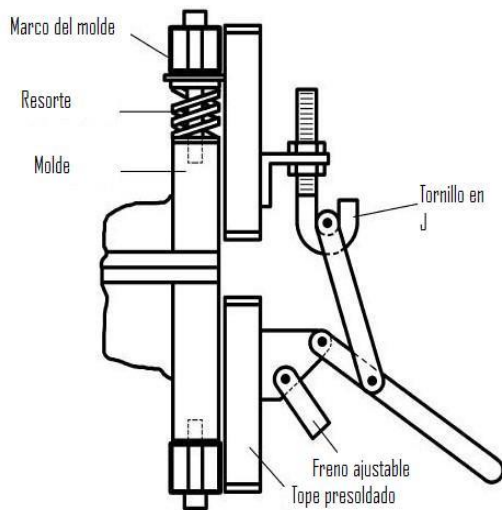


Figura 2.2.E Mecanismo de cierre con tornillo J ajustable [1] y [2]

## Insertos

Los insertos se fijan a la superficie del molde durante la etapa de llenado, el método para sujetarlos depende en gran medida de la función que estos vayan a cumplir, existen 2 tipos de insertos los plásticos y los metálicos. En la Figura 2.2.F se muestra un inserto para roscas.

### Insertos plásticos.

Se usan en una región específica de la pieza donde la tolerancia dimensional debe ser precisa como en conexiones de tubería arcos, tees y Yes, otro ejemplo sería en las roscas de los tinacos donde un elemento debe acoplarse con otro. Los insertos se fijan a la superficie del molde durante la etapa de llenado, se debe tener cuidado para que durante el proceso se minimice el daño térmico y la distorsión que pudiese sufrir el inserto, asegurando aun así que exista la temperatura suficiente para que la pieza pueda formarse.

### Insertos Metálicos

Éste tipo de insertos se clasifican en metales ferrosos y no ferrosos, de esto depende el método de sujeción que tendrán, los ferrosos se sujetan con imanes, mientras que los no ferrosos necesitan de medios mecánicos para mantenerlos en posición.

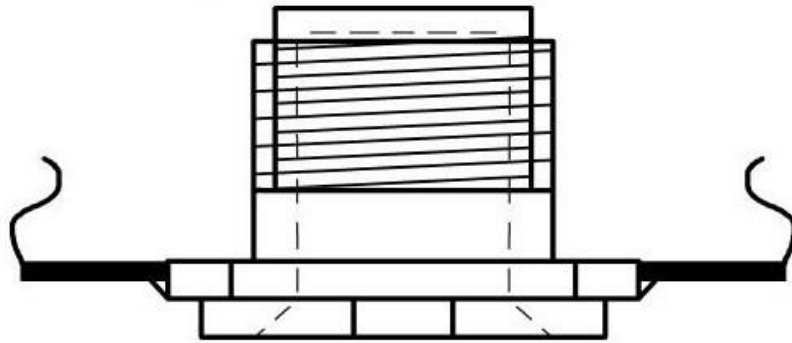


Figura 2.2.F Inserto metálico para la formación de roscas [1]

La Figura 2.2.F describe un inserto del tipo empleado en el rotomoldeo por medio del cual se forman roscas dentro de la pieza moldeada, permitiendo así su posterior ensamble con otro tipo de piezas, los insertos pueden ser de diferentes formas en función al propósito deseado.

### Roscas

El moldear roscas es un tanto difícil en el rotomoldeo, sin embargo, se ha logrado moldear roscas internas y externas, el diseño de las roscas internas es muy importante debido a que el flujo de polímero debe ser uniforme en la base de la rosca. Preferentemente la rosca debe ser de una longitud corta y tener un diámetro relativamente grande para facilitar la transferencia de calor. Los insertos empleados deben ser mayoritariamente metálicos, aunque se recomienda que para roscas con una longitud grande se empleen insertos plásticos.

### Tubo de Ventilación

El tubo de ventilación permite mantener la presión atmosférica en el interior del molde durante el proceso de calentamiento y enfriamiento ya que el aire puede salir de la cavidad del molde cuando éste se expande al calentarse y fácilmente es capaz de reingresar al molde durante el enfriamiento, si el molde estuviese completamente cerrado podría llegar a forzar al polímero a través de la línea de partición o deformar las paredes del molde debido al incremento en la presión del aire.

Sin embargo, el tubo de ventilación puede llegar a rechazarse, ya que si el molde estuviese completamente sellado la presión generada en el interior del molde empujaría al polímero contra las paredes de este, durante el enfriamiento el polímero permanecería pegado a la pared del molde lo que facilitaría la transferencia de calor.

La fuerza generada en el interior del molde está en función de la presión y el área sobre la cual se proyecta por lo tanto para moldes de piezas con gran área superficial como contenedores, ésta fuerza es grande pero para moldes de pequeñas dimensiones la fuerza generada es más pequeña y ésta podría manejarse colocando los mecanismos de cierre adecuados y el espesor requerido en la pared del molde para evitar distorsiones, si se logra esto entonces se podrá disfrutar de los beneficios de un molde completamente sellado.

### 2.3 Maquinaria y Parámetros controlables en los moldes

Las máquinas de rotomoldeo son en su mayoría estaciones de trabajo en las cuales se tienen las 4 etapas del proceso en el mismo lugar, debido a esto son aparatos grandes aunque en la actualidad su tamaño tiende a reducirse hasta tener máquinas completamente automatizadas y de pequeñas dimensiones.

En la industria las máquinas se dividen básicamente en 2 tipos las de horno abierto y horno de caja cerrada, aunque en éste último se pueden catalogar por otros parámetros como lo son el diseño del sistema de carga, el tipo sistema para la rotación, no dejan de ser máquinas de horno de caja cerrada. Las máquinas de horno abierto son máquinas que el calentamiento es directamente por la incidencia de fuego sobre el molde como lo es en el tipo de máquina rock and roll que se muestra en la siguiente Figura 2.3.A.

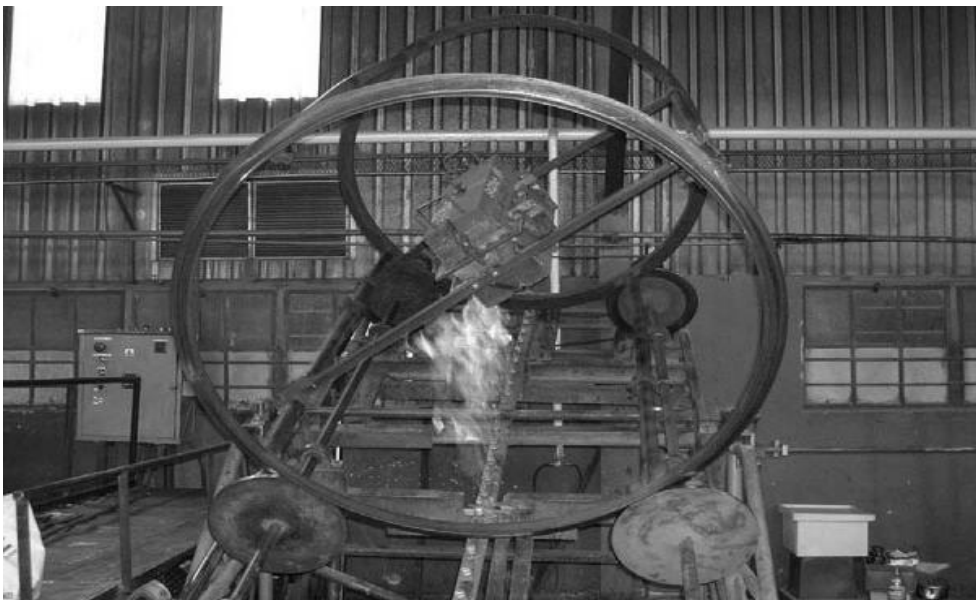


Figura 2.3.A Máquina de rotomoldeo tipo rock and roll de horno abierto.  
[2]

En la Figura 2.3.A se muestra una máquina de horno abierto del tipo rock and roll, en la cual se observa la incidencia directa de las llamas sobre el molde, en este tipo de máquinas no tienen una rotación completa sobre 2 ejes sino que, se realiza un movimiento basculante en uno de los ejes mientras el otro rota por completo.

La mayoría de las máquinas de rotomoldeo pertenecen al modelo de horno cerrado, las cuales tienen un espacio delimitado para la transferencia de calor, tal como se muestra en la siguiente Figura 2.3.B



Figura 2.3.B Máquina de rotomoldeo tipo torreta de brazo fijo, ésta máquina es de horno cerrado se observa el compartimento al lado izquierdo donde se realiza el calentamiento.

[2]

En la figura anterior se muestra una máquina de rotomoldeo de horno cerrado, las cuales son el tipo de máquinas más comunes en la industria éste tipo de máquinas pueden variar en dimensiones y forma, debido a la variedad de diseños existentes.

Dentro de éste tipo de máquinas se observa el horno de caja cerrada el cual se muestra a mayor detalle en la siguiente imagen Figura 2.3.C.

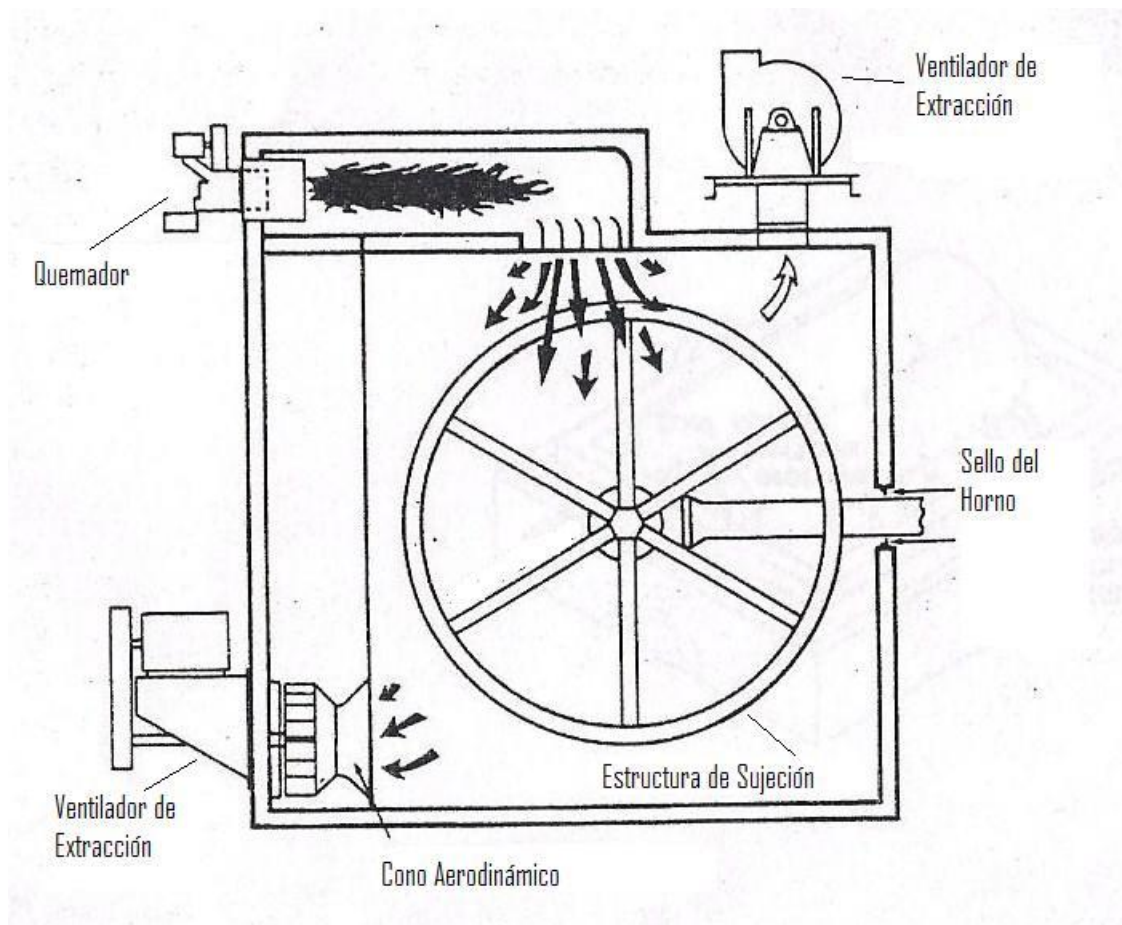


Figura 2.3.C Esquema de un horno de rotomoldeo.  
[4]

En la Figura 2.3.C se observa de manera esquemática un horno de rotomoldeo de caja cerrada podemos ver la disposición del quemador, el flujo del aire y productos de combustión hacia el interior del horno.

Pasada la etapa de calentamiento, se debe iniciar la etapa de enfriamiento del molde, la etapa de enfriamiento tiene el mayor efecto en las propiedades de la pieza así como en su acabado, ya que si el enfriamiento es asimétrico causara una distorsión en la pieza, por este motivo el enfriamiento debe realizarse de manera lenta, el tiempo que tarda un molde en enfriarse es considerable, ya que debe pasar por las diversas estaciones de enfriado que son:



**Enfriamiento a temperatura ambiente.**

En éste primer paso el molde sale del horno y continua rotando en el exterior con condiciones de temperatura y movimiento del aire ambiente.

**Enfriamiento por ventiladores.**

El molde es colocado en el interior de la cámara de enfriamiento, y comienza a dirigirse aire movido por ventiladores de alta velocidad y gran flujo volumétrico hacia la superficie de éste.

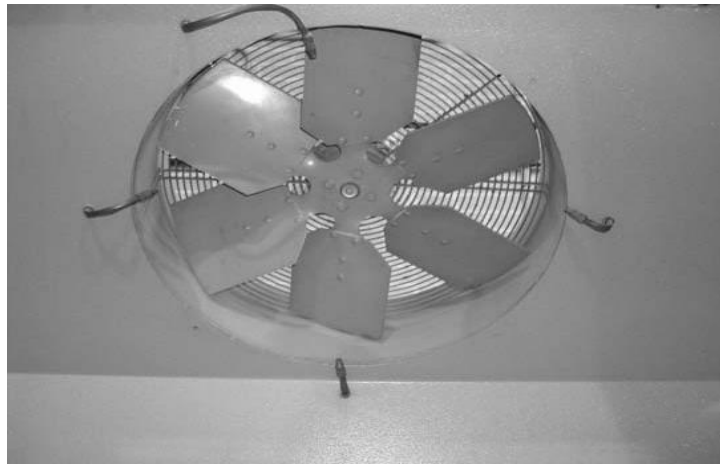


Figura 2.3.D Ventilador colocado en la cámara de enfriamiento [2]

En la Figura 2.3.D se observa un ventilador colocado en la cámara de enfriamiento, cabe recordar que durante ésta etapa el molde sigue rotando.

**Enfriamiento por sopladores.**

Se dirige una corriente de aire a una alta velocidad al molde en todas direcciones para continuar con el proceso de enfriamiento.

**Enfriamiento por aire lavado.**

Aire con un alto nivel de humedad y una baja temperatura es dirigido alrededor del molde para formar una espesa niebla alrededor de él y garantizar la homogeneidad en el enfriamiento.

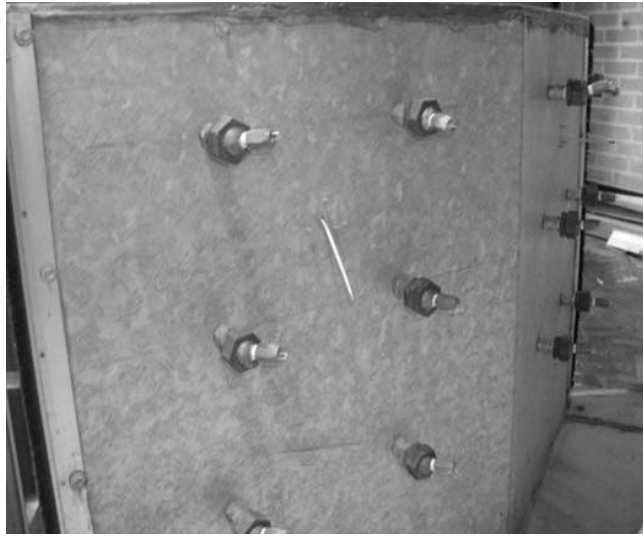


Figura 2.3.E Válvulas de salida de aire lavado ubicadas dentro de la cámara de enfriamiento [2]

En la figura anterior se muestra la disposición de las válvulas de salida de aire lavado en el interior de la cámara de enfriamiento, se observa que están distribuidas de manera homogénea y sobre un área amplia para garantizar así el enfriamiento correcto del molde.

### **Enfriamiento por aspersión de agua.**

En esta última etapa se rocía agua por medio de aspersores ubicados en la cámara de enfriamiento.



Figura 2.3.F Muestra el enfriamiento de un molde en la cámara de enfriamiento. [2]

En la Figura 2.3.F se observa un ensamble completo de molde en la etapa de enfriamiento siendo rociado por agua, el molde aún se mantiene rotando para garantizar de ésta forma la adecuada transferencia de calor.

Los parámetros a controlar en el proceso de rotomoldeo son:

- Tiempo de permanencia del molde, el tiempo de permanencia del molde en el interior del horno es indispensable ya que de éste depende que la pieza alcance o no sus propiedades mecánicas.
- Temperatura del horno, la temperatura del interior del horno influye en el tiempo de permanencia del molde en su interior, es fundamental ya que los materiales empleados poseen un límite de temperatura máximo al cual pueden ser sometidos antes de degradarse.
- Espesor del molde, como se mencionó anteriormente, debe diseñarse para tener las propiedades mecánicas adecuadas y facilitar también la transferencia de calor, está influido por el material de fabricación.
- Espesor de la pieza moldeada, esto es debido a que afecta el tiempo de duración de la etapa de calentamiento ya que al añadirse el polímero disminuye la transferencia de calor hacia el interior del molde, además el molde debe tener el diseño adecuado para evitar el punteo.
- Velocidad de enfriamiento, la cual debe ser como se mencionó, por medio de diferentes etapas.
- Velocidad de rotación, ya que de manera experimental se han obtenido diferentes relaciones de rotación en función de la forma del objeto moldeado, siendo la más convencional la relación de rotación de 4:1 entre el eje mayor y el menor. En la siguiente Figura 2.3.G se muestran los ejes referidos y como se consideran en el rotomoldeo.
- Acabado superficial del molde, influye en el proceso ya que los moldes altamente pulidos no son útiles debido a que el polvo al estar rotando no se adheriría a la superficie del molde, lo que conllevará a que la cama de polvo permanezca siempre en el fondo del molde alterando la temperatura en el polímero evitando que reproduzca fielmente la cavidad del molde.

- Tipo de material de elaboración del molde, el material seleccionado hará que exista una variación en el tiempo de calentamiento.

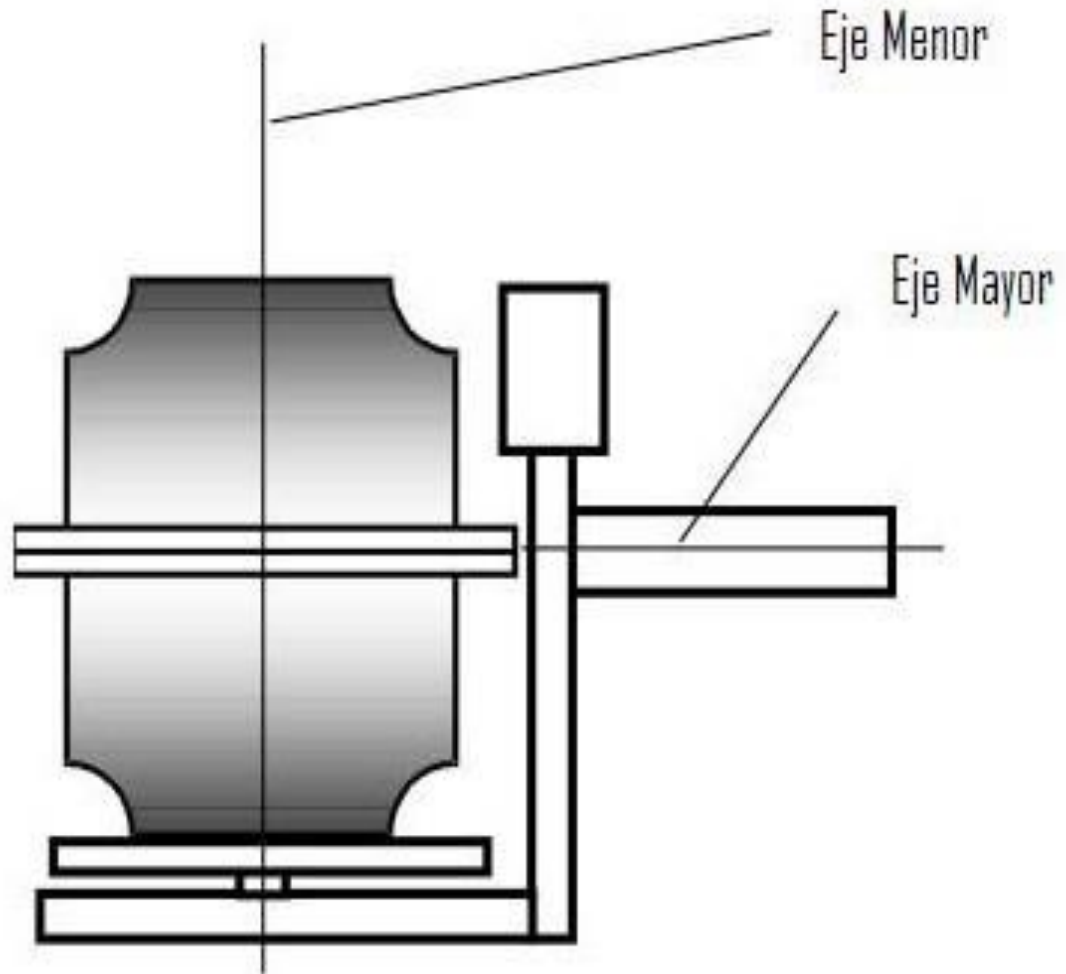


Figura 2.3.G Se muestran los ejes considerados en los moldes de rotomoldeo. [4]

En la figura anterior se muestran los ejes sobre los cuales se realiza la rotación en las máquinas de rotomoldeo. Estos ejes presentan una relación de rotación en función del tipo de pieza a moldear.

En la siguiente gráfica Figura 2.3.H se muestra una comparación entre diferentes materiales empleados para la fabricación de los moldes y su comportamiento durante el calentamiento.

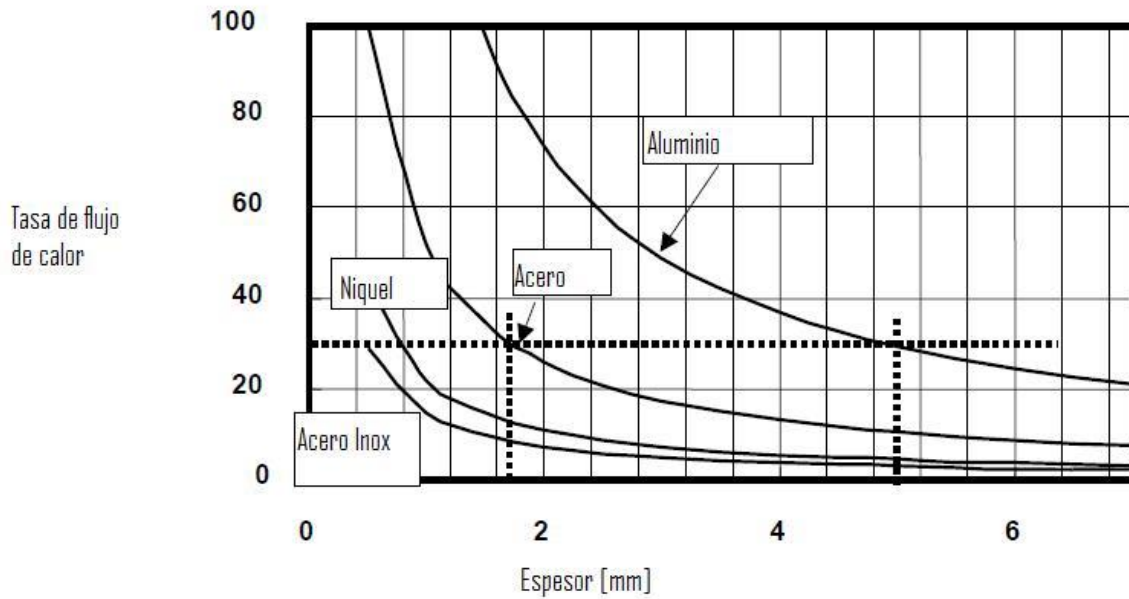


Figura 2.3.H Grafica comparativa del comportamiento de diversos materiales usados en la fabricación de moldes. La Tasa de flujo de calor esta expresada en porcentaje. [2]

En la figura anterior se muestra una gráfica a través de la cual se puede comparar la tasa de flujo de calor de diferentes materiales en función de su espesor, mostrando como diferentes materiales pueden tener el mismo flujo con diferentes espesores cada uno.

## Referencias

- [1] Crawford, Throne. *“Rotational Molding Technology”*, Plastic Design Library William Andrew Publishing 2002
- [2] Crawford, Kearns. *“Practical Guide to Rotational Moulding”*, Smithers Rapra Press 1998
- [3] Consultado en <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/42230-Hacia-el-electroconformado-de-alta-velocidad.html> el día 31 de Agosto 2012, 19:13 horas
- [4] Crawford, Throne. *“Rotational Molding of Polymers”*, Plastic Design Library William Andrew Publishing 2002

## Capítulo 3

### Método de Análisis en los moldes rotacionales

El rotomoldeo desde su concepción parece ser un método de manufactura sencillo, sin embargo, conlleva muchos elementos técnicos que deben conocerse para realizar el proceso de manera adecuada, el tipo de material polimérico empleado ha sido sometido a gran cantidad de estudios y modelos matemáticos para poder explicar su comportamiento, así como el de la formación y la eliminación de las burbujas creadas en el polímero durante la etapa de calentamiento, anteriormente ésta etapa recaía en la mayoría de las veces en las habilidades y en la experiencia del operador de la máquina ya que se obtenían las condiciones adecuadas por medio de la experimentación.

#### 3.1 Análisis existente en los moldes de Rotomoldeo

Las variables que se deben conocer preferentemente en el proceso de rotomoldeo son la temperatura del horno, la temperatura en la superficie del molde, la temperatura del aire encerrado en el molde, en función de éstas variables es como se han desarrollado modelos matemáticos para tener aproximaciones que ayuden al control del proceso y sistemas que permitan conocer las variables de forma real a través de termopares y demás dispositivos para lograr la adquisición de datos en tiempo real<sup>[1]</sup>.

Análisis teórico:

En la etapa de calentamiento están presentes los tres mecanismos de transmisión de calor:

- **Conducción:** Es la transmisión de calor entre cuerpos sólidos en contacto, se da entre la pared del molde y la capa de polímero.
- **Convección:** Es la transmisión de calor debida a un fluido en movimiento, este mecanismo de transmisión se da entre el aire caliente que está en el horno y la pared exterior del molde.
- **Radiación:** Es el intercambio de energía electromagnética entre una superficie fría y una caliente, este proceso no se da mayoritariamente en el rotomoldeo, sin embargo existe un tipo de máquinas que emplea éste mecanismo de transmisión de calor.

Durante ésta etapa se presenta una diferencia de temperaturas entre la superficie exterior del molde y la cavidad interior de aire que quedó alojado dentro del molde, debido a la cantidad de energía que se queda almacenada en la cama de polímero.

Para obtener la Temperatura aproximada en la superficie interna del molde:

$$T_{int} \approx T_{mext} - h \cdot \frac{(T_{aire} - T_{mext})}{2 \cdot K} \cdot L \dots\dots\dots ec.3.1.A$$

[1]

de donde:

- T<sub>int</sub>= Temperatura en el interior de la superficie del molde
- T<sub>mext</sub>=Temperatura en el exterior de la superficie del molde
- h=Coeficiente de transferencia de calor por convección
- T<sub>aire</sub>=Temperatura del aire en el interior de la cavidad del molde
- L=Espesor de la pared del molde
- K=Coeficiente de conductividad térmica del material del molde

Para obtener la Temperatura aproximada del polímero:

$$T_p \approx T_{mext} - h \cdot (T_{aire} - T_{mext}) \left( \frac{L}{2 \cdot K} + \frac{\Delta}{2 \cdot K_p} \right) \dots\dots\dots ec.3.1.B$$

[1]

de donde:

- T<sub>p</sub>=Temperatura del polímero
- T<sub>mext</sub>=Temperatura en el exterior de la superficie del molde
- h=Coeficiente de transferencia de calor por convección
- T<sub>aire</sub>=Temperatura del aire en el interior de la cavidad del molde
- L=Espesor de la pared del molde
- K=Coeficiente de conductividad térmica del material del molde
- Δ=Espesor de la capa de polímero líquido
- K<sub>p</sub>=Coeficiente de conductividad térmica del polímero líquido



Por medio de éstas ecuaciones podemos conocer de manera aproximada la temperatura en el interior del molde, para la obtención de los coeficientes de transferencia de calor por convección existen tablas como la siguiente Tabla 3.1 donde se muestran los coeficientes de convección para diversos medios.

Tabla 3.1  
Coeficientes de transferencia de calor por convección

Fluido	Coeficiente de convección (h) [ x10 <sup>-3</sup> W/cm <sup>2</sup> °C ]
Aire quieto	1
Aire movido por ventiladores	3
Aire movido por sopladores	10
Combustión directa de gas	10
Aire lavado	60
Rocío de agua	90

[1]

En la Tabla anterior se puede notar la variación existente en el coeficiente de convección de diferentes fluidos y como algunos de éstos incrementarán la transferencia de calor, disminuyendo por ejemplo, el tiempo de enfriamiento del molde.

Para determinar el tiempo que debe permanecer el molde en el interior del horno, el operador revisa distintas piezas que permanecieron lapsos de tiempo diferentes en el interior del horno, observa la calidad superficial de la pieza ya que si la pieza se retiro prematuramente del horno las burbujas de aire que se formaron durante el proceso de calentamiento, permanecen aun ahí, mientras que si la pieza no tiene ni una sola burbuja esto indica que la pieza permaneció un lapso muy prolongado de tiempo en el horno, por lo cual se infiere que la permanencia del molde en el interior del horno debe ser un tiempo intermedio<sup>[2]</sup>, estos ensayos de prueba y error determinan el tiempo que el molde debe permanecer en la etapa de calentamiento, sin embargo, el tiempo de permanencia en el interior del horno puede aproximarse por medio de la siguiente ecuación:

$$\theta = -\frac{\rho \cdot C_p \cdot d_m}{h} \cdot \ln\left(\frac{T_\infty - T_d}{T_\infty - T_0}\right) \dots\dots\dots ec.3.1.C$$

[1]

de donde:

$\theta$ = Tiempo de permanencia del molde en el interior del horno

$\rho$ =Densidad del material del molde

$C_p$ =Capacidad térmica específica del molde

$d_m$ =Espesor de la pared del molde

$h$ =Coeficiente de transferencia de calor por convección

$T_{oo}$ =Temperatura en el interior del horno

$T_o$ =Temperatura inicial del molde

$T_d$ =Temperatura que se desea en la superficie interior del molde

En la actualidad existen otros métodos de análisis los cuales incluyen la adquisición de datos en tiempo real o la simulación en software para poder conocer el comportamiento del proceso, la adquisición de datos en tiempo real ha logrado conocer la importancia de parámetros así como la predicción, con una mayor precisión, del tiempo de duración del proceso.

Análisis de Adquisición de Datos en tiempo real <sup>[1]</sup>.

La adquisición de datos ha permitido la graficación de manera precisa de diferentes parámetros de interés como lo son la temperatura exterior del molde, la temperatura interior del molde, la temperatura del aire encerrado en la cavidad interna, así como relacionar el comportamiento de estas variables con los cambios sufridos por el polímero.

Para implementar éste tipo de mediciones es necesaria la modificación de los moldes para lograr acoplar los aditamentos necesarios, así como la correcta manipulación del software.

Sin embargo, la cantidad de información obtenida es importante para tener un correcto control del proceso de rotomoldeo, en diferentes industrias y laboratorios se emplean este tipo de sistemas de adquisición de datos en tiempo real, tanto para incrementar la eficiencia del proceso y para la investigación en el tema.

En la siguiente Figura 3.1.A se muestra el tipo de gráficos que se obtienen por medio de éste tipo de análisis.

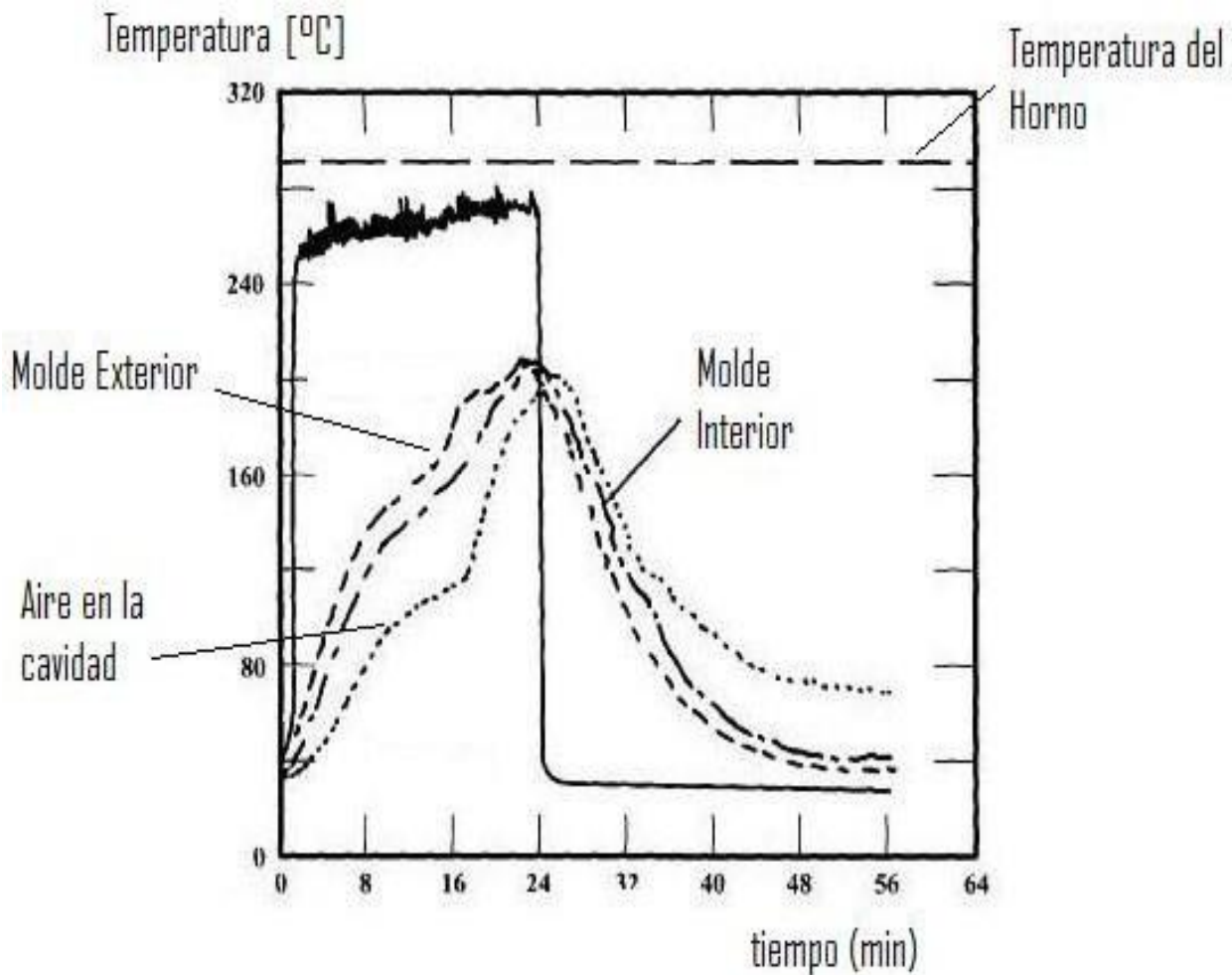


Figura 3.1.A Comportamiento de la T vs tiempo [1]

En la Figura 3.1.A se muestra el tipo de gráficos obtenidos, nótese como cada línea es el registro de la temperatura en cada parte del molde como lo es la pared exterior, la cavidad del aire, el registro de la temperatura del horno, la pared interior del molde, es interesante el comportamiento que tiene la temperatura del aire en el interior del molde y cómo cuando comienza a aproximarse a la temperatura del molde, se retira del horno y comienza la etapa de enfriamiento, representado por el descenso casi constante de la temperatura.

Mientras que podemos observar en la siguiente Figura 3.1.B el comportamiento únicamente del aire de la cavidad interna.

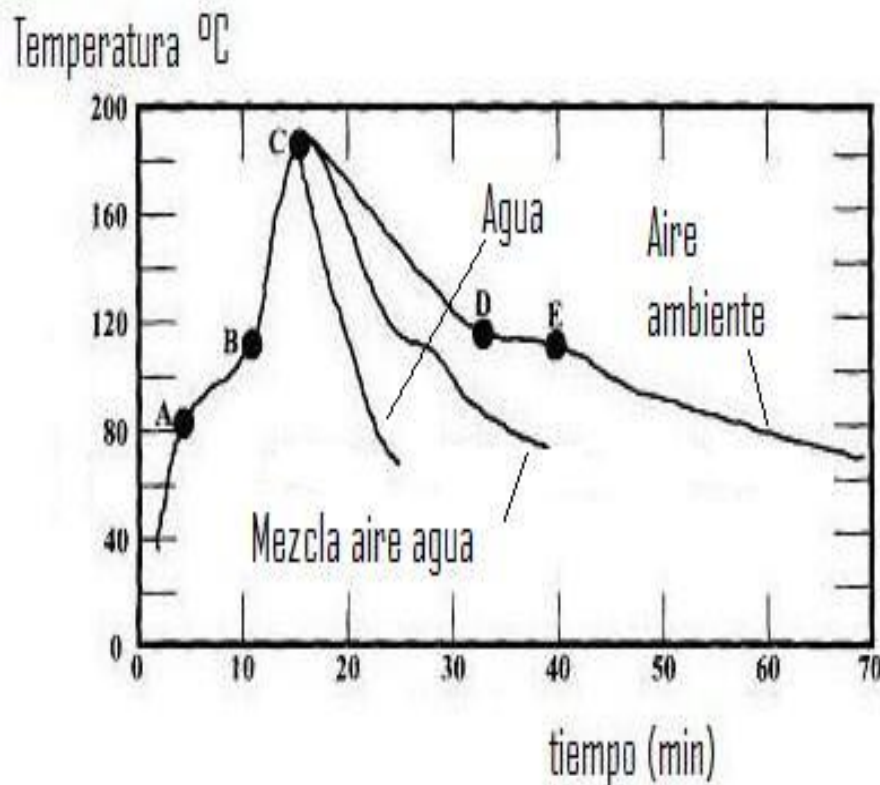


Figura 3.1.B Comportamiento de la Temperatura del aire en la cavidad interna [1]

La Figura 3.1.B muestra el comportamiento que presenta el aire encerrado en la cavidad interna del molde, así como también el comportamiento que presenta al enfriar el molde por medio de diferentes fluidos: agua (aspersión), aire ambiente (convección natural), mezcla aire agua (aire saturado).

Ésta curva característica puede explicarse de la siguiente manera:

- (A)-** Es el punto donde el polímero comienza a adherirse a las paredes del molde.
- (B)-** Debido a que la capa de polvo comienza a crecer se incrementa la diferencia de temperaturas entre la superficie externa del molde y la cavidad de aire, en este punto indica aproximadamente cuando todo el polímero está adherido a la pared del molde y comienza el proceso de sinterización.
- (C)-** Aquí el polímero es una capa monolítica, se reduce el aire que existía en ella y se aproxima la temperatura de la cavidad de aire a la temperatura del molde, el molde ya puede ser retirado del horno.

**(D)**- Inicia la cristalización en polímeros cristalinos como el PE

**(E)**- Termina la cristalización.

### 3.2 Ventajas y desventajas del Análisis

Como se habrá notado el análisis que se realice puede ser teórico o basado en adquisición de datos reales en la siguiente Tabla 3.2 se muestra un resumen de las ventajas y desventajas ofrecidas por cada tipo de análisis.

Tabla 3.2 Ventajas y desventajas de cada tipo de análisis.

<b>Análisis Teórico</b>		<b>Adquisición de datos</b>	
<b>Ventaja:</b>	Este tipo de análisis puede ser muy útil en la industria ya que se requiere poco tiempo para conocer datos necesarios para el proceso, como por ejemplo el tiempo de residencia del molde	<b>Ventaja:</b>	Permite conocer el comportamiento completo de la temperatura en el interior del molde, esto permite obtener de manera precisa el tiempo de residencia del molde.
<b>Desventajas:</b>	Se requiere experiencia para poder distinguir si los valores obtenidos resultan realmente aplicables al proceso.  Se pueden presentar errores que conlleven a una pérdida económica relativamente grande.	<b>Desventajas:</b>	El implementar este tipo de dispositivos implica una mayor inversión monetaria, se requiere conocer el uso del software y la interpretación de los datos obtenidos.

### **3.3 Comparativa de análisis.**

Realmente el tipo de análisis empleado dependerá directamente de la finalidad para lo cual se realice, ya que para una industria manufacturera que sólo esté interesada en la duración del proceso sin importarle el comportamiento real de éste, un análisis teórico le será suficiente mientras que para una unidad de investigación o una industria que emplee altos niveles de calidad requerirá la mayor cantidad de datos reales del proceso para poder así conocer su comportamiento a la perfección, en este caso sería necesario contar con un sistema que permita la adquisición de datos en tiempo real.

Resulta difícil establecer cuál de los dos tipos de análisis describe mejor el fenómeno físico, se puede pensar que es aquel que nos proporciona datos reales del proceso, sin embargo, la inversión económica necesaria para implementar este sistema es alta, además del personal capacitado para su operación, lo cual podría llegar a ser un impedimento para su empleo ya que las pérdidas económicas que se presentan al emplear el análisis teórico son mucho menores que la cantidad necesaria para la instalación del sistema de adquisición de datos en tiempo real.

Si se piensa en una gran industria de rotomoldeo entonces cabe la enorme posibilidad de que cuenten con un sistema de adquisición de datos y modelos matemáticos del proceso, sin embargo, existe gran cantidad de pequeñas industrias dedicadas al rotomoldeo las cuales en ocasiones ni siquiera cuentan con la infraestructura necesaria para realizar el rotomoldeo, mucho menos tendrán sistemas o modelos matemáticos altamente desarrollados para analizar el proceso y tendrán que basarse en la experiencia o apoyarse en cálculos sencillos para controlar sus procedimientos.

## Referencias

[1] Crawford, Throne. *“Rotational Molding Technology”*, Plastic Design Library William Andrew Publishing 2002

[2] Crawford, Kearns. *“Practical Guide to Rotational Moulding”*, Smithers Rapra Press 1998

## Capítulo 4

### Análisis en un molde para maceta

La etapa de calentamiento se realiza mayoritariamente en hornos de convección, los cuales presentan grandes pérdidas energéticas, sin embargo, existen métodos alternativos de calentamiento que muestran ventajas económicas en la manufactura de las piezas, en éste capítulo se hará la comparación entre el proceso de calentamiento por medio del sistema eléctrico, lo cual sería la aplicación del mecanismo de transferencia de calor denominado como: conducción, y el convencional que emplea un horno de convección, para la manufactura de una maceta por medio del proceso de rotomoldeo.

Se empleará el análisis de sistemas concentrados el cual es aplicable a sistemas que cumplan los siguientes parámetros:

- I. Temperatura interior homogénea
- II. Temperatura como función del tiempo
- III. Número de Biot,  $Bi < 0.1$

Los parámetros anteriores son aplicables al proceso de rotomoldeo como se discutirá en la sección 4.2.

Para realizar una comparación económica entre ambos sistemas de calentamiento se puede abordar el problema de la siguiente manera: obtener la cantidad de energía necesaria para llevar a cabo la etapa de calentamiento, y por medio de esto conocer la cantidad de combustible requerido en el horno y el costo que se tendría al emplear el sistema de calentamiento eléctrico; ya que ésta es la etapa del proceso en donde se puede ahorrar energía y de manera implícita economizar el proceso.

Por otra parte en la etapa de enfriamiento no se ha realizado un análisis debido a que sus estaciones permanecen casi constantes, tal como se mostró con anterioridad, debe pasar por diferentes estaciones enfriamiento por aire quieto, aire saturado, aspersión de agua.

Para definir el análisis se han considerado diferentes factores, los que se describirán a detalle en su respectiva sección. Las secciones en las que se ha dividido el análisis se encuentran ordenadas de la siguiente forma:

- Condiciones de análisis
- Análisis térmico del molde
- Análisis térmico del horno
- Balance energético del horno
- Balance energético del quemador



#### 4.1 Condiciones de análisis

##### A) Producto

El producto que se desea obtener por medio del proceso de rotomoldeo es una maceta de plástico de proporciones pequeñas la cual está detallada en la siguiente Figura 4.1 el material a emplear es polietileno de alta densidad, se ha elegido éste material debido a que es uno de los materiales más empleados en la industria.

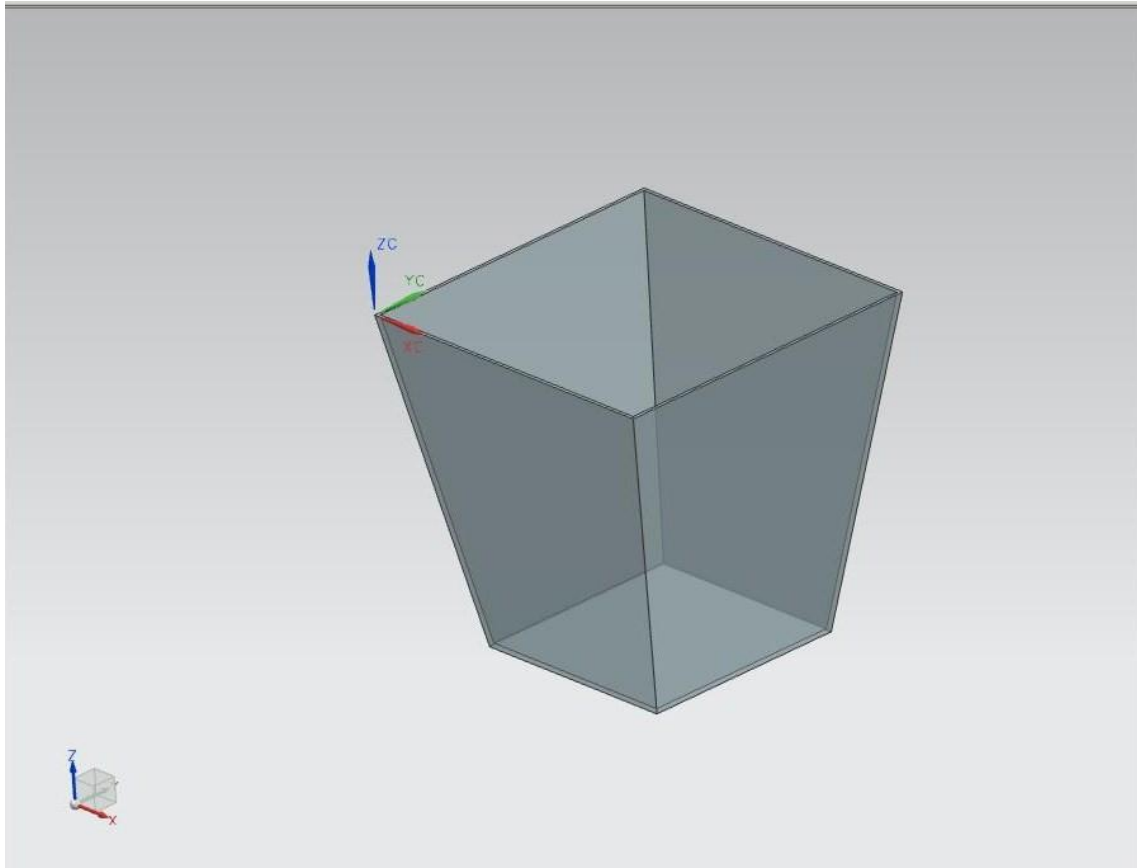


Figura 4.1 Maceta

La Figura 4.1 muestra la maceta que se desea elaborar por medio del proceso de rotomoldeo, éste tipo de producto se eligió ya que es un producto que puede fabricarse a pequeña escala y puede ser elaborado tanto por grandes industrias como por una empresa pequeña de rotomoldeo.

##### B) Condiciones de diseño del molde

El molde diseñado es un molde fabricado con el material denominado Duraluminio el cual tiene la siguientes características:

Tabla 4.1 Propiedades del Duraluminio

Material	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Conductividad térmica [W/mK]	Capacidad térmica específica [J/kgK]	Módulo de elasticidad [GN/m <sup>2</sup> ]	Coefficiente de expansion térmica 10 <sup>-6</sup> [K <sup>-1</sup> ]
----------	----------------------------------	------------------------------------	---	--	--

Duraluminio	2800	147	917	70	22.5
-------------	------	-----	-----	----	------

En la siguiente Figura 4.1.B se muestra una imagen del molde empleado en el análisis:

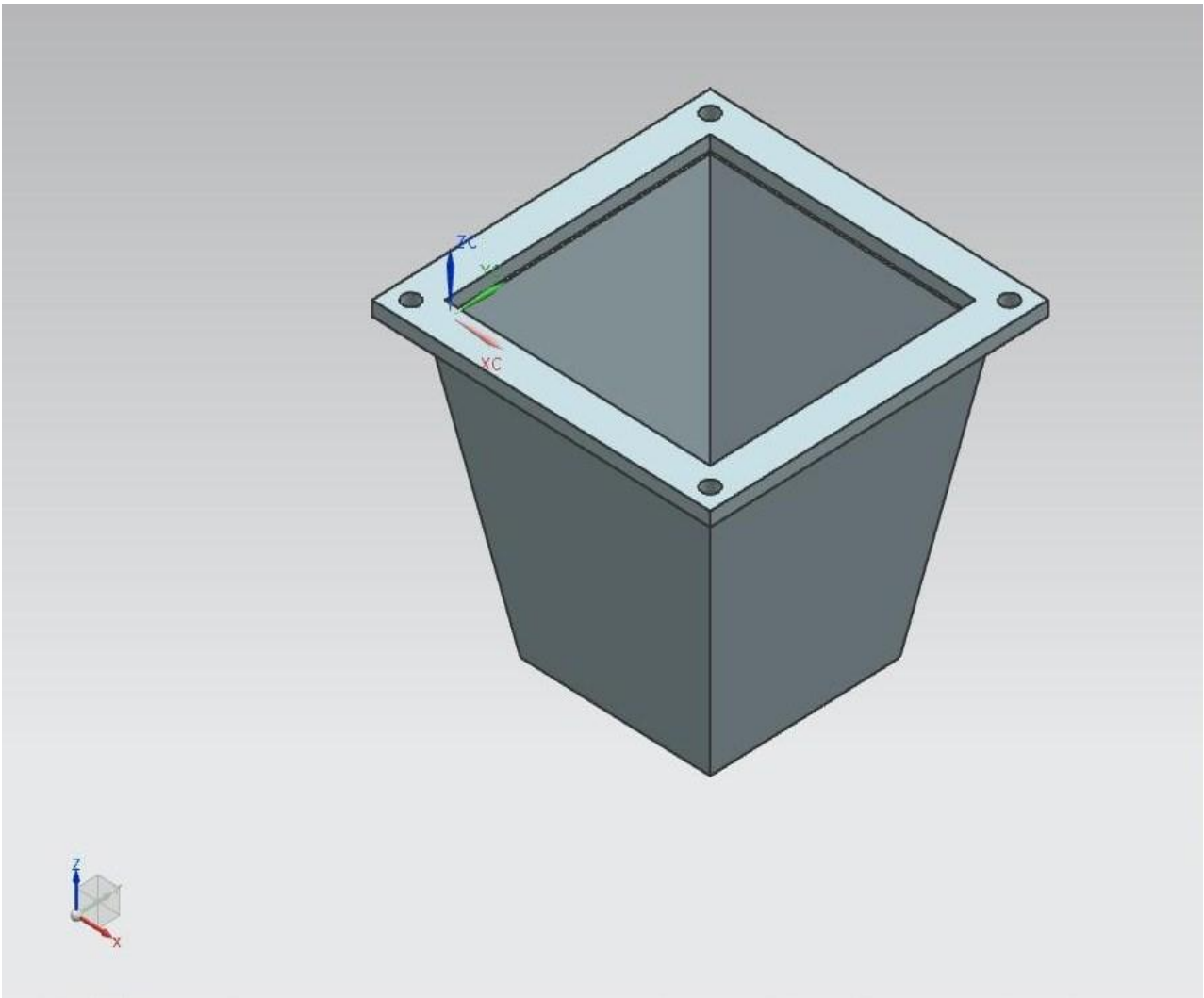


Figura 4.1.B Molde de rotomoldeo sin tapa

En la figura anterior se muestra el molde que se emplearía en la manufactura de la maceta, éste tipo de molde debido a su relativa facilidad de manufactura puede ser fabricado tanto en duraluminio por medio del proceso de fundición como por soldadura de lámina. Para este caso se ha sugerido el uso de lámina de duraluminio dado que al fabricar el molde por éste método se ofrece la posibilidad de proporcionar el espesor necesario en las paredes del molde sobre las cuales se podrían colocar los dispositivos de calentamiento por resistencia eléctrica.

C) Condiciones de diseño del horno

El horno que se ha empleado para el análisis es un horno convencional de caja cerrada mostrado en la siguiente figura:

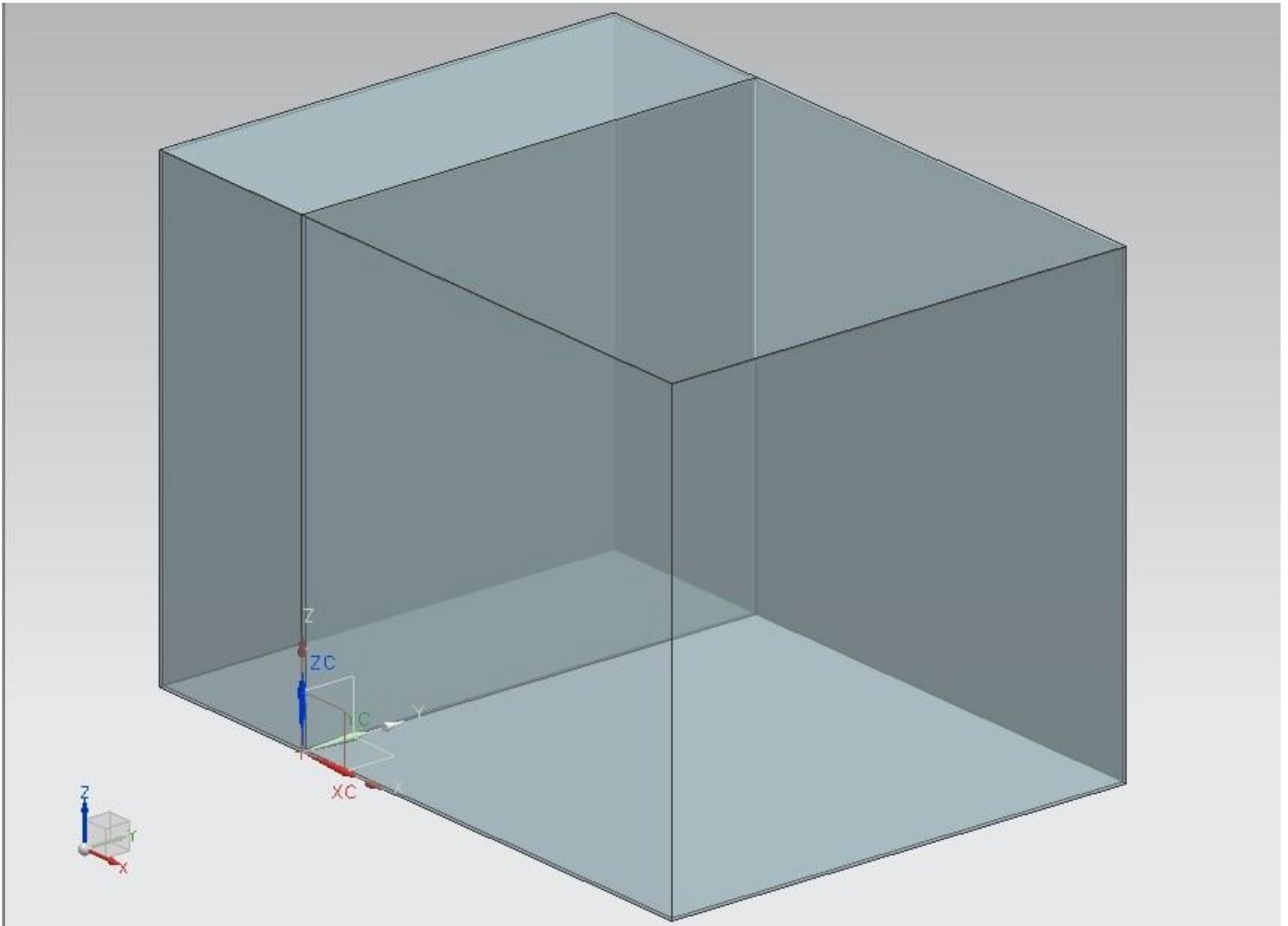


Figura 4.1.C Horno de rotomoldeo de caja cerrada

El horno de caja cerrada es el tipo de horno más común en las máquinas de rotomoldeo debido a eso se empleará en el análisis, las dimensiones del horno son las aproximadas para un horno industrial <sup>[1]</sup>.

Debido a las dimensiones del horno caben en su interior 20 piezas, montadas en su respectivo marco de sujeción <sup>[1]</sup>.

#### 4.2 Análisis térmico del molde

Existe un análisis de transferencia de calor en el cual la temperatura en el interior del cuerpo se considera constante y como una función del tiempo, este análisis se denomina: Análisis de sistemas concentrados.

En este análisis se tiene que:

$$(\text{Transferencia de Calor hacia el cuerpo en } dt) = (\text{Incremento en la energía del cuerpo en } dt)$$

Se puede considerar el análisis de la etapa de calentamiento a través de sistemas concentrados en donde:

$$(\text{Transferencia de Calor por convección}) = (\text{Incremento en la energía de la pieza})$$

Para la aplicación del análisis de sistemas concentrados es necesario que cumpla el siguiente parámetro <sup>[4]</sup>:

$$Bi < 0.1$$

Cálculo del Número de Biot.

El primer paso en el análisis de sistemas concentrados es calcular el número de Biot\*, para determinar si la aplicación de sistemas concentrados es factible en el proceso que se desea analizar. Por lo general los cuerpos pequeños con conductividad térmica alta son factibles para la realización de este tipo de análisis <sup>[4]</sup>.

Para el cálculo del número de Biot es necesario determinar la Longitud característica.

Por definición la Longitud característica <sup>[4]</sup>:

$$Lc = \frac{V}{As} \dots\dots\dots ec.4.A.a$$

De donde:

Tabla 4.2 Datos necesarios para la Lc

Propiedad	Simbología	Valor
Volumen del molde	V	0.000331[m <sup>3</sup> ]
Área superficial del molde	As	0.0726[m <sup>2</sup> ]

Una vez determinada la Longitud Característica se inicia el cálculo del número de Biot <sup>[4]</sup>.

$$Bi = \frac{h * Lc}{k} \dots\dots\dots ec.4.A.b$$

\*Número de Biot: Se define como la razón entre la convección en la superficie con respecto a la conducción

en el interior del cuerpo.  
De donde:

Tabla 4.3 Cálculo del número de Biot

Propiedad	Simbología	Valor
Coeficiente convectivo en el interior del horno	h	22 [W/m <sup>2</sup> K]
Conductividad térmica del Duraluminio	K	147 [W/mK]
Longitud Característica	Lc	4.56x10 <sup>-3</sup> [m]

Se obtiene un valor del número de Biot:

$$Bi=6.82 \times 10^{-4}$$

El cual se mantiene debajo del parámetro especificado con anterioridad por lo que es factible realizar el análisis de la etapa de calentamiento por medio de sistemas concentrados.

En la siguiente imagen se observa un sistema termodinámico en el cual toda la energía que entra en el sistema es tomada por el molde, la figura se muestra para ilustrar el mecanismo del análisis de sistemas concentrados donde la transferencia de calor hacia el cuerpo en un intervalo de tiempo se verá reflejada en un incremento en la energía de éste.

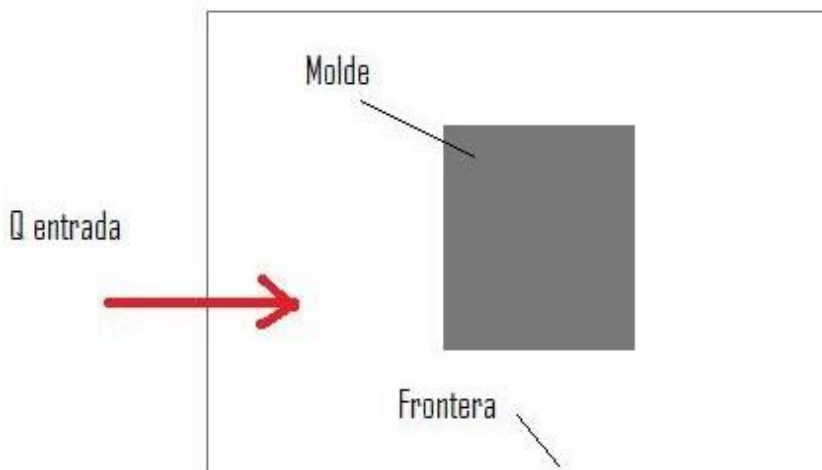


Figura 4.2.A Sistema termodinámico bajo el cual se realiza el análisis.

Dadas las condiciones de análisis, la geometría del molde no es un elemento determinante por eso se puede aproximar como el rectángulo en el interior del sistema.

Cálculo del Calor requerido por pieza

Con base en la Primera Ley de la Termodinámica\* y dadas las condiciones del análisis de sistemas concentrados se puede obtener el calor necesario por cada pieza a partir de la siguiente ecuación:

$$Q_{pieza} = masa_{molde} \cdot C_{paluminio} \cdot (T_{final\ molde} - T_{inicial\ molde}) \dots\dots\dots ec.4.A.1$$

de donde:

Tabla 4.4 Datos para la obtención del calor requerido

Propiedad	Valor
Volumen del molde	0.000331 [m <sup>3</sup> ]
Densidad del molde	2800 [kg/m <sup>3</sup> ]
C <sub>p</sub> aluminio	917 [kJ/kg]
T <sub>final</sub> molde	210 [°C]
T <sub>inicial</sub> molde	25 [°C]

Para la obtención de la temperatura final del molde ( T<sub>final molde</sub>) se refiere a la temperatura de extracción del molde del horno en éste caso obtenida de la Tabla 4.5.

Tabla 4.5  
Tiempo de Permanencia del molde en el interior del horno y temperatura de extracción del molde

Polimero	Temperatura del Horno [°C]	Espesor del molde [mm]	Temperatura de extracción [°C]	Tiempo [min]
HDPE	300	2	210	13
HDPE	300	4	210	23
HDPE	300	6	210	32
HDPE	300	8	205	43

[1]

Al realizar el cálculo de la ecuacion 4.A.1 se obtiene:

$$Q_{pieza}=157.227 \text{ [kJ]}$$

Debido al espesor del molde, 4 mm, el tiempo que tarda el proceso es de aproximadamente 23 minutos, obtenido de la Tabla 4.5 entonces:

$$Q_{pieza} =113.9 \text{ [W]}$$

\*Primera Ley de la Termodinámica o Principio de la Conservación de la Energía: establece que la energía no se crea ni se destruye solo se transforma.

Se desea conocer la temperatura en el interior del molde para corroborar que la temperatura permanece uniforme, para esto se puede emplear la Ley de Conducción de Calor de Fourier, la cual afirma que existe una proporcionalidad entre el flujo de energía y el gradiente de temperatura.

$$Q_{conduccion\ 1} = - \frac{K_{aluminio} \cdot Area_{molde}}{L_{molde}} \cdot (T_{sint} - T_{sext}) \dots\dots\dots ec.4.2.A$$

Al hacer la siguiente igualdad:

$$Q_{conduccion\ 1} = Q_{pieza}$$

entonces, sustituyendo los datos necesarios:

Tabla 4.6 Características del molde

Propiedad	Simbología	Valor
Conductividad térmica del aluminio	$K_{aluminio}$	147[W/mK]
Área superficial del molde	$Area_{molde}$	0.0726 [m <sup>2</sup> ]
Espesor de la pared del molde	$L_{molde}$	$5 \times 10^{-3}$ [m]
Temperatura de extracción del molde	$T_{sext}$	210 [°C]

Al sustituir los datos obtenemos la temperatura superficial interna del molde ( $T_{sint}$ )

$$T_{sint}=209.946 \text{ [°C]}$$

Si nuevamente se calcula la temperatura del interior del molde pero ahora en la pared interna de la maceta:

$$Q_{conduccion\ 2} = - \frac{K_{PE} \cdot Area_{PE}}{L_{PE}} \cdot (T_{spe} - T_{sint}) \dots\dots\dots ec.4.A.3$$

de donde:

$$Q_{conduccion\ 2} = Q_{pieza}$$

sustituyendo los siguientes datos:

Tabla 4.7 Datos de la maceta

Propiedad	Simbología	Valor
Conductividad térmica del HDPE	$K_{PE}$	0.5 [W/mK]
Area superficial de la maceta	$Area_{PE}$	0.06 [m <sup>2</sup> ]
Espesor de la pared de la maceta	$L_{PE}$	$1 \times 10^{-3}$ [m]
Temperatura superficial interna del molde	$T_{sint}$	210 [°C]

Se obtiene el valor de la temperatura en la pared interna de la maceta:

$$T_{sPE}=206.15 \text{ [}^\circ\text{C]}$$

Al realizar un diagrama de la disminución de la temperatura en el interior del molde el cual se muestra en la Figura 4.2.B

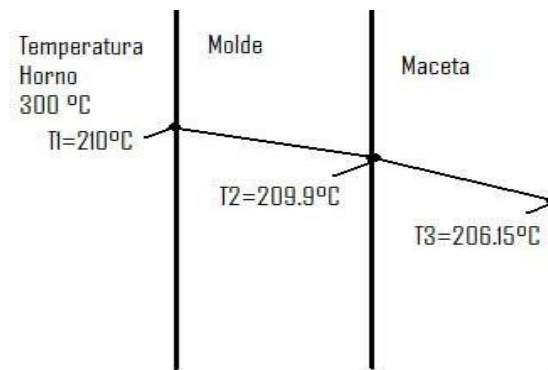


Figura 4.2.B Diagrama de la disminución de temperatura en el interior del molde.

En la figura anterior se observa la disminución de la temperatura hacia el interior del molde, debido a la resistencia en la conducción generada por la pared del molde y la capa de polímero. Dado que la disminución de temperatura en el interior del molde es mínima, se puede considerar la temperatura constante, lo cual es una de las suposiciones del análisis de sistemas concentrados. A continuación se realizará un análisis de la cantidad de calor que requiere cada parte del molde, el molde de aluminio, la maceta de polietileno, el aire encerrado en el interior del molde; lo cual sería:

$$Q_{total} = \frac{Q_{aluminio}}{Tiempo\ permanencia} + \frac{Q_{PE}}{Tiempo\ permanencia} + \frac{Q_{aire}}{Tiempo\ permanencia} \dots ec.4.A.4$$

Para el calor requerido por el molde ( $Q_{aluminio}$ ) ya se había calculado en la ecuación 4.A.1

$$Q_{aluminio}=157.226 \text{ [kJ]}$$

Para obtener el calor requerido por la maceta ( $Q_{PE}$ )

$$Q_{PE} = masa_{PE} \cdot C_{pPE} \cdot (T_{sint} - T_{amb}) \dots ec.4.A.5$$

de los siguientes datos:



Tabla 4.8 Datos de la maceta II

Propiedad	Simbología	Valor
Masa de la maceta	Masa <sub>PE</sub>	0.055 [kg]
Capacidad térmica del HDPE	C <sub>pPE</sub>	0.8963 [kJ/kgK]
Temperatura superficial interna del molde	T <sub>sint</sub>	209 [°C]
Temperatura ambiente	T <sub>amb</sub>	25 [°C]

Obteniendo el Q<sub>PE</sub>=9.07 [kJ]

Para obtener el Q<sub>aire</sub>

$$Q_{aire} = masa_{aire} \cdot C_{p_{aire}} \cdot (T_{sint} - T_{amb}) \dots\dots\dots ec.4.A.6$$

sustituyendo los siguientes datos:

Tabla 4.9 Datos de aire contenido en la cavidad del molde

Propiedad	Simbología	Valor
Masa del aire	masa <sub>aire</sub>	0.055 [kg]
Capacidad térmica del aire	C <sub>p<sub>aire</sub></sub>	0.8963 [kJ/kgK]
Temperatura superficial interna del molde	T <sub>sint</sub>	209 [°C]
Temperatura ambiente	T <sub>amb</sub>	25 [°C]

Obtenemos que para el

$$Q_{aire}=0.18492 [kJ]$$

por lo tanto al sustituir en la ec.4.A.4 obtenemos:

$$Q_{total}=120.637 [W]$$

### 4.3 Análisis térmico del horno

Si se analiza el horno de rotomoldeo el cual como se ha mostrado con anterioridad se puede aproximar a un paralelepípedo, entonces se observa que las pérdidas energéticas que presenta son debidas a la ubicación de cada una de las caras ya que algunas de éstas están expuestas al ambiente debido a eso presentarán pérdidas por convección y radiación mientras que la cara inferior tendrá pérdidas por conducción hacia la superficie de concreto sobre la cual está colocado. Si consideramos el horno como un sistema termodinámico el cual se describe en la Figura 4.3.A

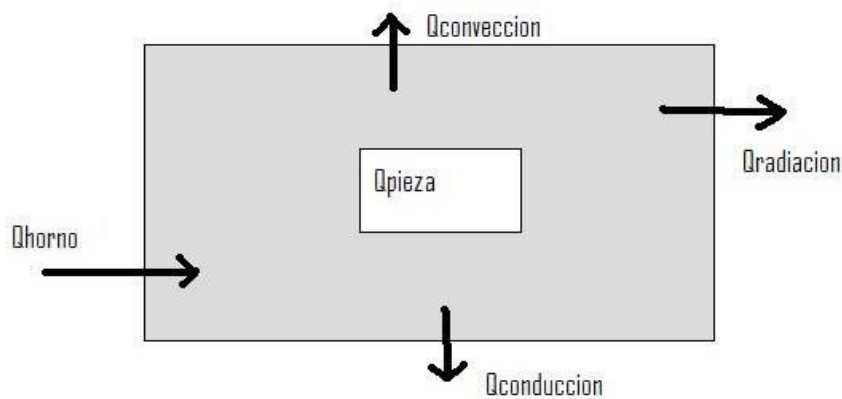


Figura 4.3.A Sistema termodinámico en base al cual se realizará el análisis del horno.

Entonces dado el sistema se puede realizar un balance de energía el cual con base a la Primera Ley de la Termodinámica establece:

$$E_{\text{entrada}} = E_{\text{salida}} + (E_{\text{consumida}} - E_{\text{generada}}) - E_{\text{acumulada}}$$

Y para un régimen estacionario:

$$E_{\text{entrada}} = E_{\text{salida}}$$

Con base en esto se puede determinar que la cantidad de energía suministrada al horno será igual a la energía utilizada por la pieza más las pérdidas energéticas del sistema:

$$Q_{\text{horno}} = Q_{\text{radiacion}} + Q_{\text{conveccion}} + Q_{\text{conduccion}} + Q_{\text{pieza}} \dots \text{ec.4.B.1}$$

de donde las variables son:

- $Q_{\text{radiacion}}$  = Calor perdido por radiación
- $Q_{\text{conveccion}}$  = Calor perdido por convección
- $Q_{\text{conduccion}}$  = Calor perdido por conducción
- $Q_{\text{pieza}}$  = Se refiere a la cantidad de calor necesaria en la elaboración del total de piezas

A) Para obtener el calor perdido por conducción, se emplea la Ley de Conducción de Fourier:

$$Q_{\text{concreto}} = - \frac{K_{\text{concreto}} \cdot \text{Area}_{\text{base}}}{L_{\text{concreto}}} \cdot (T_{\text{piso}} - T_{\text{horno}}) \dots \text{ec.4.B.2}$$

donde:

Tabla 4.10 Datos para la obtención de la pérdida por conducción

Propiedad	Simbología	Valor
Conductividad térmica del concreto	$K_{\text{concreto}}$	0.1308 [W/m]
Área de la base del horno	$A_{\text{base}}$	6.76 [m <sup>2</sup> ]
Espesor del concreto	$L_{\text{concreto}}$	0.5 [m]
Temperatura del piso	$T_{\text{piso}}$	5 [°C]
Temperatura externa del horno	$T_{\text{horno}}$	60 [°C]

Al sustituir estos valores obtenemos que las pérdidas de calor por conducción son:

$$Q_{\text{conduccion}}=972.6 \text{ [W]}$$

B) La ley de enfriamiento de Newton se empleara para la obtención del calor perdido por convección:

$$Q_{\text{conveccion}} = h_{\text{conveccion}} \cdot A_{\text{superficial}} \cdot (T_{\text{amb}} - T_{\text{superficial}}) \dots\dots\dots\text{ec.4.B.3}$$

donde:

Tabla 4.11 Datos para la obtención de la pérdida por convección

Propiedad	Simbología	Valor
Coefficiente convectivo del aire en recintos cerrados	$h_{\text{conveccion}}$	4 [W/m]
Área superficial del horno	$A_{\text{superficial}}$	33.8 [m <sup>2</sup> ]
Temperatura ambiente	$T_{\text{amb}}$	25 [°C]
Temperatura externa del horno	$T_{\text{superficial}}$	60 [°C]

Al sustituir estos valores se tiene que las pérdidas de calor por convección son:

$$Q_{\text{convección}}=4732 \text{ [W]}$$

C) Para la obtención del calor perdido por radiación se puede aplicar la Ley de Stefan-Boltzmann\*:

$$Q_{\text{radiacion}} = \epsilon_{\text{superficie}} \cdot \sigma \cdot A_{\text{superficial}} \cdot (T_{\text{superficial}}^4 - T_{\text{amb}}^4) \dots\dots\dots\text{ec.4.B.4}$$

\*Ley de Stefan-Boltzmann: Establece que el comportamiento de un cuerpo negro emite radiación con una potencia emisiva proporcional a la cuarta potencia de su temperatura.

donde:

Tabla 4.12 Datos para la obtención de la pérdida por radiación

Propiedad	Simbología	Valor
Coefficiente de emisividad para superficies oscuras	$E_{\text{superficie}}$	0.4
Constante de Steffan-Boltzmann	$\Sigma$	$5.67 \times 10^{-8} \text{ [W/m}^2 \text{ K}^4]$
Área superficial del horno	$A_{\text{superficial}}$	33.8 [m <sup>2</sup> ]
Temperatura del horno	$T_{\text{amb}}$	298.15 [K]
Temperatura de salida del molde	$T_{\text{superficial}}$	333.15 [K]

Al sustituir estos valores se tiene que las pérdidas de calor por radiación son:

$$Q_{\text{radiacion}}=3386 \text{ [W]}$$

D) Para la obtención del calor requerido por el total de piezas se multiplicara el número de piezas por la cantidad de energía requerida para la elaboración de una pieza:

$$Q_{\text{pieza total}} = Q_{\text{pieza}} \cdot N_{\text{piezas}} \dots\dots\dots \text{ec.4.B.5}$$

donde de las condiciones de diseño del horno:

$$N_{\text{piezas}}=20$$

Al sustituir este valor obtenemos:

$$Q_{\text{pieza total}}=2279 \text{ [W]}$$

Sustituyendo estos resultados en la ecuación 4.A.7 tenemos que

$$Q_{\text{horno}}=11369 \text{ [W]}$$

Lo cual es toda la energía que debe ser proporcionada al horno y de esta cantidad solo el 20.03% se emplea en calentar los moldes.

#### 4.4 Balance energético del horno

El balance energético requiere no solo medidas del calor sino también contabiliza la energía transportada mediante flujo másico\* debido a esto al realizar un balance energético en la zona del horno se puede obtener el flujo másico de gases de combustión necesaria para proporcionar las condiciones de temperatura indicadas en el horno, si se considera un sistema termodinámico abierto mostrado en la Figura 4.4.A

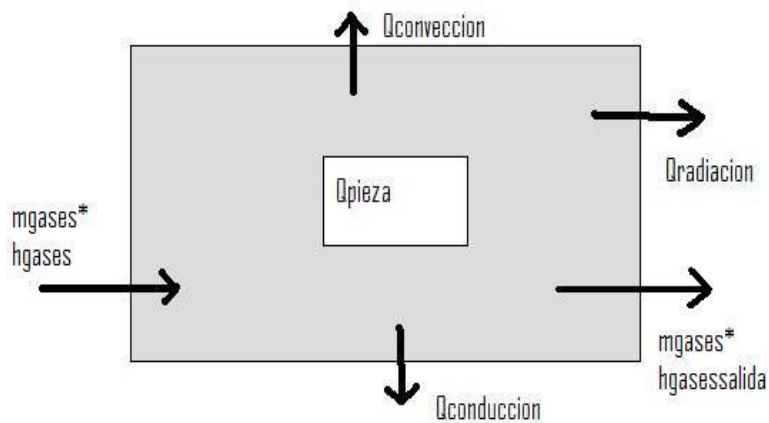


Figura 4.4.A Donde se muestra el sistema termodinámico bajo el cual se realizó el análisis de flujo de gases en el horno.

Al realizarse un balance energético se tiene que:

$$masa\ gases_{entrada} \cdot h\ gases_{entrada} = Q_{horno} + masa\ gases_{salida} \cdot h\ gases_{salida} \dots\dots ec.4.C.1$$

De donde si no se consideran pérdidas de flujo de gases, entonces:

$$masa\ gases_{entrada} = masa\ gases_{salida} = masa_{gases} \dots\dots ec.4.C.2$$

A) Para la obtención de la entalpía\*\* de los gases entrada ( $hgases_{entrada}$ )

$$h\ gases_{entrada} = Cp_{aire\ entrada} \cdot (T_{ent\ horno} - T_{ent}) \dots\dots ec.4.C.3$$

\*Flujo másico: Rapidez a la que la masa atraviesa la frontera del sistema.

\*\*Entalpía: Suma de la energía interna que posee una sustancia.

Dadas las condiciones iniciales se tienen los siguientes datos:

Tabla 4.13 Condiciones de los gases de entrada

Propiedad	Simbología	Valor
Capacidad térmica específica del aire a la entrada	$C_{p_{aire\ entrada}}$	1.04 [kJ/kgK]
Temperatura del aire a la entrada del horno	$T_{ent\ horno}$	300 [°C]
Temperatura inicial del aire	$T_{ent}$	25 [°C]

Al sustituir los datos anteriores obtenemos:

$$h_{gases\ entrada}=287.1 \text{ [kJ/kg]}$$

B) Para la obtención de la entalpia de los gases a la salida ( $h_{gases\ salida}$ )

$$h_{gases\ salida} = C_{p_{airesalida}} \cdot (T_{salgases} - T_{ent}) \dots\dots\dots ec.4.C.4$$

De donde debido a las condiciones de salida se tienen los siguientes datos:

Tabla 4.14 Condiciones de los gases de salida

Propiedad	Simbología	Valor
Capacidad térmica específica del aire a la salida	$C_{p_{airesalida}}$	1.04 [kJ/kgK]
Temperatura del aire a la salida del horno	$T_{salgases}$	240 [°C]
Temperatura inicial del aire	$T_{ent}$	25 [°C]

C) Para la obtención de el flujo másico de gases ( $masa_{gases}$ ):

$$masa_{gases} = \frac{Q_{horno}}{h_{gases\ entrada} - h_{gases\ salida}} \dots\dots\dots ec.4.C.5$$

Al sustituir todos los valores en la ecuación se obtiene:

$$masa_{gases}=0.1815 \text{ [kg/s]}$$

### 4.5 Balance energético del quemador

Al realizar un balance energético en el quemador se puede obtener la masa de combustible requerida, sea el siguiente sistema mostrado en Figura 4.5.A

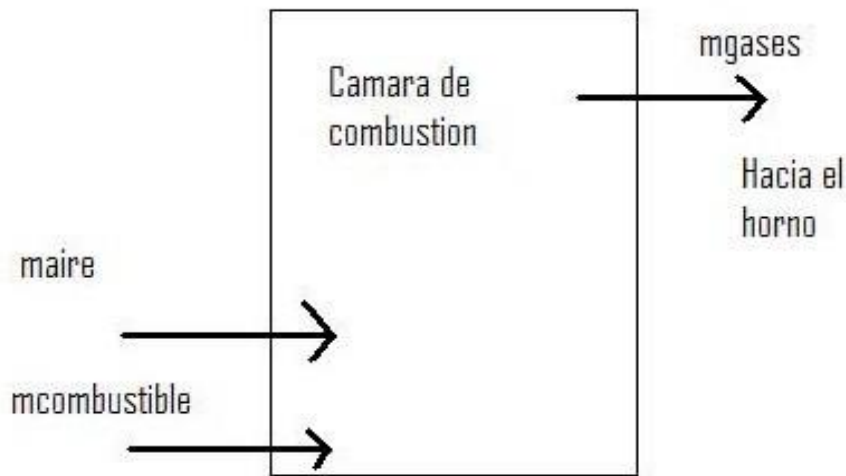


Figura 4.5.A Se muestra el balance energético del quemador

La masa de combustible se puede obtener con la siguiente ecuación obtenida al realizar el balance energético del sistema:

$$masa_{combustible} = \frac{masa_{gases} \cdot h_{gases_{entrada}}}{eficiencia_{quemador} \cdot PC} \dots\dots\dots ec.4.D.1$$

Al sustituir los siguientes valores:

Tabla 4.15 Condiciones de los gases en el quemador

Masa de los gases de combustion	$masa_{gases}$	0.1276 [kg/s]
Entalpia de los gases a la entrada	$h_{gases_{entrada}}$	$hgasesent=287.1$ [kJ/kg]
Eficiencia del quemador	$eficiencia_{quemador}$	98.00%
Poder calorifico del combustible, para gas LP	PC	49858 [kJ/kg]

Se obtiene que:

$$m_{comb}=1.066 \times 10^{-3} \text{ [kg/s]}$$

Lo cual para una hora de trabajo da un valor de:

$$m_{comb}=3.839 \text{ [kg/h]}$$

Al obtener el flujo másico de combustible entonces se puede realizar una comparación económica entre los dos sistemas de calentamiento propuestos, si el costo del gas LP por kilogramo para la Ciudad de México es de \$11.95, entonces:

$$\text{costo gas} = 45.88 \text{ [$/h]}$$

para una sola pieza entonces dividiendo entre el total de éstas:

$$\text{costo gas}_{\text{pieza}} = \frac{\text{costo gas}}{N_{\text{piezas}}} \dots\dots\dots \text{ec.4.D.2}$$

Si se supone que una máquina de rotomoldeo en la cual las primeras 20 piezas terminan su etapa de calentamiento e inmediatamente se coloca otra ronda en el interior del horno tenemos que la cantidad de piezas producidas son: 40 en una sola hora de trabajo, por lo tanto al sustituir los valores se obtiene:

$$\text{costo gas}_{\text{pieza}} = 1.147 \text{ [$/pieza]}$$

Se tiene un costo de fabricación de una sola pieza por medio del proceso convencional de calentamiento por horno de convección, ahora si el proceso se realizará mediante el calentamiento directo del molde por medio de resistencias eléctricas, aplicando la conducción como el mecanismo de transferencia de calor.

Para realizar la comparación con el mecanismo de conducción si de la ecuación 4.A.4 se sabe que la cantidad de energía necesaria para la fabricación de una pieza es:

$$Q_{\text{total}} = 120.637 \text{ [W]}$$

Siendo esta la cantidad de energía que debe ser proporcionada por las resistencias eléctricas, si se aplica la Tarifa 2 de Comisión Federal de Electricidad para el mes de octubre de 2012, se tiene un costo de 2.141 [\$/kWh].

Por lo cual el costo de la producción de una sola pieza por medio de calentamiento eléctrico directo se obtiene de la siguiente manera:

$$\text{costo electricidad}_{\text{pieza}} = Q_{\text{total}} \cdot \text{Tarifa} \dots\dots\dots \text{ec.4.D.3}$$

Se obtiene el valor de

$$\text{costo electricidad}_{\text{pieza}} = 0.2439 \text{ [$/h]}$$

Cabe recordar que en la etapa de calentamiento por resistencia eléctrica sólo se produce una sola pieza y el enfriamiento de la pieza se realiza en el mismo molde por lo tanto aunque la duración aproximada de la etapa de calentamiento sea de 23 minutos se considera el tiempo necesario para el enfriamiento del molde y el tiempo necesario para



colocar otra carga de polímero en su interior siendo aproximadamente 1 hora.

### 4.6 Resumen de Resultados

En la siguiente tabla se muestra un resumen de los resultados obtenidos, considerando una jornada laboral de 8 horas por día.

Tabla 4.16 Resumen y comparación de costos

Tipo de Calentamiento	Piezas producidas por hora	Piezas producidas por día	Costo [\$/h]	Costo [\$/día]	Costo \$/año
Eléctrico	1	8	0.2439	1.9512	712.188
Horno de Gas	40	320	45.87	367	133955

En los siguientes gráficos se muestra una comparación energética entre ambos sistemas de calentamiento.

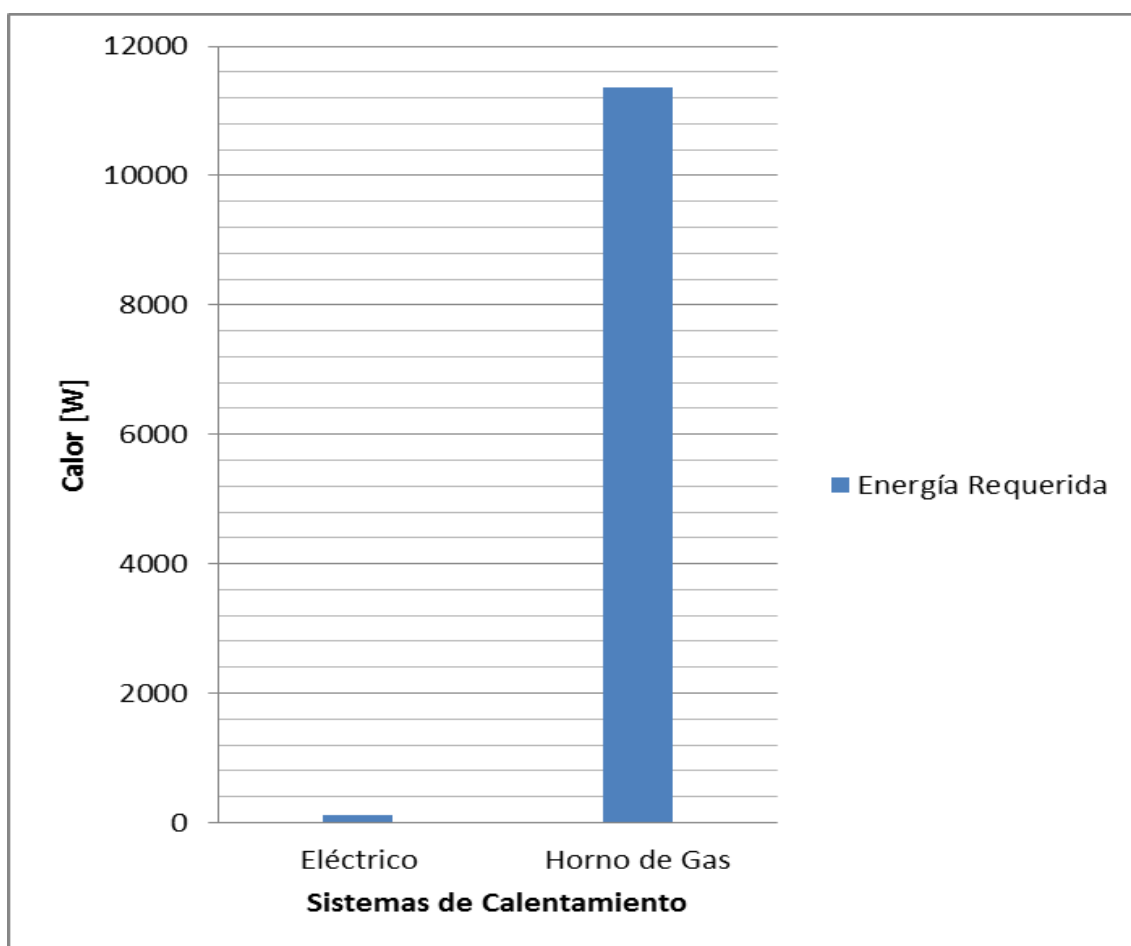


Figura 4.6 Comparación entre la energía requerida por ambos sistemas de calentamiento.

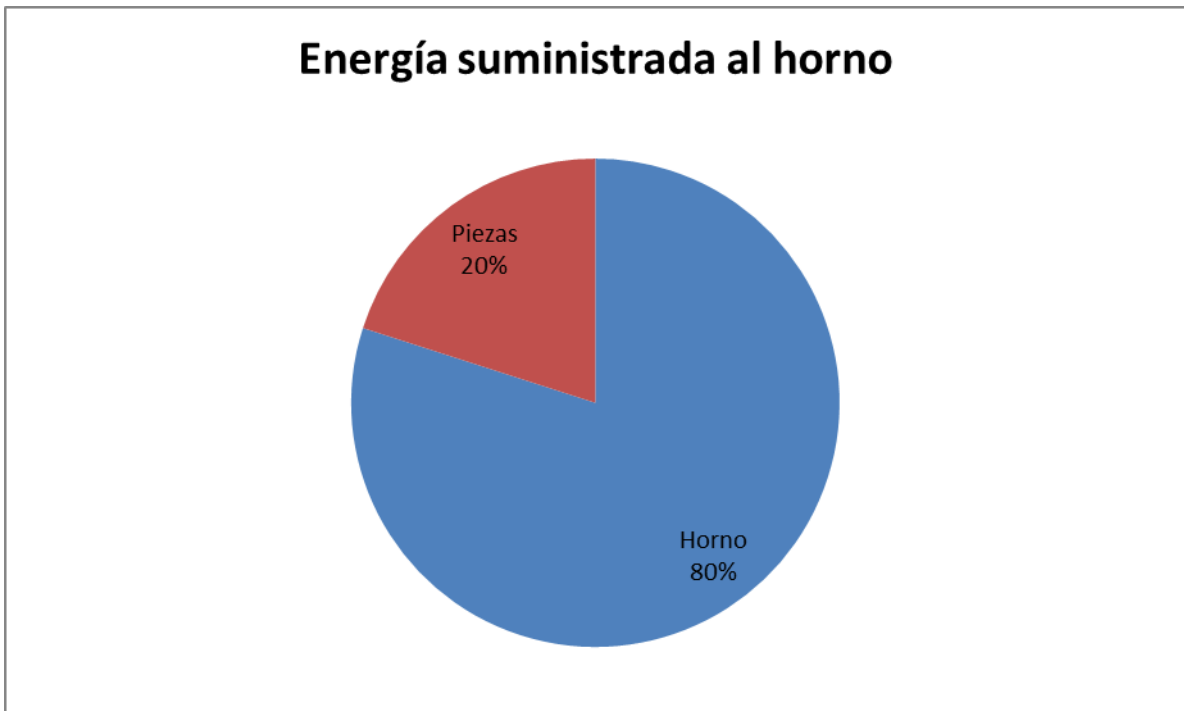


Figura 4.7 Cantidad de energía suministrada en el horno de la cual solo esa fracción es empleada en las piezas.

En la Figura 4.6 se muestra la cantidad de energía empleada en ambos sistemas de calentamiento en la cual se observa una gran diferencia, se ha considerado la energía total que debe ser suministrada al horno, mientras que en la Figura 4.7 se observa que de la cantidad total de energía suministrada al horno tan solo el 20% es lo que se emplea para el calentamiento de los moldes la otra fracción se distribuye a lo largo de las pérdidas energéticas del sistema.

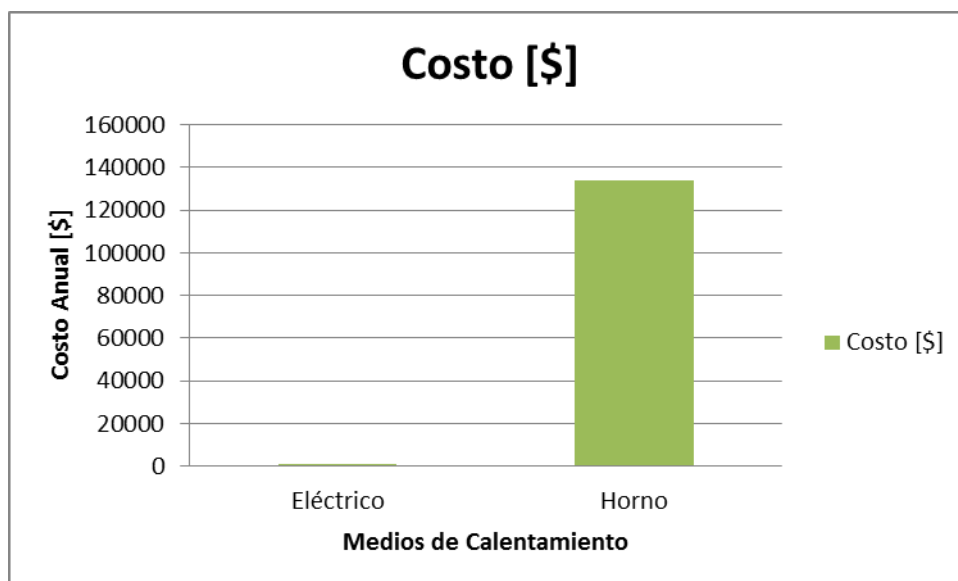


Figura 4.8 Comparación de costos de producción en un año

En la última Figura 4.8 se muestra la comparación entre costos de producción por ambos

medios de calentamiento siendo una enorme diferencia aunque esta gráfica se equilibra al comparar la cantidad de piezas producidas como se observa en la siguiente Figura 4.9.



Figura 4.9 Piezas producidas por año

En la Figura 4.9 se muestra la comparación entre la cantidad de piezas producidas durante el mismo lapso de tiempo por ambos sistemas de calentamiento, la diferencia es marcada principalmente por la duración del proceso en el sistema eléctrico, ya que la duración de éste es más del doble comparada con el proceso a través del calentamiento por horno.

Además de que en una sola etapa de calentamiento en el horno se producen 20 piezas y en una hora de trabajo se producen 40, mientras que en el sistema eléctrico tan solo se produce una pieza por hora.

Por ejemplo, si se desea producir 1000 piezas podemos comparar ambos mecanismos de transferencia, con base a los datos de la Tabla 4.16, construiremos la siguiente Tabla 4.17.

Tabla 4.17 Comparación entre mecanismos de transferencia para la producción de 1000 pzs.

<b>Sistema Eléctrico</b>		<b>Horno</b>	
<b>Tiempo de Producción</b>	125 días	<b>Tiempo de Producción</b>	3.125 días
<b>Costo</b>	\$ 243.9	<b>Costo</b>	\$1146.9

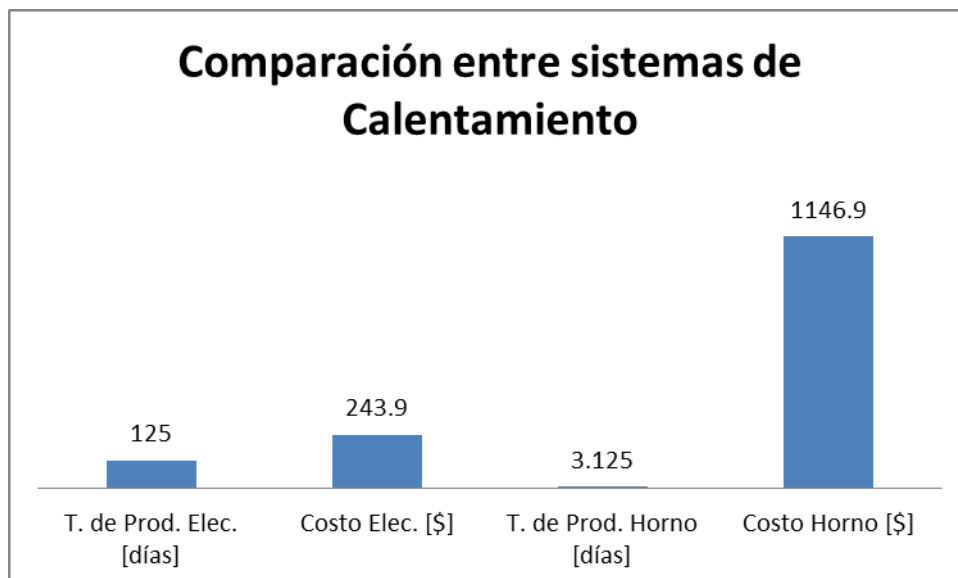


Figura 4.10 Se muestran los resultados de la Tabla 4.15

A partir de la imagen anterior se observa una enorme diferencia entre los tiempos de producción y en base a la Tabla 4.17 se puede obtener una relación entre ambos sistemas de calentamiento, comparando el sistema eléctrico contra el calentamiento en horno:

Tabla 4.18 Relaciones entre ambos mecanismos de transferencia

<b>Velocidad de Producción</b>	<b>2.5%</b>
<b>Costo</b>	<b>21.2%</b>

La Tabla 4.18 se realizó comparando el sistema eléctrico contra el calentamiento en horno de rotomoldeo, lo cual es una comparación entre el calentamiento por conducción y por convección.

Se observa que la velocidad de producción es muy baja en relación con la cantidad de piezas que se pueden producir en un horno de rotomoldeo, sin embargo, el costo es mucho menor lo cual, es benéfico para la producción de una pequeña cantidad de unidades, o un proceso en el que la velocidad de producción no sea un determinante.

## Conclusiones

En el presente trabajo se han podido determinar una serie de ventajas y desventajas generadas por la aplicación de resistencias eléctricas a un molde de rotomoldeo, las cuales se muestran a continuación:

- Ventaja:

Economía.

Si comparamos el costo de producción entre ambos métodos considerando que ya se tiene el herramental y la maquinaria necesaria, obtenemos que el precio de elaboración, para el calentamiento por medio de resistencias es en promedio el 21 % del costo total de producción a través del horno, empleando los resultados obtenidos en la Tabla 4.18.

- Desventaja:

Tiempo de producción.

Debido al tiempo que tarda el proceso en el calentamiento eléctrico la capacidad de producción es de tan sólo el 2.5 % en comparación con la producción por horno siendo una desventaja enorme en el caso de que sea necesaria la producción de una gran cantidad de piezas, ya que el tiempo que tardaría un gran lapso de tiempo para producir la cantidad de piezas necesarias. Nuevamente se ha basado ésta conclusión en los datos de la Tabla 4.18.

Por otra parte haciendo la comparación en costo, el realizar la etapa de calentamiento por medio de una resistencia eléctrica aplicada directamente sobre el molde es más económico que realizarlo de manera convencional en un horno de convección, debido a que las pérdidas energéticas se ven reducidas a pesar de que se incrementa el tiempo de la etapa de calentamiento.

Sin embargo, el horno de convección presenta la ventaja de producir varias piezas al mismo tiempo, algo que no se puede realizar empleando el calentamiento

directo sobre el molde, debido a esto el proceso incrementaría el tiempo de producción así como el inconveniente del molde el cual al tener añadido un sistema de calentamiento directo sería difícil de modificar.

Esto puede ser algo negativo para la industria dado que se tendría que realizar una comparación entre el tiempo de producción de una pieza y el balance económico por este motivo el calentamiento directo del molde debe ser recomendado para producción a baja escala, en donde el tiempo de duración del proceso no sea un impedimento así como la cantidad de piezas a producir ya que aproximadamente las ventajas y desventajas que presenta el calentamiento por resistencias son las siguientes:

Es por eso que una máquina de rotomoldeo que emplee resistencias eléctricas o algún otro medio alternativo de calentamiento, es recomendada para corridas cortas de producción o para laboratorios de investigación <sup>[1]</sup>, en este caso debido a la ventaja económica que presenta y además se podría considerar también el tamaño de ésta, dado que será más pequeña que una de las máquinas habituales de rotomoldeo.

## Referencias

- [1] Crawford, Throne. *“Rotational Molding Technology”*, Plastic Design Library William Andrew Publishing 2002
- [2] Crawford, Kearns. *“Practical Guide to Rotational Moulding”*, Smithers Rapra Press 1998
- [3] <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/42230-Hacia-el-electroconformado-de-alta-velocidad.html> el día 31 de Agosto 2012, 19:13 horas
- [4] Crawford, Throne. *“Rotational Molding of Polymers”*, Plastic Design Library William Andrew Publishing 2002
- [5] <http://www.rotomachinery.com/content/view/28/39/lang,es/>
- [6] Alonso Grañena, Ángela. *“Proceso de diseño y fabricación de una luminaria por rotomoldeo”* Universidad de Zaragoza, Septiembre 2011
- [7] Yunus Cengel. *“Transferencia de Calor”*, McGraw-Hill, 4° Edición, 2011
- [8] Yunus Cengel. *“Termodinámica”*, McGraw-Hill 2005