



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AVENIDA DE  
MÉXICO

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN  
INGENIERÍA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**“DISEÑO DE PIEZAS PLÁSTICAS  
ROTOMOLDEADAS”**

**T E S I S**

PARA OPTAR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERÍA**

**INGENIERÍA MECÁNICA – DISEÑO MECÁNICO**

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

**SANDRA ARACELY ORTEGA ARREDONDO**

TUTOR:

**Dr. JESÚS MANUEL DORADOR GONZÁLEZ**

**2006**



# Índice

Prólogo		iii
Objetivos		iv
Alcances		v
1	Introducción al proceso de rotomoldeo	1
1.1	Historia	1
1.2	Principio de funcionamiento del Proceso de Rotomoldeo	2
1.2.1	Caga del material	3
2.2.1.1	Cálculo del peso y volumen de la carga	6
1.2.2	Calentamiento	7
1.2.3	Enfriamiento	8
1.2.4	Desmolde	9
1.3	Ventajas y desventajas del Rotomoldeo	10
1.3.1	Ventajas	10
1.3.2	Desventajas	11
1.4	Aplicaciones	12
2	Materiales plásticos	14
2.1	Clasificación	15
2.1.1	Comportamiento térmico	15
2.2	Plásticos usados en el proceso de Rotomoldeo	18
2.2.1	Polietilenos	19
2.2.1.1	Polietileno de baja densidad	20
2.2.1.2	Polietileno de alta densidad	21
2.2.1.3	Polietileno lineal de baja densidad	23
2.2.2	Polipropileno	23
2.2.3	Policloruro de vinilo (PVC)	25
2.2.4	Policarbonato (PC)	26
2.2.5	Poliamida (Nylon)	27
2.3	Selección de materiales	30
2.3.1	Métodos para la selección de materiales	33
2.3.1.1	Método de costo por unidad de propiedad	33
2.3.1.2	Método de propiedades ponderadas	34
2.3.1.3	Método de propiedades al límite	35
3	Análisis de resistencia en piezas plásticas huecas	37
3.1	Propiedades mecánicas de los plásticos	37
3.1.1	Pruebas de deslizamiento (flujo)	39
3.1.2	Recuperación de la deformación	41
3.1.3	Fuerzas de impacto	42
3.1.4	Dureza Rockwell	44



3.2	Comportamiento de esfuerzo – deformación en los plásticos	44
3.3	Análisis mecánico de piezas plásticas huecas	46
3.3.1	Viga hueca simplemente apoyada con carga uniformemente distribuida	47
3.3.2	Viga en cantiliver hueca	48
3.3.3	Columnas	49
3.3.4	Recipientes a presión	51
3.3.4.1	Recipientes a presión cilíndricos	52
3.3.4.2	Recipientes a presión esféricos	53
3.3.4.3	Recipientes a presión debida a un líquido	54
4	Recomendaciones de diseño para piezas plásticas rotomoldeadas	55
4.1	Espesor de pared	57
4.2	Factor de contracción	61
4.3	Radios	61
4.4	Ángulos	63
4.5	Conicidad o ángulo de salida	65
4.6	Roscas	67
4.7	Agujeros	69
4.8	Insertos	70
4.9	Paredes dobles	72
4.10	Capas múltiples	74
4.11	Costillas	77
4.12	Formación de columnas	78
5	Metodología para el diseño de piezas plásticas huecas por rotomoldeo	82
6	Caso de estudio	90
6.1	Análisis de viabilidad del uso proceso de rotomoldeo	93
6.2	Configuración geométrica de la pieza plástica hueca	93
6.3	Análisis de resistencia	93
6.4	Selección del material	95
6.5	Verificación del material	96
6.6	Aplicación de recomendaciones de diseño	96
6.7	Pieza final	99
6.8	Errores y Alternativas para eliminar fallas en la fabricación de la nodriza horizontal de tres soportes	100
	Conclusiones	102
	Bibliografía	104



## Prólogo

El siguiente trabajo el cual lleva por título "Diseño de piezas plásticas rotomoldeadas", se enfoca en el diseño de piezas plásticas huecas. El Proceso de Rotomoldeo es un método de transformación de resinas plásticas que no ha sido difundido ampliamente debido a que existe muy poca información bibliográfica. A la mayoría de los moldeadores que usan este método de transformación les ha tomado tiempo para estandarizar sus procesos con el fin de poder obtener una producción de piezas con menos defectos. Esto involucra la inversión de años para poder adquirir la experiencia suficiente. A través de estos años se sufren grandes pérdidas económicas ocasionadas por los desperdicios y la gran cantidad de piezas de mala calidad.

Si alguien quiere entrar al campo de la transformación del plástico le será difícil adquirir tales conocimientos fácilmente, por ejemplo en cuestión al tipo de material ideal para el proceso de Rotomoldeo es indispensable conocer distintos factores como: a que temperaturas se deben de manejar los diferentes materiales, tipo de enfriamiento, el flujo del material, en que presentación es más conveniente (líquido o sólido), la degradación del material, resistencia mecánica de las piezas plásticas, etc. El conocer como debe ser el diseño geométrico de las piezas para una manufactura eficiente libre de defectos es una parte esencial de la fabricación de piezas plásticas por el proceso de Rotomoldeo que el moldeador debe de tomar en cuenta.

Por todos estos factores involucrados se determinó la conveniencia de realizar este trabajo el cual proporciona una metodología que contiene la información suficiente para la realización del *Diseño de Piezas Plásticas por el Proceso de Rotomoldeo*. Primeramente se muestra a grandes rasgos cuales fueron los comienzos del proceso a través del tiempo, las etapas que lo conforman así como los parámetros que se involucran en cada una de ellas para poder obtener piezas plásticas rotomoldeadas de buena calidad. También se muestran las grandes ventajas que el proceso de Rotomoldeo ofrece a los moldeadores de resinas plásticas y sus campos de aplicación.

Es importante mencionar que el Rotomoldeo ocupa el quinto lugar nacional de importancia con respecto a los procesos de transformación de plástico. Con esta referencia se visualiza que el Rotomoldeo es una técnica en crecimiento [23].

El capítulo 2 incluye información referente a los materiales que se usan en el proceso, donde la cantidad de plásticos que actualmente se rotomoldean son básicamente 6 o 7 esto es porque el costo de transformación del plástico a un estado de polvo resulta muy elevado, se tendrían que fabricar cantidades muy



altas de piezas de este material para que sea costeable esta reducción del plástico.

Conocer ésta información es básico para el transformador de plásticos, con la finalidad de hacer uso adecuado de las resinas plásticas. Es decir, que para determinada aplicación el material no se encuentre sobrado en propiedades o en su defecto se obtengan piezas que no cumplan las especificaciones del producto, esto resulta en costos elevados de manufactura y en el precio al consumidor del producto. Para evitar estos errores es importante realizar una correcta selección del material, como se indica en la sección 2.3.

Este tema tiene mucha importancia porque es aquí donde entra la interrelación que existe entre *proceso, forma y función* que va a tener la pieza es decir, si se necesita que esta sea ligera, robusta, con alta resistencia mecánica o de costo mínimo, resistencia química, cumpla con normas FDA, etc.

El análisis de resistencia que se aborda en este trabajo es básico y sencillo en el que las piezas plásticas son asemejadas a vigas huecas sometidas a flexión, columnas sometidas a una fuerza vertical, fuerzas de presión debidas a gases, sólidos o líquidos.

Una parte importante del trabajo radica en los factores directos involucrados en la geometría ideal que deben tener las piezas para que puedan ser rotomoldeadas, así como también cual es la resistencia de las piezas y las formas que ayudan a que aumente.

Una vez que al moldeador ya se le proporcionó esta información contenida en una metodología, será capaz de saber cuál va a ser la configuración de la pieza a rotomoldear, el material apropiado para el producto, si la resistencias del material y la geometría se encuentran dentro de especificación, cuales son las recomendaciones geométricas para que la pieza pueda ser manufacturada por rotomoldeo y poder obtener piezas sin defectos. Con toda esta información el moldeador no necesitará ser un experto o haber involucrado muchos años.



## Prólogo

El siguiente trabajo el cual lleva por título " Diseño de piezas plásticas rotomoldeadas ", se enfoca en el diseño de piezas plásticas huecas. El Proceso de Rotomoldeo es un método de transformación de resinas plásticas que no ha sido difundido ampliamente debido a que existe muy poca información bibliográfica. La mayoría de los moldeadores que usan este método de transformación les ha tomado tiempo para estandarizar sus procesos con el fin de poder obtener una producción de piezas con menos defectos. Esto involucra la inversión de años para poder adquirir la experiencia suficiente. A través de estos años se sufren grandes pérdidas económicas ocasionadas por los desperdicios y la gran cantidad de piezas de mala calidad.

Si alguien quiere entrar al campo de la transformación del plástico le será difícil adquirir tales conocimientos por ejemplo en cuestión al tipo de material ideal para el proceso de Rotomoldeo es indispensable conocer distintos factores como: a que temperaturas se deben de manejar los diferentes materiales, tipo de enfriamiento, el flujo del material, en que presentación es más conveniente (líquido o sólido), la degradación del material, resistencia mecánica de las piezas plásticas, etc. Parte esencial de la fabricación de piezas plásticas por el proceso de Rotomoldeo que el moldeador debe de tomar en cuenta es el conocer como debe ser el diseño geométrico de las piezas para una manufactura eficiente libre de defectos.

Por todos estos factores involucrados se vio la conveniencia de realizar este trabajo el cual proporciona una metodología que contiene la información suficiente para la realización del *Diseño de Piezas Plásticas por el Proceso de Rotomoldeo*. Primeramente se muestra a grandes rasgos cuales fueron los comienzos del proceso a través del tiempo, las etapas que lo conforman así como los parámetros que se involucran en cada una de ellas para poder obtener piezas plásticas rotomoldeadas de buena calidad. También se muestran las grandes ventajas que el proceso de Rotomoldeo ofrece a los moldeadores de resinas plásticas y sus campos de aplicación.

Es importante mencionar que el Rotomoldeo ocupa el quinto lugar nacional de importancia con respecto a los procesos de transformación de plástico. Con esta referencia se visualiza que el Rotomoldeo es una técnica en crecimiento [23].

El capítulo 2 incluye información referente a los materiales que se usan en el proceso, donde la cantidad de plásticos que actualmente se rotomoldean son básicamente 6 o 7 esto es porque el costo de transformación del plástico a un estado de polvo resulta muy elevado, se tendrían que fabricar cantidades muy



altas de piezas de este material para que sea costeable esta reducción del plástico.

Conocer ésta información es básico para el transformador de plásticos, con la finalidad de hacer uso adecuado de las resinas plásticas. Es decir, que para determinada aplicación el material no se encuentre sobrado en propiedades o en su defecto se obtengan piezas que no cumplan las especificaciones del producto, esto resulta en costos elevados de manufactura y en el precio al consumidor del producto. Para evitar estos errores es importante realizar una correcta selección del material, como se indica en la sección 2.3.

Este tema tiene mucha importancia porque es aquí donde entra la interrelación que existe entre *proceso, forma y función* que va a tener la pieza es decir, si se necesita que esta sea ligera, robusta, con alta resistencia mecánica o de costo mínimo, resistencia química, cumpla con normas FDA, etc.

El análisis de resistencia que se aborda en este trabajo es básico y sencillo en el que las piezas plásticas son asemejadas a vigas huecas sometidas a flexión, columnas sometidas a una fuerza vertical, fuerzas de presión debidas a gases, sólidos o líquidos.

Una parte importante del trabajo radica en los factores directos involucrados en la geometría ideal que deben tener las piezas para que puedan ser rotomoldeadas, así como también cual es la resistencia de las piezas y las formas que ayudan a que aumente.

Una vez que al moldeador ya se le proporcionó esta información contenida en una metodología, ya es capaz de saber cuál va a ser la configuración de la pieza a rotomoldear, el material apropiado para el producto, si la resistencias del material y la geometría se encuentran dentro de especificación, cuales son las recomendaciones geométricas para que la pieza pueda ser manufacturada por rotomoldeo y poder obtener piezas sin defectos. Con toda esta información el moldeador no necesitará ser un experto o haber involucrado muchos años.



## Objetivos

Dada la poca información teórica que se tiene sobre el proceso de rotomoldeo y la importancia del mismo dentro de los procesos de fabricación de piezas de plástico al ocupar el quinto lugar en producción de material procesado a nivel nacional [23], esta tesis tiene el propósito de conjuntar los diversos factores que se deben tomar en cuenta en el diseño de piezas que se producirán por este medio en una metodología para ayudar a que los productores no tengan que invertir grandes cantidades de tiempo y recursos al trabajar por medio de pruebas y errores.

Dicha metodología debe contener la información suficiente para la obtención de piezas plásticas capaces de ser manufacturadas por éste proceso de manufactura. Y que el resultado sean piezas libres de defectos ocasionados por una mala configuración geométrica.

También debe garantizar que la pieza diseñada por rotomoldeo cuente con el material adecuado para la aplicación, el espesor mínimo requerido, que la resistencia de las piezas sea la adecuada, y que el costo final no sea alto, etc.

Debido a que en México la principal área de aplicación del rotomoldeo es la manufactura de contenedores para el agua potable, otro de los objetivos es que los transformadores se den cuenta de la existencia de áreas de mercado vírgenes con gran potencial.





## Alcances

Para el cumplimiento de los objetivos anteriormente planteados se establecieron las siguientes actividades de investigación:

- Investigar en que consiste el proceso de manufactura, como se dividen sus etapas de manufactura.
- Cuales son los materiales usados en el proceso de rotomoldeo, así como sus propiedades, la presentación física para poder ser usados en el proceso de rotomoldeo, etc.
- Ventajas, desventajas y aplicaciones del proceso de rotomoldeo.
- Recopilar información referente a métodos para selección de materiales
- Información de cómo se presentan las fuerzas en productos huecos
- Cuanta bibliografía existe especializada en el proceso de rotomoldeo
- Buscar revistas especializadas en materiales plásticos y obtención de artículos
- Recopilar información referente a características geométricas que debe tener las piezas rotomoldeadas proporcionadas por empresas manufactureras.

Con la recopilación de información anterior se estructurará una metodología para el diseño de piezas plásticas por el proceso de rotomoldeo.

Por último se realizara la aplicación de dicha metodología en un caso de estudio que consiste en someter una pieza cualquiera fabricada por el proceso de rotomoldeo a una inspección donde se identifican los parámetros referentes a las reglas de diseño que deben de tener las piezas fabricadas por rotomoldeo, que el material con que esté fabricada la pieza sea el correcto, etc.



# 1 Introducción al Proceso de rotomoldeo

## 1.1 Historia

El rotomoldeo es un proceso de transformación primario intermitente que se usa para la fabricación de artículos plásticos huecos de tamaños muy variados, desde perillas que se usan en la higiene de bebés hasta grandes contenedores de 75,000 litros [1].

En este proceso un plástico líquido o en polvo se deposita dentro del molde hueco, dicho molde gira en forma lenta en dos direcciones a través de ejes biaxiales, en una cámara caliente. El material se distribuye y se adhiere de forma homogénea en toda la superficie interna del molde, posteriormente se enfría para permitir la extracción de la pieza terminada.

En los últimos años el rotomoldeo ha evolucionado rápidamente y ha llamado fuertemente la atención de los transformadores del plástico por todas las ventajas y cualidades que ofrece, como por ejemplo:

- Ventajas económicas
- Flexibilidad en cuanto al diseño,
- Propiedades únicas en los productos obtenidos

El proceso de rotomoldeo comenzó en el año de 1855 en la industria militar [2, 3], cuando el británico R. Peters patentó el moldeo para los cascos de misiles balísticos y otras piezas huecas; aplicando el principio básico del proceso de rotomoldeo, pero con la diferencia que se hacía el uso de la fuerza centrífuga para mantener el contacto entre el material y el molde. Diez años más tarde el norteamericano T. J. Lovegrove presentó un sistema mejorado que permitía la producción de material bélico con paredes más uniformes.

En los primeros años del siglo XX, el rotomoldeo empezó a usarse para fabricar diversos productos huecos. Por ejemplo, en 1905 F. A Voelke moldeó objetos de cera; en 1910 los norteamericanos G. S. Baker y G. W. Peras fabricaban huevos de chocolate, Y R. J. Powell producía objetos de yeso en 1920, prescindiendo de la fuerza centrífuga, este sistema utilizaba por primera vez las ventajas del moldeo con rotación lenta con una relación 4:1.

En 1932, el inglés W. Kay fabricaba balones de caucho; la máquina que desarrolló presentaba un sistema de transmisión muy semejante a los usados actualmente. Así el proceso de rotomoldeo de plásticos fue básicamente desarrollado en los años de 1940. En esta época no ofrecía muchas ventajas porque no había variedad en materiales capaces de ser rotomoldeados. Sin



embargo dos décadas después, mejoras en el control del proceso y con el desarrollo de plásticos en polvo resultó en un incremento significativo del uso de este proceso.

En 1946 la empresa Union Carbide introdujo el primer compuesto comercial de PVC líquido en plastificante, mejor conocido como plastisol, que dos años más tarde sería usado como materia prima para el rotomoldeo. El plastisol se convirtió en el material que el rotomoldeo requería para iniciar la ampliación de su mercado y empezar a notarse comercialmente. La gran versatilidad del PVC fue la característica que más contribuyó a su aceptación.

Con el descubrimiento del polietileno, el rotomoldeo explora nuevas aplicaciones que limitaban al PVC, sin embargo su presentación comercial era en gránulos que no son posibles transformar por el proceso de rotomoldeo. Años más tarde en 1955 la compañía Pallman Pulverizing Company, Inc. desarrolló la tecnología de molinos que permitían la obtención de polvo muy fino a partir de plásticos con baja temperatura de fusión sin emplear agentes refrigerantes.

Con este cambio en la presentación del polietileno en pocos años el rotomoldeo tuvo una amplia aceptación en el mercado. Esta industria gozó de un alto crecimiento gracias al uso de los polietilenos.

Nuevos materiales como el policarbonato, descubierto en 1964, se emplea en la fabricación de luminarias transparentes, en 1970 apareció el polietileno entrecruzado para diversas aplicaciones dentro de la industria del transporte alrededor de la misma fecha, el polietileno y la poliamida reforzados con fibra de vidrio iniciaron la introducción del rotomoldeo en nuevos mercados.

En la actualidad el polietileno es el material más usado en el proceso de rotomoldeo con un índice del 90%. Pero día con día aparecen otros materiales capaces de ser procesados por este método.

## **1.2 Principio de funcionamiento del proceso de rotomoldeo**

El proceso de rotomoldeo consiste de cuatro etapas como se observa en la figura 1.1 [3-13]

- Carga de materia prima
- Calentamiento
- Enfriamiento
- Extracción de la pieza



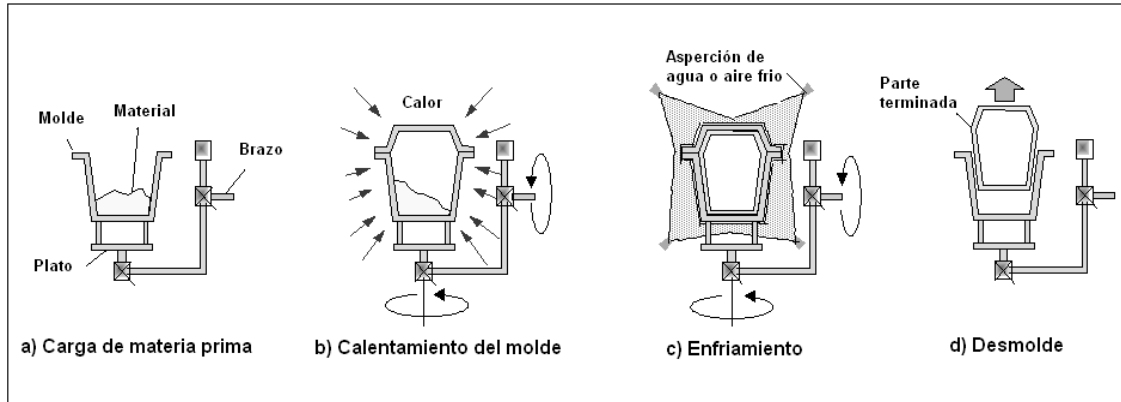


Figura 1.1 Etapas del proceso de rotomoldeo (imagen tomada de Frontier Polymers Pvt. Ltd.).

### 1.2.1 Carga del material

El material usado en el rotomoldeo puede ser de diferentes formas, dependiendo de la naturaleza del plástico. Por ejemplo, algunos tipos de nylon se usan en forma de gránulos debido a que estos materiales se funden rápidamente. En forma líquida se usa el PVC mejor conocido como plastisol el cual ha sido usado desde los comienzos del rotomoldeo porque el material líquido se adhiere enseguida al interior del molde. No obstante una considerable mayoría de materiales plásticos usados en este proceso son en forma de polvo para que puedan fluir bien en el molde. Otra de las ventajas del uso de polvos es la habilidad de fundirse más rápidamente.

El grado del polvo para rotomoldeo tiene características de sólido y fluido a la vez, donde el tamaño de las partículas, las características de forma, la densidad de empaquetamiento, etc; están particularmente influenciadas por las técnicas de pulverización.

La naturaleza del flujo del polvo afecta la transferencia de calor y de forma más importante al arreglo del empaquetamiento de las partículas en la forma en que son depositadas y fundidas en la superficie del molde. Las características de empaquetamiento de las partículas tienen efecto en la distribución de las burbujas formadas a lo largo de la sección transversal, así como a la uniformidad del material fundido depositado en la superficie del molde [14]



Figura 1.2 Carga de material plástico en polvo al molde, el cual ya se encuentra colocado en la araña (imagen tomada de Gold Shield Inc.)

Los parámetros más usados para definir la calidad del material en polvo para rotomoldeo son:

- **Distribución de los tamaños de partículas:** generalmente el tamaño de las partículas en los polvos está definido por el tamaño de malla [15]. El cual relaciona el número de aberturas en la malla por pulgada. Polvos muy finos tienen una mayor área superficial por lo tanto son más susceptibles al deterioro. Generalmente en el proceso de rotomoldeo se usan grados de polvo entre 35 mesh hasta 200 mesh (ó 75 micrones hasta 420 micrones).
- **Grado de fluidez:** esta propiedad es muy importante durante el moldeo pues ella determina cual será la distribución del polímero dentro del molde y que tan bien el flujo fundido fluye en moldes con geometrías complejas. El grado de fluidez depende primordialmente del tamaño de las partículas y de su forma. La figura 1.3a muestra la geometría ideal que deben de tener las partículas, en la figura 1.3b existe la presencia de colas en las partículas de polvo, estas colas reducen las propiedades del flujo del fluido perjudicando las propiedades de la parte como por ejemplo un puenteo a través de huecos estrechos y un alto contenido de porosidad en las paredes de la pieza.

La presencia de colas en las partículas se debe a un mal procedimiento en la reducción del material plástico, los factores que pueden estar involucrados son

un desgaste en las cuchillas de corte, sobre calentamiento durante el proceso, etc.

Una fluidez alta es recomendable para piezas complejas en donde es necesario que el material fluya por todas las partes internas del molde de forma homogénea. Primordialmente piezas que cuentan con paredes muy estrechas y profundas.

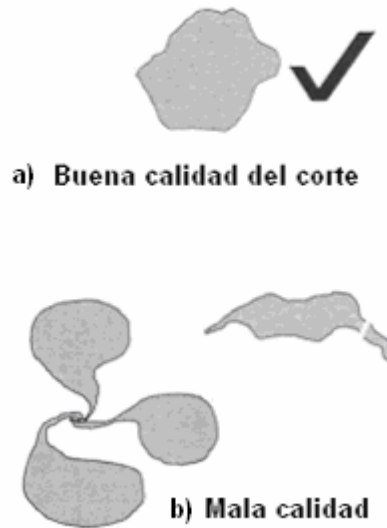


Figura 1.3 Forma ideal de la partícula plástica

- **Densidad volumétrica:** ésta es una medida de la eficiencia con la cual las partículas del polvo permanecen juntas, en la tabla 1.1 se muestran los diferentes valores de la densidad volumétrica dependiendo del material. Una buena calidad de partículas limpias (sin colas) tienen una alta densidad volumétrica, minimiza las superficies porosas y la tendencia a retener burbujas de aire en el material fundido [16]. Tanto la densidad volumétrica como grado de fluidez dependen de la forma y el tamaño de la partícula así como también de la distribución de las partículas del polvo.

Si se cuenta con un buen balance de estos parámetros se asegura que el material empleado cuenta con las siguientes características:

- Buena transferencia de calor
- Una elevada densidad volumétrica inicial
- Buen llenado de las cavidades
- Menos aire atrapado
- Una buena calidad superficial
- Limitada degradación en el molde

Tabla 1.1 Valores típicos de densidad volumétrica en polvos, tomada de Roy J. Crawford, James L. Throne. *Rotational molding technology*, [9].

Polímero	Densidad de compactación (kg/m <sup>3</sup> )	Reducción de densidad %	Densidad volumétrica	
			(kg/m <sup>3</sup> )	(lb/ft <sup>3</sup> )
LLPDE	910	0.38 – 0.43	345 – 390	22 – 24
HDPE	960	0.35 – 0.50	335 – 480	23 – 30
PS	1050	0.30 – 0.55	315 – 580	22 – 36
PP	910	0.25 – 0.40	230 – 365	14 – 23
Nylon	1100	0.40 – 0.60	440 – 660	27 – 41

Usualmente el llenado del molde con el material plástico en polvo se realiza en forma manual, como se muestra en la figura 1.2. Se deben tener en cuenta varios aspectos que son importantes durante el llenado. Primero debe haber un espacio para el polvo en una sección del molde durante el llenado. Cuando se trata de moldes asimétricos, la parte más profunda es la que debe de ser llenada. El polvo debe ser libremente vertido esto es, no se debe apisonar. Se necesita también espacio libre para que al momento de que el molde gire el polvo pueda rodar a través de todo el interior del molde, ya que si el material no puede fluir libremente en la superficie del molde las consecuencias resultan en espesores de pared no uniformes, como dato numérico de la cantidad de material a verter en el molde, este valor no debe de sobrepasar ½ del volumen del molde.

### 1.2.1.1 Cálculo del peso y volumen de la carga

La determinación o cálculo de la cantidad (peso) de polvo de material plástico que se debe de depositar dentro del molde para la fabricación de una pieza cualquiera esta fundamentalmente relacionado con el espesor de pared de dicha pieza, el cual a su vez es función de los esfuerzos a los que va a estar sometido el elemento.

Se recomienda que primero se realice un análisis de esfuerzo del elemento, y a partir de este análisis se prosiga a calcular cual será el espesor mínimo que cumple con tal requisito. Conocer el mínimo espesor de diseño que debe tener la pieza ofrece la ventaja, de no hacer uso de material extra en la manufactura de la pieza y analizar si el producto es viable económicamente.

Una vez que se tiene el mínimo espesor se prosigue a calcular el área superficial de la pieza (fórmula 1.1), después se multiplica dicho espesor por el área calculada dando como resultado el volumen final del material que conforma a la pieza [9,10].

$$V (\text{pieza}) = \text{Espesor (mínimo)} \times \text{Área superficial (pieza)} \quad (1.1)$$



Ya que se cuenta con el volumen de la pieza se prosigue a multiplicarlo por la densidad del material plástico con el que se va a ser moldeada. Esto nos da la masa de la carga del material polimérico.

$$m = V (\text{pieza}) \times \rho \quad (1.2)$$

Donde  $m$  es el peso del material plástico y  $\rho$  su densidad.

Como ya se mencionó en los párrafos anteriores, es importante saber si el espacio con el que cuenta el molde es el apropiado para que el material fluya libremente cuando el molde se encuentra rotando. El volumen máximo óptimo que debe ocupar el material en polvo es aproximadamente *la mitad del volumen total* de la pieza [9]. Entonces ahora se prosigue a calcular el volumen real del material polimérico en su estado de polvo como se muestra a continuación:

$$V_p (\text{mat. en polvo}) = m (\text{masa del mat. plástico}) \times \text{densidad volumétrica} \quad | \quad (1.3)$$

Donde  $V_p$  es el volumen que va a ocupar el polvo dentro del molde.

### 1.2.2 Calentamiento

Una vez que se preparó el molde con la cantidad correcta de material polimérico, el molde se introduce a un horno o se somete a la aplicación directa de calor, esto va a depender de la constitución física de la maquinaria que se está empleando. En la figura 1.4, se visualiza una máquina de rotomoldeo del tipo carrusel.

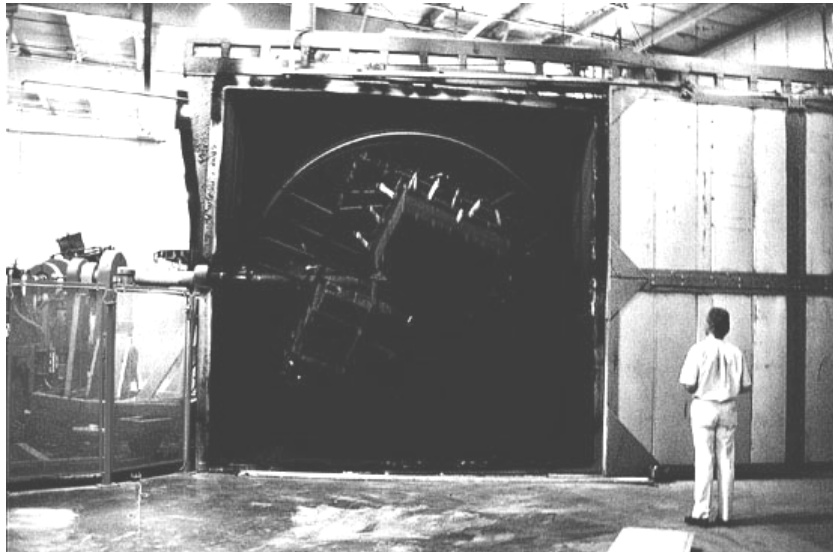


Figura 1.4 Calentamiento del molde dentro del horno (imagen tomada de Gold Shield Inc.).



Los métodos utilizados para el calentamiento de los moldes son a través de la convección de aire caliente, conducción de líquido caliente (aceite), radiación infrarroja, o resistencias eléctricas. El método óptimo a utilizar depende principalmente de la geometría de la pieza, el número de moldes en cada plato, así como del tamaño de la producción.

Otro de los factores primordiales para conseguir altas eficiencias en la etapa de calentamiento está relacionada con la construcción del molde, el cual debe ser relativamente delgado y tener una alta conductividad térmica, regularmente son construidos con aceros y aluminio (ver tabla 2.2).

Tabla 2.2 Propiedades de materiales para construcción de moldes [10]

Material	Densidad $\rho$ kg/m <sup>3</sup> (lb/ft <sup>3</sup> )	Conductividad térmica W/m <sup>2</sup> K (Btu/ft °F)	Capacidad de calor específico Cp J/kg <sup>2</sup> K (Btu/lb <sup>2</sup> F)	Módulo elástico GN/m <sup>2</sup> (Mlb/in <sup>2</sup> )	Coefficiente de expansión térmica 10 <sup>-6</sup> K <sup>-1</sup>
Aluminio (Duraluminio)	2800(175)	147(153)	917(0.4)	70(10.2)	22.5
Níquel (monel)	8830(551)	21.7(22.6)	419(0.18)	179(26)	14.1
Acero al carbón (medio)	7860(491)	51.9(51.9)	486(0.21)	206(29.8)	12.2
Acero inoxidable (304)	7910(494)	14.5(15.1)	490(0.21)	201(29.2)	16.3

La transferencia de calor hacia adentro del molde está determinada por la ecuación 1.4:

$$\rho c_p t \frac{dT}{d\theta} = h(T_{aire} - T) \quad (1.4)$$

donde  $\rho$  es la densidad del material del molde,  $c_p$  es su calor específico,  $t$  es el espesor del molde,  $T$  es la temperatura del molde en ese instante,  $\theta$  es el tiempo,  $T_{aire}$  es la temperatura del ambiente y  $h$  es el coeficiente de convección de transferencia de calor.

### 1.2.3 Enfriamiento

Una vez que el material polimérico se ha fundido completamente y a su vez adherido a toda la superficie interna del molde se procede al enfriamiento, antes de que el material sufra degradación debido a un tiempo de exposición al calor prolongado. Esto se puede observar cuando se manifiesta un cambio de color en el interior de la pieza plástica, también existen pérdidas de propiedades mecánicas de la pieza terminada.

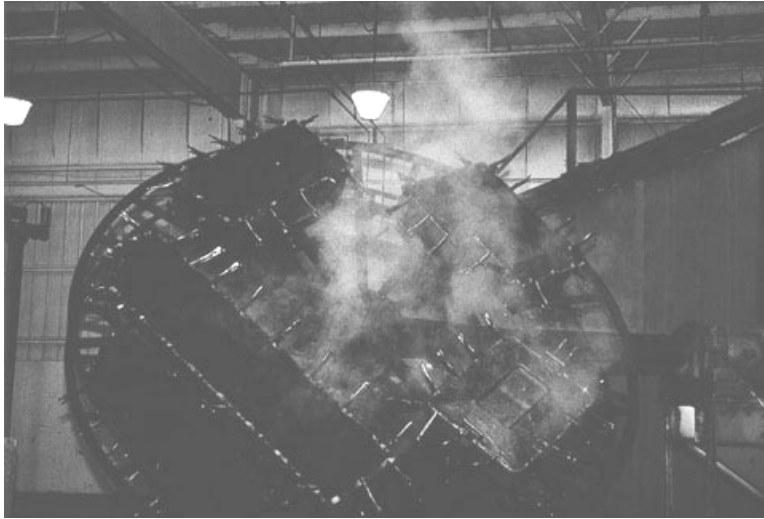


Figura 1.5 Enfriamiento del molde (imagen tomada de Gold Shield Inc.).

Los métodos de enfriamiento son:

- Aspersión de gotas de agua (enfriamiento rápido)
- Aire frío (enfriamiento lento)
- Vapor de agua condensada

El tipo de enfriamiento más apropiado dependerá del polímero que se está procesando, por ejemplo el PP y el Nylon necesitan enfriamientos más lentos ya que ambos materiales son bastante sensibles al cambio de las temperaturas y pueden durante el enfriamiento sufrir degradaciones. Los polietilenos no son tan sensibles, por lo que se puede aplicar un enfriamiento rápido.

#### 1.2.4 Desmolde

En esta etapa del proceso la pieza ya está totalmente rígida y se procede a separarla del molde para volver a iniciar un nuevo ciclo de producción. Se podría decir que es una de las etapas más sencillas del proceso pero cuando se tienen piezas con formas muy complejas y de gran tamaño se convierte en un gran reto. Actualmente este desmolde se realiza en forma manual ver fig. 1.6.

El desmolde de las piezas es un factor importante en el diseño de los moldes para rotomoldeo, siempre se debe de contemplar posibilidades de diseño que faciliten al operario su trabajo. Además de que los tiempos en cada etapa deben de minimizarse.

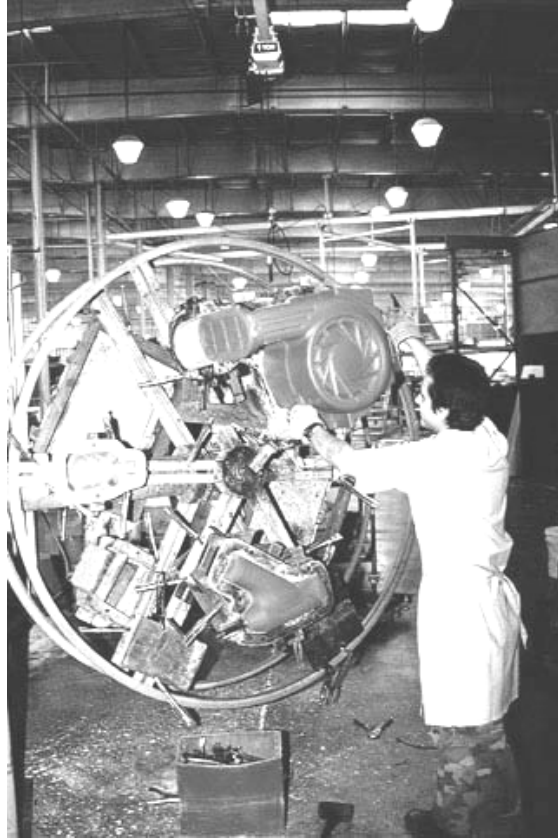


Figura 1.6 Desmolde de una pieza plástica hueca (imagen tomada de Gold Shield).

Hay que tomar en cuenta que al molde se le aplica desmoldante que puede estar en forma líquida o en aerosol, o al molde se le puede hacer un recubrimiento de teflón aunque esta solución es más cara que las anteriores. El desmoldante debe aplicarse cada 8 a 10 ciclos. O en su defecto cuando se empiecen a presentar problemas de desmolde de la pieza.

Si la pieza llegara a quedar atorada en el molde, se debe aplicar flama directa al molde para sacarla.

### **1.3 Ventajas y desventajas del rotomoldeo**

#### **1.3.1 Ventajas:**

- Las geometrías de los moldes son sencillas y los costos son económicos, esto debido a que en el proceso de rotomoldeo no se hace el uso de presiones elevadas las cuales provocan que los moldes deban de tener altas resistencias. Además de que la fabricación de los moldes se requiere un tiempo de 6

semanas en comparación con otros procesos de los cuales se habla de tiempos de aproximadamente 4 meses. Esto no quiere decir que no sea posible la realización de piezas con geometrías complejas. [17-22]

- Este proceso permite que haya una distribución uniforme del material dentro del molde, garantizando un espesor de pared uniforme. Como el material en el proceso de transformación no está sometido a presiones, el producto final está libre de esfuerzos residuales.
- Las piezas fabricadas están libres de costuras, y juntas; además de que la rotación biaxial garantiza isotropía en las propiedades mecánicas de la pieza.
- Existe la posibilidad de producir piezas complejas que a través de otros procesos son imposibles de fabricar, o que son necesarias varias piezas para conformar la pieza final. Con el rotomoldeo se elimina el número de piezas y se fabrica una sola pieza equivalente.
- Es posible que de forma simultánea sean manufacturadas en una misma máquina piezas de diferentes tamaños y hasta de diferentes materiales.
- También es posible fabricar piezas de cualquier tamaño, tanto piezas pequeñas como máscaras, tapones para oídos, juguetes, hasta piezas de gran tamaño como carcasas para autos, botes, contenedores, tanques para almacenamiento de agua de 75000 litros.
- Añadiendo aditivos a la materia prima se pueden modificar directamente las propiedades físicas del producto, los colorantes por ejemplo se pueden verter en la etapa de alimentación, así se elimina el proceso de pintura posterior.
- Los diseños producidos pueden tener más de una pared y el espacio intermedio se puede rellenar con polímeros espumados, con el propósito de aumentar la rigidez de la pieza y conseguir que a su vez sea más ligera.
- Se pueden obtener piezas conformadas por multicapas.
- Con un mismo molde se pueden obtener piezas de diferentes espesores, esto se consigue con verter al molde una cantidad diferente de material plástico.

### 1.3.2 Desventajas

- Los tiempos de proceso son más largos en comparación con la inyección o el soplado.



- El costo de la materia prima es más elevado en la mayoría de los casos debido a que su presentación es en forma de polvo. Esta reducción es la que eleva significativamente su precio. Una de las opciones que tienen los moldeadores de rotomoldeo es llevar a cabo la reducción del material dentro de sus instalaciones, lo cual puede traer ventajas económicas, pero si tal reducción no tiene la calidad requerida para el proceso resulta en una mala calidad de las piezas (ver sección 1.2.1).
- Las nervaduras sólidas son difíciles de moldear pues el espesor de pared tiende a ser uniforme en toda la pieza (ver sección 4.11).
- El proceso es más apropiado para producciones más pequeñas, debido a que el molde debe calentarse a temperaturas muy altas. Para poder aumentar la producción es necesario colocar en la máquina varios moldes al mismo tiempo. Pero aun así no tiene comparación con la producción que se puede obtener mediante la inyección o soplado.
- Otro inconveniente radica en la limitación de la materia prima, pero actualmente se hace mucha investigación para obtener más materiales que puedan ser rotomoldeados. El factor principal para que un material sea rotomoldeado es que debe de tener un amplio rango de temperaturas de procesamiento, debido al largo tiempo en la etapa de calentamiento.

## **1.4 Aplicaciones**

El rotomoldeo tiene un campo de aplicación muy grande en los sectores del juguete, transporte, agricultura, tráfico, etc. El porcentaje de estas aplicaciones varía de acuerdo al lugar. Por ejemplo en los Estados Unidos el sector del juguete es su principal uso pues cuenta con un porcentaje del 40%. En cambio en el mercado europeo este sector sólo cuenta con el 5%. Esto se muestra en la figura 1.7.

En México el campo de aplicación que ocupa un porcentaje del 90% es en la manufactura de contenedores para el almacenamiento de agua potable [1] principalmente. Esta estadística refleja las grandes oportunidades que ofrece el proceso al incursionar en el mercado nacional en otros sectores.

Lo que refleja la gran diversificación del proceso y su amplio campo de aplicación. A pesar de que es un proceso del que muy pocos moldeadores hacen uso de él, ha tenido un gran crecimiento y va a continuar en ascenso por todas las ventajas que ofrece.



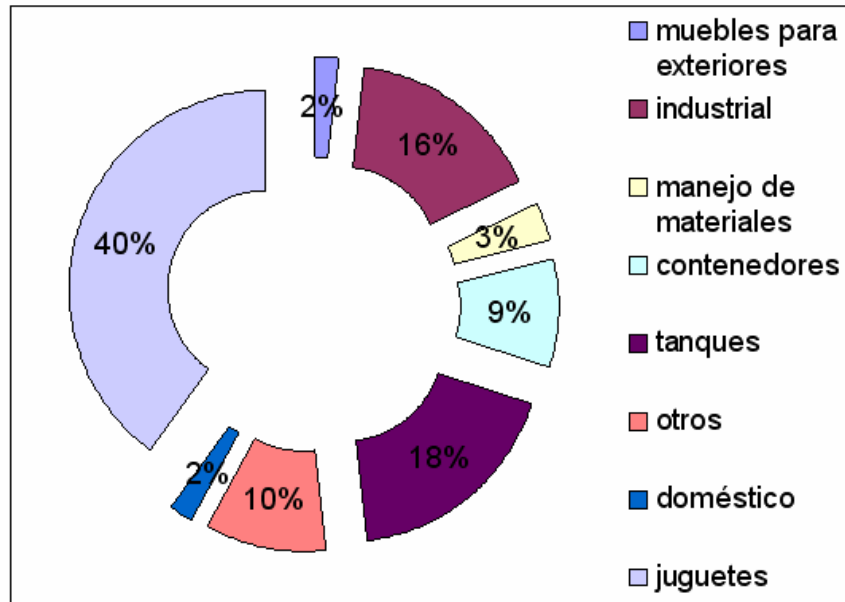


Figura 1.7 Sectores de mercado para productos rotomoldeados en el mercado de Estados Unidos [10].

## 2 *Materiales plásticos*

Los plásticos son cadenas moleculares grandes de polímeros, obtenidos a partir de métodos químicos que determinan su estructura, propiedades y comportamiento. La materia prima más importante para la fabricación de plásticos es el petróleo, el petróleo procesado y refinado genera diferentes fracciones pesadas y ligeras, de las cuales sólo una parte de ellas es aprovechada para la fabricación de plásticos, el porcentaje es del 6% [3, 23].

Otras materias primas que se emplean para la obtención de plásticos, pero en menor proporción, son el carbón y el gas natural. También se hace el uso de algunas sustancias naturales como la madera, el algodón, la remolacha y el azúcar de donde se obtiene la celulosa y otros productos químicos, para evitar la dependencia del petróleo como fuente de materia única, además de las fluctuaciones en los precios.

Tabla 2.1 Clasificación de los plásticos [3]

<b>Clasificación</b>	
Comportamiento térmico	Termoplásticos Termofijos Elastómeros
Origen	Naturales Sintéticos
Conformación física	Lineales Con grupos laterales Con anillos Lineal con anillos Cadenas entrecruzadas Plástico amorfo Plástico entrecruzado
Polaridad	Alta polaridad Polaridad media Baja polaridad No polares
Consumo	Comodities (mayor consumo) Versátiles o termofijos Técnicos o de ingeniería Especialidades y compuestos



## 2.1 Clasificación

Los materiales plásticos pueden ser clasificados en función de parámetros muy variados, desde el origen hasta los métodos de obtención utilizados en su manufactura [3-10].

Los principales factores son los siguientes:

- Comportamiento térmico
- Origen
- Conformación física
- Polaridad
- Consumo

La clasificación a tomar para describir los plásticos que se usan en el proceso de rotomoldeo es con referencia al comportamiento térmico, como se observa en la tabla 2.1.

### 2.1.1 Comportamiento térmico

Los materiales plásticos bajo esta clasificación del comportamiento térmico que presentan al ser sometidos a procesos de transformación a diferentes temperaturas se dividen en tres grupos:

- Termoplásticos
- Termofijos
- Elastómeros

Alrededor del 80% de los plásticos procesados en el mundo son termoplásticos. Para el análisis de los plásticos con esta clasificación se debe tomar en cuenta tres niveles de temperatura:

- $T_g$  Temperatura de transición vítrea: Por debajo de esta temperatura, el plástico es rígido y quebradizo como el vidrio y a temperaturas superiores el material adquiere mayor flexibilidad y elasticidad.
- $T_m$  Temperatura de fusión: solo los materiales cristalinos presentan una temperatura de fusión, por arriba de ésta estos materiales pasan a su estado líquido.
- $T_d$  Temperatura de descomposición (degradación): el plástico se degrada y carboniza.





Los plásticos amorfos no presentan un punto de fusión específico ( $T_m$ ), en estos plásticos es la temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) la que marca el punto de inicio del reblandecimiento del material.

Los plásticos termofijos no presentan punto de fusión ni de transición vítrea y el incremento de temperatura los puede llevar hasta su descomposición.

### **a) Termoplásticos**

Los materiales termoplásticos poseen gran estabilidad a temperatura ambiente y se convierten en un líquido viscoso a temperaturas superiores, pero el cambio puede ser reversible. Los termoplásticos se caracterizan por transformarse de sólido a líquido y viceversa por la acción de calor

Cuando los termoplásticos se encuentran en estado semilíquido pueden deformarse de forma permanente después de la aplicación de una fuerza. A temperatura ambiente pueden ser blandos, duros, frágiles y rígidos. Este comportamiento se deriva de la estructura molecular, ya que las moléculas tienen forma de cadena abierta o de hilos.

Los termoplásticos pueden soldarse, son materiales reciclables, es decir son ideales para ser sometidos repetidas veces a un proceso térmico sin que sus propiedades físico químicas varíen.

Los materiales termoplásticos se dividen en:

**Amorfos** Los termoplásticos amorfos se caracterizan porque sus moléculas filamentosas y ramificadas están por completo en desorden. Este arreglo molecular permite el paso de luz a través de estos materiales, siendo la razón por la cual son transparentes.

**Cristalinos** Los materiales cristalinos tienen un orden molecular relativamente bueno. Se aprecia cierto grado de paralelismo dentro de los filamentos moleculares y las ramificaciones son más cortas. Este ordenamiento se opone al paso de la luz del sol provocando que los materiales termoplásticos cristalinos tengan una apariencia lechosa o traslúcida.

### **b) Termofijos**

Son materiales plásticos que presentan una estructura molecular en forma de red (reticular) generada por una reacción no reversible entre dos o más componentes, la cual tiene lugar durante el procesamiento.



Estas reacciones pueden ser activadas por temperatura, mezclado o por catálisis y los procesos de moldeo son distintos a los que se llevan a cabo con los termoplásticos. Al quemarse solo se carbonizan o degradan. Estos materiales se mantienen rígidos y sólidos a temperaturas elevadas.

### **c) *Elastómeros***

Los materiales plásticos elastoméricos se caracterizan porque recuperan casi totalmente su forma cuando se deja de aplicar la fuerza que originaba su deformación. Son materiales insolubles y no funden mediante la aplicación de calor.

Estos materiales se dividen a su vez en:

#### ***Elastómeros termofijos***

El comportamiento de estos materiales se debe a que las macromoléculas de elastómeros están entrecruzadas por enlaces químicos. Se producen a partir de formulaciones que incluyen gran variedad de ingredientes que se mezclan para formar un compuesto, son generalmente viscosos y pegajosos porque utilizan los elastómeros sin curar.

Durante la reticulación o vulcanización, las cadenas moleculares del polímero se unen mediante enlaces químicos amplios. El desperdicio de los productos reticulados no pueden ser incorporados dentro del proceso de producción (son no reciclables).

#### ***Elastómeros termoplásticos***

Este grupo de elastómeros combina propiedades especiales de los elastómeros con las posibilidades de transformación de los termoplásticos. Son unidos física y químicamente para formar copolímeros de bloque y aleaciones entre polímeros que poseen propiedades elásticas dentro de cierto rango de temperatura.

Cuando se calientan dentro de ciertos rangos de temperatura los enlaces intermoleculares desaparecen y se restituyen inmediatamente después de que se enfrían, para desarrollar sus propiedades elastoméricas. Pueden ser procesados e incluso reciclados de manera similar a los materiales termoplásticos, sin necesidad de una vulcanización que los haría termofijos.



## **2.2 Plásticos usados en el proceso de rotomoldeo**

El material más utilizado en el proceso de rotomoldeo es el polietileno (material termoplástico de la familia de las poliolefinas) en sus presentaciones de polietileno de alta densidad (HDPE), polietileno de baja densidad (LDPE), polietileno lineal de baja densidad (LLDPE), polietileno entrecruzado (XLPE), polietileno de media densidad (MDPE). Este material representa aproximadamente el 90% del material utilizado en la industria del rotomoldeo [1].

Otros de los materiales que se utilizan en el proceso pero en menores cantidades son el policloruro de vinilo (PVC), poliamida (PA), el policarbonato (PC), el polipropileno (PP).

La presentación que deben tener los materiales para poder ser rotomoldeados es en estado pulverizado (polvo) o líquido. Debido a que el material debe tener la capacidad de adquirir la forma del molde sin la aplicación de ninguna presión, esto se logra con una rápida transmisión de calor y para conseguirlo es necesario generar partículas pequeñas que faciliten la circulación dentro del molde.

La mayoría de los termoplásticos se comercializan en forma de pellets, razón por la que existen muy pocos materiales que actualmente se rotomoldean, el costo de reducción del material aumenta considerablemente, además se debe de tener un óptimo control en el proceso de reducción para obtener el material lo mas uniforme posible y que los gránulos se aproximen a la forma de una esfera, pues si el corte no se realiza correctamente y les quedan colillas a los gránulos durante el proceso de rotomoldeo estos gránulos tenderán a aglomerarse de forma individual lo cual provoca que no haya uniformidad, además de aire atrapado en la pieza (ver sección 1.2.1, y fig. 1.3). En la figura 2.1 se observa aire atrapado a lo largo de la sección transversal de la pieza, debido a la mala calidad del material.

Como se mencionó anteriormente, el costo que adquiere la materia prima por esta reducción es la razón por la que existen pocos materiales capaces de rotomoldearse en el mercado, lo cual no quiere decir que los demás grupos no puedan ser factibles de ser rotomoldeados.



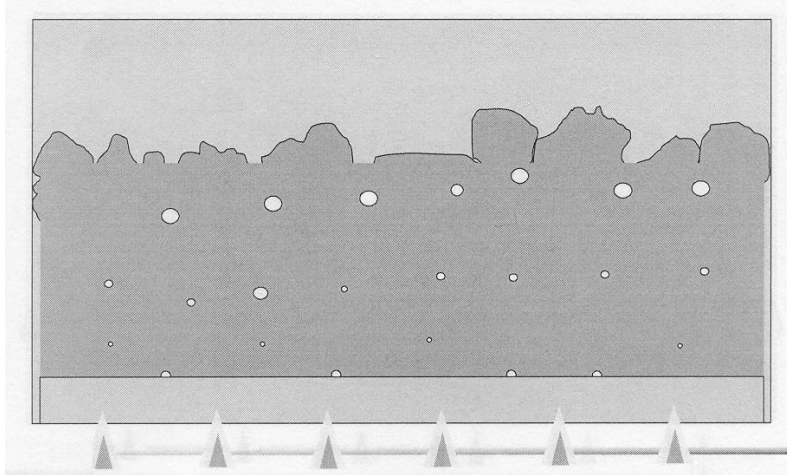


Figura 2.1 Aire atrapado en una pieza debido a mala geometría de partículas plásticas. (Imagen tomada de Módulo de rotomoldeo, IMPI)

Un factor que hay que tomar en cuenta para que un material sea capaz de ser rotomoldeado es el rango de temperatura amplio entre la temperatura de fusión  $T_m$  y la temperatura de degradación  $T_d$ , esto porque en la etapa de calentamiento de una pieza rotomoldeada es largo y dependerá del espesor y tamaño de la pieza. Hay que recordar que mientras más tiempo dure el material en la etapa de calentamiento aumenta la posibilidad de degradación.

También puede influir el número de piezas que se van a rotomoldear para que los costos por el pulverizado de material plástico no tengan tanto impacto en el costo del producto final. Es necesario tomar en cuenta que si la pieza a manufacturar va a estar destinada a una aplicación especializada (pieza técnica) el costo del material va a ser un parámetro secundario, con la capacidad del uso de materiales y mercados más especializados.

### 2.2.1 Polietilenos

Los polietilenos son una familia muy versátil, es el material termoplástico de mayor consumo en el mundo. Se encuentran dentro de la familia de las poliolefinas y es un material plástico clasificado dentro de los commodities.

El criterio más común para clasificar a los polietilenos es mediante el uso de la densidad, según la ASTM.

Un parámetro de importancia es el peso molecular, donde el peso molecular es la medida de longitud de las moléculas. Este parámetro determina varias características y en general mientras más largas son las moléculas mejores son las cualidades mecánicas del material, pero también es más difícil de transformarse por tener más resistencia al flujo, o mayor viscosidad. Un pelet de

polietileno se compone por una infinidad de cadenas de pesos moleculares distintos, es decir de diferentes longitudes.

Si la distribución de pesos moleculares es ancha significa que no hay homogeneidad en el material, es decir existen cadenas largas, medianas y cortas sin predominar alguna de ellas. Sin embargo si esta distribución es angosta existe homogeneidad pues las diferencias serán menores. Este tipo de distribución es la ideal, ya que es más uniforme en la longitud y distribución de sus cadenas y mejores propiedades en los productos terminados.

Otro parámetro de mucha importancia es el *índice de fluidez*, que es una medición en condiciones estandarizadas de la capacidad de flujo de los plásticos en estado fundido. Este índice ayuda a determinar la temperatura y el tiempo de ciclo que será necesario para alcanzar óptimas condiciones. Por ejemplo para un índice de fluidez alto (específicamente para el proceso de rotomoldeo) es necesario tener una temperatura de moldeo baja. Si la temperatura es alta o el tiempo de proceso se prolonga demasiado, el material plástico puede ser sobre calentado, resultando en un excesivo flujo en el molde y con el riesgo de una oxidación térmica [16].

Índices de fluidez altos son útiles cuando se va a manufacturar una pieza complicada, pues es necesario que el material no tenga problemas de flujo, y pueda adherirse a todas las paredes internas del molde. La desventaja es que en piezas manufacturadas con fluidez alta se obtienen propiedades mecánicas pobres. Pero como se observa más adelante, con cambios en las geometrías de la pieza o con el uso de costillas la pieza adquiere mayores resistencias.

Los polietilenos que comúnmente se usan en el proceso de rotomoldeo se subdividen en:

- Polietileno de baja densidad
- Polietileno de alta densidad
- Polietileno de lineal de baja densidad
- Polietileno de media densidad

### 2.2.1.1 Polietileno de baja densidad

El polietileno de baja densidad es un homopolímero muy ramificado que tiene por unidad monomérica el etileno. Las cadenas moleculares de este polímero son cadenas carbono-hidrógeno. Esta estructura ramificada causa la baja densidad de este material plástico.

El polietileno de baja densidad tiene una densidad en el rango de 0.910-0.925 g/cm<sup>3</sup>, este material tiene una estructura en su mayor parte amorfa, razón por la



cual tiene una apariencia translúcida con transmitancia de 20 a 50%, pero depende del espesor que se maneje en las piezas.

Tiene altas propiedades de permeabilidad a gases, buena barrera a vapor de agua así como baja absorción de agua.

Con respecto a sus propiedades mecánicas, estas dependen del grado de polimerización y la configuración molecular. Presenta buena elongación ante la aplicación de fuerzas de tensión de 350 – 700%. La resistencia al impacto es muy buena.

Es un excelente aislante eléctrico, la constante dieléctrica es una de las más bajas (2.1 – 60 Hertz), la resistividad volumétrica mayor a  $10^{16}$  Ohm-cm, prácticamente no varía con la Cristalinidad. Las propiedades dieléctricas no varían con la temperatura principalmente por la naturaleza no polar de su estructura.

La fusión de los cristales de polietileno de baja densidad ocurre entre 105 y 110°C. La temperatura de servicio en lapsos cortos es de 80 a 90 °C y en periodos continuos de 60 a 75°C. La temperatura de reblandecimiento es de 80 a 100°C. Su temperatura de transición vítrea es de -25°C.

La naturaleza no polar del polietileno le otorga propiedades de gran resistencia a los ataques de sustancias químicas, a temperaturas menores de 60°C resiste a la mayoría de los solventes inorgánicos, ácidos débiles, bases y sales en cualquier concentración. Pero a temperaturas mayores es soluble en solventes orgánicos alifáticos, los aromáticos y clorados. Es un material atóxico y puede estar en contacto directo con los alimentos.

Las sustancias oxidantes como el ácido crómico y el ácido sulfúrico tienen un efecto degradante en el polietileno de baja densidad produciendo una ruptura en las cadenas moleculares.

### **2.2.1.2 Polietileno de alta densidad**

El polietileno de alta densidad tiene una estructura lineal con pocas ramificaciones, estas ramificaciones son muy cortas. La cantidad de estas ramificaciones depende del comonomero (propileno, butano, exeno) incorporado.

Los polímeros de etileno considerados de alta densidad son el: HDPE (polietileno de alta densidad), polietileno de alto peso molecular, polietileno de ultra alto peso molecular.



Tiene una densidad de  $0.941 - 0.965 \text{ g/cm}^3$ , un alto grado de Cristalinidad, por lo tanto es un material opaco y de aspecto ceroso. La transmitancia del plástico es de 0 a 40% dependiendo del espesor. Tiene una alta permeabilidad a los gases, aromas y ciertos líquidos, esta permeabilidad depende de la temperatura. Absorbe poca humedad y tiene alta cualidad de barrera a vapor de agua. Así también tiene cierta permeabilidad a los aceites y grasas.

La rigidez, dureza y resistencia a la tensión de los polietilenos se incrementa con la densidad. La mayor presencia de cristales eleva la resistencia a la tensión. Es un material muy tenaz, demuestra alta resistencia a los impactos a bajas temperaturas. Es un excelente aislante eléctrico.

El polietileno de alta densidad tiene un punto de fusión entre  $126^\circ\text{C}$  y  $130^\circ\text{C}$ . Su temperatura de transición vítrea es de  $-25^\circ\text{C}$ . La temperatura máxima de servicio depende de la duración y la magnitud del esfuerzo mecánico, pero para piezas que no están sometidas a cargas en períodos cortos es de  $90^\circ\text{C}$  a  $120^\circ\text{C}$ , en períodos largos el valor desciende hasta  $70^\circ\text{C}$  y  $80^\circ\text{C}$ .

El factor de contracción de las piezas rotomoldeadas varía de 1.5 a 3%. Se debe de tener mucho cuidado con el nivel de contracción cuando se trata de piezas que se van a ensamblar posteriormente.

Al igual que el polietileno de baja densidad, por su característica no polar es muy resistente a agentes químicos, soporta apropiadamente a los ácidos fuertes y bases fuertes. Los halógenos y las sustancias altamente oxidantes atacan a este plástico, también los ácidos inorgánicos concentrados como el nítrico, sulfúrico, perclórico.

La principal aplicación del polietileno de alta densidad en el proceso de rotomoldeo es la manufactura de contenedores de gran tamaño. Otras aplicaciones son tolvas, bebederos para el sector ganadero, muebles para el jardín, juegos de jardín para niños, para señalización en el sector de tránsito, macetas, etc.

Debe ser pulverizado a una medida de 35 mesh. El índice de fluidez puede variar entre 3 y 60 g/10 min., para seleccionar el valor adecuado depende de la geometría y del desempeño mecánico que se requiere en la pieza. Los valores menores de índice de fluidez corresponden a una mejor resistencia química y mecánica, pero tiene problemas de flujo en artículos con geometría complicada.

El polietileno de alta densidad puede ser espumado, por medio de un agente espumante como la azodicarbonamida, se puede aditivar con humo negro o absorbedor ultravioleta para resistir el envejecimiento. Además del uso de antimicrobianos en determinadas aplicaciones.



### 2.2.1.3 Polietileno lineal de baja densidad

El polietileno lineal de baja densidad tiene características intermedias entre el polietileno de baja densidad y el polietileno de alta densidad. La diferencia se encuentra en la densidad que varía del rango de 0.918 y 0.935. Tiene un menor grado de ramificación que el polietileno de baja densidad.

Este polietileno tiene una apariencia translúcida debido a la presencia de cristales en su estructura, es menos transparente que el polietileno de baja densidad, tiene una alta permeabilidad a los gases como el O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, tiene alta barrera al paso de agua y a la humedad, baja absorción de agua alcanzando un valor de 0.01% en un periodo de 24 horas. Cumple con las normas FDA para aplicaciones de contacto con alimentos.

Tiene una excelente resistencia al impacto, sustituyendo al polietileno de baja densidad en muchas aplicaciones, también tiene una mejor resistencia química. Una de las aplicaciones de este material es en la manufactura de depósitos para la gasolina en la industria automotriz.

Se trata de un polímero con ramificaciones muy cortas y uniformes que hacen que su temperatura de fusión y su resistencia a la tracción y al agrietamiento sean superiores a las del polietileno de baja densidad. Su temperatura de reblandecimiento es de 115°C, permite una presencia de cristales mayor requiriendo una temperatura de fusión de los cristales de 122 y 124°C.

### 2.2.2 Polipropileno

El polipropileno es un material termoplástico que se obtiene por la polimerización del propileno, pertenece a la familia de las poliolefinas, su acrónimo es el PP. Puede categorizarse como homopolímero o como copolímero. El homopolímero de polipropileno tiene una dureza y una resistencia superiores a las del polietileno de alta densidad pero con una resistencia al impacto inferior y se vuelve quebradizo por debajo de los 0°C.

La estructura química del polipropileno se puede clasificar dependiendo del orden en que estén colocados los grupos metilo laterales, así como el catalizador y el proceso de polimerización usado:

**Polipropileno isotáctico.** Posee radicales metilo a lo largo de la cadena, que permite cristalizar. Es el grado de mayor interés por sus elevadas propiedades mecánicas y térmicas derivadas de su cristalinidad.

**Polipropileno sindiotáctico.** En esta estructura los radicales metilo están alternados a lo largo de la cadena de manera ordenada.





**Polipropileno atáctico.** Los radicales metilo están al azar en la cadena, es una cera que apenas tiende a cristalizar por carecer de ordenamiento. Por tanto su densidad y resistencia son menores al isotáctico así como las temperaturas de reblandecimiento y fusión, no tiene ninguna aplicación como termoplástico, comúnmente es usado como impermeabilizante.

**Polipropileno estereoblock.** Como su nombre lo indica, los radicales metilo se encuentran localizados por bloques en la cadena. Presenta buenas propiedades mecánicas y térmicas, son más frecuentes en la formación de copolímeros.

Siempre se obtiene una mezcla de ellos, y se busca alcanzar elevados porcentajes del polipropileno isotáctico.

Dentro de la clasificación del polipropileno se encuentran los copolímeros de *impacto* y copolímero *Random*. Como su nombre lo indica el polipropileno de impacto, mejora su resistencia a impacto añadiendo EDPM que es un hule de etileno-propileno-dieno perteneciente a la familia de las olefinas. Para producir el copolímero Random durante el proceso de obtención del polipropileno homopolímero se adiciona de un 1.5 a 3.5% de etileno.

El polipropileno es el material plástico con más baja densidad, esto ofrece la ventaja de que se tienen más piezas por volumen. Su densidad se encuentra en el rango de 0.902 a 0.906. Su contracción de moldeo es más baja que la del polietileno de 1 – 2 %. No absorbe humedad y no requiere de secado para su transformación, garantizando una buena estabilidad aún en lugares de alta humedad. El índice de fluidez del polipropileno que más se usa esta en el rango de 5 a 20 g/10 min. Una de las desventajas de este material es su permeabilidad es 7 veces mayor a la del polietileno.

El polipropileno tiene un excelente rango de elongación a la ruptura, fluctúa entre 400 y 430% utilizando cargas de 300 a 400 kg/cm<sup>2</sup>. Tiene una temperatura de fusión de 165°C y su temperatura de transición vítrea es de 0°C. Tiene una amplia ventana de procesamiento, esto hace que sea idóneo de ser procesado por rotomoldeo.

Una temperatura de servicio por períodos cortos de 150°C, sin deformación; puede soportar a 110°C 4.5 kg/cm<sup>2</sup>. Ofrece un valor muy pequeño de conductividad. Esto se refleja en períodos más largos de enfriamiento. Es un material translúcido, esto se debe a que existe menor densidad en las zonas amorfas y cristalinas, pero depende del espesor de la pieza a manufacturar.

Con respecto a las propiedades químicas presenta excelente resistencia a los ácidos y bases fuertes o débiles, solo es atacado por el ácido nítrico concentrado por arriba de los 80°C.



Así también el polipropileno es el tercer material más utilizado con respecto a consumo en ventas. Comúnmente en el proceso de rotomoldeo la mayor aplicación que tiene el polipropileno es en tanques de almacenamiento

### 2.2.3 Policloruro de vinilo (PVC)

El policloruro de vinilo es resultante de la asociación molecular del monómero Cloruro de vinilo, su acrónimo es PVC.

Es un material termoplástico, el más inestable de todos. Pero por medio de aditivos es uno de los materiales más versátiles, para su aplicación en diferentes procesos de manufactura y en piezas plásticas. En su estado puro se encuentra en polvo pero no es posible de ser transformado. Comercialmente se encuentra de cuatro formas distintas además de su estado puro, compuesto rígido el cuál consiste de resina de PVC mezclada con aditivos sin plastificantes, compuesto flexible que es una mezcla de resina de PVC con más del 25% de plastificantes, el plastisol es una dispersión de una resina de emulsión de PVC con plastificante y el organosol una dispersión de resina de emulsión con plastificante y solvente.

El plastisol es el PVC que se utiliza en el proceso de rotomoldeo. En esencia se trata de un compuesto flexible de PVC, donde el método de polimerización en emulsión se integra con una serie de aditivos para convertir el polímero en un material procesable, con la diferencia de contener plastificante en niveles del 40 %. Esta formulación es un material en forma de líquido viscoso, que recubre el interior del molde de rotomoldeo, al aplicar el calor el material reacciona y toma la forma del molde. Comúnmente se usa en la fabricación de pelotas, juguetes flexibles, muñecas, perillas, cabezas de muñeca, etc.

El valor típico de la densidad de PVC del homopolímero es de 1.4 g/cm<sup>3</sup>. La viscosidad de la pasta está en relación al contenido de carga usado, así como al tipo de carga.

Tabla 2.2 Capacidad de absorción con diferentes tipos de carga

Carga	Capacidad de absorción
Sulfato de bario	16
Carbonato de calcio (precipitado)	24
Carbonato de calcio (pulverizado)	36
Arcilla calcinada	66

A mayor contenido de carga, menor resistencia a la tensión, menor elongación, flexión y mayor resistencia a la ruptura. Si un plastisol se somete a un calentamiento progresivo, su viscosidad se reducirá poco a poco, pero después



sufrirá de un incremento, pues en esta etapa empieza su punto de gelificación y curado. El comportamiento de los plastisoles presenta características de flujo diferentes debido a que es un gel y no un compuesto completamente sólido.

La gelificación comienza a una temperatura de 55°C, donde las partículas de PVC se solvatan con el plastificante y posteriormente a los 90°C las partículas han absorbido todo el plastificante y han llegado a su máximo grado de inchamiento. Cuando ocurre este inchamiento se inicia la unión entre las partículas y llega a los 150°C hasta formar una superficie uniforme sólida. El tiempo de curado del plastisol es de aproximadamente 5 minutos. Este material es flexible y suave.

Es muy importante la propiedad del flujo del plastisol debido a que de ésta depende la uniformidad de las paredes del producto moldeado. Cuando no se tiene uniformidad en las paredes por ejemplo en las pelotas se puede tener un rebote descontrolado del producto.

Tabla 2.3 Formulación para Muñeca y pelotas. Información obtenida del Instituto Mexicano del Plástico Industrial (IMPI).

Componente	Muñeca	Pelota
PVC E	100	100
Plastificante	60	95
Aceite epoxidado de soya	5	-
Estabilizador térmico (Ca/Zn)	3	2
Carga (CaCO <sub>3</sub> )	5	3
Plastificante (polietilen glicol)	1	1
Desmoldante (estearato de zinc)	1	1

## 2.2.4 Policarbonato (PC)

El policarbonato es un material termoplástico de estructura amorfa, clasificado dentro de los materiales de ingeniería. Forma parte de la familia de los poliésteres termoplásticos, tiene un grupo ester dentro de su estructura.

Existe una gran variedad y grados de policarbonatos que se adaptan a los distintos procesos de transformación del plástico. Tiene excelentes propiedades ópticas, mecánicas y térmicas, donde sus principales cualidades son una elevada transparencia y brillo, excelente resistencia a la intemperie, elevada resistencia al impacto, baja y uniforme dilatación térmica, resistencia a altas temperaturas.

Comercialmente el policarbonato se clasifica en:



- Grado general

Alta viscosidad  
Media viscosidad  
Baja viscosidad

- Especialidades

Policarbonato reforzado  
Policarbonato con retardante a la flama  
Policarbonato con absorbedores de luz ultravioleta  
Policarbonato grado FDA  
Policarbonato alto flujo  
Aleaciones

El policarbonato de forma general tiene elevada densidad con respecto a otros polímeros, siendo esta de  $1.2 \text{ g/cm}^3$ . Tiene una baja absorción de agua de 0.36% el máximo de absorción de líquido. Existen diferentes grados de fluidez dependiendo de la aplicación. El índice de refracción del policarbonato se encuentra en un rango de 1.56 a 1.65, tiene una transmitancia en la región visible de 85 a 90%. Para que tenga una mayor resistencia a la luz ultravioleta se pueden aplicar absorbedores de luz UV a la resina.

Con respecto a sus propiedades mecánicas cuenta con excelente resistencia al impacto, tenacidad, rigidez y dureza. Tiene un amplio rango de procesamiento y de trabajo. Su temperatura de transición vítrea es a  $150^\circ\text{C}$  y la temperatura de fusión es de aproximadamente  $260^\circ\text{C}$ . Estos altos valores de temperatura se deben principalmente a la rigidez de la cadena molecular y no a las fuerzas de atracción originadas por los grupos ester. Su temperatura de degradación se encuentra arriba de los  $320^\circ\text{C}$ , originando la liberación de  $\text{CO}_2$  y decoloración.

### 2.2.5 Poliamida (Nylon)

Familia de termoplásticos industriales semicristalinos generalmente sintetizados a partir de aminas y ácidos alifáticos en cadena lineal. Cada nylon particular se describe por uno o dos números (por ejemplo nylon 6 o 6/6), cada número indica la cantidad de átomos de carbón en los monómeros aminados y ácidos. Si sólo hay un número, el monómero es un aminoácido. Si hay dos números, los monómeros son diaminas y diácidos. El primer número se refiere a la diamina y el segundo al diácido.



Las poliamidas usadas en el proceso de rotomoldeo es la poliamida 6, poliamida 11 y la poliamida 12.

### ***Poliamida 6***

La poliamida 6 tiene un grado de cristalización del 60%, se caracteriza por una excelente tenacidad, bajo coeficiente de fricción y alta resistencia a la abrasión. Pero una de las desventajas es la absorción y el desprendimiento de humedad. El uso de plastificantes reduce el esfuerzo a la tensión y la rigidez, pero dependiendo de la cantidad incrementa el porcentaje de elongación, puede reforzarse en un porcentaje de 10 a 45% con fibra de vidrio aumentando las propiedades mecánicas y se disminuye la absorción de humedad.

Otra característica importante es la gran capacidad para soportar cargas dinámicas, amortiguación de ruido y vibraciones, resistencia a la abrasión y al desgaste, buena resistencia a fuerzas de impacto.

Su densidad es de 1.12 a 1.14 g/cm<sup>3</sup>, absorbe de 2.5 a 3.5% de humedad en clima normal afectando su estabilidad dimensional. La humedad absorbida por la PA 6 tiene un efecto plastificante en su comportamiento mecánico, resultando en un notable incremento en la resistencia al impacto. Paralelamente, el agua afecta los módulos de elasticidad y los parámetros de tensión y flexión. En este caso la humedad reduce su módulo, que resulta en una tracción menor.

Sus características de resistencia al desgaste y su bajo coeficiente de fricción son unas de las más importantes propiedades mecánicas de la PA 6, cuando esta resina es reforzada este coeficiente de fricción se reduce en un 20%. Los productos que se fabrican con poliamida 6 son productos que van a estar sometidos a cargas elevadas durante un período de tiempo largo.

Es un buen aislante eléctrico, aunque no es el mejor material. Tiene una temperatura de transición vítrea de 60°C, esto cuando no se presenta humedad en la resina en caso contrario esta temperatura disminuye. Tiene un punto de fusión de 215°C, presenta una temperatura de reblandecimiento vicat muy alta en el rango de 180 a 220°C. Su resistencia a las altas temperaturas por periodos largos y continuos es entre 82 y 121°C, pero si la resina es reforzada con fibra de vidrio esta temperatura aumenta hasta 93 a 149°C con (30 – 35% de refuerzo).

Resiste de forma satisfactoria al ataque de la mayoría de los agentes inorgánicos incluyendo amoníaco y dióxido de azufre, sustancias orgánicas como solventes, aceites, grasas, petróleo, benceno, esterres y cetonas. No resiste ácidos minerales y soluciones alcalinas en altas concentraciones.



### **Poliamida 11**

La poliamida 11 semicristalina es más elástica y tenaz que la poliamida 12, debido al número impar de átomos de carbono en su cadena principal. La temperatura de fusión es de 180 a 190°C, procesándose en un perfil de temperaturas de 200 y 270°C. Presenta una contracción lineal de 0.012%. Es la poliamida de menor densidad 1.04 – 1.06 g/cm<sup>3</sup>, absorbe muy poca humedad, tiene buena estabilidad dimensional.

Su resistencia al impacto a bajas temperaturas es de -40 a -70°C, tiene una resistencia a la intemperie elevada.

### **Poliamida 12**

Poliamida semicristalina que cuenta con alta tenacidad, resistencia a la tensión y resistencia química como todas las poliamidas, pero se distingue por su gran estabilidad dimensional y baja densidad esta es de 1.02 g/cm<sup>3</sup>. Absorbe una menor cantidad de agua que la PA 6, teniendo un mejor comportamiento mecánico y eléctrico. Tiene una alta tenacidad a bajas temperaturas.

Su temperatura de fusión se encuentra en el rango de 160 a 209°C, una temperatura de transición vítrea en el rango de 125°C a 155°C, su temperatura de procesamiento es de 176 a 275°C. Es factible de ser reforzado con fibra de vidrio o carbono, así como de incluir plastificantes para obtener productos flexibles.

Después de haber analizado cada uno de los materiales usados en el proceso de rotomoldeo, en la tabla 2.4 se muestra un resumen:

**Tabla 2.4 Propiedades de los materiales plásticos**

Material	Present.	Dens.	Contracc.	T <sub>f</sub> (°C)	T <sub>g</sub> (°C)	Td <sub>1</sub>	Td <sub>2</sub>	T <sub>v</sub>	A	B %	C	D
LDPE	polvo	0.91-0.925	3%	105-110	-25	40	23	83	no	550	7.86	139
HDPE	polvo	0.941-0.965	1.5 – 3%	133	-25	57	42	98	no	405	22	930
LLDPE	polvo	0.918-0.935	3%	126	-25	59	38	91	no	450	17.2	703
PVC	liquido	1.4	.0025	168-174		67	62					
PP	polvo	0.902-0.906	1 – 2%	165	0	120						1340
PC	polvo	1.2	0.012%	260	150	135	131	157	.15%		64.1	2280
PA6	polvo	1.12-1.14	0.02%	215	60	176	74		1.8%	100		
PA11	polvo	1.04-1.06	0.02%	180-190		135	47	146		Min 50	31	525
PA12	polvo	1.02	0.02%	160-209	125-156	135	55	142		Min 50	40	1080

T <sub>f</sub>	Temperatura de fusión
T <sub>g</sub>	Temperatura de transición vítrea
T <sub>1</sub>	Temperatura de reblandecimiento a 0.46 MPa
T <sub>2</sub>	Temperatura de reblandecimiento a 1.8 MPa
T <sub>v</sub>	Temperatura vicat
A	Absorción de agua
B	elongación
C	Resistencia a la tensión a la cedencia (MPa)
D	Módulo elástico (MPa)



## 2.3 Selección de materiales

Es muy importante el seleccionar el material idóneo para cada aplicación, con esto se garantiza un óptimo funcionamiento del producto y ventajas económicas. Para esto se debe de tener presente la función a realizar, el tipo de ambiente en el cual se va a desempeñar, así como cada una de las propiedades del material que son indispensables. En la actualidad existen más de 6000 materiales plásticos, desde plásticos puros hasta copolímeros y aleaciones. Es por eso de la gran importancia de una selección correcta [11, 24, 25].

La selección de materiales como posibles candidatos en un producto específico, se realiza en etapas tempranas de diseño. Así se puede tener un amplio margen de alternativas en materiales.

Existen diferentes tipos de diseño entre las que se encuentra el **diseño original** donde se envuelve el concepto de una nueva idea, para desarrollarlo es necesario el uso de nuevos materiales, con nuevas composiciones y propiedades o el uso de materiales ya existentes pero no explorados en ese tipo de aplicaciones.

El **rediseño (diseño de adaptación)** en este caso se parte de un concepto existente en el que se busca incrementar su eficiencia a través de una refinación del principio de funcionamiento. Implicando sustituir materiales por otros que hacen al producto más económico, ligero, con mayor resistencia, mejor ergonomía, hacer el uso de un proceso de manufactura distinto, etc.

Por último el **diseño variacional** en el que se involucra un cambio de escala, dimensión o algunos detalles sin cambiar su función original. En este caso el hacer un cambio de escala puede involucrar un cambio de material, un ejemplo es el caso de botes pequeños para navegación en donde algunos son hechos de fibra de vidrio, mientras que los grandes son hechos de acero.

Como se puede observar a través de cada uno de los diferentes tipos de diseño se debe de hacer una correcta selección de materiales con el objetivo de que el producto sea económico, tenga resistencia mecánica, resistencia química y si la aplicación lo requiere ligero, entre otras características.



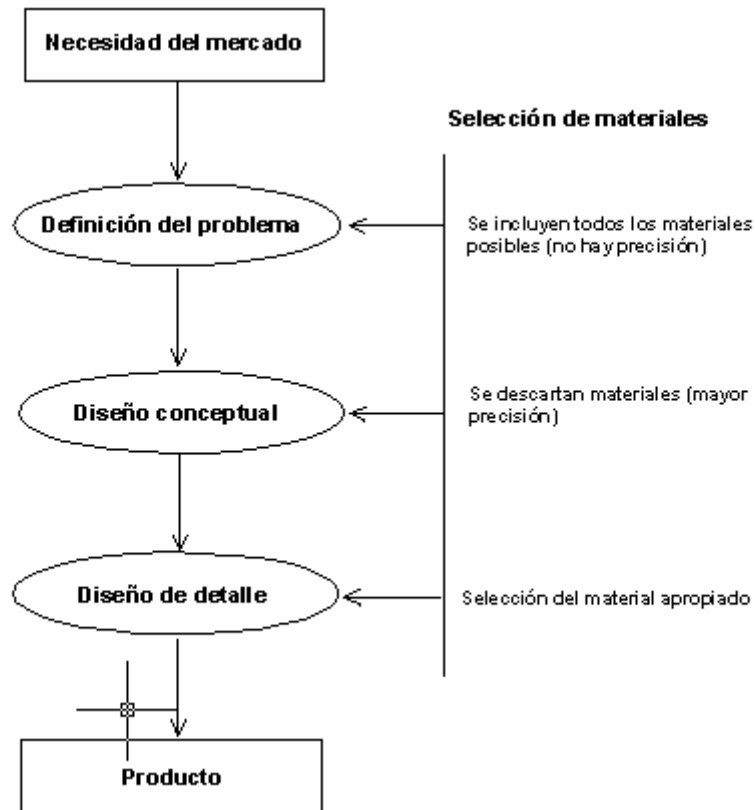


Figura 2.2 Etapas del proceso de diseño, imagen tomada de Materials Selection in Mechanical Design, Michael Ashby.

El proceso de diseño se compone de varias etapas como se observa en la figura 2.2, cada una de las etapas involucra una selección de materiales, la naturaleza de los datos en su nivel de precisión depende de la etapa en la cual se encuentre el diseño. La primera etapa consiste en la existencia de una necesidad, se prosigue con la definición del problema donde se parte de todas las alternativas posibles de materiales, ya que hasta el momento solo existe una necesidad y no se tiene en sí una estructura física del producto, es decir solo la idea. Conforme avanza el proceso de diseño se aborda el diseño conceptual en el que se visualiza la configuración final del producto por tanto se tienen datos de las propiedades que el material debe tener para cumplir con su función y se evalúan las diferentes alternativas.

De esta manera se realiza de nuevo otra selección del material con el objetivo de descartar los materiales que no cumplen con las especificaciones de diseño.

Al entrar a la última etapa de diseño es decir la etapa de detalle, ya se cuenta con todas las especificaciones necesarias, los cálculos de resistencia de las piezas, las propiedades térmicas, eléctricas, ópticas, etc.; del producto. El proceso por el cual resulta más viable la manufactura dependiendo del material, la forma final del producto y por ende ya es factible la selección de un material óptimo para esa aplicación específica.



La interrelación existente entre **función – material – forma – proceso** como se muestra en la figura 2.3 es de gran importancia, siempre se deben de manejar estos parámetros como un conjunto. Esta interrelación es de vital importancia, porque cada uno de estos parámetros como la forma, proceso, función y por supuesto el material representan un equilibrio para que el producto a diseñar contenga para una función específica una forma conveniente, donde la forma a su vez va a ser determinada y. determinar el material.

Al tener estos tres factores (función – forma – material) se define el proceso de manufactura viable que garantice una pieza sin defectos con ventajas de resistencia y económicas en su producción.

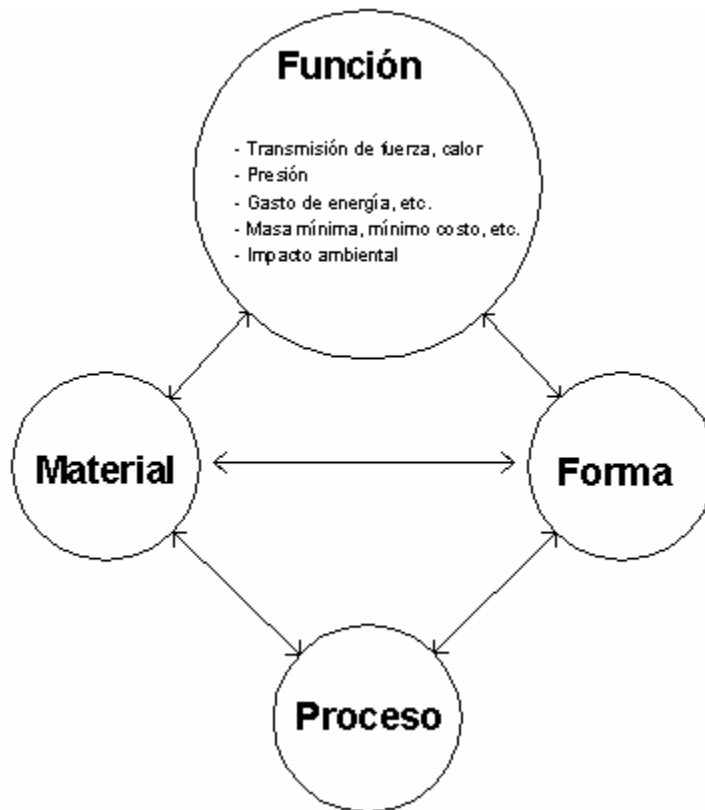


Figura 2.3 Interrelación entre la función, forma, material y proceso, en el diseño de un producto. Imagen tomada de *Materials Selection in Mechanical Design*, Michael Ashby.

### 2.3.1 Métodos para la selección de materiales

En la última etapa de diseño se puede hacer el uso de distintas herramientas para la selección del material óptimo como [24, 25]:

- Métodos de costo por unidad de propiedad
- Método de propiedades ponderadas
- Método de propiedades límite

Estos métodos para la selección de materiales son usados cuando después de partir de una gran gama de posibilidades se llega a tener un número mínimo, y cada uno de ellos ofrece al producto propiedades óptimas muchas veces diferentes. Es aquí donde entra la controversia de cual de estos materiales es el más conveniente a elegir, pues todos cumplen con la solución al problema planteado.

Cada uno de estos métodos se basa en la cuantificación de las propiedades, así como el costo del material. Para poder lograr un equilibrio.

#### 2.3.1.1 Método de costo por unidad de propiedad

Se basa en considerar el costo como un factor prioritario. Donde este costo se le agrega a una propiedad que se califica como la más crítica para el funcionamiento del producto o como pieza clave para su venta al mercado.

El costo se obtiene de la siguiente forma

$$C' = c \cdot \rho \cdot V \quad (2.1)$$

donde  $c$  es el costo del material por unidad de masa,  $\rho$  es la densidad del material y  $V$  el volumen de la pieza.

Si la propiedad que es la más crítica es la de resistencia el costo se debe obtener por unidad de resistencia como se observa en (2.2).

Así el material más bajo por unidad de resistencia será el mejor candidato para esa aplicación, pues implica que es el de menor costo. Esto es

$$\frac{c \cdot \rho}{\sigma} \quad (2.2)$$

Cuando se trata de un rediseño del producto y se busca sustituir el material existente se realiza una comparación de este material con los posibles candidatos, en este caso se aplica la fórmula (2.3).

$$RC' = \frac{C'(a)}{C'(b)} = \frac{c_a \cdot \rho_a \cdot \sigma_b}{c_b \cdot \rho_b \cdot \sigma_a} \quad (2.3)$$

Si  $RC' < 1$  significa que el material a es mejor que el b.

### 2.3.1.2 Método de propiedades ponderadas

El método consiste en agrupar los materiales candidatos en una tabla (ver tabla 2.4) y se añaden las propiedades de dichos materiales.

Tabla 2.4 Propiedades ponderadas

Material	Propiedad I	Propiedad II	Propiedad III	Propiedad IV
AA	----	----	----	----
BB	----	----	----	----
CC	----	----	----	----
DD	----	----	----	----
EE	----	----	----	----

Se debe de escalar la tabla para que los valores que se obtienen sean homogéneos, esto es porque se pueden presentar valores altos con valores minúsculos (decimales). Existen dos procedimientos para estandarizar los valores como se muestra en las siguientes fórmulas donde en la (2.4) se obtienen valores pequeños

$$prop.esc. = B = \frac{\text{valor numérico de la prop.}}{\text{valor máximo de la lista}} \times 100 \quad (2.4)$$

Para el caso de valores deseables altos se aplica la formula (2.5)

$$prop.esc. = B = \frac{\text{valor mínimo de la lista}}{\text{valor numérico de la prop.}} \times 100 \quad (2.5)$$

Cuando se habla de propiedades que no cuentan con un valor numérico, se les debe de asignar una ponderación

El siguiente paso es hacer una matriz de ponderación ( ver tabla 2.5) en la cual se compara propiedad contra propiedad en relación 1 a 1 se dan valores de 1 si la propiedad es mejor y de 0 a la contraria.

Tabla 2.5 Matriz de ponderaciones



Propiedad	1	2	3	4	5	6	suma	$\alpha$
Propiedad I	1	1	1				3	0.5
Propiedad II	0			1	1		2	0.333
Propiedad III		0		0		0	0	0
Propiedad IV			0		0	1	1	.166

Por último se calcula el índice de desempeño del material como

$$\gamma = \sum_{i=1}^n B_i \alpha_i \tag{2.6}$$

Con relación al costo (aplicar formula 2.7) este parámetro puede ser tomado como una propiedad extra o se puede tomar al final como un modificador del índice de desempeño.

$$\gamma' = \frac{\gamma}{c \cdot \rho} \tag{2.7}$$

Donde la tabla queda al final de la siguiente forma

Tabla 2.6 Configuración final de tabla

Material	Propiedad I	Propiedad II	Propiedad III	Propiedad IV	$\alpha$	$\gamma$	$\gamma'$
AA	----	----	----	----	----	----	----
BB	----	----	----	----	----	----	----
CC	----	----	----	----	----	----	----
DD	----	----	----	----	----	----	----
EE	----	----	----	----	----	----	----

El material óptimo corresponde al que obtuvo un valor del índice de desempeño mayor.

### 2.3.1.3 Método de propiedades al límite

El método consiste en evaluar las propiedades de los materiales candidatos en base a la comparación de valores en forma numérica. Se establecen límites determinados por los requerimientos del producto como lo es resistencia, conductividad eléctrica, térmica, resistencia al impacto, etc, de modo que los requerimientos marquen límites superiores e inferiores de las propiedades.

De esta forma se van a tener propiedades en donde el desempeño que va a realizar en el producto es determinado por:



- Propiedades de límite inferior
- Propiedades de límite superior

El índice de desempeño esta determinado por la siguiente fórmula:

$$M = \left( \sum_{i=1}^{h_i} \alpha_i \frac{y_i}{x_i} \right)_i + \left( \sum_{j=1}^{h_j} \alpha_j \frac{x_j}{y_j} \right)_j + \left( \sum_{k=1}^{h_k} \alpha_k \left| \frac{x_k}{y_k} \right| \right)_k \quad (2.8)$$

Donde

$x_i$  es el valor del material candidato en su limite inferior

$y_i$  es el valor especifico del material de límite inferior

$x_j$  es el valor del material candidato en su limite superior

$y_j$  es el valor especifico del material de límite superior

$\alpha$  se calcula con la matriz de ponderación

M es el índice de desempeño

M' es el índice de desempeño modificado con el costo.

El material a seleccionar es el que tenga el valor M más bajo posible. Al igual que en los métodos anteriores el costo entra como un modificador, aplicar la formula (2.7).

Tabla 2.7 Propiedades al límite

Material	Propiedad I	Propiedad II	Propiedad III	Propiedad IV	$\alpha$	M	M'
A	----	----	----	----	----	----	----
B	----	----	----	----	----	----	----
C	----	----	----	----	----	----	----
D	----	----	----	----	----	----	----
E	----	----	----	----	----	----	----



### 3 **Análisis de resistencia mecánica en piezas plásticas huecas.**

Este trabajo consiste en el diseño de piezas plásticas huecas por el método de rotomoldeo las cuales van a cumplir con distintas funciones de trabajo.

Las piezas plásticas huecas en determinado momento van a ser sometidas a esfuerzos de flexión, tensión, cortantes, fuerzas de presión entre otras. Ejemplo de estas fuerzas se presentan a continuación, cuando se habla de fuerzas de presión, estas fuerzas se encuentran presentes en el diseño de contenedores de líquidos, sólidos o gases; piezas sometidas a flexión por mencionar algunos: mesas, sillas, juguetes montables, juegos de jardín, otro tipo de fuerzas que se pueden presentar son de impacto las cuales se presentan en la defensa de un automóvil.

El proceso de rotomoldeo se usa básicamente para la fabricación de piezas de plástico huecas que van desde tamaños pequeños hasta grandes dimensiones. Las formas a manufacturar son muy variadas, desde formas simétricas hasta asimétricas con múltiples usos. En ocasiones estarán las piezas sujetas a grandes esfuerzos pero en otros casos los esfuerzos no serán tan significativos.

Así también existen otros factores que hay que tomar en cuenta cuando se lleva a cabo el diseño de las piezas plásticas a manufacturar, dichos factores consisten en el ambiente al cual va a ser destinada la pieza plástica rotomoldeada pues puede existir degradación del material plástico a consecuencia de algunas sustancias corrosivas, el factor de degradación en el tiempo, y el efecto que la temperatura tiene en la disminución de la resistencia [20].

Es por eso que dentro de la etapa de diseño del producto es indispensable realizar el análisis mecánico de las piezas que van a constituirlo para saber si el diseño va a cumplir con los requerimientos, ¿cómo se va a presentar una falla? y ¿cuál es la vida útil del producto?

#### **3.1. *Propiedades mecánicas de los plásticos***

Los materiales plásticos tienen un comportamiento visco-elástico cuando se somete el material a fuerzas de forma continua. Es decir el comportamiento del material plástico es una función del tiempo [26, 27, 28].

Cuando las fuerzas son aplicadas al material plástico la deformación total en el material no es instantánea, esta deformación incrementa con el tiempo y no se

recupera completamente. Bajo una fuerza constante la deformación incrementa con el tiempo (deslizamiento retardado) y en caso contrario cuando se presenta una deformación constante el esfuerzo decrece con el tiempo (fase de relajación), esto se puede observar en la figura 3.1

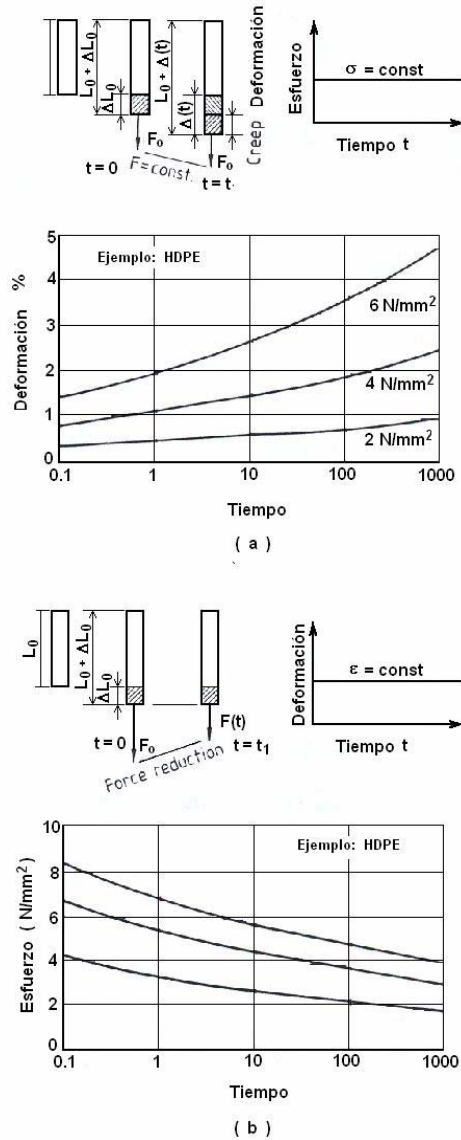


Figura 3.1 a) Aplicación de una fuerza constante que resulta en una deformación que incrementa con el tiempo. b) Aplicación de una deformación constante, se tiene el resultado de disminución del esfuerzo en el tiempo. Imagen tomada de Plastics processig an introduction. Walter Michaeli.

Este comportamiento viscoelástico de los plásticos se debe a que su estructura es molecular en comparación con los metales la cual es atómica.

Es necesario diferenciar como se hizo anteriormente en la clasificación de los plásticos, los cuales se clasifican como termofijos, termoplásticos y elastómeros. Los materiales termofijos debido a sus reticulaciones carecen de deslizamiento interior, por esta razón no cumplen con el concepto de viscoelasticidad, estos materiales son básicamente quebradizos.

Otro comportamiento importante de mencionar es que los materiales plásticos son visco-elásticos no lineales, esto quiere decir que la magnitud de la carga es de vital importancia. Pues el doble de la carga a través del mismo periodo de tiempo da como resultado más del doble de la deformación. Y el doble de la deformación a través del mismo período de tiempo resulta en menos de la mitad del esfuerzo en decremento.

Los materiales plásticos exhiben un comportamiento de dependencia a la temperatura (ver capítulo 2 referente a la clasificación de los plásticos), ejemplo de ellos son los materiales termoplásticos. A elevadas temperaturas el fenómeno se acelera.

### 3.1.1 Pruebas de deslizamiento (de flujo)

Las pruebas de deslizamiento consisten a grandes rasgos en pruebas de tensión o flexión en las cuales se observa la deformación que sufre la probeta plástica a través del tiempo con condiciones controladas. Después de que la carga ha sido aplicada, la galga marca la longitud por medio de mediciones. En este caso el incremento en la longitud marcada por la galga entre la longitud original de la probeta es la deformación. En la figura 3.2 se muestra una máquina universal donde se realiza una prueba de tensión.

Estas pruebas muestran que el plástico inmediatamente experimenta una deformación elástica cuando la fuerza es aplicada, después de un período de tiempo se presenta una deformación elástica retardada y conforme el tiempo continúa en un periodo ocurre el flujo viscoso.

La parte elástica de la deformación se reduce si se deja de aplicar la fuerza y se observa como se recupera. Usualmente se contrae instantáneamente y continúa de forma lenta hasta que ya no sucede ningún cambio.







Figura 3.2 Máquina universal para pruebas de tensión, compresión, elongación y flexión (imagen tomada de Instron Limited Inc.).

La cantidad de tiempo que al material le toma para llegar a un nivel particular de deformación depende del esfuerzo aplicado y de la temperatura, pues si se incrementan alguno de los dos parámetros la cedencia se acelera. La información que se obtiene en estos ensayos es de gran utilidad para artículos plásticos que están sometidos a fuerzas por largos periodos de tiempo.

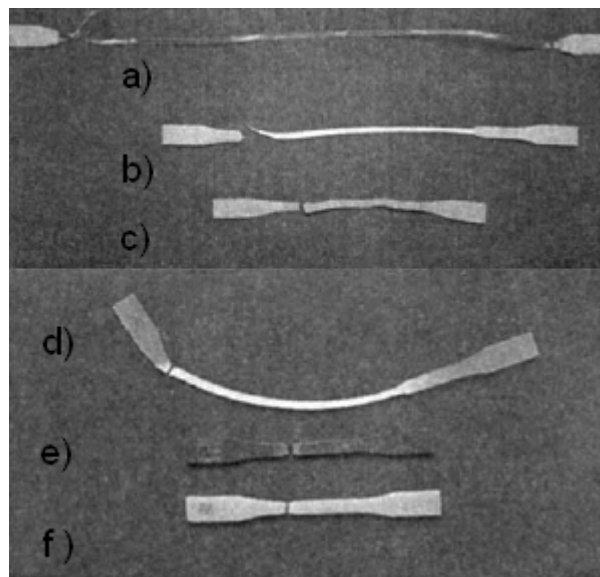


Figura 3.3 Ensayo de tensión de diferentes plásticos durante un ciclo de carga. a) polietileno de baja densidad, b) polietileno de alta densidad, c) polietileno de ultra alto peso molecular, d) polipropileno, e) PVC, f) poliamida. Normas ASTM D638, ISO 527 DIN 53455. Imagen tomada de Centro Empresarial del Plástico Industrial IMPI.

En la figura 3.3 se observa el resultado de pruebas de tensión en diferentes materiales, donde el polietileno de baja densidad es el material con mayor grado de deformación, y para este caso el PVC y la poliamida son los de menor deformación.

### 3.1.2 Recuperación de la deformación

A pesar de que todos los materiales plásticos ceden, se debe recordar que cuando la fuerza se deja de aplicar la deformación en el material decrece con el tiempo (fase de recuperación). Para aplicaciones en donde el tipo de fuerzas que se aplican son en ciclos intermitentes, se debe considerar en el diseño de las partes plásticas que la deformación no va a desaparecer una vez que se ha dejado de aplicar la fuerza cíclica. En este caso la deformación de deslizamiento (flujo) se acumula ciclo a ciclo. Como se observa en la figura 3.2.

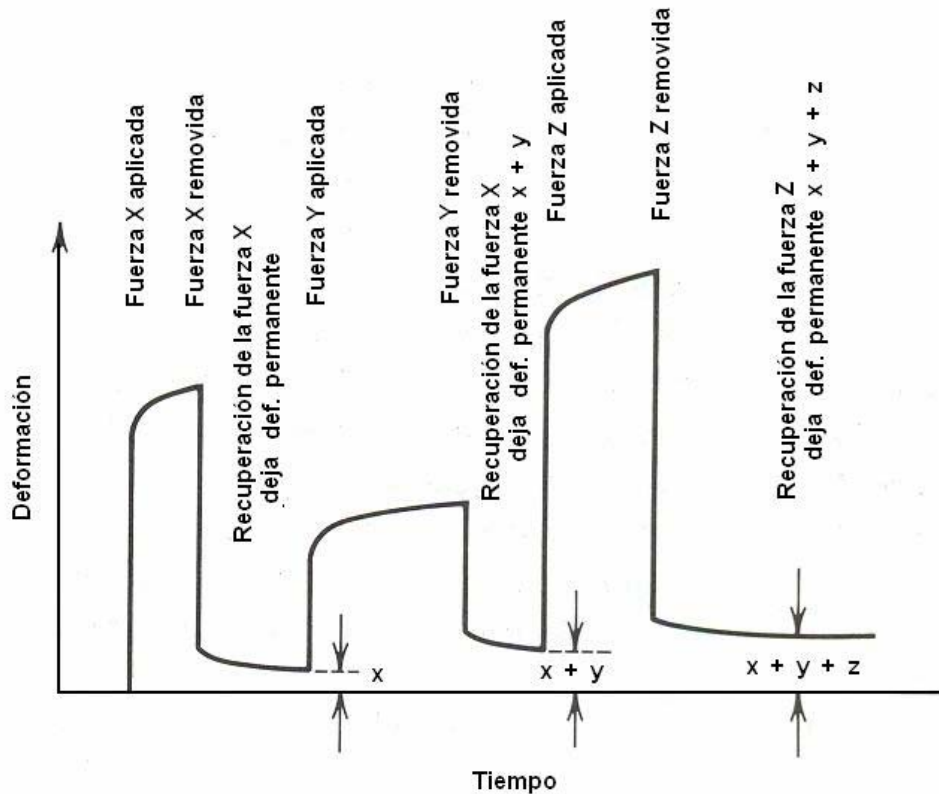


Figura 3.4 Deformación y recuperación en una situación de carga intermitente. Imagen tomada de *Plásticos en la construcción*. Hansjürgen Saechtling.

### 3.1.3 Fuerzas de impacto

La resistencia al impacto es la propiedad que presentan los plásticos a resistir un golpe o prolongar una fractura al estar sujeto a cargas de impacto.

El ensayo de impacto mide la relación de las cargas dinámicas con:

- Energía de formación de la fractura
- Energía de propagación de la fractura

Los factores que afectan los resultados que se obtienen en las pruebas de impacto son:

- La temperatura
- Velocidad de carga
- Procesamiento
- Orientación
- Muesca de la pieza
- Cristalinidad / peso molecular



Figura 3.5 Máquina para pruebas de impactos, imagen tomada de publicación “Importancia de los ensayos mecánicos como herramienta de competitividad por Andrés F. Rigail, Plast universal”

El desempeño de los plásticos bajo cargas de impacto se compara con la determinación experimental de la cantidad de energía requerida para romper probetas en impacto, conocido como prueba de péndulo. Como se muestra en la figura 3.5.

Los resultados de las pruebas de impacto muestran que muchos plásticos tienen alta resistencia a impactos, así como sensibilidad al radio agudo de la punta y a la temperatura. Este concepto de fuerzas de impacto es importante analizarlo

con detalle en piezas que tienen la probabilidad de fallar debido a impactos, como cajas de refrescos, hieleras, cascos, carcasas, etc.

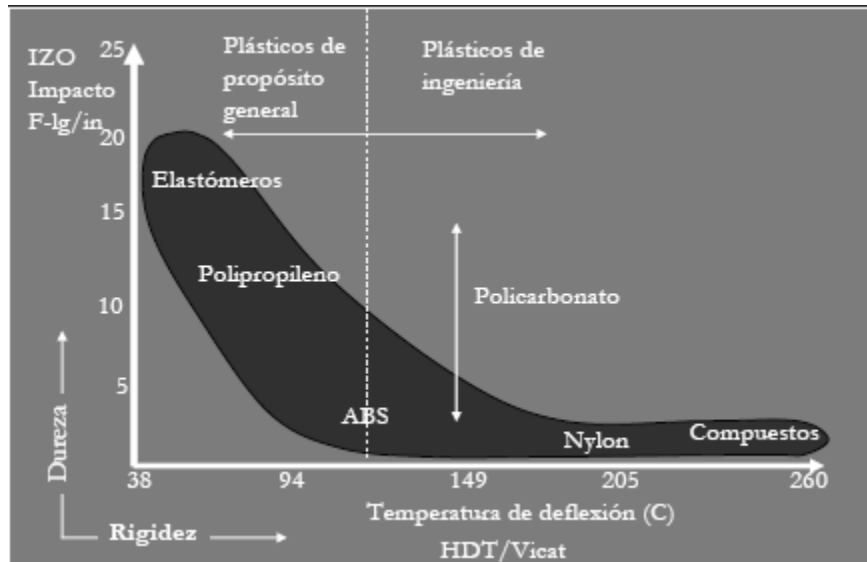


Figura 3.6 Efecto de la temperatura en la resistencia debido a impacto en algunos plásticos, imagen tomada de publicación “Importancia de los ensayos mecánicos como herramienta de competitividad por Andrés F. Rigail, Plast universal”

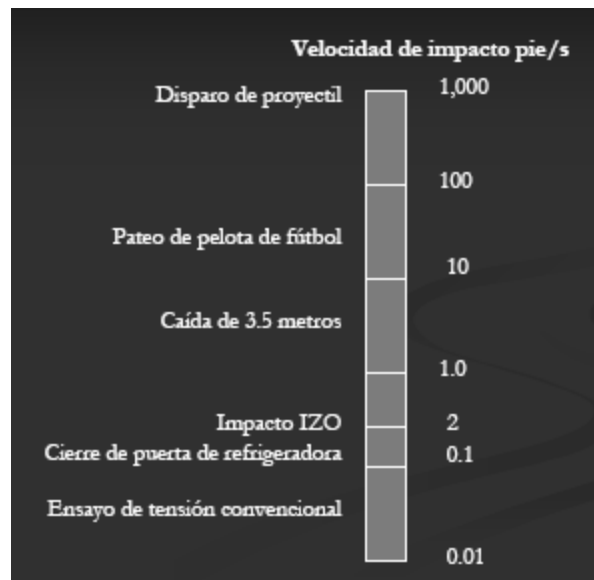


Figura 3.7 Velocidades de impacto, imagen tomada de publicación “Importancia de los ensayos mecánicos como herramienta de competitividad por Andrés F. Rigail, Plast universal”

En la figura 3.6 se muestra como es la variación de la resistencia con respecto a la temperatura, para distintos materiales plásticos. En la figura 3.7 se ejemplifica la correspondencia de cada una de las velocidades de impacto con respecto a un fenómeno físico de impacto.

#### 2.1.4 Dureza Rockwell

La dureza Rockwell es la resistencia que presentan los materiales a ser mellados o rayados sobre su superficie.

El método consiste en colocar una muestra o probeta bajo una esfera de acero de diámetro y peso calibrado, dejándose caer sobre la muestra plástica. De esta forma, se deja una marca sobre ella y de acuerdo a la penetración que deja la esfera, se calcula su dureza. Este método está regido por las normas: Rockwell ASTM D 785, ISO 2039.

La dureza está referida a otras pruebas de fricción y desgaste que consisten en medir el desgaste de una probeta de plástico que se ha sometido a una fricción constante.

Los artículos que son más difíciles de rayar son utilizados en carcasas, artículos de decoración los cuales van a estar expuestos a la presencia del ojo humano.

Los materiales que presentan altos valores de dureza son el acrílico, acetal, el polietileno de ultra alto peso molecular. También se les considera como auto lubricantes debido a su baja pérdida por fricción.

### 3.2 *Comportamiento de esfuerzo - deformación en los plásticos*

En la mayoría de las aplicaciones de los materiales plásticos las propiedades mecánicas son de gran interés. En especial el comportamiento de esfuerzo deformación, en donde la magnitud y el tiempo de aplicación de la fuerza son los parámetros que juegan un papel muy importante en los resultados del estado de esfuerzos de la pieza. Así también factores externos como la temperatura, sustancias del ambiente de trabajo, que van a actuar en las piezas plásticas rotomoldeadas.

- Comportamiento a corto plazo

Cuando se dimensionan productos plásticos en las etapas tempranas del diseño los resultados de las pruebas de corto plazo hechas a los materiales plásticos



sirven como una base para dar idea de cual va a ser el comportamiento del material en determinada aplicación y magnitud de fuerzas. La forma básica del diagrama esfuerzo - deformación para materiales plásticos frágiles, suaves/elásticos se muestran en la figura 3.8, comparar la gráfica con la figura 3.3.

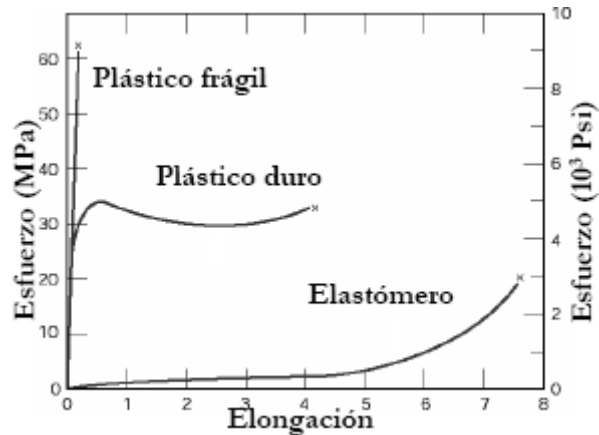


Figura 3.8 Diagrama esfuerzo – deformación de materiales plásticos.

- **Efecto de la temperatura en el comportamiento mecánico**

La temperatura tiene el mayor efecto en el comportamiento mecánico de los plásticos. En la figura 3.9 se muestra el efecto de la temperatura en un material termoplástico. El incremento de la temperatura tiende a causar un ablandamiento, esto da como resultado una disminución en la resistencia de las piezas, y para temperaturas por debajo de la cristalización tiende a ser quebradizo. Los materiales termofijos no presentan cambio en sus propiedades por temperatura, solo si esta es demasiado alta el material tendera a una degradación.

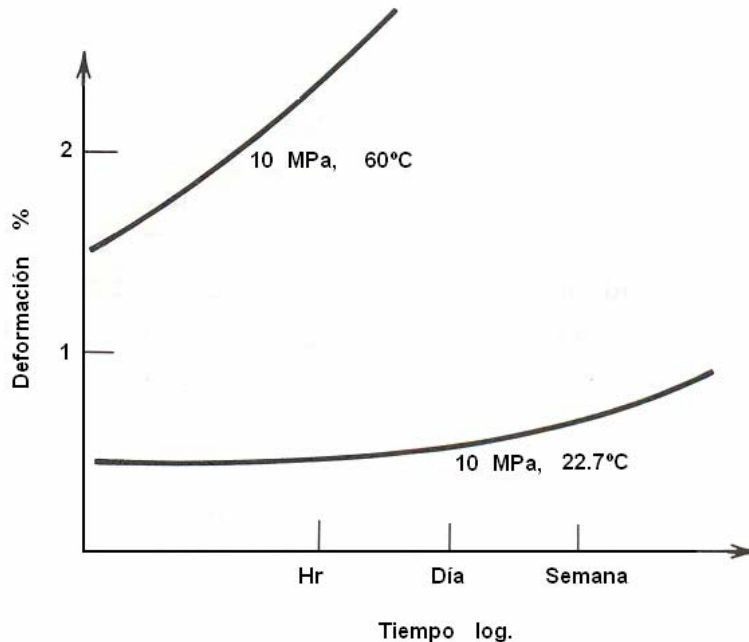


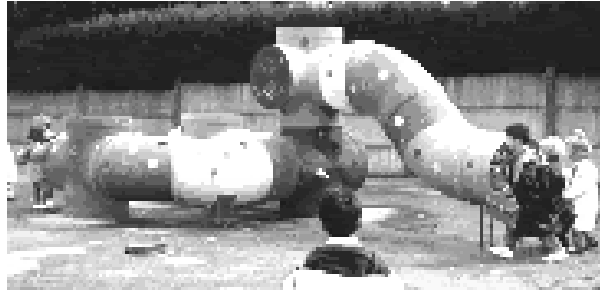
Figura 3.9 Variación en la deformación debido al efecto de la temperatura

### 3.3 *Análisis Mecánico de Piezas Plásticas huecas*

Como ya se conocen cuales son los parámetros de importancia en el diseño de las piezas plásticas, esto con respecto a la resistencia mecánica. Ahora es necesario determinar los esfuerzos máximos a los que estarán sometidas las piezas rotomoldeadas y cual es la geometría que ofrece mejores ventajas de resistencia así como ahorro de material.

El proceso de rotomoldeo básicamente es para la manufactura de piezas huecas, esto no quiere decir que no se puedan manufacturar piezas que no lo sean. Pues si se juega con los arreglos de las piezas en el diseño del molde se pueden fabricar dos piezas dentro del mismo molde. Pero con la desventaja de que es necesario un trabajo posterior de corte para separar las piezas rotomoldeadas.

A continuación se analizan los diferentes casos en los que se pueden dar la presencia de fuerzas en las piezas plásticas, dichas fuerzas van a depender del uso al que van a ser destinadas. Las piezas que son principalmente manufacturadas por rotomoldeo son contenedores de sustancias líquidas y sólidas en este tipo de piezas plásticas se debe de realizar el análisis como un recipiente que esta sometido a presión; juguetes de los cuales algunos pueden asimilarse a vigas a flexión o columnas.



a)



b)

Figura 3.10 Productos plásticos rotomoldeados, el análisis es mediante el uso del concepto de vigas huecas (imagen de Gold Shield)

### 3.3.1 Viga hueca simplemente apoyada con carga uniformemente distribuida.

Se considera una viga hueca simplemente apoyada de sección transversal cuadrada. La cual esta sometida a una carga uniformemente distribuida. El comportamiento de la viga depende de la fuerza distribuida  $q$ , del material (modulo de elasticidad del plástico) y de la geometría de la viga [29].

El momento de inercia para una sección transversal cuadrada esta dado por la fórmula (3.1):

$$I = \frac{BH^3 - bh^3}{12} \quad (3.1)$$

Donde B y H corresponden a las dimensiones externas y b, h a las dimensiones internas de la sección transversal cuadrada.

Unos de los ejemplos para la aplicación del concepto de viga hueca simplemente apoyada con carga uniformemente distribuida o con carga puntual se puede dar



en juegos para exteriores como se observa en la figura 3.10, bancas para jardín, etc.

Donde el esfuerzo máximo esta dado por la fórmula (3.2) y corresponde a:

$$\sigma = \frac{M c}{I} \quad (3.2)$$

c es la distancia al eje neutro, I es el momento de inercia, M es el momento flexionante.

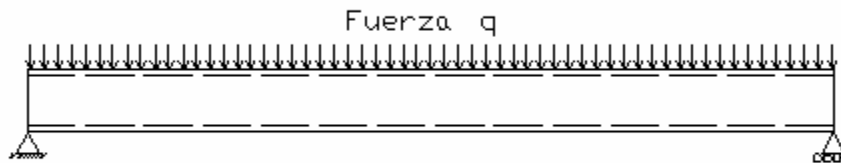


Figura 3.11 Viga hueca simplemente apoyada con carga uniformemente distribuida.

La deflexión máxima esta dada por:

$$\delta_{\max} = \frac{5qL^4}{384 EI} \quad (3.3)$$

q es la carga distribuida, L la longitud de la viga, E el módulo de elasticidad, I el momento de inercia.

Cuando la sección transversal sea distinta a un perfil cuadrado se debe de utilizar el momento de inercia referente a la geometría en cuestión.

### 3.3.2 Viga en cantiliver hueca.

Una pieza rotomoldeada puede tener la función de una viga en cantiliver con una serie de combinaciones entre la aplicación de las cargas y la geometría

transversal. Enseguida en la fórmula (3.4) se muestra el esfuerzo al que va a estar sometida una viga hueca con una carga puntual en el extremo:

$$\sigma = \frac{Mc}{I} \quad (3.4)$$

La deflexión en el extremo libre está dado por la fórmula (3.5) donde como ya se menciono anteriormente el momento de inercia es dependiente de la sección transversal de la viga

$$\delta_{\max} = \frac{PL^3}{3EI} \quad (3.5)$$

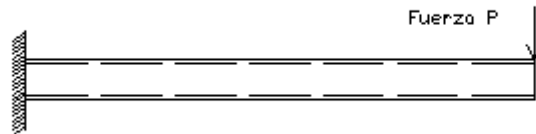


Figura 3.12 Viga en cantiliver con fuerza puntual en un extremo

### 3.3.3 Columnas

Si consideramos una barra, poste o una pared a la cual se le van a aplicar cargas (verticales) en los extremos y estas cargas se incrementan, en un principio no pasará nada pero después va a tender a alabearse (flexionarse) hasta que finalmente va a fracturarse o fallar [30].

La prioridad en el diseño de esta configuración es que las columnas tengan la capacidad de sostener una carga específica sin experimentar esfuerzos excesivos y la capacidad para sostener la carga sin sufrir deformaciones inaceptables.

En la figura 3.13 se observan unas tarimas plásticas donde en sus cuatro esquinas tienen conos salientes, los que sirven como soporte de la tarima superior. Estos soportes ejemplifican muy bien el concepto del uso de columnas en piezas plásticas rotomoldeadas.



Figura 3.13 Tarimas plásticas manufacturadas por el proceso de rotomoldeo. Obsérvese los conos de las cuatro esquinas que funcionan como columnas.

Básicamente el diseño de las columnas es bajo el concepto una carga crítica, si la presión es mayor que esta presión crítica el sistema se volverá inestable. La presión crítica esta dada por la fórmula 3.6 como se muestra a continuación:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 E I}{L_e^2} \quad (3.6)$$

En forma similar se encuentra el esfuerzo crítico presente en la columna el cual se calcula con la siguiente formula

$$\sigma_{cr} = \frac{P_{cr}}{A} = \frac{\pi^2 E}{(L_e/r)^2} \quad (3.7)$$

donde E es el módulo de elasticidad del material de la columna, I es el momento de inercia el cual depende de la sección transversal hueca,  $L_e$  es la longitud efectiva de la columna. Este parámetro de la longitud efectiva varía con respecto al tipo de apoyo de los extremos de la columna como se muestra a continuación en la figura 3.14.

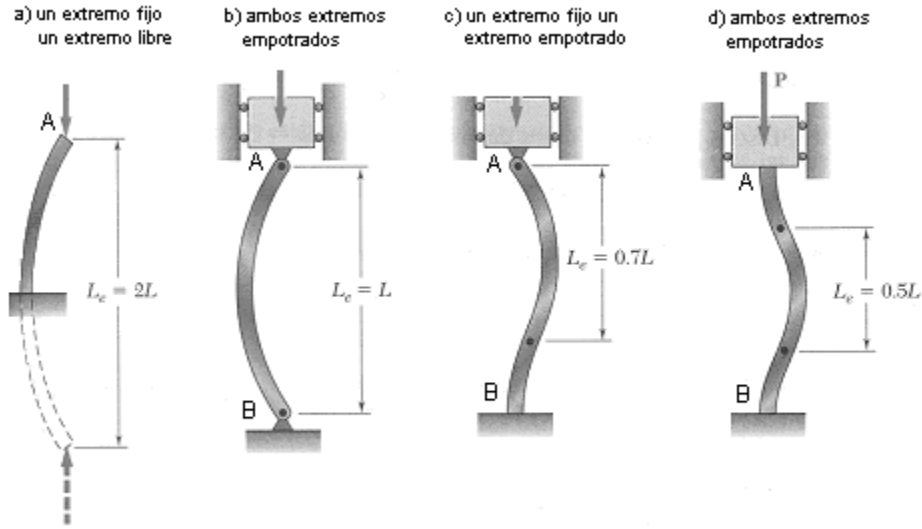


Figura 3.14 Longitudes de columnas efectivas para varias condiciones de extremo, imagen tomada de Mecánica de Materiales, Ferdinand P. Beer; E. Russell Johnston; John T. Dewolf.

### 3.3.4 Recipientes a presión

Una de las aplicaciones importantes de los productos plásticos manufacturados por el proceso de rotomoldeo se destina a recipientes que sirven para almacenar ya sea líquidos, sólidos y algunas veces gases. Por tanto los esfuerzos que se presentan son debidos a fuerzas de presión internas ocasionadas por el elemento que contienen.



Figura 3.15 Recipientes para almacenamiento de líquidos.

Como ejemplo se mencionan las pelotas, tanques de gasolina, depósitos de agua, silos para el almacenamiento de polvos, granos, entre otros. Cada uno de estos ejemplos tiene características comunes con los demás. Primero deben soportar una fuerza en forma de presión interna normal a la superficie interna del recipiente. Segundo, todos tienen una geometría similar es decir los espesores son delgados.

El estado de esfuerzos de los recipientes de pared delgada sometidos a presión generalmente es biaxial como se observa en la figura 3.16, con fuerzas internas por unidad de longitud en las direcciones axial y circunferencial, es decir fuerzas internas tangenciales a la superficie de los recipientes a presión.

A continuación se describen los esfuerzos para recipientes esféricos y cilíndricos sometidos a presión interna ocasionada por gases, donde la presión es constante en todas las caras internas del recipiente. Esta diferenciación en el cálculo es debido a que si la presencia de presión es debida a líquidos, dicha presión aumenta con respecto a la altura del líquido contenido en el recipiente.

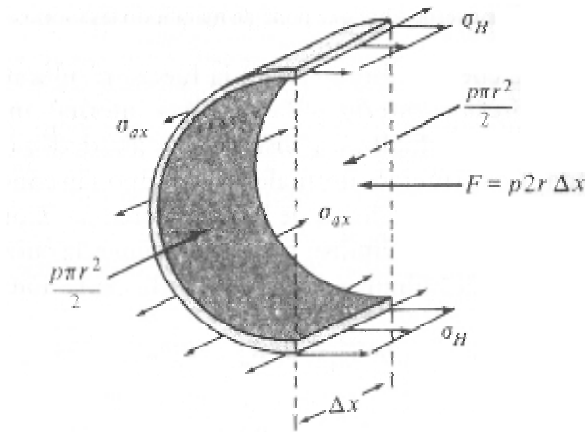


Figura 3.16 Diagrama de cuerpo libre, donde se observan las fuerzas axiales internas. Mecánica de sólidos, conceptos y aplicaciones, William B. Bickford.

### 3.3.4.1 Recipientes a presión cilíndricos

Se considera un recipiente a presión cilíndrico cerrado que está sometido a una presión interna provocada por un gas. Las fuerzas internas que actúan se observan en el diagrama de cuerpo libre de la figura 3.16.

Las fuerzas axiales están determinadas por:

$$\sigma_{ax} = \frac{pR_i}{2t} \quad (3.8)$$

$p$  es la presión debida al gas contenido,  $R$  es el radio interno del contenedor y  $t$  es el espesor.

Los esfuerzos circunferenciales se suponen uniformes, siempre y cuando se cumpla la hipótesis de  $t/R_i$  sea pequeño. El esfuerzo circunferencial  $\sigma_H$  es el doble que el esfuerzo axial  $\sigma_{ax}$ .

$$\sigma_H = \frac{pR_i}{t} \quad (3.9)$$

### 3.3.4.2 Recipiente a presión esférico

En el análisis de recipientes esféricos sometidos a presión, en donde el espesor  $t$  es uniforme. La fuerza de presión es constante en cualquier punto de la esfera, esto da como resultado que el esfuerzo también es constante. Este esfuerzo normal actúa tangencialmente en cualquier dirección y en todo punto del recipiente.

$$\sigma_H = \frac{pR}{2t} \quad (3.10)$$

donde  $R$  es el radio interno,  $t$  es el espesor del recipiente. Los valores del esfuerzo cortante que se presentan sobre los planos a  $45^\circ$  en las superficies exterior e interior son  $\tau = \sigma_H/2$  y  $\tau = (\sigma_H + p)/2$  respectivamente y representan el esfuerzo cortante máximo absoluto en el recipiente.

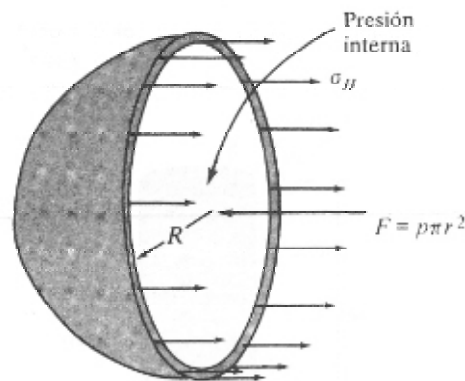


Figura 3 17 Fuerzas internas en una esfera sometida a presión. Imagen tomada de Mecánica de sólidos, conceptos y aplicaciones, William B. Bickford.

Una aplicación del rotomoldeo en recipientes esféricos sometidos a un gas es la manufactura de pelotas.

### 3.3.4.3 Recipientes a presión debida a un líquido.

El análisis de los recipientes sometidos a presión ocasionada por un líquido varía solo un poco a el análisis de recipientes donde la presión es ejercida por un gas. En el caso de la presión ejercida por un líquido, dicha presión no es constante a lo largo de las paredes del recipiente.

En las paredes laterales del recipiente, la presión aumenta gradualmente conforme aumenta la altura del líquido contenido, como se establece en la fórmula (3.11). Por lo tanto la presión esta dada por:

$$p = \rho g h = \gamma h \quad (3.11)$$

donde  $\rho$  es la densidad del líquido contenido en el recipiente,  $g$  la gravedad,  $h$  la altura del líquido y  $\gamma$  es el peso específico del líquido [26].

Como se puede observar el diseño de recipientes donde la presión es ocasionada por un líquido, los cálculos se realizan con la máxima presión presente en el recipiente. Esta máxima presión se localiza en el fondo del recipiente.

El esfuerzo se determina como sigue

$$\sigma_{ax} = \frac{(\gamma h)R_i}{2t} = \frac{pR_i}{2t} \quad \text{y} \quad \sigma_H = \frac{(\gamma h)R_i}{t} \quad (3.12)$$

## 4 Recomendaciones de diseño para piezas plásticas rotomoldeadas

Una parte fundamental en el diseño de piezas plásticas se encuentra en la función que debe de realizar el diseñador, pues debe de estar estrechamente relacionado con el proceso a través del cual se van a fabricar las piezas plásticas. Cada uno de los procesos de fabricación como la inyección, termoformado, extrusión y rotomoldeo, por mencionar algunos, cuentan con diferentes características geométricas en el diseño de las piezas plásticas; donde este último proceso de manufactura es el objeto de análisis para este trabajo.

Si el diseñador o la persona que piensa manufacturar piezas plásticas por medio del proceso de rotomoldeo conoce estas recomendaciones o reglas de diseño, le será muy difícil saber cuales son las dimensiones geométricas idóneas para encontrar un equilibrio entre piezas resistentes, material adecuado de acuerdo a la aplicación que se le va a dar a la pieza, piezas con mínimo peso, buena apariencia superficial, sin defectos y que sean económicamente viables.

El proceso de rotomoldeo se utiliza en un sinnúmero de aplicaciones para la manufactura de piezas plásticas huecas, dichas piezas pueden ser desde tamaños pequeños como se muestra en la figura 4.1 hasta piezas de grandes dimensiones como se muestra en la figura 4.2 (ver sección 1.4).



Figura 4.1 Piezas fabricadas por el proceso de rotomoldeo (imagen tomada de The Plastic Professionals Inc., rotacional molding).

Debido a la cantidad de variables que se involucran en el proceso, se presenta a continuación una guía que tiene la finalidad de proporcionar información acerca de las variables geométricas involucradas en el proceso de rotomoldeo, con esto el diseñador o la persona que empieza en el rubro del procesamiento de piezas



plásticas por el proceso de rotomoldeo contará con la información suficiente para poder obtener piezas económicas, resistentes y de buena calidad.

Las siguientes recomendaciones de diseño que se abordan en este trabajo [33 - 52] son los espesores mínimos que se pueden obtener en una pieza y su relación existente dependiendo del material con el que se va a fabricar la pieza, los radios mínimos aplicables, las formas para realizar agujeros en las piezas plásticas; la distancia que debe de haber para una correcta elaboración de piezas de pared doble, así también cuando es necesario el uso de multicapas. Y como es posible aumentar la resistencia de las piezas plásticas desde una perspectiva de esfuerzo, ligereza y economía. Otro de los puntos a tratar es el uso de insertos metálicos.



Figura 4.2 Piezas de tamaños grandes fabricadas por rotomoldeo, para este tipo de piezas es necesario reforzarlas para evitar deformaciones (de Ameri-kart Advantages).

Existen otras variables importantes en la etapa de diseño de las piezas plásticas, entre ellas están el seleccionar la maquinaria adecuada para determinadas piezas, así como también las velocidades de rotación de los ejes son muy

importantes porque la elección de una velocidad adecuada representa que el material va a recubrir toda la superficie interna del molde así también que el material va a pasar en la misma proporción por cada una de las superficies que forman el molde, lo que nos va a garantizar que se tengan espesores de pared uniformes.

La transmisión de calor es otro de los parámetros importantes en esta etapa de diseño, esto es si ya se realizaron análisis de esfuerzos y se ha determinado cual es la configuración final de la pieza plástica, es decir se tiene entre los requerimientos un determinado espesor o entre en las especificaciones de diseño el material de la pieza a manufacturar es uno específico y no se puede realizar un cambio, se debe poner especial atención en el tipo de material del molde. Esto debido a que si el material que lo constituye tiene una conductividad térmica elevada y el tiempo de proceso es alto para que se puedan lograr los espesores requeridos, el material plástico va a degradarse. Por tanto el material del molde debe de cambiarse por otro que tenga una conductividad menor; si esto no fuera posible, se deben cambiar los espesores o en su defecto el material plástico de la pieza.

Como se puede observar cada una de estas variables son muy importantes para poder obtener piezas sin defectos, con ventajas económicas y con buenas resistencias mecánicas.

#### **4.1 Espesor de pared**

El proceso de rotomoldeo tiene como característica positiva una distribución uniforme del material en el molde, esto nos da una garantía de que se va a contar con un espesor de pared uniforme de la pieza plástica fabricada. El grado de uniformidad está determinado por las velocidades de rotación de los ejes, dichas velocidades deberán ser las correctas para que el material recorra todo el interior del molde en la misma proporción, es decir las velocidades de rotación dependerán de la geometría del molde y del grado de fluidez del material.

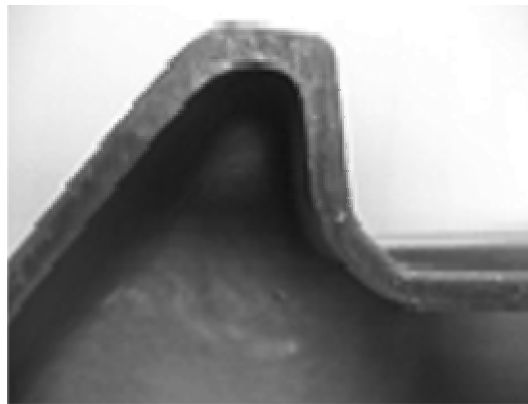


Figura 4.3 Muestra del espesor de pared de una pieza rotomoldeada.

La geometría ideal para el proceso de rotomoldeo es la formación de una esfera como se muestra en la figura 4.4, debido a que esta geometría es sencilla, por lo tanto no existe obstáculo alguno para el flujo del material, y el espesor de pared obtenido es el mismo a través de toda la superficie de la esfera. Ejemplo de piezas plásticas en donde se tiene la formación de esferas es la fabricación de pelotas de PVC (plastisol).



Figura 4.4 Geometría ideal esférica. Pelota de PVC (plastisol) realizada por el proceso de rotomoldeo.

Otro de los parámetros que impiden un espesor de pared uniforme es la transferencia de calor a través del molde, es decir si dicha transferencia de calor no es constante, en el molde se tendrán zonas más calientes que otras. Esto provoca que el material plástico se adhiera en primer lugar a las zonas más calientes. Por tanto debe ponerse mucha atención en el diseño del molde y que los espesores de pared de este sean también uniformes de ser posible. Si las paredes del molde no son uniformes o el diseño del mismo es complicado en cuanto a geometría, es decir cuenta con superficies internas a las cuales el calor no les llega directamente se puede jugar con la velocidad de rotación de los ejes como se mencionó anteriormente para que el material recorra un número mayor de veces por estas secciones (secciones más frías) de esta forma se compensa la falta de temperatura en estas superficies.

El material con el cual se va a fabricar la pieza plástica rotomoldeada juega un papel muy importante en el espesor de pared. Debido a que cada uno de los diferentes materiales que pueden ser usados en este proceso cuentan con temperaturas de plastificación distintas, por lo tanto el tiempo de exposición del plástico desde que alcanza la temperatura de plastificación y empieza a adherirse a la superficie del molde en algunos materiales debe ser más corto que para otros para evitar la degradación del mismo.

A continuación se mencionan los espesores de pared recomendados para algunos materiales plásticos:

- *Poliétileno de alta densidad (HDPE)*: en este material se tiene un rango ideal el cual varía desde 1.5 mm hasta 25 mm. Cabe mencionar que se ha llegado a obtener un espesor mínimo de 0.5 mm y como máximo uno de

75 mm. Para el caso del máximo espesor es aplicable en contenedores de grandes dimensiones en donde dicho espesor es requerido para soportar las grandes presiones a las que se le va a someter. La desventaja de espesores grandes es que los tiempos de ciclo son largos así que habría que someter a discusión cual es la prioridad en el diseño de las piezas con estas características.

- Para polietilenos de baja densidad (LDPE) se cuenta con el rango más común el cual varía de 1.5 mm a 25 mm, donde el espesor de pared mínimo que se puede obtener en este material es de 0.75 mm. Y el máximo espesor de pared es de 50 mm.
- Para el policloruro de vinilo (plastisol) o PVC se han llegado a obtener espesores de pared mínimos de 0.25 mm para aplicaciones medicas. Pero el rango mas común se encuentra en un espesor de pared de 1.5 mm a 10 mm.
- En el nylon PA (poliamidas) generalmente va desde 2.5 mm hasta 20 mm. En casos especiales se han llegado a obtener espesores mínimos de 1.5 mm y máximos de 35 mm.
- El policarbonato (PC) tiene un rango de espesor de pared de 1.5 mm hasta 10 mm.
- El polipropileno (PP) tiene un rango de 1.5 mm a 25 mm. Su mínimo es de 0.5 mm y el máximo espesor a obtener es de 25 mm.

Sin embargo no hay que olvidar, como ya se mencionó anteriormente, que el espesor de pared está íntimamente ligado al tiempo de ciclo y este a su vez con gastos de operación (tiempos de ciclo grandes = altos costos de operación, y viceversa).

Es por esta razón que deben diseñarse las piezas plásticas rotomoldeadas bajo el concepto de *resistencia - economía*, y encontrar un equilibrio. Es de vital importancia realizar un análisis de esfuerzos (revisar el capítulo 3) a los que van a estar sometidas las piezas plásticas, ya que de acuerdo a los esfuerzos que se presenten en las piezas plásticas rotomoldeadas se debe de tener un espesor de pared mínimo para poder soportar dichos esfuerzos.

En cuanto a costos podemos añadir que si se tienen piezas con un espesor de pared sobredimensionado, aparte de aumentar los costos de operación debido a ciclos de proceso grandes en el calentamiento y enfriamiento de las piezas, se tendrá un exceso de material, esto da como resultado una pieza cara y más pesada. En cambio si se diseña bajo espesor mínimo requerido que satisfaga la función para la cual fue diseñada se contará con una pieza económica y ligera en comparación con el caso anteriormente descrito.



Otro de los atributos que proporciona el proceso de rotomoldeo es que también podemos obtener espesores de pared variables en caso de que el diseño de la pieza así lo requiera en zonas específicas de la pieza a rotomoldear.

Los espesores de pared variables se pueden conseguir de distintas formas:

### Aumento del espesor de pared

Si se requiere que determinada zona tenga un espesor de pared mayor por necesidades de resistencia o de diseño de la pieza, el molde en esta zona debe tener un espesor de pared menor o ser de un material con un mayor coeficiente de conductividad térmica en esta zona, esto para una rápida y una mayor transferencia de calor. La diferencia de espesores a obtener por este proceso está limitada a  $\frac{1}{2} W$  ( $W$  = espesor de pared de la pieza plástica). Arriba de  $\frac{1}{2} W$  no es viable realizar esta diferencia de espesores. En la figura 4.5a se muestra el caso donde no es posible realizar esta diferencia de espesores, la figura 4.5b muestra un cambio de espesor en corma gradual, pero este cambio de espesor es menor a  $\frac{1}{2}$  del espesor de pared.

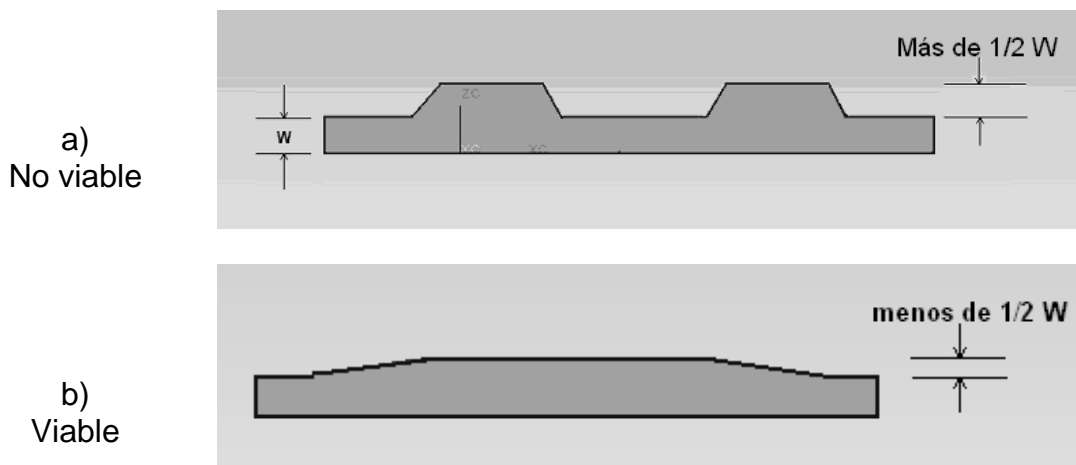


Figura 4.5 Espesores de pared: a) espesores de pared no viables de realizar, b) espesor de pared posible de realizar.

### Disminución en el espesor de pared

Como caso contrario si lo que se busca es reducir algunas zonas lo que se tiene que hacer es aislar un poco la zona requerida. Pero lo ideal es que todas las secciones transversales de la pieza tengan secciones transversales constantes, como se muestra en la figura 4.6.

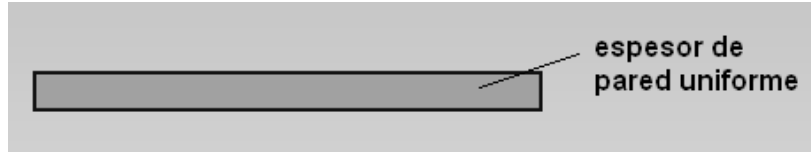


Figura 4.6 Espesores de pared, caso óptimo para una pieza rotomoldeada. Espesor de pared uniforme.

## 4.2 Factor de contracción

Durante el enfriamiento todos los materiales plásticos tienden a contraerse volumétricamente. Donde los polímeros con arreglo molecular cristalino tienen factores de contracción mayores (5 veces más) que los polímeros con arreglo molecular amorfo como se observa en la siguiente tabla [53].

Tabla 4.1 Valores de contracción para materiales plásticos, tomada de Rotational molding technology. Roy J. Crawford, James L. Throne

Material	Rango de contracción (%)	Recomendado (%)
LDPE	1.6 – 3.0	3.0
HDPE	3.0 – 3.5	3.5
LLDPE	1.5 – 3.0	3.0
PP	1.5 - 2.2	2.2
PVC	0.8 – 2.5	1.5
PC	0.6-.0.8	0.8
PA	1.0 – 1.5	1.5

La contracción se realiza en forma uniforme en todas las caras de la pieza plástica cuando esta se encuentra libre, es decir no se encuentra restringida por insertos, los cuales van a hacer que la parte donde se localizan dichos insertos no cambie de posición. Otro factor que puede restringir la contracción volumétrica y provoque en su lugar una contracción lineal es cuando en la pieza plástica se hace el uso de costillas para reforzar la pieza y agujeros.

A consecuencia de esta contracción no uniforme es que se pueden presentar deformaciones y distorsión en la pieza plástica rotomoldeada.

## 4.3 Radios

Como ya se mencionó, el proceso de rotomoldeo tiene como una de las principales características que las piezas manufacturadas por este proceso cuentan con espesores de pared uniformes. No obstante uno de los problemas que se pueden presentar en el diseño de las piezas se encuentra en las

esquinas, esto debido a que si las esquinas son agudas (ángulo en V), el material no se va a adherir hasta las puntas de dichas esquinas por la formación de puentes y bloqueamiento del material plástico. Aparte de que se puede presentar una pequeña concentración de esfuerzos.

La forma óptima de diseño de las esquinas en las piezas rotomoldeadas es por medio de radios, de esta manera se evitan fracturas, esfuerzos internos por moldeo y espesores irregulares en dichas secciones.

El uso de radios en las esquinas de las piezas rotomoldeadas ayuda a que el material tenga un flujo y distribución uniforme por las paredes del molde, mientras más amplios sean los radios más uniforme será el flujo y la distribución del material; por lo tanto el espesor de pared de la pieza será uniforme.

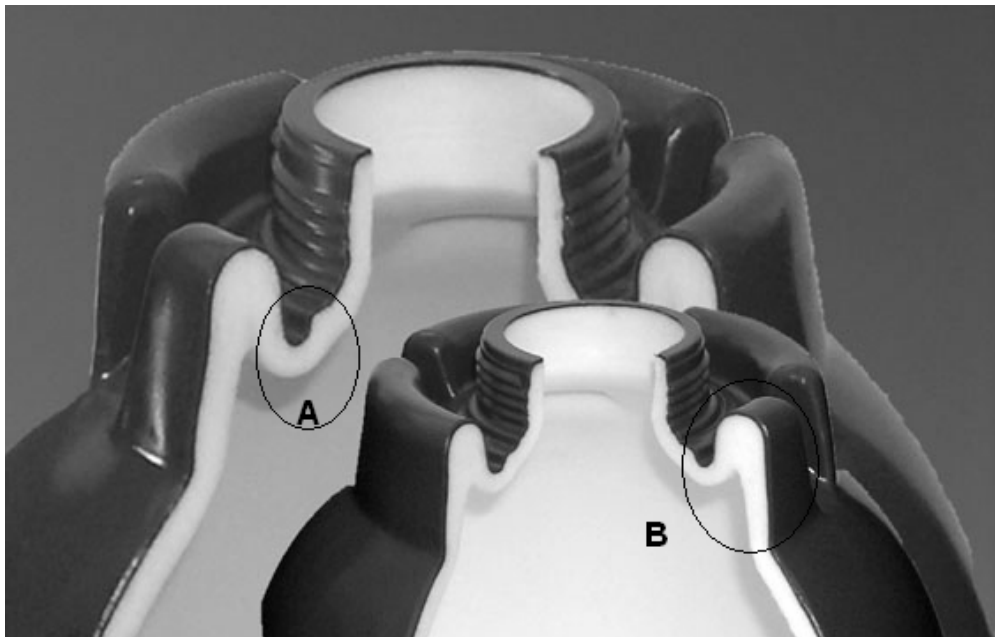


Figura 4.7 Radios. A) radio negativo, B) radio positivo (notar la diferencia en el espesor cuando se usan radios pequeños y radios más amplios (imagen tomada de Comdess Compañy Inc).

Los radios se clasifican en:

- *Radios negativos*: son de forma convexa, este tipo de radios dificulta la acumulación del material, por tanto estas secciones son un poco más delgadas que el resto de la pieza. Esto se puede observar en la figura 4.7A.
- *Radios positivos*: tienden a acumular más material en esta zona como se muestra en la figura 4.7B, esto resulta en espesores más gruesos.

Se pueden llegar a obtener radios mínimos del orden de 1 mm, pero esto depende también del espesor final de la pieza plástica, esto es porque a menores espesores se obtienen radios más pequeños. En contra parte si se tienen espesores grandes se deben de diseñar piezas con radios grandes.

No es muy práctico el uso de radios tan pequeños por lo explicado anteriormente con respecto a problemas de flujo del material, además de que este tamaño de radio pueden provocar lastimaduras o accidentes a las personas que van a usar el producto.

Como ya se mencionó, el tamaño del radio posible de obtener en una pieza plástica rotomoldeada esta interrelacionado con el espesor de pared de la pieza, y cuando se abordó el tema en la sección 4.1, acerca del espesor de pared se planteó que cada uno de los materiales plásticos para rotomoldeo tienen un espesor mínimo que se puede obtener, así también existen radios mínimos e ideales para cada material plástico rotomoldeable.

Tabla 4.2 Dimensiones de radios internos y externos para piezas rotomoldeadas Rotational molding technology. Roy J. Crawford, James L. Throne.

Material		Radio interior (mm)	Radio exterior (mm)
Poliétileno (PE)	ideal	12.5	6.5
	comercial	6.5	3.2
	mínimo	3.2	1.5
Policloruro de vinilo (PVC)	ideal	9.5	6.5
	comercial	6.5	3.2
	mínimo	3.2	2.0
Nylon (PA)	ideal	19.0	12.5
	comercial	9.5	9.5
	mínimo	4.7	4.7
Policarbonato (PC)	ideal	12.5	19.0
	comercial	9.5	9.5
	mínimo	3.2	6.5

#### 4.4 Ángulos

Al igual que con el diseño de los radios ideales que deben de tener en las esquinas las piezas rotomoldeadas, hay que considerar ángulos ideales que garanticen la fabricación de espesores de pared uniformes y de igual forma que el material plástico no tenga problemas de flujo, ni de puenteo por ángulos tan estrechos.





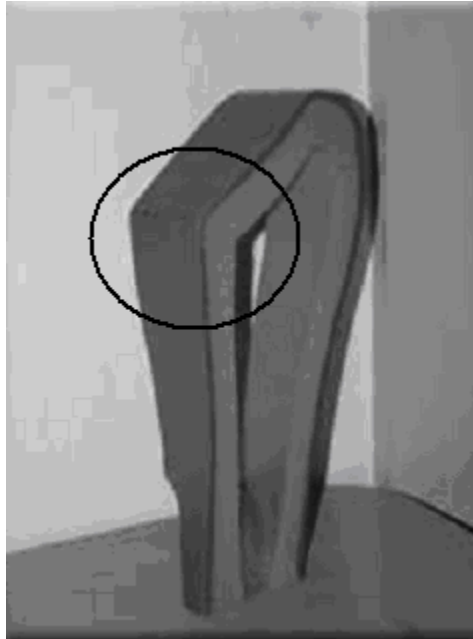


Figura 4.8 Ángulo amplio en una pieza plástica rotomoldeada la cual esta formada por dos materiales, el espesor obtenido es uniforme. Ángulo aproximado de  $135^\circ$  (imagen de The plastic professionals, rotacional molding).

En el proceso de rotomoldeo se pueden manufacturar sin ningún problema piezas con ángulos de  $90^\circ$ , sin importar el material plástico que se use. Pero con ángulos menores de  $45^\circ$  hay problemas de flujo, puentes y secciones bloqueadas en algunos materiales plásticos. Como se puede observar en la tabla 4.3, el Nylon (poliamida) es el plástico que ofrece una posibilidad de ángulos muy agudos hasta de  $20^\circ$ . [54]

En la figura 4.9c se observa un acumulamiento de material en el ángulo agudo.

Tabla 4.3 Ángulos ideales de piezas rotomoldeadas [46]

Material	Ángulo mínimo agudo	Ángulo ideal agudo
Polietileno (PE)	$30^\circ$	$45^\circ$
Polipropileno (PP)	$30^\circ$	$45^\circ$
Policloruro de vinilo (PVC)	$30^\circ$	$45^\circ$
Nylon (PA)	$20^\circ$	$30^\circ$
Policarbonato (PC)	$30^\circ$	$45^\circ$

Los ángulos al igual que los radios, mientras más grandes sean es mejor, esto para un buen flujo del material a través del molde.

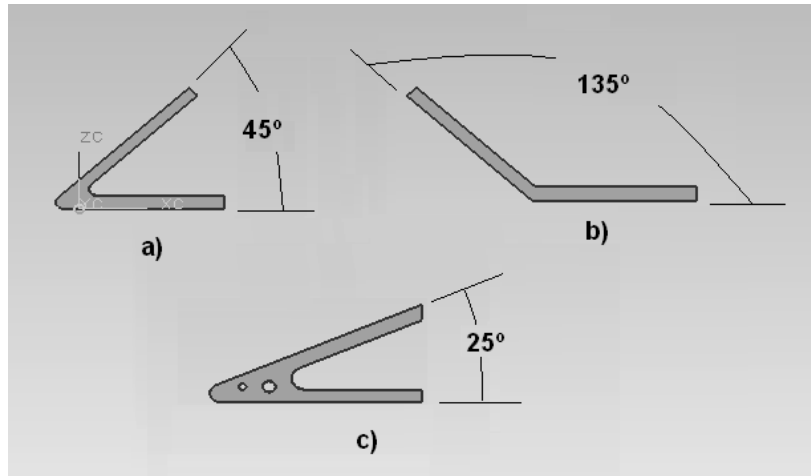


Figura 4.9 Ángulos en piezas rotomoldeadas. a) Ángulo de  $45^\circ$  con este ángulo se obtienen buenos espesores de pared uniformes. b) Para ángulos tan amplios se garantiza una uniformidad en el espesor de pared y no hay problemas de flujo. c) Ángulos pequeños, mala calidad de la pieza, existen puentes.

#### 4.5 Conicidad o ángulo de salida

Para que las piezas rotomoldeadas no tengan problemas en el desmolde, se debe añadir cierta conicidad o ángulo de salida en las paredes laterales de las piezas rotomoldeadas. Con esta conicidad se garantiza un fácil desmolde de la pieza plástica.

El ángulo mínimo de salida para todos los materiales plásticos es de  $1^\circ$ , de esta forma no se tendrán problemas en el desmolde. Es importante mencionar que en determinados materiales plásticos no es necesario el uso de ángulos de salida debido a que su factor de contracción es muy elevado, un ejemplo es el polietileno el cual tiene un factor de contracción de 3%.

El caso contrario se presenta con los materiales plásticos de estructura molecular amorfa los cuales tienen factores de contracción muy bajos menores al 0.5%, estos materiales plásticos amorfos deben tener ángulos de salida mayores. Los ángulos de salida mínimos corresponden a  $4^\circ$ , un ejemplo de material plástico amorfo es el policarbonato (PC) como se muestra en la tabla 4.4.



Figura 4.10 Desmolde de una pieza plástica de polietileno de alta densidad sin problemas, a pesar del alto factor de contracción se aplicó en su diseño un ángulo de salida.

Los ángulos de salida se clasifican como

- Ángulos de salida interiores
- Ángulos de salida exteriores (ver figura 11)

Tabla 4.4 Ángulos de salida de piezas plásticas rotomoldeadas. Tomada de Standars and practices of practices plastics custom molders. Engineering and technical standars,

Material	Ángulos interiores (°)	Ángulos exteriores (°)
Polietileno lineal de baja densidad (PELBD)	0 a 1	1 a 2
Polietileno de alta densidad (PEAD)	0 a 1.5	1 a 2.5
Polipropileno (PP)	0 a 1.5	1 a 2
Policloruro de vinilo (PVC)	0 a 1.5	1 a 3
Nylon 6	1 a 2	1.5 a 3.5
Policarbonato (PC)	1.5 a 2.5	3 a 5

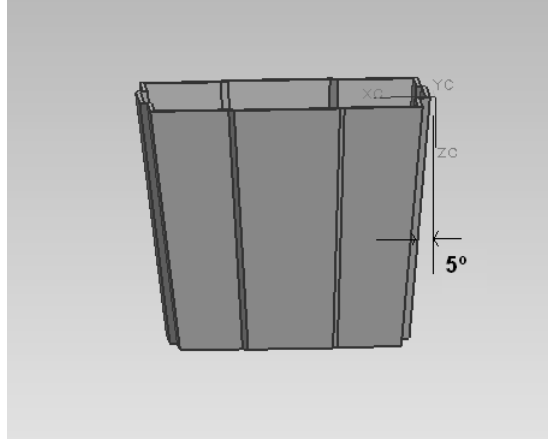


Figura 4.11 Ángulo de salida externo.

## 4.6 Roscas

En muchas ocasiones las piezas plásticas huecas se van a acoplar a otras piezas y el método puede ser a través de roscas, las cuales se pueden realizar de dos formas:

- Durante el proceso de rotomoldeo
- Posterior al proceso de rotomoldeo

Cuando se decide realizar la rosca durante el proceso, esta se realiza mediante la adición al molde de una pieza metálica la cual tiene la forma de la rosca. Así cuando se inicia el moldeo de la parte a rotomoldear el material plástico adquiere la forma de la rosca. Cuando ya se terminó de moldear la pieza plástica, primeramente se desacopla la parte que contiene la forma de la rosca del molde esto para poder desensamblar la pieza plástica rotomoldeada del molde. Como se observa en la figura 4.12, aquí la forma de la rosca se obtiene porque se añade una tuerca metálica al molde. También se puede hacer el uso de insertos plásticos que ya contienen la forma de la rosca.

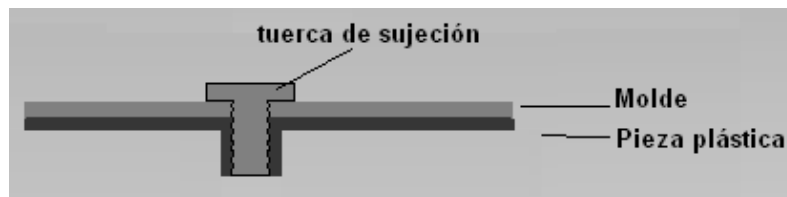


Figura 4.12 Rosca manufacturada durante el proceso de rotomoldeo mediante la adición de un elemento extra al molde.

Otra de las formas para crear piezas con rosca durante el proceso es que se hace la forma de la rosca requerida directamente al molde, como se observa en la figura 4.13.



Figura 4.13 Pieza rotomoldeada, la rosca se realizó directamente en el molde (imagen de Comdess Compañy Inc).

El tipo de roscas recomendadas son las de avance rápido, pues son más fáciles de realizar; el tamaño de las rosca también influye en la calidad de las mismas. Si las roscas son muy pequeñas y con geometrías en punta, la rosca resultante no habrá tenido una adhesión completa del material plástico.

Las roscas pueden ser internas o externas. Si se desea que la rosca sea interna, la rosca de la pieza metálica que contiene la forma es externa y el caso contrario cuando se requiere una rosca externa. Para las roscas externas es necesario que esta no sea muy esbelta, profunda, se deben de seguir las recomendaciones se aplican las dimensiones para el diseño de las costillas.

Algunas de las formas que se recomiendan los las siguientes:



Figura 4.14 Formas de roscas. a) Rosca de uso general, b) Forma trapezoidal modificada, c) Rosca circular, d) Cuerda en V no se recomienda este tipo de rosca por los ángulos agudos que la conforman. [12].

El otro procedimiento, como se escribió en la parte superior, es la fabricación de la rosca por medio de un proceso posterior de corte. La principal desventaja de consiste en añadir un costo extra a la pieza plástica que ha sido rotomoldeada. Pero tiene la ventaja que este tipo de roscas son más exactas.

Se debe poner mucha atención en las piezas plástica que llevan roscas con respecto al factor de contracción, para el ensamble posterior.

## 4.7 Agujeros

Cuando por razones de diseño es necesario incluir agujeros en la pieza plástica rotomoldeada, estos se pueden realizar de dos formas. La primera de ellas es que en la parte en donde se requiere el agujero se moldea un domo como se observa en la figura 4.15a y posteriormente se pasa la pieza a un proceso secundario de corte.

Otra forma es hacer proyecciones hacia el interior de la pared del molde para obtener líneas guías y poder contornear en la pieza moldeada, una vez que se tiene este contorno de donde se localiza el agujero y la forma del mismo se procede al corte.

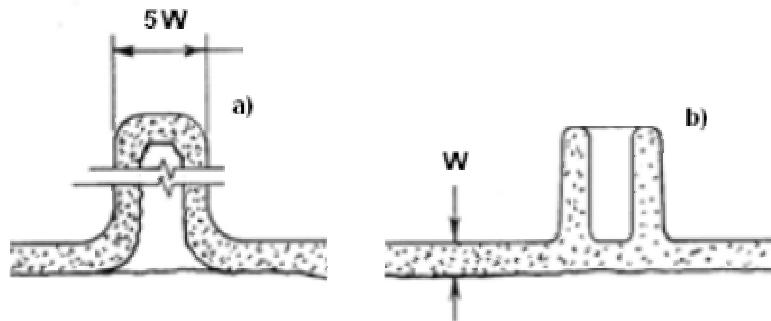


Figura 4.15 Método para realizar agujeros en una pieza rotomoldeada. a) moldeo de domo y corte posterior. B) no se puede realizar un agujero ciego [55]

Un procedimiento muchas veces utilizado para realizar un agujero es colocando un tapón de teflón (PTFE) en la pared interior del molde donde se va a localizar el agujero el cual evita que el material plástico se adhiera al molde en este punto. También se puede colocar material aislante el cual no va a dejar pasar calor a esa sección del molde por tanto el material no se depositara en esa zona. Estas últimas dos soluciones tienen como impedimento que vuelve al molde más complicado, además de que aumenta su precio, pero en comparación con las opciones en donde se hace el uso del proceso posterior de corte se tiene la ventaja de que no hay desperdicio de materia prima.

Hay que hacer un análisis comparativo para ver cual de las opciones anteriores es la más conveniente. Además de mencionar que lo ideal es que la pieza presente el mínimo número de agujeros posibles. Otro dato importante radica en no contar con un límite en el tamaño del agujero.

Otro tipo de agujeros son los que atraviesan la pieza, los cuales dan una mayor resistencia a la pieza plástica debido a que generan columnas internas. Pero la desventaja que tienen es una inexactitud en las dimensiones y dificultad para el desmoldeo de la pieza por el efecto de la contracción del material. Cuando sea necesario este tipo de agujeros, y que estos deban de ser largos y estrechos se debe poder especial atención en que dichas zonas reciban suficiente calor para que los agujeros se formen bien.



Figura 4.16 Creación de agujeros durante el rotomoldeo de la pieza. Imagen tomada de Little Tikes.

En la figura 4.16 se muestra la fabricación de un pieza plástica rotomoldeada en donde se realizaron agujeros durante el proceso de rotomoldeo, como se mencionó en este tipo de agujeros no se obtienen medidas exactas debido a que dependiendo del material se tendrán diferentes contracciones.

## 4.8 Insertos

Los insertos son piezas metálicas las cuales van a tener la función servir como medio de acoplamiento en el ensamble de la pieza plástica rotomoldeada para una presentación final como pieza terminada. Ver figura 4.17. Estos insertos pueden tener roscas o ser lisos, así también deben tener una superficie moleteada o cambios de sección para que este quede bien fijo a la pieza plástica.



Figura 4.17 Insertos metálicos (imagen de The plastic professionals, rotacional molding).

Los insertos se colocan y aseguran al molde antes de introducir el material plástico como se observa en la figura 4.18, el medio de aseguramiento de los insertos en el molde es a través de tornillos, tuercas e imanes.

Hay que tomar en cuenta varios aspectos importantes, como lo es la compatibilidad que tiene el material del inserto con el material plástico de la pieza, también se debe poner atención de que el inserto metálico resista las altas temperaturas que se van a manejar durante el proceso.



Figura 4.18 Sujeción de los insertos en el molde antes de introducir el material plástico (imagen tomada de The Plastic Professionals, rotacional molding).

Otro aspecto que influye en obtener una pieza óptima sin defecto alguno, es la correcta sujeción del inserto al molde. Esto porque si este acoplamiento no se hace de forma correcta y el inserto metálico tiene algún juego con el molde, el inserto en algún momento durante el proceso de rotomoldeo puede desprenderse y quedar totalmente cubierto por el material plástico. O desalinearse por tanto no va a cumplir con su función posterior. En la figura 4.19 se puede observar una correcta manufactura de la pieza plástica rotomoldeada con la integración de un inserto, nótese como se obtiene un espesor de pared



homogéneo en el contorno del inserto con respecto a las otras secciones de la pieza.

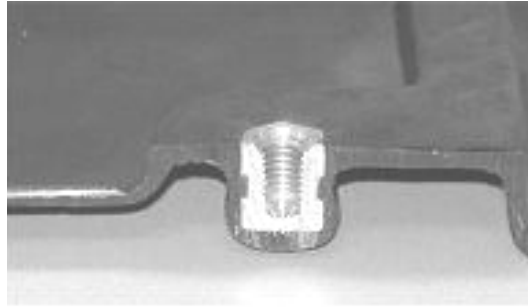


Figura 4.19 Buena colocación y manufactura de pieza plástica rotomoldeada con la integración de un inserto metálico (imagen tomada de Three 60 Corporation, custom rotacional molding).

Los insertos no deben de ser tan grandes, ni profundos porque al momento de la etapa de enfriamiento el plástico va a contraerse presentándose agrietamientos y posibles fracturas en el material plástico que rodea al inserto metálico.

#### **4.9 Paredes dobles**

El uso de paredes dobles para piezas plásticas rotomoldeadas tiene varios objetivos como:

- Piezas más resistentes
- Aislamiento térmico
- Piezas ligeras

Estas piezas plásticas de doble pared son comúnmente piezas huecas totalmente cerradas. Como se puede observar en las piezas de la figura 4.19, el rotomoldeo es el único proceso que es capaz de realizar este tipo de piezas sin el uso de otro aditamento como corazones. Esta técnica se desarrolló con el fin de fabricar piezas más resistentes, ya que al ser un producto totalmente cerrado es más difícil de fragmentar. En la figura 4.40 se muestran algunos ejemplos de piezas de pared doble.

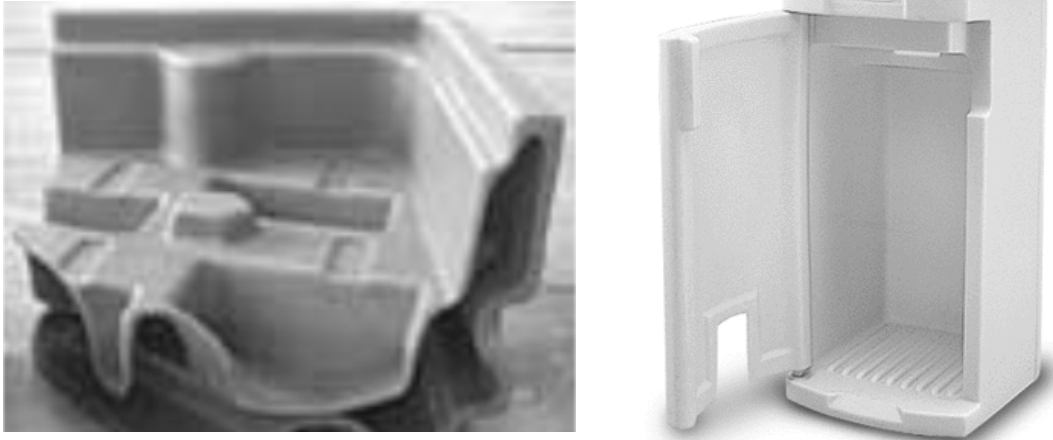


Figura 4.20 Piezas de pared doble (imagen tomada de Ameri-kart Advantages).

El material plástico se introduce al molde que va a formar la pieza de pared doble, donde el material recorre de ida y vuelta todo el molde. Existe una distancia mínima de  $3W$  ( $W$  = espesor), es decir tres veces el espesor de pared nominal de la pieza para poder obtener una pared doble compacta sin que haya problemas de flujo. La distancia ideal es de  $5W$ , cinco veces el espesor nominal de la pieza.

Si no se toma en cuenta esta distancia, la pieza no se formará adecuadamente pues cuando el material alcanza su punto de plastificación, este empieza a adherirse a las paredes del molde, si la distancia entre las dos caras del molde es demasiado estrecha el material no puede fluir libremente ocasionando taponamientos en distintas secciones que va a impedir el paso del material a además de que se pueden presentar puentes. Este tipo de problemas de flujo conlleva a la fabricación de piezas defectuosas.

Otra de las ventajas existentes en la fabricación de piezas de pared doble. Es que se pueden rellenar con un material espumante después de ser manufacturadas. Con esto se consigue que la pieza sea muy resistente además de tener propiedades de aislamiento térmico. Ver figura 4.21.

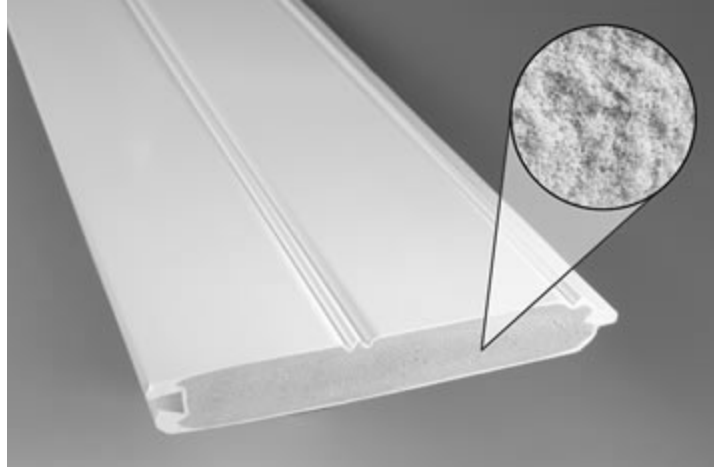


Figura 4.21 Pieza de pared doble rellena con espumante

#### 4.10 Capas múltiples

Una característica muy especial del proceso de rotomoldeo, es la fabricación de piezas plásticas huecas formadas por capas múltiples. Es decir las piezas están constituidas por dos o más materiales para lograr combinar propiedades específicas y producir así una mejor pieza terminada o más económica.

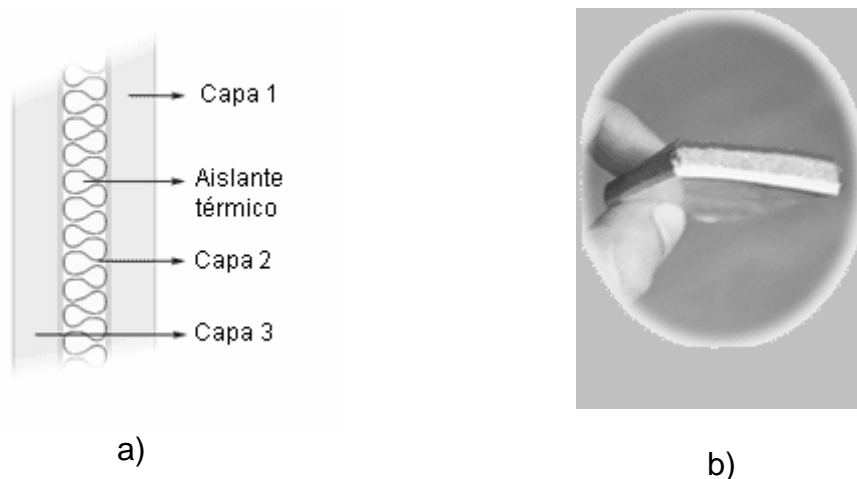


Figura 4.22 A) en esta figura se observa que el material intermedio sirve como aislante. B) Pieza plástica rotomoldeada constituida por tres capas de 3 materiales distintos.

Así entonces un plástico costoso se puede respaldar por un material más económico. Otro caso es cuando se necesita que la capa externa tenga características diferentes a la superficie interna de la pieza y los materiales que se requieren son incompatibles; en este caso se hace el uso de otro material que es compatible con estos dos materiales y queda intermedio entre ellos como se muestra en la figura 4.22. uno de los ejemplos de piezas que hacen el uso de multicapas son los tanques para el almacenamiento de agua potable.

El uso de capas múltiples en las piezas plásticas rotomoldeadas ofrece las siguientes ventajas:

- Resistencia química
- Mayor resistencia mecánica
- Piezas más ligeras
- Incremento del espesor sin un aumento considerable en el peso de la pieza, con el uso de material espumante.
- Disminución del espesor pero con un aumento en la resistencia o por lo menos mantener la misma resistencia
- Aislamiento térmico y acústico
- Baja permeabilidad
- Reducción de costos
- Resistencia a altas temperaturas

En la figura 4.23 se observa una pieza rotomoldeada, en donde la capa exterior es de polietileno de alta densidad, la capa interna es de polietileno lineal de baja densidad espumado.



Figura 4.23 Contenedor rotomoldeado constituido por 2 capas capa exterior polietileno de alta densidad, capa interna polietileno lineal de baja densidad (imagen de Coutland Components).

El procedimiento para la realización de las capas múltiples se puede realizar de distintas formas dependiendo del diseño de la parte:

- ***En un sólo paso***

Consiste en depositar dos o más materiales en el molde al mismo tiempo según requiera la pieza a rotomoldear, es necesario que los materiales tengan diferentes temperaturas de plastificación. Así el material con mayor punto de plastificación es el que primero se va a adherir a toda la superficie interna del molde. Una vez que esta completamente adherido el primer material, el segundo

material que tiene una temperatura de fusión menor empezará a adherirse a la capa formada por el primer material. Se debe poner atención de que la formación de la segunda capa no requiera demasiado tiempo pues es posible que la primera capa se degrade.

Otra forma de realizar la formación de capas múltiples en un solo paso es mediante la adaptación de contenedores aislados al molde, los cuales se accionan neumáticamente. Es decir primeramente se coloca el material plástico que formara la capa externa de la pieza, cuando esta capa se ha formado por completo se procede a accionar neumáticamente la compuerta del depósito añadido al molde el cual contiene el material que va a formar la segunda capa de la pieza plástica. Este paso se realiza sin parar la máquina por lo que no existe aumento en los tiempos de operación.

Si la pieza va a estar formada por más de dos capas, el número de contenedores aislados añadidos al molde será igual al número de capas

- ***En dos pasos***

Para este procedimiento primero se añade la cantidad correcta de material que va a formar la primera capa de la pieza, cuando esta capa ya se ha formado se para la máquina y deja de girar el molde, ahora se procede a integrar el material que formará la segunda capa de la pieza a través de una sección la cual esta libre de la adherencia de material plástico.

Existen varios inconvenientes como:

- Al detener la rotación del molde se puede dar el caso de que la capa formada se despegue anticipadamente del molde.
- Otro inconveniente es que el ciclo de proceso se hace más largo.

Para evitar el desprendimiento de la primera capa, se debe de llevar a cabo un enfriamiento por aire del molde por un periodo de tiempo de 5 a 15 minutos dependiendo del espesor de la capa. En este momento se añade el segundo material y debe de haber suficiente calor disponible en el material de la primera capa para fundirlo (al segundo material plástico) dentro del periodo de enfriamiento por aire.

Las consideraciones que se deben de tomar en cuenta para la factibilidad de la manufactura de piezas plásticas formadas por multicapas son las siguientes

1. Compatibilidad de los plásticos
2. Tomar en cuenta el factor de contracción del material plástico.
3. Viscosidad y espesor de la primera capa

Como recomendación adicional, el uso de productos plásticos formados por multicapas, se consideran productos antiecológicos debido a que ya no se



pueden reciclar estos plásticos por la difícil separación. Por tanto se recomienda disminuir el uso de este tipo de productos.

#### 4.11 Costillas

Debido a que las piezas plástica rotomoldeadas tienen espesores de pared delgados, en muchas ocasiones existe la necesidad de aumentar la resistencia de las piezas plásticas. Este aumento de resistencia se puede realizar de las siguientes formas. Ver figura 4.24.

1. *Aumentando el espesor de la pieza*, lo que produce una pieza más pesada, con un ciclo de proceso más largo lo cual da como resultado una pieza cara.
2. *El uso de costillas*, por este método se mantienen espesores de la pieza delgados; por tanto tenemos una pieza ligera y económica.

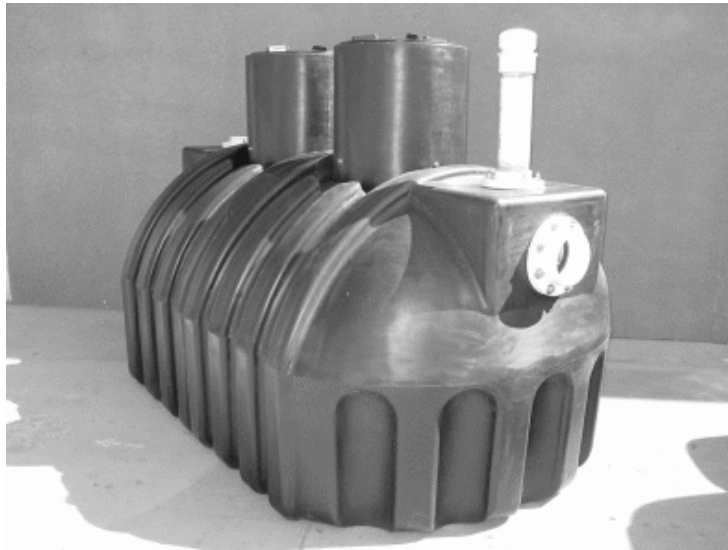


Figura 4.24 Piezas con costillas para aumento de rigidez (imagen de tomada de Multipal Inc).

Como se puede observar, el uso de costillas ofrece grandes ventajas al diseñador, donde la finalidad que tiene este tipo de geometrías es proporcionar una mayor rigidez a la pieza rotomoldeada con el mínimo peso requerido. Las costillas se suelen utilizar en piezas que tienen secciones planas largas las cuales van a estar sometidas a grandes esfuerzos en determinado momento, observar la figura 4.24. Debido a que las secciones planas y largas tienden a pandearse cuando la pieza se extrae del molde o a través del tiempo ya en el uso.

El tipo de costillas que se pueden manufacturar en las piezas plásticas rotomoldeadas no son sólidas, estas costillas son huecas. Son fácilmente moldeables y se mantiene la uniformidad en el espesor de pared.

Hay que poner mucha atención en las dimensiones mínimas para la realización de este tipo de refuerzos estructurales, pues si la costilla es angosta el material plástico no va a llenar la cavidad que forma a la costilla y va a dejar hilos en el interior, esto resulta en una mala apariencia de la pieza y posiblemente no se consiga el aumento en la resistencia deseado. Así también si la costilla es demasiado profunda se presentan mayores dificultades pues el material plástico no alcanza a llegar hasta el fondo de la costilla antes de su fusión, de igual forma la costilla moldeada tendrá defectos de porosidad y mala apariencia superficial de la pieza. Como caso contrario si la costilla es pequeña, de poca profundidad y angosta, este tipo de costilla si se llena completamente del material plástico pero la resistencia adquirida es mínima.

Las características geométricas que debe de tener una costilla para poder ser rotomoldeada consisten en:

- Tener un amplio hueco intermedio utilizado para formar la costilla
- Tener amplia conicidad para que el material plástico pueda entrar y adherirse a las paredes de la costilla de forma uniforme y así evitar el puenteo
- Tomar en cuenta de que si se trata de material plástico en polvo, es importante el tamaño de las partículas para una buena manufactura de la costilla.

Otro dato que hay que tomar en cuenta es la dirección y forma de la costilla, para poder decidir se debe de visualizar como van a presentarse los esfuerzos en la pieza; de esta forma las costillas llevan una dirección contraria a la de los esfuerzos para contrarestarlos.

#### **4.12 Formación de columnas**

Las piezas plásticas rotomoldeadas pueden aumentar su resistencia ante la presencia de fuerzas. Los métodos para aumentarla son por medio de:

- Aumento en el espesor de pared
- Utilizar capas múltiples integrando un material resistente con otro que no lo es.
- Uso de paredes dobles
- Formación de columnas



Esta última opción otorga un aumento considerable en el refuerzo con la ventaja de ahorro de material ya que solo se refuerza en unas cuantas secciones. La formación de estas columnas internas tiene la función de distribuir las fuerzas de forma equilibrada en toda la superficie que esta siendo esforzada. En la figura 4.25, se muestra como una pieza que sirve para cargar un determinado peso, los esfuerzos se concentran en la parte superior en el centro. Y en la figura 4.27 se hace la modificación y se añaden columnas internas, de esta forma el esfuerzo se distribuye en todas las columnas formadas.

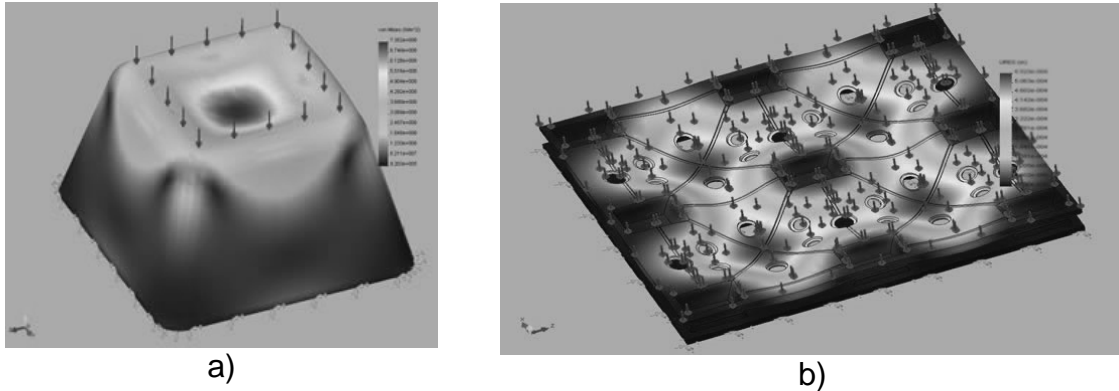


Figura 4.27 Comparación de la concentración de esfuerzos en la cara superior de una pieza sometida a una carga distribuida. a) los esfuerzos se concentran en el centro. b) los esfuerzos se distribuyen homogéneamente mediante el uso de costillas. Imagen tomada de Roto Design Ltd.

Generalmente estas columnas se localizan en la base de las piezas plásticas rotomoldeadas o bien en la dirección de aplicación de las fuerzas. Este tipo de piezas que cuentan con la formación de columnas internas son formadas por paredes dobles.

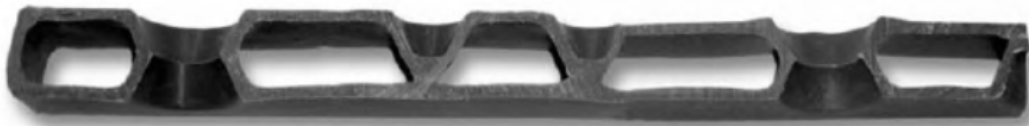


Figura 4.28 Formación de columna interna permanente

Se pueden presentar dos tipos de columnas en las piezas plásticas rotomoldeadas, columnas internas permanentes y columnas momentáneas.



## Columnas internas permanentes

Como se muestra en la figura 4.29, la pieza de plástico rotomoldeada de pared doble cuenta con la formación de columnas permanentes. Dicha formación se realiza durante el proceso, uniendo la capa superior y la capa inferior en un punto o sección determinada. La geometría de las columnas son de forma trapezoidal, pero pueden adoptar cualquier geometría. Las geometrías más comunes son las ya mencionadas y las cónicas.

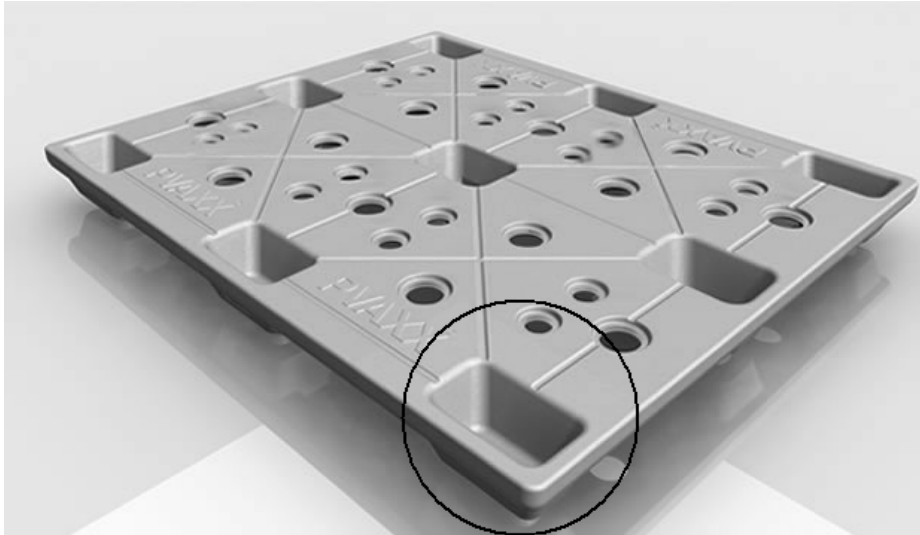


Figura 4.29 Pieza plástica con columnas permanentes. Imagen tomada de Roto Design Ltd.

Para poder manufacturar columnas por rotomoldeo, se deben seguir consideraciones respecto a las distancias mínimas entre las paredes para que el flujo de material alcance a distribuirse por todas las superficies internas de la pieza para al mismo tiempo formar las columnas. En la sección 4.9 en donde se trató el tema acerca de la distancia mínima para piezas de pared doble, se determinó que la distancia mínima es de 3 veces el espesor, con esto se evitan los puentes y un buen flujo. Pero en cuestión a columnas lo que se busca es provocar el puenteo entre la capa superior y la capa inferior de la pieza plástica hueca, aquí la distancia mínima es de 1.75 veces el espesor, como se muestra en la figura 4.30. Esta distancia solo es en la sección donde estará formada la columna.

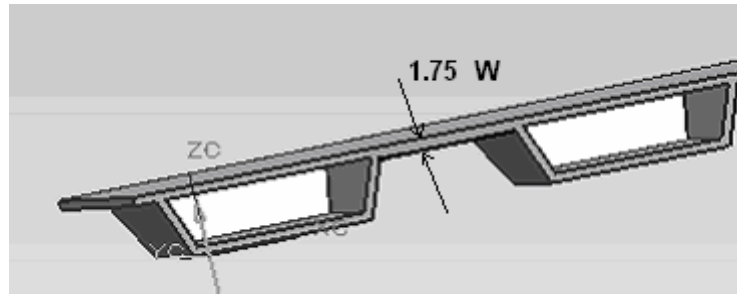


Figura 4.30 Distancia mínima en la zona de la formación de costillas de las paredes del molde.

Otro aspecto a tomar en cuenta es la distancia puenteada (zona de unión, ver figura 4.31a), esta no debe ser muy grande pues en caso de serlo se va a bloquear el flujo antes de tiempo y el material no será distribuido uniformemente (ver figura 4.31b).

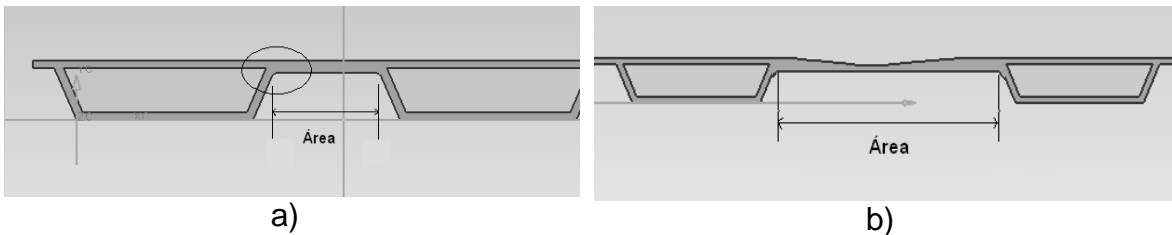


Figura 4.31 Área ideal de diseño en formación de columnas

Como se observa en las figuras 4.30 y 4.31 el espesor de pared resultante en el área de puenteo es más grueso.

### Columnas internas momentáneas

Las columnas momentáneas comúnmente se usan en piezas de pared doble como ejemplo en contenedores, donde al llenar el depósito la pared interna reposa sobre las geometrías salientes de la pared exterior, las cuales van a hacer la formación de las columnas. Con esto se disminuyen las deformaciones de los contenedores.

## 5 Metodología para el diseño de piezas plásticas huecas por rotomoldeo.

Toda la información anteriormente descrita referente al tipo de material empleado, el análisis de resistencia para piezas huecas, los diferentes métodos para la selección de material óptimo, así como los parámetros involucrados para un buen diseño geométrico de la pieza plástica hueca a manufacturar por el proceso de rotomoldeo se integran en la siguiente metodología la cual indica paso a paso el procedimiento de diseño de piezas plásticas huecas.

### ***Paso 1 Análisis de viabilidad del uso proceso de rotomoldeo.***

En el capítulo 2, en la figura 2.3 se muestra la interrelación entre los parámetros de:

#### *FORMA – FUNCIÓN – MATERIAL - PROCESO*

Esta relación es de vital importancia como se mencionó para el diseño de un producto los cuales deben estar en un estado de equilibrio. Garantizando un buen desempeño mecánico así como en el aspecto económico.

En cuestión al proceso de manufactura este factor es restringido al proceso de rotomoldeo, ver figura 5.1. En el capítulo 1 se menciona que para poder diseñar una pieza capaz de manufacturarse por rotomoldeo está debe de ser una pieza hueca, otra de las posibilidades es manufacturar piezas que no son huecas pero con la diferencia que el molde está constituido de tal forma que se manufacturan dos piezas al mismo tiempo (resultado pieza hueca). Con la desventaja de realizarse un proceso posterior de corte.

Otros factores que influyen en la decisión del uso del rotomoldeo como proceso de manufactura de piezas plásticas huecas son las dimensiones de las piezas, una pieza que es dimensionalmente mayor a 20 litros económicamente es más viable fabricarla por rotomoldeo que por otros procesos. [56]

Así también el volumen de producción influye en la decisión del uso del proceso, donde el rotomoldeo tiene un rango de producción desde pocas piezas (para la fabricación de prototipos) hasta un volumen de producción de 100000 piezas. Otro factor a tomar en cuenta es el referente a los gastos en inversión en maquinaria y herramental.



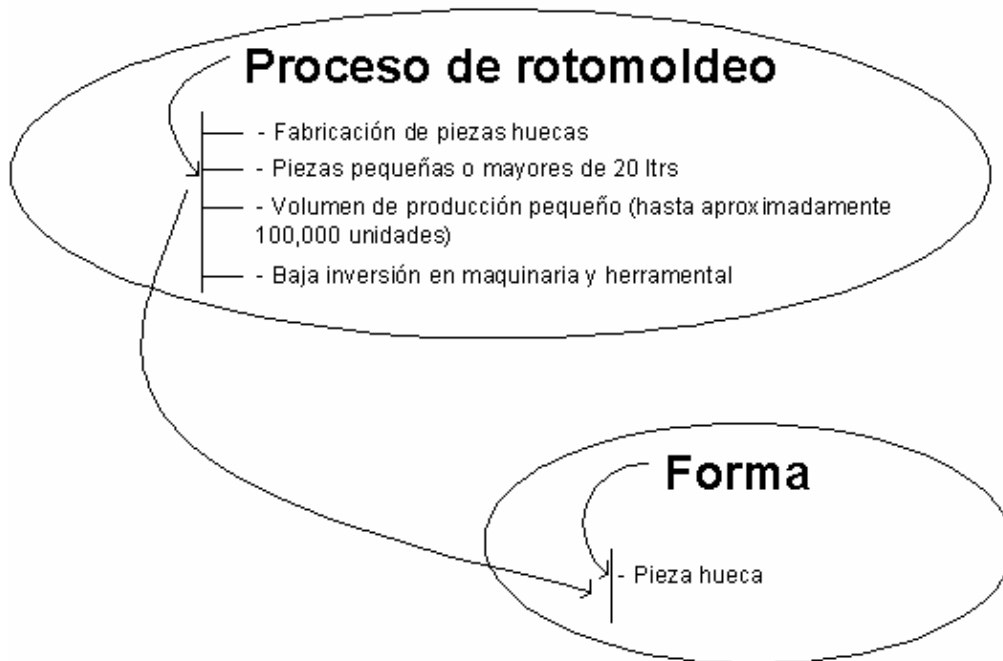


Figura 5.1 El proceso de fabricación es el rotomoldeo, este determina la forma de la pieza a manufacturar – pieza hueca.

## ***Paso 2 Configuración geométrica de la pieza plástica hueca***

Como ya se describió en el paso 1, la forma de la pieza a manufacturar es una pieza hueca, además debe cumplir con los factores de volumen de producción si se quiere garantizar la realización de un proyecto económico con el uso del proceso de rotomoldeo. Los factores de costos de maquinaria y tamaño de las piezas ayudan a visualizar la viabilidad del proceso.

El siguiente paso una vez que se determinó el proceso y que la forma de partida debe de ser hueca se debe trabajar en la función del producto, como se observa en la figura 5.2 con el objetivo de establecer la geometría del producto que cumpla con dicha función.

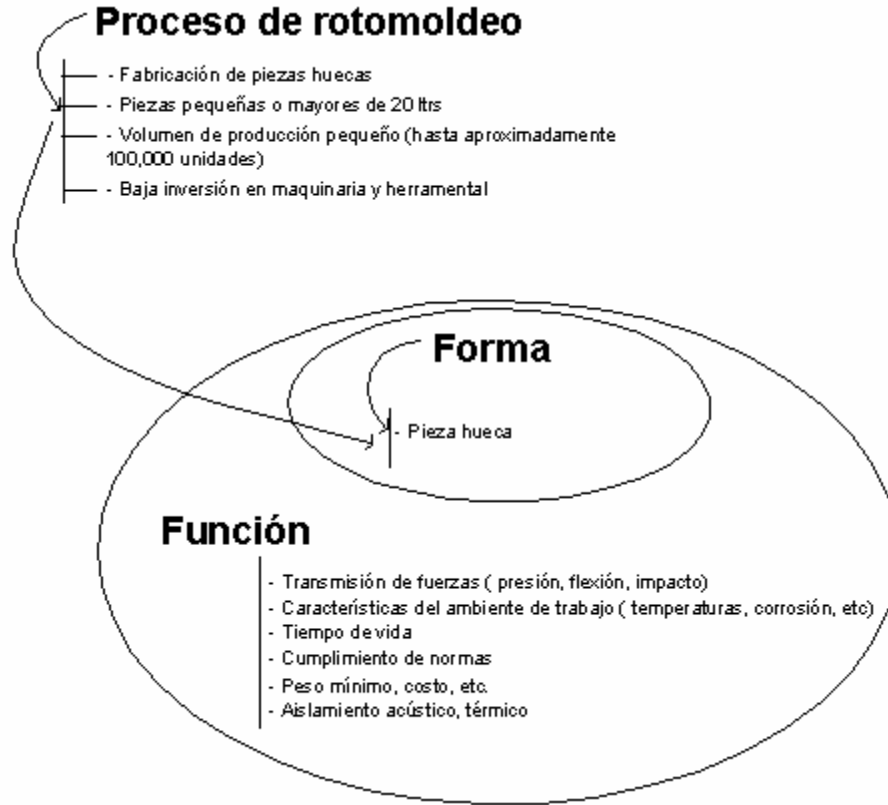


Figura 5.2 Integración de la función de la pieza en la forma

### **Paso 3 Análisis de resistencia**

Ya que se tiene la forma de la pieza plástica hueca se prosigue a la realización del análisis de resistencia con el objetivo de establecer la forma de la aplicación de las fuerzas, cuáles son las secciones transversales que ofrecen una mayor resistencia y realizar cambios en la geometría en caso de ser necesarios, desde las etapas tempranas del diseño. En el capítulo 2, figura 2.2 se presentan las etapas de diseño.

Para poder realizar este análisis de resistencia se debe contar con la información necesaria sobre la aplicación final que va a tener la pieza plástica hueca (ver figura 5.2) el tipo de fuerzas y esfuerzos a los que va a estar sometida, en el capítulo 3 se enuncian las diferentes tipos de fuerzas a los que son sometidas las piezas huecas (ver figura 5.3). La información referente a las fuerzas, esfuerzos, ambiente de trabajo, etc.

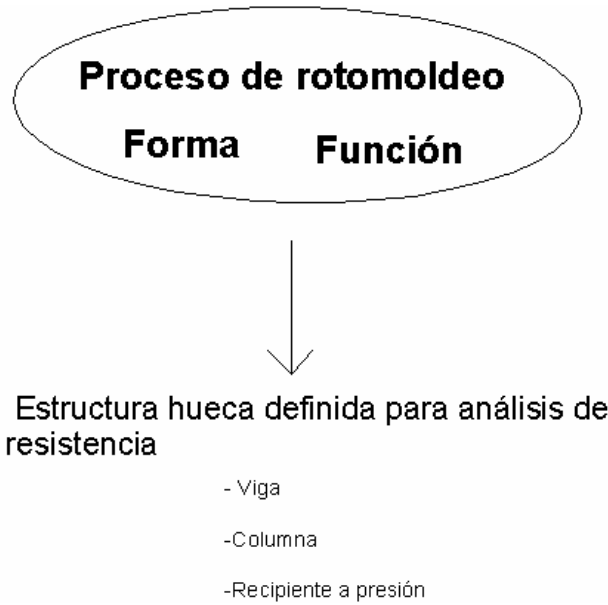


Figura 5.3 Etapa de realización de un análisis de resistencia de la pieza plástica hueca.

De este análisis se van a obtener los esfuerzos máximos, y las configuraciones que van a ofrecer mejores resistencias.

Si la geometría planteada hasta el momento cumple con las especificaciones de diseño para un buen desempeño en su ambiente de trabajo se prosigue con el análisis de los materiales a ser empleados en el proceso de rotomoldeo.

En caso contrario si la geometría no cumple con las especificaciones se realiza un nuevo diseño partiendo de la modalidad que la pieza base debe de ser hueca.

#### ***Paso 4      Selección del material***

Después de haber realizado el análisis de resistencia se obtuvieron valores de los esfuerzos a los que va a estar sometida la pieza plástica hueca y las geometrías que soportan mayores esfuerzos.

El siguiente paso es seleccionar el material ideal para la aplicación correspondiente a:

#### **PROCESO – FUNCIÓN - FORMA**

En el capítulo 2 se establecen los diferentes materiales que actualmente se encuentran en el mercado para el proceso de rotomoldeo, queda especificado que existen básicamente seis materiales que se comercializan para el proceso

de rotomoldeo, esta limitación como se mencionó en el capítulo 1 es básicamente debida al costo alto de la reducción del material a polvo.

En esta fase del diseño se deben analizar las propiedades que van a estar directamente involucradas en las especificaciones de diseño como es densidad, resistencia al impacto, resistencia a la tensión, temperatura máxima de servicio, resistencia química, propiedades ópticas, eléctricas, magnéticas, etc. Sin olvidar un factor muy importante que determina en un gran número de casos el uso del material, este factor es el costo del material.

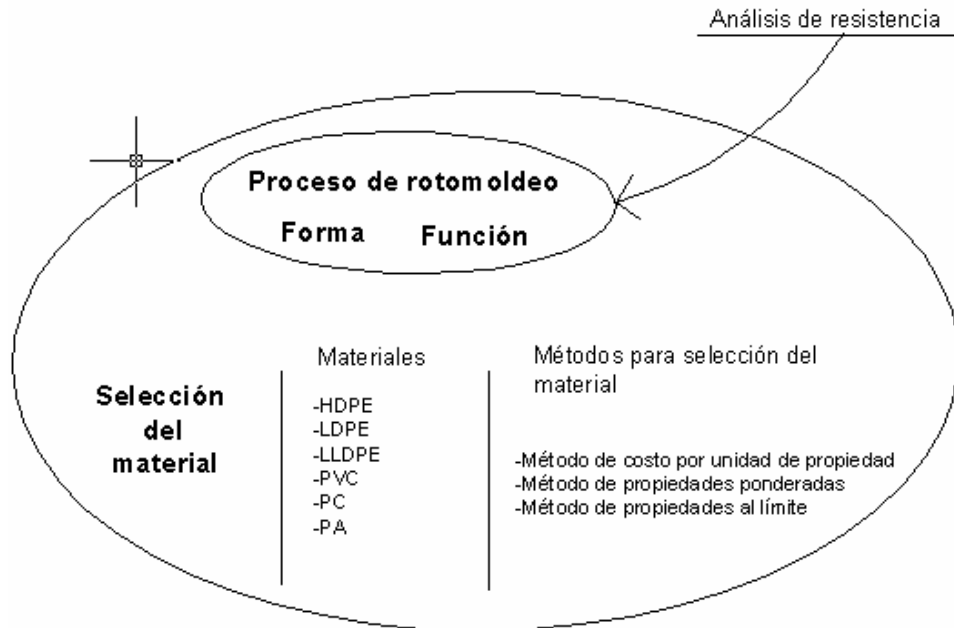


Figura 5.4 Etapa de selección de materiales.

En el capítulo 2 se establecen tres diferentes métodos para realizar una correcta selección del material, en la figura 5.4 se muestran estos métodos donde la diferencia radica en tomar como base para la selección del material el factor costo, el cual se le añade a la propiedad más crítica. Otro de los métodos hace el uso de ponderaciones, y el último se basa en el establecimiento de límites determinados por los requerimientos del producto.

## **Paso 5 Verificación del material**

En este momento ya se cuenta con una forma geométrica la cual en principio cumple con las especificaciones de diseño, el material óptimo que ofrece un equilibrio entre sus propiedades y el costo en caso de que se requiera.





## **Paso 6    Aplicar las recomendaciones de diseño**

En esta etapa ya se cuenta con una geometría final de la pieza plástica hueca y el material óptimo para su manufactura por el proceso de rotomoldeo los cuales cumplen con las funciones de diseño establecidas.

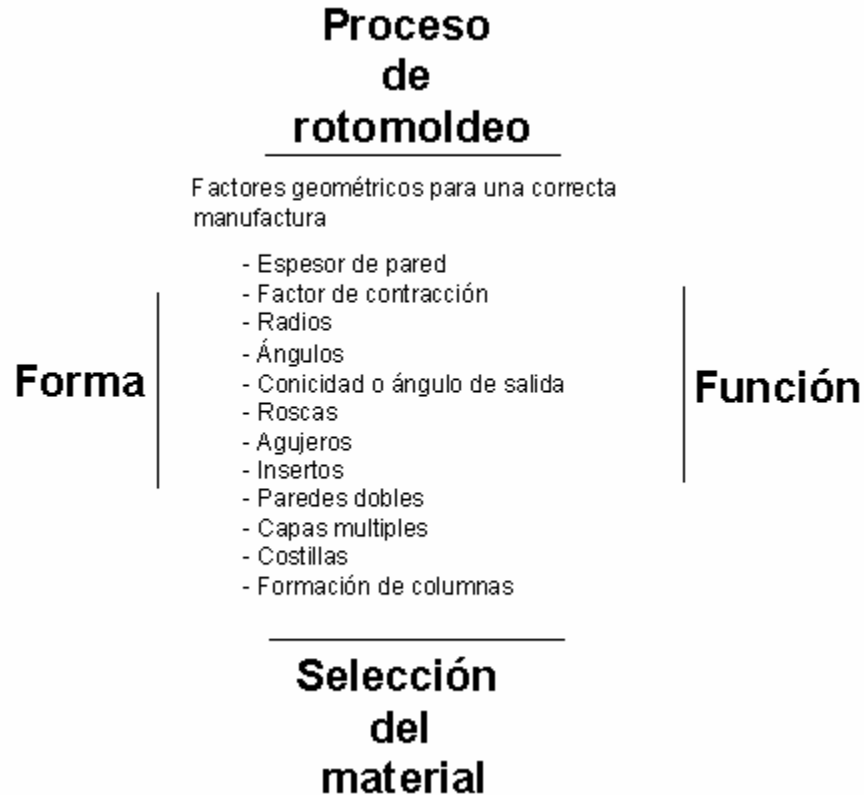


Figura 5.6 Factores geométricos que intervienen en una correcta manufactura de una pieza plástica hueca por el proceso de rotomoldeo

Por tanto ahora solo deben de realizarse algunos ajustes a la geometría de la pieza para que esta pueda ser manufacturada por el proceso de rotomoldeo, estos ajustes están relacionados con los parámetros geométricos de diseño (ver capítulo 4) como son radios, ángulos de salida, espesores de pared óptimos, factores de contracción, el uso de multicapas, costillas, columnas para el aumento de la resistencia, las dimensiones mínimas en secciones estrechas, etc.

### Paso 7 Obtención de la pieza final.

En este paso se termina con una pieza la cual es geoméricamente posible ser manufacturada por el proceso de rotomoldeo, así como económicamente viable, con el material óptimo para la aplicación en cuestión la cual cumple con las especificaciones de resistencia

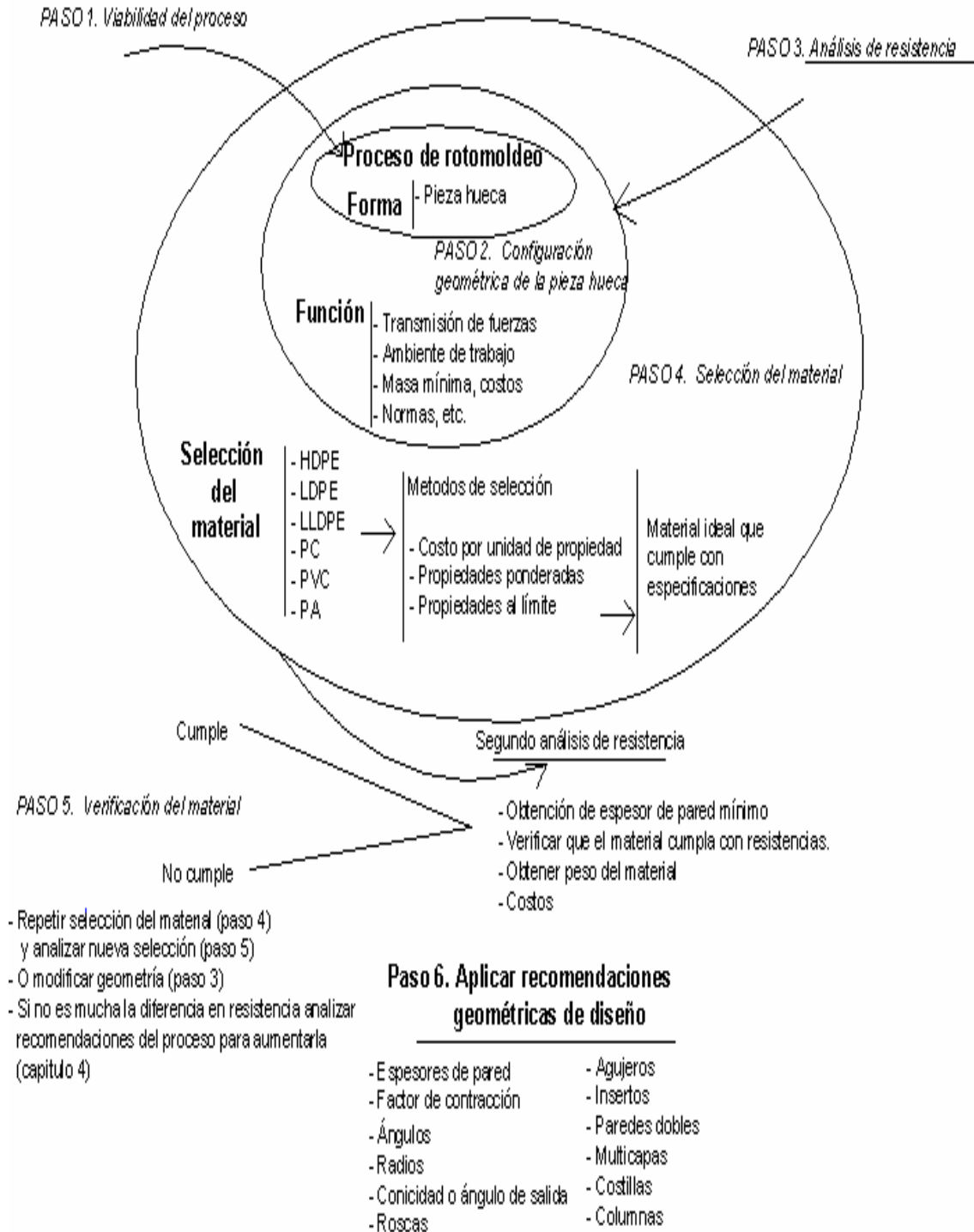


Figura 5.7 Metodología para el diseño de piezas plásticas rotomoldeadas



## 6 Caso de estudio

Con anterioridad se expuso que una de las aplicaciones más importantes del rotomoldeo es la manufactura contenedores pequeños hasta de grandes dimensiones (ver capítulo 1). Este campo constituye la mayor aplicación en nuestro país, pues existen alrededor de 40 empresas que se dedican a fabricar tinacos para el almacenamiento de agua potable [1].

Sólo algunas de estas empresas tienen variedad en el diseño de los contenedores, una de estas variantes son las nodrizas horizontales las cuales tienen dos funciones principales:

- 1 almacenar
- 2 transportar

Los moldes para estas piezas tienen formas simples y son hechos de lámina de acero, de pared relativamente delgada, como se puede observar en la figura 6.1.



Figura 6.1 Molde de una nodriza horizontal. Llenado del molde en forma manual, imagen tomada de Rotoplas S.A. de C.V.

Las piezas obtenidas pueden tener una gran cantidad de variantes como el número de capas, color, material, espesores de pared. Esta característica es la que hace del rotomoldeo un proceso amigable y flexible. Hay que recordar que los tiempos de fabricación también van a variar.

Para el desmolde de piezas de gran tamaño como es este el caso se debe de hacer el uso de ayudas mecánicas y desmoldantes (ver capítulo 1, sección 1.2.4), para no dañar a la pieza y llegar a deformarla, pues este paso se puede volver muy complicado si realiza correctamente (ver capítulo 1, referente a la etapa de desmolde). Ver figura 6.2.



Figura 6.2 Desmolde de una nodriza horizontal. Imagen tomada de Rotoplas S.A. de C.V

A pesar de que la fabricación de contenedores ya es un área muy competitiva, el rotomoldeo ofrece otros campos vírgenes como por ejemplo: la manufactura de juegos para exteriores. La razón es porque por lo regular este tipo de juegos tienen tamaños grandes, la mayoría de estas piezas son de importación eso quiere decir que es aire lo que mayoritariamente se importa, existiendo la posibilidad de bajar en un gran porcentaje los costos si son manufacturados en nuestro país.

A continuación se plantea el siguiente caso de estudio el cual consiste en analizar la manufactura de un contenedor horizontal de tres soportes conocido como “Nodriza horizontal”. Este tipo de contenedores son usados primordialmente para el almacenamiento, transporte y mezclado de sustancias como agua, fertilizante, ácidos, cloruros melaza, miel, leche, diesel entre otras.

El campo de aplicación para las Nodrizas Horizontales se encuentra en:

- Agrícola
- Vinatera
- Cervecera
- Pinturas

- Alimenticia
- Metalúrgica
- Papelera
- Petrolera
- Textil
- Química
- Minería
- Tintas
- Pegamentos
- Tratamientos de aguas residuales
- Doméstica e industrial

Para poder realizar un análisis más específico en este tipo de contenedores se plantea que deben cumplir con los siguientes requerimientos:

- 1 Líquido a contener “agua”
- 2 Uso para almacenamiento o transportación del líquido
- 3 Fácil limpieza
- 4 Resistente
- 5 Ligero
- 6 No formación de moho y bacterias
- 7 Económico
- 8 Buen acabado superficial
- 9 Fácil manejo

De acuerdo a cada uno de los parámetros descritos se va a corroborar que los contenedores rotomoldeados en HDPE (polietileno de alta densidad) cumplan con ellos.



Figura 6.3 Nodriza horizontal para el almacenamiento de agua con capacidad de 1100 litros.

Para llevar a cabo este análisis se hace el uso de la metodología planteada en el capítulo 5:

### **6.1 Análisis de viabilidad del uso proceso de rotomoldeo.**

La nodriza horizontal en cuestión tiene una capacidad de 1100 litros, como se especifico en el paso 1 del capítulo 5 referente a la metodología para el diseño de piezas huecas fabricadas por el proceso de rotomoldeo, una pieza con capacidad volumétrica mayor de 20 litros es más económico fabricarla por rotomoldeo.

Otro punto importante es el volumen de producción, para este caso al tratarse de una pieza plástica hueca que forma parte de un sector especializado de contenedores para transportación de líquidos, no es alto este volumen.

Con estos datos se justifica el uso del rotomoldeo para la fabricación de nodrizas horizontales.

### **6.2 Configuración geométrica de la pieza plástica hueca**

Se parte de la forma geométrica que se muestra en la figura 6.3, la cual efectivamente se trata de una pieza hueca.

Donde la geometría consiste de un cilindro horizontal, con terminación esférica en los costados. Además de estar compuesta de una serie de patas para que el contenedor tenga una base firme. Dicha geometría proporciona un mejor equilibrio a la hora de transportar el líquido.

En la parte superior del contenedor cuenta con un agujero de tamaño estándar para poder realizar una limpieza periódica.

### **6.3 Análisis de resistencia**

Este paso como se menciona en el capítulo 5, consiste en realizar un análisis de resistencia a la geometría de la pieza.

Los tanques son estructuras especiales con el propósito de almacenar algún material o sustancia, principalmente para el almacenamiento de agua u otros líquidos como combustible, sustancias químicas o productos sólidos por ejemplo granos. También son utilizados para el transporte de las mismas.



Los tanques para el almacenamiento de agua potable son muy importantes dentro de la sociedad, es por eso que se debe llevar a cabo un diseño correcto para evitar la pérdida del líquido contenido debido a alguna falla o mal diseño.

Los parámetros para realizar el cálculo de un tanque de almacenamiento son los siguientes:

- Líquido a contener (densidad)
- Capacidad del tanque (Volumen)

La nodriza horizontal en cuestión tiene una capacidad de 1100 litros, esto es un volumen de  $1.1 \text{ m}^3$ .

Primero se verifica que las dimensiones correspondan a la capacidad establecida. Esto se muestra en la figura 6.4.

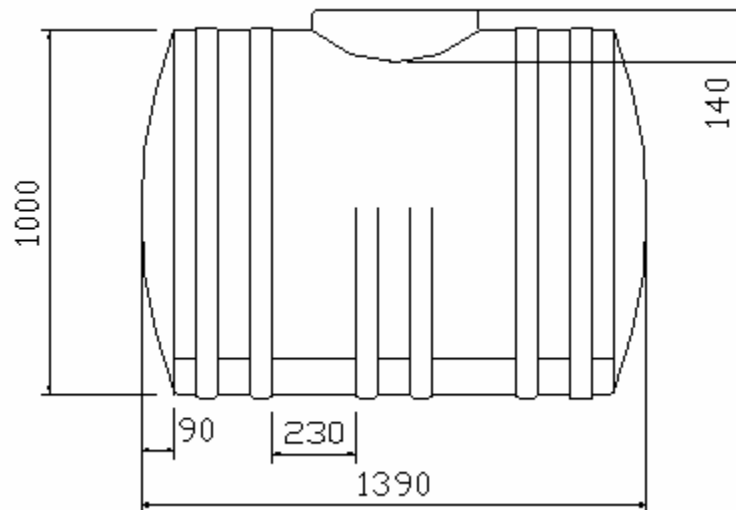


Figura 6.4 Dimensiones de nodriza horizontal

El volumen se calcula de la siguiente forma, el primer paso es calcular el volumen de la figura geométrica base, el cilindro.

$$V1 = \text{Área círculo} \times \text{longitud} = \pi (0.5 \text{ m})^2 (1.21 \text{ m}) = 0.94 \text{ m}^3$$

$$V2 = 2/3 (1)(.09) = .06 \text{ m}^3 (2) = .12 \text{ m}^3$$

$$V3 = [(1)(.5)(.21)] - [\pi (.21)(0.5)^2 / 2] = 0.0226 \text{ m}^3 \times 3 = 0.067 \text{ m}^3$$

$$VT = 0.94 + 0.12 + 0.067 = 1.127 \text{ m}^3$$

Con esto se verifica que la capacidad de la nodriza horizontal corresponde a lo establecido.

El siguiente paso es realizar el cálculo del esfuerzo al que está sometida la nodriza horizontal debida al líquido. Para esto se hace el uso de la siguiente fórmula con la cual se calcula primero la presión, como se observa la máxima presión va a estar aplicada en el fondo del contenedor en este caso una profundidad de 1m

$$p = \rho g h = \gamma h$$

donde  $\rho$  es la densidad del líquido contenido en el recipiente,  $g$  la gravedad,  $h$  la altura del líquido y  $\gamma$  es el peso específico del líquido.

Por lo tanto

$$p = \rho g h = (1000 \text{ kg/m}^3)(9.81 \text{ m/s}^2)(1 \text{ m}) = 9810 \text{ N/m}^2 = 9810 \text{ Pa}$$

El esfuerzo se determina como sigue

$$\sigma_{ax} = \frac{(\gamma h)R_i}{2t} = \frac{pR_i}{2t} \quad \text{y} \quad \sigma_H = \frac{(\gamma h)R_i}{t}$$

donde los esfuerzos máximos son

$$\sigma_{ax} = \frac{(\gamma h)R_i}{2t} = \frac{pR_i}{2t} = \frac{9810(0.5)}{2(.0075)} = 327000 \text{ Pa}$$

$$\sigma_H = \frac{(\gamma h)R_i}{t} = \frac{9810(0.5)}{.0075} = 654000 \text{ Pa}$$

## 6.4 Selección del material

Las nodrizas horizontales plásticas se manufacturan por el proceso de rotomoldeo con polietileno de alta densidad (HDPE). Revisar el paso 3, de la metodología planteada en el capítulo 5. Las ventajas que ofrecen estos contenedores es que son fabricados de una sola pieza, sin costuras ni puntos de unión, son ligeros, resistentes, no se oxidan ni se corroen, resisten a más de 300 sustancias químicas, no generan sabor ni olor, se limpian fácilmente, el color va integrado en la manufactura, además de ser aprobado por la FDA.

En este paso se verifica que el polietileno de alta densidad ha sido aplicado para esta pieza de forma correcta (ver capítulo 2, referente a materiales plásticos) pues si se contrasta con los demás materiales que se rotomoldean se encuentra que el policarbonato que es un material más resistente que el polietileno de alta





densidad no tiene unas propiedades de resistencia química. Además de ser este transparente y en este caso requerir de un material opaco esto para evitar los efectos de los rayos solares sobre la sustancia contenida. El PVC con presentación en plastisol es un material flexible por tanto no califica, la PA es un material más caro que el polietileno por tanto no compite económicamente para esta aplicación donde básicamente la sustancia a contener es agua y el uso de un polietileno lineal solo queda justificado si la sustancia a almacenar se tratase de un combustible o sustancia corrosiva.

Para esta aplicación queda establecido que la mejor aplicación fue la selección del polietileno de alta densidad. De haber resultado lo contrario se hubiera proseguido a realizar una nueva selección del material.

### **6.5 Verificación del material**

Ahora que ya se cuenta con el análisis de resistencia de la pieza plástica hueca, la forma geométrica y se ha revisado que el material para esta aplicación específica corresponde al ideal.

Se verifica que los esfuerzos debidos a la presión por el líquido contenido en el recipiente no sobrepasan a las especificaciones del material (ver tabla 2.8).

### **6.6 Aplicación de recomendaciones de diseño**

En la capítulo 4 de este trabajo se establecieron distintas recomendaciones de diseño, las cuales van a ser el parámetro de medición para validar el diseño de la nodriza horizontal. En la figura 6.5 se observa que la parte inferior de la nodriza horizontal es la que cuenta con cambios de sección grandes, por lo tanto son en estas secciones en donde el material podría tener problemas para fluir de forma correcta.





Figura 6.5 Parte inferior de nodriza horizontal

Estos cambios de sección tienen varios objetivos, el primero de ellos es proporcionar a la nodriza estabilidad (es decir cumple la función de base), la siguiente función consiste en trabajar como una **costilla de refuerzo** (ver sección 4.11) de la pieza, como se observa en la figura 6.6 a y b.

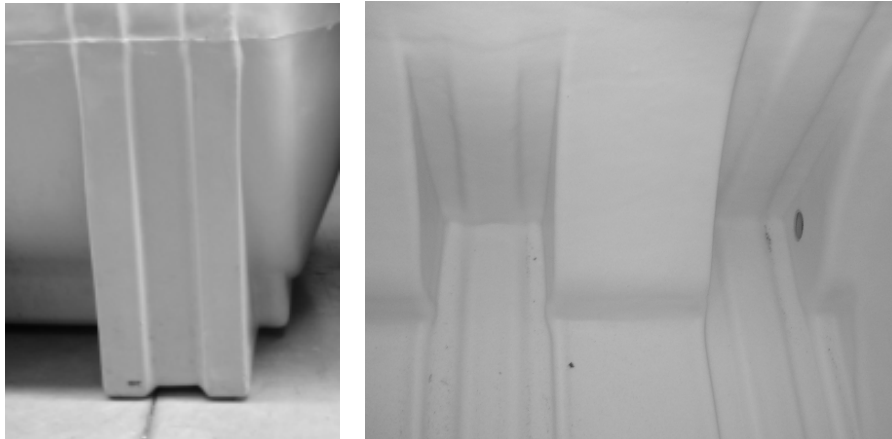


Figura 6.6 a) costillas en nodriza vista externa, b) costillas en nodriza vista interna.

En las reglas referentes al diseño de piezas huecas rotomoldeadas se establece que la profundidad de la costilla comparada con su ancho debe de ser siempre menor. Este parámetro se encuentra dentro de lo establecido ya que se cuenta con una profundidad de 10mm y un ancho de 60 mm, garantizando que no existen problemas de que el material recubra por completo la costilla.

Los **radios** son un parámetro importante, revisar sección 4.3. En la tabla 4.2 se muestran los radios convenientes para el polietileno (PE), donde el ideal es de 12.5 mm y el más comercial es de 6.5 mm. La nodriza tiene radios de 10 mm en promedio, y no existen señales de problemas del flujo del material en las esquinas.

Se puede observar que la pieza no cuenta con un **ángulo de salida** (ver sección 4.5), el cual se puede considerar que es necesario en la sección inferior de la nodriza. Una de las razones por la cual no cuenta con él es que por tratarse de una pieza de polietileno, este material tiene un **factor de contracción** (ver sección 4.2) relativamente grande de 3%. Sin embargo es preferible hacer el uso de estos para una mayor seguridad de tener un desmoldeo sin problemas.



Figura 6.7 Parte superior del molde de la nodriza horizontal, que determina la geometría del agujero que sirve para una fácil limpieza.

En los diferentes modelos de contenedores es necesario que la pieza diseñada cuente con un agujero el cual va a servir de entrada para realizarle una limpieza interna.

Anteriormente se manejaron varias opciones las cuales hacen posible la creación de un **agujero** en una pieza hueca rotomoldeada dentro de ellas se mencionó (ver sección 4.7):

- Realizar el agujero en un proceso posterior de corte
- Aislamiento total de la sección donde se va a ubicar el agujero para que el material plástico no se deposite en dicha superficie.

En este caso existe una solución muy interesante para la realización del agujero en la nodriza. Como se puede observar en la figura 6.8, la parte en donde va a estar localizado el agujero está constituida por una sección cónica prolongada la cual tiene varias funciones, como se menciona a continuación:

- Que el material localizado dentro del molde no se salga al momento de la rotación.

- Introducir un segundo o tercer material (dependiendo del número de capas)

La presente nodriza horizontal es un claro ejemplo de una pieza formada por **multicapas** (ver sección 4.10), en este caso se trata de tres capas. La primer capa (externa) es de polietileno de alta densidad (HDPE) con pigmento color arena y con protector UV esta capa tiene un espesor de 3 mm, la capa intermedia es de HDPE en color negro con espesor de 2 mm. Por último la tercera capa (interna) es de polietileno de alta densidad natural espumado, esta capa es de 5 mm.

La última capa contiene además del espumante, un aditivo antibacterial que evita la formación de bacterias y hongos, los cuales producen mal olor, y sabor en el agua.

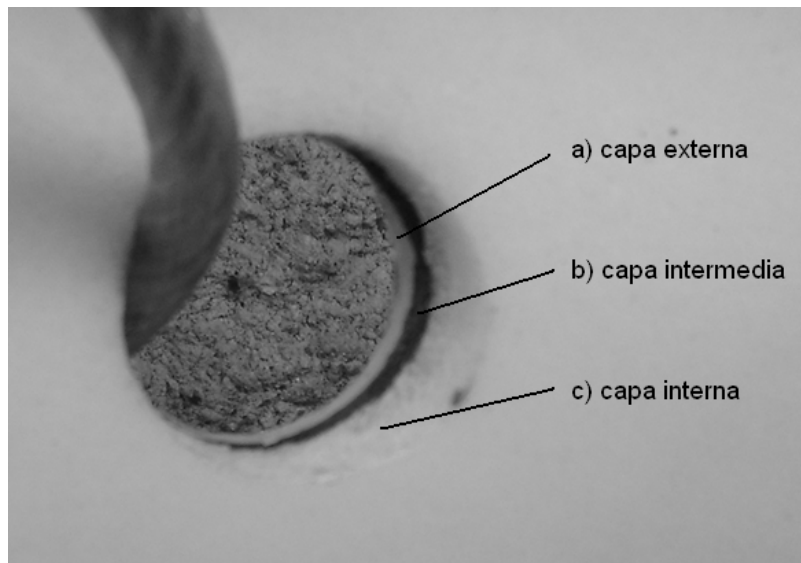


Figura 6.8 Multicapa: a) capa externa color arena de HDPE, b) capa intermedia color negro (HDPE), c) capa externa natural de HDPE espumado.

## 6.7 Pieza final

Cada uno de los puntos anteriores analizados dejan claro que la pieza está bien conformada geoméricamente para la obtención de piezas sin defectos producidos en la etapa de manufactura

## 6.8 Errores y Alternativas para eliminar fallas en la fabricación de la nodriza horizontal de tres soportes

Como se puede observar con respecto a cada uno de los parámetros anteriores, la nodriza horizontal se encuentra dentro de un rango adecuado, sin embargo existen varios defectos de fabricación en la pieza, como se observa en la figura 5.7 que pueden evitarse con las siguientes recomendaciones.

Estos defectos de fabricación no son ocasionados por la geometría, son ocasionados por parámetros de proceso como velocidad de rotación de los ejes, calentamiento del molde, enfriamiento. Así como una mala calidad de la materia prima y un mal sello del molde, etc.

Uno de los defectos se localizan en la línea de partición del molde donde las consecuencias pueden ser debido a:

- Desgaste del molde
- Mal acoplamiento y ajuste.
- Desbalanceo del molde durante el proceso
- Mal diseño y acabado del molde

En la figura 6.9 se observa que existen fuertes problemas de calidad en la pieza debidas al molde como se mencionó en el párrafo anterior, lo que ocasiona la formación de rebaba y un marcado defasamiento en la línea de partición.

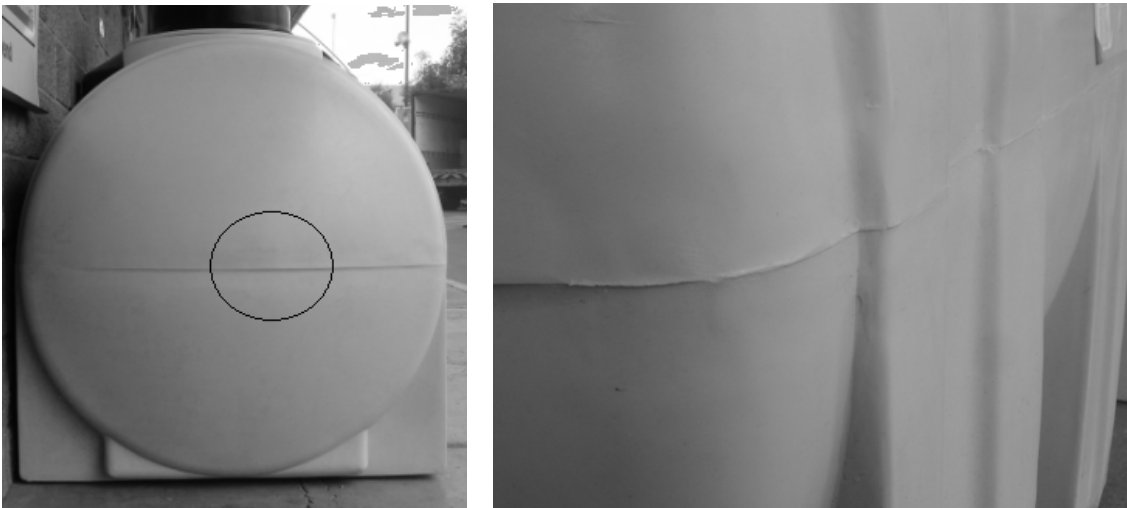


Figura 6.9 Defectos en la línea de unión, defasamiento del molde y producción de rebaba.

Este problema de fabricación se puede ver en la figura 6.10, donde se observa claramente el defasamiento de las dos piezas que integran el molde de la nodriza horizontal. Ocasionado por un mal acoplamiento del molde.

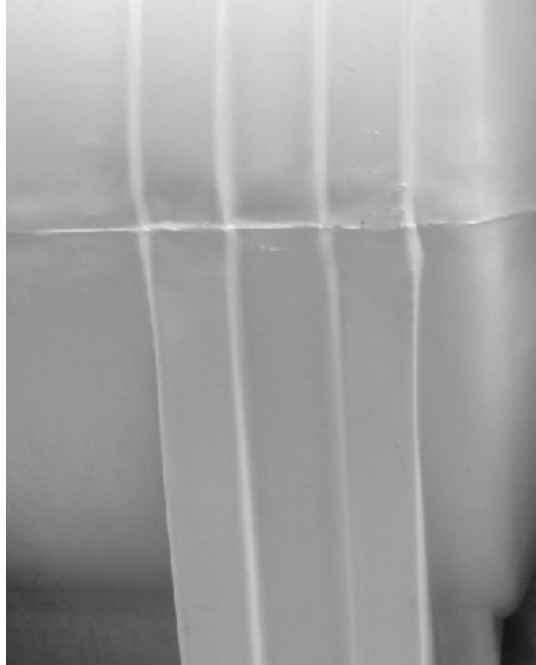


Figura 6.10 Defasamiento de las dos piezas del molde

Otro problema frecuente y muy importante pues le resta a la pieza calidad superficial en acabado superficial, es la aparición de poros. Su importancia radica que en contenedores donde la capa externa es de color claro este tipo de defecto se hace muy visible, como se aprecia en la figura 6.11.

Estos defectos superficiales son burbujas de aire atrapadas (ver sección 1.2.1) dentro del plástico que afloran en la superficie de la pieza, o pueden quedar atrapadas dentro del material. Este problema es ocasionado por varias razones dentro de las cuales se encuentra una mala calidad de la materia prima, un problema de rotación, calentamiento no uniforme o que la resina sea insuficiente.



Figura 6.11 Defecto superficial en nodriza horizontal.

En este caso es probable que el problema sea de rotación, es decir que durante la etapa de calentamiento la pieza no tuvo un correcto balance en la rotación de sus ejes de forma que el material plástico se distribuya de manera equilibrada en cada una de las superficies internas del molde.

Esto se comprueba porque esta sección en particular tiene un espesor de pared más delgado (menor a 3 mm de espesor) puesto que se alcanza a observar la siguiente capa, como se observa en la figura 6.11, en donde se muestran puntos negros los cuales corresponden a la capa intermedia de polietileno de alta densidad de color negro.

Esta mala proporción en la rotación del molde da también como resultado una transferencia de calor no uniforme en la superficie del molde, obteniéndose el mismo efecto antes descrito.

## Conclusiones

A lo largo del desarrollo de este trabajo se confirma que existen limitantes con respecto a la información porque existen pocos libros especializados en el proceso de rotomoldeo, los libros marcados en la bibliografía solo abordan el proceso de rotomoldeo con información referente a las etapas de proceso y algunas recomendaciones en el diseño de piezas. La siguiente fuente de información está referida a revistas especializadas en el área de la transformación de plásticos, organismos y asociaciones; otra fuente de información es acudir directamente con los transformadores.

De la información reunida se obtuvo información suficiente para la realización de una metodología que abarca todos los pasos a seguir para el diseño de piezas plásticas por el proceso de Rotomoldeo.

Esta metodología se dividió en siete pasos básicos, donde el primer paso consiste en la realización de un análisis de la viabilidad de usar el proceso de rotomoldeo para determinado producto donde interfieren factores como volumen de producción, inversión de maquinaria, tamaño de la pieza, etc. Una vez que se está seguro de su viabilidad se procede al segundo paso referente a darle forma al producto, dicha forma debe de ser una pieza hueca preferentemente con espesores de pared iguales en todo el producto, cuando ya se cuenta con una geometría definida se realiza un análisis de resistencia (tercer paso) a la pieza para determinar las fuerzas que se presentan y los esfuerzos.

El cuarto paso es realizar una buena selección del material a aplicar a la pieza plástica. Toda la información referente a los materiales usados en rotomoldeo se encuentran en el capítulo 2.

Como ya se cuenta con los conceptos de **Proceso – forma – función – material** bien determinados, el paso 5 consiste en realizar otra vez un análisis de resistencia para verificar que el material este dentro de especificación, además de obtener el espesor de pared mínimo que soporte los esfuerzos establecidos.

En el paso 6 se aplican las diferentes recomendaciones geométricas de diseño a la pieza plástica a manufacturar, esto con el objetivo de obtener una pieza sin problemas en su manufactura, debidas a errores en la geometría.

En el paso siete se tiene una pieza factible de ser rotomoldeada, con resistencia mecánica suficiente para la aplicación, y el material ideal; para la obtención de piezas con buena calidad.





Esta metodología ayuda también a balancear el concepto de *mínimo costo – máxima resistencia*.

Cabe mencionar que existen otros parámetros que tienen mucha influencia como el tipo de máquina ideal para la fabricación de una pieza determinada, la velocidad de rotación, la temperatura, el uso de presión interna en el molde, los venteos que debe de tener el molde, material del molde, los tiempos de fabricación, entre otros para realizar una correcta manufactura.

Se observó que estos parámetros, tanto de proceso como del molde, tienen gran importancia en el caso de estudio presentado en el capítulo 6. La pieza analizada cumplió con las recomendaciones geométricas marcadas en el capítulo 4, sin embargo se observaron varios defectos en su manufactura. Estos defectos fueron provocados por la falta de cumplimiento de los parámetros antes mencionados, por lo que se comprueba que se debe profundizar en estos conceptos por la importancia que tienen en la obtención de piezas sin defectos.



## Bibliografía

- [1] Mike Greer, Marketing Manager Spin-cast Plastics, Inc. *Publicación de Medical device & diagnostic Industry Magazine*, (april 1996).
- [2] Joseph Fred Chabot, Jr. *The development of plastics processing machinery and methods*. Editorial Wiley-Interscience; 1 edition (February 6, 1992)
- [3] Instituto Mexicano del Plástico Industrial. *Enciclopedia del plástico 2000*.
- [4] Joseph Gordon. *Industrial design of plastics products. 1<sup>st</sup> Edition*. Wiley – Interscience a John Wiley and Sons Inc. 2003.
- [5] Harold Belofsky. *Plastics product design and process engineering*.
- [6] Eddie Norman, Joyce Riley. *Advanced design and technology*.
- [7] Hansjürgen Saechtling. *Plásticos en la construcción. 1<sup>st</sup> Edition*. Editorial Gustavo Gili, S. A. Barcelona 1978.
- [8] Walter Michaeli. *Plastics processig an introduction. 1<sup>st</sup> Edition*. Hanser Publishers, Munich Viena New York. 1992.
- [9] Roy J. Crawford, James L. Throne. *Rotational molding technology. 1<sup>st</sup> Edition*. *Plastics Design Library William Andrew Publishing*. 2002
- [10] R. J. Crawford. *Rotational molding of plastics. 2<sup>nd</sup> Edition*. John Wiley and Sons Inc. 1996.
- [11] Darren A. Traub. What´s That Process?. Process Heating. Febrero 2005.
- [12] D.I. Juan Carlos Ortiz Nicolás. *Rotomoldeo para diseñadores Industriales. Colección cidí Tecnología 3. Centro de Investigaciones de Diseño Industrial*. 2003
- [13] K. G. Swift, D. J. Broker. *Process selection from design to manufacture. 2<sup>nd</sup> Edition*. Butterworth Heinemann. 2003
- [14] J. Olinek; C. Anand; C. T. Bellehumeur. *Experimental study on the flow and deposition powder particles in rotational molding. Polymer engineering and science, January 2005*.
- [15] Carlos García – Reducción Engineering. Rotomoldeo, Polietileno pulverizado, ¿Como controlar la calidad?. Abril 2005.
- [16] George Gogos. Bubble Removal in Rotational Molding. Polymer Engneering and Science. Febrero de 2004.
- [17] Anna Allen. Rotational Molding can reduce cost, part count. Design News. Mayo 3 1999.
- [18] John Miguel Huérfano. Rotomoldeo Economía y Versatilidad. Revista Plastico. Julio de 2003.
- [19] Grupo GMI. Transformación del plástico por rotomoldeo
- [20] Larry Suba. Rotational Molding. Akro Plastics.
- [21] C- Park Industries, Inc
- [22] WWW. Emece Plegados.com



- [23] Centro Empresarial del Plástico S.A. de C.V. Adolfo Prieto # 424 Col. Del Valle C. P. 03100 México D.F.
- [24] Michael Ashby. *Materials Selection in Mechanical Design*, Editorial Butterworth-Heinemann; 3 edition (febrero 26, 2005)
- [25] Budinski, Kenneth G. *Engineering materials, properties and selection*. Edit. Prentice Hall, 5 edition (1996).
- [26] Rotational Molding supports unlimited design options. *Design news*. Agosto 16 1996.
- [27] Eduard A. Muccio. *Plastic part technology. ASM International (September 1991)*
- [28] Tim A. Osswald. *Polymer processing fundamentals. Hanser Gardner Publications (October 1998)*
- [29] William B. Bickford. *Mecánica de sólidos, conceptos y aplicaciones*. Primera edición. Mc Graw Hill Irwin (1995).
- [30] Ferdinand P. Beer; E. Russell Johnston; John T. Dewolf. *Mecánica de Materiales*. Tercera edición.
- [31] Heinrich Dubbel, K. H. Kuttner, and W Beitz. *Handbook of Mechanical Engineering*. Editorial Springer-Verlag Telos (October 1994).
- [32] James M. Gere, Stephen P. Timoshenko. *Mecánica de materiales*. 4<sup>a</sup> Edición. International Thomson Editores (Julio 1999).
- [33] Equipo editorial de Tecnología del Plástico. *La industria del Rotomoldeo en América Latina*. Septiembre del 2005
- [34] Matthew H. Naitove. *Plastics Technology. Rotomolding New Way to Rotomold Foam/Solid PE Parts*.
- [35] S. Panigrahi, L.G. Tabil, W. J. Credar. *Application of saskatchewan Grown Flax Fiber in Rotational Molding of Polymer Composites*. Department of agricultural and Bioresource Engineering, University of Saskatchewan Canada. Julio 2002.
- [36] M C Cramez, M J Oliveira and R J Crawford. *Optimization of the rotacional molding process for polyolefins*. Department of Mechanical Engineering, Queen's University Belfast, Northern Ireland, UK. (octubre 2002)
- [37] Mikell Knights. *Rotomolding Finally Gets Some Respect*. *Plastics Technology*.
- [38] Mikell Knights. *Rotomolders Hear New Ways to Make Better Parts, Cut Costs*. Fall ARM Conference. *Plastics Technology*
- [39] Glenn L. Beall. *Rotational molding, today and tomorrow*. Glen L. Beall, Ltd. ANTEC 97.
- [40] Mikell Knights. *The next generation or rotomolding technology*. *Plastics Technology*
- [41] David W. Berg. *Fine-tuning the design process for complex rotomolded structural parts*. *Plastics Engyneering*. Diciembre 2000.
- [42] L G Olson, R Crawford, M Kearns, N Geiger. *Rotational Molding of plastics: Comparison of Simulation and Experimental Results for an Axisymmetric Mold*. Department of Mechanical Engineering University of Nebraska-Lincoln. Agosto 2000.



- [43] Michael J. Wright, Alvin G. Spence and Roy J. Crawford. An Analysis of Heating Efficiency in Rotational Moulding. The Queen's University, Belfast. ANTEC 97.
- [44] M. Kontopoulou, E. Takács, C. T. Bellehumeur and J. Vlachopoulos. A Comparative Study of the Rotomolding Characteristics of Various Polymers. CAPP-D, Department of Chemical Engineering, McMaster University, Hamilton Ont, Canada
- [45] Ruben Barragan F. Manual Práctico para la industria. Polietileno Tecnología, proceso, problemas y soluciones.
- [46] Jordan I Rotheiser Design Inc. Diseño para Rotomoldeo. Revista Plástico. Octubre 2003.
- [47] Mat Web, Material Property Data. WWW. Matweb.com
- [48] Paul Nugent. Shrinkage and warpage. WWW. Paulnugent.com
- [45] Paul Nugent. 25 Ways to save money in Rotomolding. WWW. Paulnugent.com
- [49] Paul Nugent. Venting of Molds. WWW. Paulnugent.com
- [50] AISR (Associazione Italiana Stampaggio Rotazionale). Diseño Rotacional. WWW. Rotacionaldesign.it
- [51] On Overview of Rotacional Molding. WWW. Boyce.com
- [52] Paul Nugent. 10 Ways to save 10% in Rotomolding. WWW. Paulnugent.com.
- [53] Equistar a Liondel. *Company. Mold Shrinkage*. Equistar technical tip.
- [54] Standars and practices of practices plastics custom molders. Engineering and technical standars, nylon resins.
- [55] Glenn Beall, Glenn Beall Plastics, Ltd., *Rotational molded holes*. Rotational molding newsletter.
- [56] Nanjunda Narasimha Murthy. Rotacional molding vs. Blow molding cost comparison. Bryan Young University.

