

**ESTABLECER LAS CONDICIONES NECESARIAS PARA PROCESAR  
MATERIALES TERMOESTABLES MEDIANTE EL ROTOMOLDEO.**

**Daniel Pérez O**

**Medellín, Colombia**

**Universidad EAFIT.**

**Facultad de Ingeniería**

**Departamento de Ingeniería de Diseño de producto.**

**2 0 0 9**

**ESTABLECER LAS CONDICIONES NECESARIAS PARA PROCESAR  
MATERIALES TERMOESTABLES MEDIANTE EL ROTOMOLDEO.**

**Daniel Pérez O**

**Trabajo de grado presentado para optar al título de  
Ingeniero de Diseño de Producto**

**Asesora**

**Doctora MÓNICA ÁLVAREZ LÁINEZ  
Ingeniera Química U.Nal. de Colombia  
Doctora en Física de la U. de Valladolid**

**Medellín, Colombia**

**Universidad EAFIT.**

**Facultad de Ingeniería**

**Departamento de Ingeniería de Diseño de producto.**

**2 0 0 9**

## CONTENIDO

|   |     |
|---|-----|
| LISTA DE TABLAS .....   | iv  |
| LISTA DE FIGURAS .....  | v   |
| RESUMEN .....   | vii |
| INTRODUCCIÓN .....  | 1   |
| 1. JUSTIFICACIÓN.....   | 4   |
| 2. OBJETIVOS.....   | 6   |
| 2.1. Objetivo general .....   | 6   |
| 2.2. Objetivos específicos. ....  | 6   |
| 3. MARCO TEÓRICO .....  | 7   |
| 3.2. Resinas de poliéster insaturado: .....   | 11  |
| 3.3. Ensayo de reactividad SPI: .....   | 14  |
| 3.4. Ensayo de viscosidad relativa para materiales reactivos: .....   | 16  |
| 3.5. Moldes para rotomoldeo de termoplásticos: .....  | 17  |
| 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....  | 27  |
| 4.1. Ensayo de reactividad SPI: .....   | 27  |
| 4.2. Ensayo de viscosidad relativa para materiales reactivos. ....  | 40  |
| 4.3. Consideraciones para la fabricación de moldes de rotomoldeo para<br>materiales termoestable. ....                            | 44  |
| 4.4. Ensayo sobre las condiciones de rotación en los ejes de la máquina de<br>rotomoldeo, en función de espesores homogéneos..... | 47  |
| 4.5. Producto final: .....  | 52  |
| 5. CONCLUSIONES .....   | 61  |
| BIBLIOGRAFIA: .....   | 67  |

## LISTA DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Constituyentes base y aplicaciones de algunas de las resinas de poliéster insaturado .....            | 13 |
| Tabla 2. Descripción de aspectos químicos y físicos de las resinas de poliéster insaturado seleccionadas. .... | 13 |
| Tabla 3. Equipo requerido para el ensayo de reactividad SPI. ....  | 28 |
| Tabla 4. Porcentaje de catalizador en relación al número de la muestra y a su referencia comercial.....        | 29 |
| Tabla 5. Porcentajes de catalizador de las muestras para el ensayo de viscosidad relativa .....                | 41 |
| Tabla 6. Muestras rotomoldeadas en relación a las variables a controlar. ....                                  | 50 |
| Tabla 7. Resultado de las simulaciones de elementos finitos.....   | 57 |
| Tabla 8. Criterios de procesamiento del producto final.....  | 61 |
| Tabla 9. Comparación entre rotomoldeo de termoplásticos y termoestables. ....                                  | 64 |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1. Descripción del proceso de rotomoldeo para termoplásticos. ....   | 8  |
| Figura 2. Fluidímetro.....  | 17 |
| Figura 3. Molde para rotomoldeo en chapa metálica.....  | 18 |
| Figura 4. Molde de rotomoldeo en fundición de aluminio.....   | 20 |
| Figura 5. Molde de rotomoldeo – draga.....  | 21 |
| Figura 6. Molde de rotomoldeo – tapa contenedor multiusos – flanche.....  | 24 |
| Figura 7. Detalle - molde draga – sistema de cierre. ....   | 25 |
| Figura 8. Detalle - molde sum – inserto extraíble. ....   | 26 |
| Figura 10. Comparación de los tiempo de gel y de exotermia de las 6 muestras de la resina tereftálica R835. ....                            | 32 |
| Figura 11. Comparación de la Temperatura de gel y de exotermia de las 6 muestras de la resina ortoftálica R851. P(T°= 27.0°C, RH= 51%)..... | 33 |
| Figura 12. Comparación de los tiempo de gel y de exotermia de las 6 muestras de la resina ortoftálica R851. ....                            | 34 |
| Figura 13. Comparación de la Temperatura de gel y de exotermia de las 6 muestras de la resina Isoftálica R872. P(T°= 27.0°C, RH= 54%).....  | 35 |
| Figura 14. Comparación de los tiempo de gel y de exotermia de las 6 muestras de la resina isoftálica R872.....                              | 36 |
| Figura 15. Filtro según los tiempos de gel de las 3 resinas evaluadas en el ensayo de reactividad SPI.....                                  | 38 |
| Figura 16. Filtro según los tiempos exotérmicos de las 3 resinas evaluadas en el ensayo de reactividad SPI.....                             | 39 |

|   |    |
|---|----|
| Figura 17. Pasos para el uso del fluidímetro.....   | 41 |
| Figura 18. Comparación entre los índices de fluidez de las muestras para el ensayo de viscosidad relativa. .... | 42 |
| Figura 19. Proceso de RTM.....  | 46 |
| Figura 20. Maquina de rotomoldeo – elaborada para la implementación del proyecto de grado.....                  | 47 |
| Figura 21. Moldes piloto para el procesamiento de materiales termoestables por la técnica de rotomoldeo.....    | 48 |
| Figura 22. Muestras rotomoldeadas de resina de poliéster insaturado. ....                                       | 49 |
| Figura 23. Modelación del producto final. ....  | 52 |
| Figura 24. Soporte y fuerza para la simulación 1.....   | 53 |
| Figura 25. Análisis de esfuerzo mínimo principal – compresión. Simulación 1.....                                | 54 |
| Figura 26. Resultado de Análisis de deformación direccional en el eje Y.....                                    | 54 |
| Figura 27. Soporte y fuerza para la simulación 2.....   | 55 |
| Figura 28. Análisis de esfuerzo mínimo principal - compresión – simulación 2 ....                               | 55 |
| Figura 29. Soporte y fuerza para la simulación 3.....   | 56 |
| Figura 30. Análisis de esfuerzo mínimo principal – compresión – simulación 3. .                                 | 56 |
| Figura 31. CAD del molde para el producto final rotomoldeado. ....  | 58 |
| Figura 32. Prototipo en madera blanda para el producto final. ....  | 58 |
| Figura 33. Molde en fibra de vidrio para el rotomoldeo del producto final.....                                  | 59 |
| Figura 34. Configuración propuesta para el producto final. ....   | 60 |
| Figura 35. Producto final con 3 módulos rotomoldeados y aditamentos adicionales.....                            | 60 |

## RESUMEN

En este trabajo se establecieron las condiciones necesarias para procesar materiales termoestables mediante la técnica de rotomoldeo, comenzando por el estudio de las condiciones de curado y viscosidad relativa, donde se evidenció una relación directa del porcentaje de catalizador en función del tiempo y la temperatura de polimerización.

Una vez conocidas las características de polimerización del material, se procedió a definir los criterios de fabricación de los moldes, en comparación con los moldes de rotomoldeo para termoplásticos, evaluando las condiciones que podían replicarse y definiendo las que no. Teniendo estos criterios definidos, se procedió a la implementación del rotomoldeo con el material reactivo seleccionado, empleando moldes piloto, que permitieron ver el comportamiento del material dentro de la cavidad, y donde las rotaciones de los ejes hueco, mayor y menor, en función de la geometría, determinaron las condiciones de procesamiento del material por ésta técnica, lo que se validó con las mediciones de los espesores resultantes, enmarcados en una tolerancia dimensional permisible ( $\pm 0.5\text{mm}$ ).

Finalmente, se fabricó un producto por medio de la técnica de rotomoldeo de termoestables, con el que se implementaron los resultados obtenidos y se destacaron las ventajas del proceso.

**Palabras clave:** Materiales termoestables, rotomoldeo, curado, viscosidad relativa, catalizador, moldes piloto.

## INTRODUCCIÓN

El uso del plástico en la industria colombiana ha tenido un incremento considerable en los últimos años, lo que se evidencia en el porcentaje de incremento de la industria manufacturera para enero de 2008, que en términos generales creció un 5.6% y donde el sector manufacturero creció en un 20.5%, lo que se ve directamente relacionado con los USD 594 millones exportados a finales del 2007, con un aumento del 31% en relación con años pasados<sup>1</sup>.

Los polímeros que tienen mayor uso en la industria manufacturera, son los termoplástico y los termoestables; los primeros, son materiales que al ser calentados a temperaturas por encima de 100 °C cambian de un estado sólido a un estado líquido, estado en el cual, pueden ser llevados a una matriz y donde al enfriarse regresan a su estado sólido, conformando un producto con la forma de ésta. Adicionalmente éste material posee una gran ventaja, que radica en su reprocesabilidad, sin cambiar sus propiedades físicas, para así formar otros productos. Entre los termoplásticos más conocidos se encuentran el PVC, Nylon, ABS, polietileno, polipropileno, poliéster saturado, entre otros, para los cuales existen muchos procesos de transformación, tales como la extrusión, la inyección, el rotomoldeo, el soplado, el termoformado, entre otros<sup>2</sup>.

En el caso de los termoestables, son polímeros que a temperatura ambiente se encuentran en estado líquido y luego de la adición de acelerador y catalizador o por acción del calor, mediante una reacción química conocida como polimerización, pasan a un estado sólido a temperatura ambiente, sin la necesidad de aplicar presión externa. Cabe aclarar, que la solidificación no se presenta inmediatamente una vez se adicionan los agentes químicos o se inicia el calentamiento, sino que transcurre un lapso de tiempo en el cual el material continúa en estado líquido, momento en el que se lleva a una matriz para ser

moldeado y donde posteriormente el líquido comienza una transición, pasando por un estado gelatinoso, para que luego presente las características de un sólido rígido, una vez ocurre este proceso no puede volver a su estado líquido, impidiendo ser reprocesado. Entre los termoestables más conocidos, se encuentran, las resinas de poliéster insaturado, resinas vinil éster, resinas bisfenólicas, resinas epóxicas, resinas alquídicas, entre otras. En muchas ocasiones las resinas termoestables son utilizadas con otros materiales para crear compuestos, pues tienen alta compatibilidad con diferentes fibras sintéticas. Los procesos más comunes en los que se ven involucradas las resinas, son: moldeo por transferencia de resina (RTM), moldeos por aspersion a molde abierto, laminados, polímero colado, entre otros, procesos en los que la resina es utilizada como una matriz, y está acompañada de otros elementos, también son empleadas solas sin ningún tipo de cargas y reforzantes, para generar encapsulados que son usualmente por vaciado y son macizos<sup>3</sup>.

Dentro de los procesos mencionados anteriormente, muchos de estos son excluyentes para las materias primas (distinción entre termoplásticos y termoestables), debido a como éstas se conforman, pero existe un proceso que puede ser compartido, que es el rotomoldeo, que actualmente se usa para algunos termoplásticos. Este proceso consiste en hacer girar un molde metálico en dos sentidos simultáneamente, de manera que el material polimérico previamente cargado (generalmente en polvo) y calentado por convección, recubre las paredes del molde a medida que va girando, formando de esta manera el producto<sup>4</sup>. Las formas producidas por rotomoldeo son esencialmente huecas, donde es posible obtener piezas con gran variación geométrica y con una gran diferencia en tamaño.

El procesamiento de termoplásticos en rotomoldeo tiene una serie de requerimientos energéticos y locativos, que presentan diferencias con los que se necesitarían para el rotomoldeo de termoestables. Dentro de los requerimientos energéticos del proceso, se encuentra la temperatura para el procesamiento del material, la cual debe alcanzar cerca de los 350°C para que por convección el material se funda dentro del molde. Ésta energía calórica que proviene del gas natural de origen fósil es no renovable, por lo que el uso de este implica un incremento de costo en corto tiempo. Por ejemplo, una compañía de rotomoldeo actualmente en la ciudad de Medellín, puede disponer de 36.000 metros cúbicos mensuales de gas aproximadamente, para realizar el proceso de quemado de las piezas, teniendo en cuenta que el metro cúbico puede estar cerca de los 300COP, lo que implica un costo variable de 10'500.000COP<sup>5</sup>.

Otro gasto energético se puede evidenciar en la energía empleada en las estaciones de enfriamiento, que hacen uso de energía eléctrica para el encendido de los ventiladores y motobombas. Adicionalmente existe un alto consumo de agua a la hora de efectuarse el proceso de enfriamiento.

Con respecto a los requerimientos locativos, las maquinas de rotomoldeo, hacen uso de un espacio considerable, debido al tamaño de los hornos, que en comparación con el tamaño máximo del molde permitido los supera en un 25%, tamaño que también se requiere para la zona de enfriamiento, haciendo que el espacio no se pueda emplear al máximo<sup>6</sup>.

## 1. JUSTIFICACIÓN

La implementación del rotomoldeo para las resinas de poliéster insaturado, puede brindar una gran cantidad de oportunidades para el desarrollo de productos, gracias a las características que ofrece el material cuando es conformado, y de igual forma pueden aprovecharse sus características reactivas y disminuir los costos variables de producción en función de una menor necesidad energética para el procesamiento de dichas resinas, traducido en la no utilización de hornos, optimizando las demandas de espacio y tiempo.

Adicionalmente, a diferencia del rotomoldeo para termoplásticos, el enfriamiento se produciría directamente en el producto final, y no en el molde, lo que agilizaría los tiempos de procesamiento, considerando que para este tipo de materiales no se recomienda el uso de agua, puesto que generaría un choque térmico capaz de crear esfuerzos internos, reduciendo las propiedades mecánicas del material y posiblemente fracturándolo. Por esta razón, se debe considerar el uso de aire como la opción más viable para este proceso.

Así pues, estos elementos, que resultan ventajosos, a la vez, justifican la elaboración de una investigación con la que pueda establecerse algunas variables del proceso, tales como:

- La fluidez del material, ya que ésta se debe garantizar para que llegue a todas las partes del molde. Para el caso de los materiales termoestables, la fluidez dependerá del tiempo de curado, por lo tanto, en éste trabajo se implementa una medida relativa de la viscosidad con miras a establecer que composición (resina + catalizador) será la más adecuada para el proceso de rotomoldeo.

- La fabricación de los moldes, que partiendo del hecho de que los materiales termoestables se conforman de manera exotérmica, se asume que los moldes requeridos para su procesamiento mediante rotomoldeo, no demandan restricción alguna sobre el espesor, (contrario a los moldes de rotomoldeo para termoplásticos) y obvian una posterior aplicación de calor, por lo cual, la conducción térmica no sería un factor relevante a considerar, lo que implicaría un posible cambio en el material, con menores consideraciones en cuanto a costo y manufactura.
- Las relaciones de rotación de ejes, necesarias para obtener espesores homogéneos, donde hay que tener en cuenta la viscosidad relativa que presenta el material a la hora de polimerizar, hecho que está directamente relacionado con los tiempos de curado del mismo.

Una vez estudiadas y analizadas las posibles variables que deben controlarse en el proceso, se procederá a establecer las condiciones necesarias para procesar materiales termoestables mediante el rotomoldeo, con miras a la creación de nuevos productos que aprovechen las ventajas tanto del material como del moldeo rotacional.

## **2. OBJETIVOS**

### ***2.1. Objetivo general***

Establecer las condiciones de rotomoldeo necesarias para la implementación de resinas termoestables, tipo poliéster insaturado en este proceso, estableciendo las relaciones de rotación de ejes, en función de las condiciones de curado y viscosidad del material.

### ***2.2. Objetivos específicos***

- o Determinar las condiciones de curado y de viscosidad de tres tipos de resinas de poliéster, necesarias para ser implementadas en el proceso de rotomoldeo.
- o Definir las condiciones necesarias para el diseño de moldes de rotomoldeo para materiales termoestables, comparadas con el rotomoldeo de termoplásticos.
- o Establecer las condiciones de rotación para el eje menor y para el eje mayor, teniendo en cuenta las condiciones de curado y de viscosidad establecidas.
- o Experimentar con un producto a escala real, que comprenda las características detectadas de los materiales termoestables procesados por rotomoldeo.
- o Comparar las ventajas y desventajas que tiene el rotomoldeo de termoestables con el rotomoldeo de termoplásticos, utilizando como punto de referencia el producto fabricado.

### 3. MARCO TEÓRICO

#### 3.1. Rotomoldeo<sup>7</sup>:

##### 3.1.1. Definición del proceso:

Es un proceso utilizado para producir formas grandes y huecas que consiste en hacer girar un molde metálico en dos sentidos simultáneamente, de manera que el material polimérico previamente cargado (generalmente en polvo) y calentado por convección, recubre las paredes del molde a medida que va girando, formando de esta manera la pieza.

##### 3.1.2. Formas y tipologías de productos fabricados por rotomoldeo:

Las formas producidas por rotomoldeo son esencialmente huecas. Es posible obtener piezas largas y angostas con ciertas limitaciones en el espaciado entre paredes.

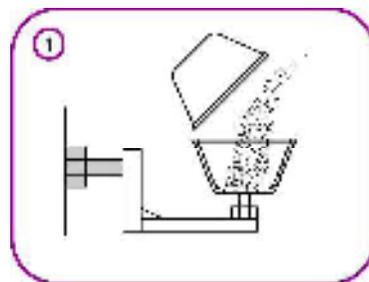
Dentro de los productos típicos fabricados por rotomoldeo se encuentran: tanques, contenedores para embarques y alimentos, cubiertas para máquinas e instrumentos, sanitarios portátiles, kayaks, vehículos de juguete, canecas y maniqués.

##### 3.1.3. Descripción del proceso:

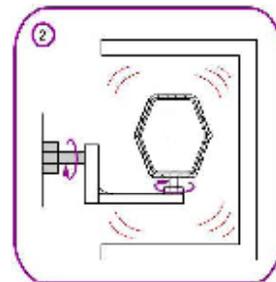
El proceso comienza con la adición del material dentro de un molde de dos partes. Este se calienta ya sea por medio de la aplicación de llama directa o en un horno por convección, donde se alcanzan temperaturas hasta de 375°C. Las variables más importantes de este proceso son: La temperatura y el tiempo de calentamiento, pues dependen del material, del tamaño y del espesor de pared que se desee obtener en la pieza.

Una vez se carga el molde con el material, éste se introduce en el horno, donde gira de forma simultánea sobre dos ejes perpendiculares, a velocidades que van desde 10 a 40 rpm (dependiendo del tipo del molde), de manera que el material se distribuye en las superficies internas de la cavidad, por acción de la gravedad, formando gradualmente una capa fundida de espesor uniforme.

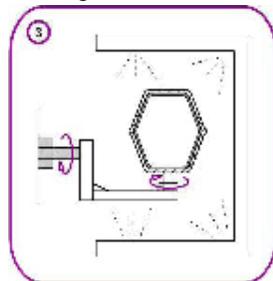
El enfriamiento de la pieza se realiza por aspersion de agua para piezas con formas redondas, o con aire para piezas planas o cuadradas debido a que el choque térmico del molde con el agua puede deformar la pieza. El tiempo de enfriamiento también depende de las mismas variables del calentamiento. Al mismo tiempo que se enfría continúa girando, haciendo que la capa de plástico se solidifique. Finalmente se abre el molde y se retira la pieza. *Ver figura 1.*



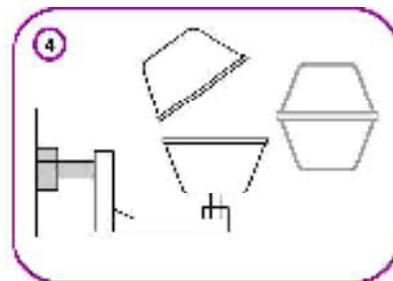
a. Carga del material al molde



b. Calentamiento del material



c. Enfriamiento del molde



d. extracción de la pieza.

Figura 1. Descripción del proceso de rotomoldeo para termoplásticos<sup>8</sup>.

En relación a la figura 1, para el procesamiento de materiales termoestables por rotomoldeo, las etapas de calentamiento del material

y la del enfriamiento del molde, se pueden ahorrar, debido a las condiciones de polimerización del material.

#### 3.1.4. Ventajas generales:

- En comparación con el moldeo por inyección, el rotomoldeo es menos costoso de instalar y operar. Los moldes son más ligeros, sencillos y económicos de construir y mantener.
- Es extremadamente fácil cambiar el espesor de pared de una pieza sin cambiar el molde: simplemente se modifica la cantidad de material cargado.
- Puede producir piezas plásticas con paredes muy delgadas en relación con su tamaño, con una tolerancia de  $\pm 0.5$  mm de espesor.
- Las piezas obtenidas presentan bajos esfuerzos residuales debido a que el material no entra a presión en el molde.
- Alto grado de estabilidad dimensional en los productos finales.
- Se pueden lograr acabados y relieves dentro de la operación de moldeo sin ningún proceso posterior.

#### 3.1.5. Restricciones generales:

- Se requiere mayor área de trabajo para el equipo.
- No es posible la utilización de tolerancias estrechas.
- No es tan eficiente para altas producciones como el moldeo por inyección o soplado.

#### 3.1.6. Ciclos de producción:

Como se ilustra en la figura 1, el proceso de rotomoldeo, cuenta con 4 ciclos; el primero, de carga de material en el molde, puede durar entre 5 a 8 minutos. El segundo ciclo, del calentamiento del material, puede

durar entre 15 a 22 minutos, dependiendo de la cantidad de material y de la geometría del molde. El tercer ciclo, que es el del enfriamiento, puede durar entre 15 a 25 minutos, dependiendo del tipo de enfriamiento (Aire-Agua o Aire-Aire). Finalmente, el cuarto ciclo, para descargar la pieza, puede durar entre 8 y 12 minutos, dependiendo del tipo de cierre del molde (Clamps o tornillería).

Así pues, Los ciclos del rotomoldeo, son los más extensos en comparación con otros procesos, por lo que se emplean varios moldes durante los ciclos mencionados, con el fin de contrarrestar la demora en el procesamiento.

#### 3.1.7. Materiales adecuados:

Se utilizan materiales tanto líquidos como sólidos. El material sólido debe ser pulverizado. El PE es el material más utilizado, especialmente el de alta densidad; le sigue el PVC líquido, el cual es apropiado para piezas que requieren de alguna flexibilidad o de detalles superficiales complicados.

Otros materiales utilizados son nylon, PC, ABS, PP, acetal, acrílico y fluorocarbonados, todos estos termoplásticos.

En este trabajo se implementa el uso de materiales termoestables, como lo son las resinas de poliéster insaturado, para establecer las condiciones necesarias de su procesamiento mediante la técnica de rotomoldeo.

### **3.2. Resinas de poliéster insaturado:**

Constituyen la familia más importante de las resinas termoestables utilizadas en los materiales compuestos. Se utilizan en más del 90% de los laminados comerciales. El sistema está basado en ésteres formados entre ácidos orgánicos bifuncionales, una proporción de los cuales debe ser insaturado, y alcoholes y dioles bifuncionales, constituyendo una mezcla homogénea y viscosa de una cadena polimérica central a base de poliéster.

Su viscosidad se puede controlar por el grado de polimerización del poliéster y por la proporción de estireno añadido. Un grado de polimerización más bajo, y/o una relación de estireno más elevada produce o da lugar a una menor viscosidad. Así pues las resinas comerciales se disponen en un amplio rango de viscosidad según las diferentes operaciones de procesado a que va a someterse y según los diferentes requerimientos de prestaciones exigidas. Este rango está comprendido normalmente entre 10 a 10000 mPa\*s a 20°C (mPa\*s (milipascal –segundo) = 1cps (centipoise)).

El curado de una resina de poliéster insaturado está afectado por el uso de iniciadores químicos y aceleradores y por la aplicación de calor o exposición a la radiación. Cuando la resina se prepara para ser utilizada en el proceso, se mezcla uniformemente entre un 1 a un 3% del catalizador con la resina pre-acelerada, que tiene como función reaccionar con el acelerador, lo que ocasiona que las moléculas se rompan, produciendo radicales libres que inician una reacción de polimerización adicional en el estireno diluido y con los dobles enlaces insaturados en los residuos de ácido insaturado en el poliéster.

Las prestaciones de la resina están influenciadas por la elección y proporción de los ingredientes principales, así como por el número de aditivos diferentes y modificadores que se utilizan (Ej: retardantes del fuego). Por esta razón existen

diferentes formulaciones de poliéster comercialmente, ampliando la diversidad de este producto a la vez que su implementación<sup>9</sup>.

### 3.2.1. Criterios para la selección de las tres resinas de poliéster:

La configuración y la composición química de las resinas de poliéster insaturado, una vez curadas, determinan las características y sus propiedades (flexibilidad, dureza, resistencia mecánica, resistencia química, resistencia térmica, entre otros). Estas características se derivan de los siguientes parámetros:

- Naturaleza de los constituyentes de base, dialcoholes y diácidos, sus propiedades dependerán del carácter alifático o aromático, del número de carbonos, del número de grupos éteres y del isómero.
- Proporciones relativas de los constituyentes, grado de insaturación, naturaleza del monómero, porcentaje del monómero.

Así pues para la selección de las tres resinas de poliéster insaturado, se selecciono; la que posee el anhídrido sin variaciones, que es de tipo ortoftálica y las que tuvieran una variación en su carácter alifático, considerando que éste ácido tiene dos isómero, de donde resultan los ácidos isoftálicos y los tereftálicos, y cuya variación es la causa del desempeño o utilización final que se le dará a la resina. Adicional a esto, otra razón de selección, es que estos son los tipos de resina de poliéster más utilizadas en los procesos de pequeña y mediana serie<sup>10</sup>.

En la tabla 1 se muestran los tipos de resinas de poliéster con sus constituyentes de base y las aplicaciones, que hacen de estas, ser las más empleadas:

Tabla 1. Constituyentes base y aplicaciones de algunas de las resinas de poliéster insaturado<sup>11</sup>.

| <b>Tipos</b>       | <b>Ácidos o anhídridos saturados</b> | <b>Ácidos o anhídridos saturados</b> | <b>Glicoles</b>                 | <b>Monómero</b> | <b>Aplicaciones</b>  |
|--------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------|-----------------|--|
| <b>Ortoftálica</b> | Anhídrido Maleico                    | Anhídrido ftálico                    | Propilenglicol , Etilenglicol   | Estireno        | Barcos, estratificados industriales, placas onduladas y planas |
| <b>Isoftálica</b>  | Anhídrido Maleico                    | Anhídrido ftálico                    | Propilenglicol , Dietilenglicol | Estireno        | Gel coats, depósitos, ingeniería química                       |
| <b>Tereftálica</b> | Anhídrido Maleico                    | Ácido ftálico                        | Propilenglicol                  | Estireno        | Ingeniería química, resistencia química mejorada.              |

En la tabla 2, se especifica la referencia según la empresa productora, el tipo según su naturaleza y sus propiedades químicas y físicas, según se establecen en la ficha técnica de las resinas que finalmente fueron seleccionadas.

Tabla 2. Descripción de aspectos químicos y físicos de las resinas seleccionadas.  
Fuente: El autor. En referencia a las fichas técnicas de los materiales.

| <b>Referencia CRISTALAN</b>   | <b>R 851</b>        | <b>R872</b>           | <b>R835</b>  |
|-------------------------------|---------------------|-----------------------|--------------|
| <b>Naturaleza propiedades</b> | Ortoftálica         | Isoftálica            | Tereftálica  |
| <b>Apariencia</b>             | Transparente rosada | Amarilla transparente | Ámbar turbio |
| <b>Valor acido</b>            | 42 máximo           | 33 maximo             | -----        |

|   |           |           |            |
|---|-----------|-----------|------------|
| <b>Viscosidad Brookfield (cps), 25°C, (Aguja 3, 10 r.p.m.).</b>       | 400 - 600 | 600 - 800 | 600 - 1200 |
| <b>% solidos</b>  | 60 - 62   | 66 - 70   | 63 - 65    |
| <b>Tiempo de gel a 25° C, minutos.* reactividad (100 gr * 1% MEK)</b> | 9 - 12    | 14 -17    | 9 - 12     |
| <b>Temperatura exotérmica °C</b>                                      | 140 - 160 | 70 - 90   | 130 - 160  |
| <b>Tiempo exotérmico. minutos</b>                                     | 15 - 30   | 30 - 40   | 20 - 50    |
| <b>Dureza Barcol (modelo GYZJ - 934-1)</b>                            | 45        | -----     | 38 - 42    |
| <b>Resistencia a la tensión, MPa</b>                                  | 62        | -----     | 53         |
| <b>Modulo tensión, MPa</b>  | 4400      | -----     | 2900       |
| <b>Elongación a la ruptura, %</b>                                     | 1.80      | -----     | 5          |
| <b>Resistencia a la flexión, MPa</b>                                  | 105       | -----     | 94         |
| <b>Modulo flexión, MPa</b>  | 3900      | -----     | 3200       |

### **3.3. Ensayo de reactividad SPI<sup>12</sup>:**

Por medio de este ensayo se espera determinar:

- Los tiempos de gel (t gel): tiempo transcurrido desde la reacción de los reactivos a la resina, hasta la observación del primer “síntoma” de gelificación.

- La temperatura exotérmica (P exo): es la temperatura máxima alcanzada por la resina durante la polimerización.
- El tiempo exotérmico: es el tiempo en el que se presenta el pico exotérmico.
- Intervalo de tiempo de gel - pico exotérmico: tiempo transcurrido entre la gelificación de la resina y el pico exotérmico.

Se definen las muestras, sobre las cuales se comienza a variar las proporciones de catalizador suministradas. Es de vital importancia para la obtención de resultados concluyentes, tomar cantidades de muestras lo mas similares posibles y utilizar el mismo tipo de recipiente, con el fin de controlar posibles causas de error al ejecutar la prueba. En este sentido, hay que tener en cuenta la temperatura y la humedad relativa en el ambiente. Dichas variables influyen directamente en la transmisión de calor al exterior y en posibles reacciones no deseadas con la resina, por lo que pueden repercutir en los resultados finales.

Los valores que se obtienen dependen de diversos factores:

- De la naturaleza o inhibición de la resina.
- De la naturaleza del propio sistema catalítico: en caliente el aumento del porcentaje de catalizador reduce el tiempo de gel y el de la polimerización. En frío, para una combinación dada el acelerador influye en los tiempos de gel, mientras que el catalizador reduce el tiempo de polimerización y aumenta el pico exotérmico.

En relación a los porcentajes de catalizador, estos se deben utilizar desde el 1% hasta el 3%, debido a que por fuera de este rango, ya sea por encima o por debajo, no se puede garantizar que una vez preparada la resina, quede bien

polimerizada, lo que significaría una reducción en sus propiedades físicas y química<sup>13</sup>.

#### **3.4. Ensayo de viscosidad relativa para materiales reactivos:**

Con el fin de conocer el comportamiento del material a la hora de fluir sobre una superficie en función del tiempo y del desplazamiento, se pretende realizar el ensayo de la viscosidad relativa de materiales reactivos para las resinas de poliéster insaturado. La implementación de la medida se realiza para obtener el índice de fluidez expresado en gramos sobre segundos (g/s), que servirá para comparar los resultados y determinar que configuración de las materias primas evaluadas se acopla más a los requerimientos buscados.

Para el caso de las resinas de poliéster insaturado, los resultados dependerán de la naturaleza de las resinas y de los porcentajes de catalizador suministrado en cada muestra. Cabe resaltar que se debe ejecutar el ensayo de forma controlada y bajo los mismos parámetros, con el fin de que los resultados sean comparables entre sí. Adicionalmente, hay que tener en cuenta la temperatura y la humedad relativa en el ambiente. Dichas variables influyen directamente en la transmisión de calor al exterior, y por tanto repercuten en el resultado final obtenido.

A raíz de la necesidad de implementar este ensayo, y en consecuencia de que en la universidad no existía el equipo requerido para el mismo, se procedió a realizar un fluidímetro (ver figura 2) con el cual se pudiera ejecutar el ensayo, con la ventaja de que la superficie sobre la cual fluiría el material, era de las mismas condiciones de los moldes piloto, por lo que los resultados se replicaban de la misma forma a la hora de procesar las resinas por rotomoldeo.



Figura 2. Fluidímetro.  
Fuente: El autor.

### **3.5. Moldes para rotomoldeo de termoplásticos:**

Para el rotomoldeo de termoplásticos, existen dos tipos de moldes, que son:

#### **3.5.1. Chapa metálica:**

Los moldes de lámina metálica o chapa metálica, son moldes formados en frío, mediante procesos de punzonado, rolado, doblado, embombado, de soldadura, entre otros, lo que requiere de una gran destreza por parte del fabricante, para replicar la complejidad de las formas del producto final en el molde.

Normalmente se emplean laminas de acero 1020 decapadas, entre los calibres 14 (1.9 mm) y 16 (1.5 mm), la cual sufre un proceso de curado en el horno de rotomoldeo, lo que no permite que se oxide.

La razón por la cual el espesor de los moldes se realiza en este rango, es debido a que la propagación del calor debe ser homogénea, con el fin de garantizar el llenado total de las áreas de la cavidad y a la vez obtener

espesores homogéneos en la pieza rotomoldeada, pues la concentración de calor en puntos específicos, se traduce en un desperdicio de material, en espesores heterogéneos y en un comportamiento mecánico diferente al calculado en la etapa de diseño, pues ese material en exceso en un punto, es material faltante en otro<sup>14</sup>. (Ver figura 3).



Figura 3. Molde para rotomoldeo en chapa metálica.  
Fuente: El autor. Foto tomada en ROTOPLAST S.A

### 3.5.2. Fundición de Aluminio:

Los moldes en fundición de aluminio han estado en existencia desde el inicio de la industria del moldeo rotacional. Las primeras versiones fueron moldeadas en arena, que era la única forma de fabricar, por lo que su uso era muy limitado y en consecuencia exclusivo.

Para 1950 un nuevo bastidor de aluminio se introduce a la técnica de moldeo rotación, que consistió en la implementación de yeso en vez de

utilizar arena. Esta técnica, denominada colada de yeso, ofrece las siguientes ventajas sobre su contraparte de arena:

- Fundición de paredes delgadas, que en consecuencia los tiempos de procesamiento (reducción de tiempo de horno) disminuyen, pues hace una transferencia de calor de forma más rápida y directa. La fundición en arena, por lo regular se debe fabricar con un espesor  $5/8$ " (15.875 mm) a  $3/4$ " (19.05 mm), mientras que piezas moldeadas en yeso, están entre  $1/4$ " (6.35) y  $3/8$ " (9.52 mm).
- Una complicación notable en la fundición de aluminio con bastidor de arena, es la cantidad de poros, que finalmente se replican en las piezas procesadas, obteniendo un acabado superficial irregular. En cambio, la fundición de aluminio en bastidor de yeso, hace que se reduzcan los niveles de porosidad.

Estas dos técnicas todavía son implementadas en la industria del rotomoldeo, y la implementación de una o de la otra radica propiamente en el costo beneficio, pues si se desea crear moldes de bajo costo y donde el acabado superficial de la pieza rotomoldeada no es muy relevante, entonces se utiliza la fundición con bastidor de arena, pero si se requiere que la pieza plástica quede con muy buen acabado superficial, se emplea la fundición con bastidor de yeso, aunque signifique un sobre costo en la manufactura del molde<sup>15</sup>. (Ver figura 4).



Figura 4. Molde de rotomoldeo en fundición de aluminio.  
Fuente: El autor. Foto tomada en ROTOPLAST S.A

Adicional al tipo de material empleado para la fabricación de los moldes, existen múltiples consideraciones que se deben tener en cuenta, estas son:

- Formas:

Aunque existen muchas formas de transformar la materia prima de los moldes para rotomoldeo, existen formas y consideraciones del proceso, que imposibilitan obtener todo tipo de geometrías y a lo que se le suma el costo en función del beneficio.

Cuando se piensa en la fabricación de un producto por rotomoldeo, se debe considerar antes que nada, ángulos de desmolde y líneas de partición, pues en gran medida estos rigen la forma final del producto y el costo del molde, que fluctúa en relación a la mano de obra empleada y a la cantidad de materia prima.

Por lo general, cuando ya se han solucionado las consideraciones mencionadas anteriormente en el producto, se procede a evaluar la posibilidad de ser fabricado, teniendo en cuenta factores propios de la tecnología existente, de la precisión requerida y del espesor a formar,

así pues, se debe conocer los radios permisibles de rolado, los ángulos de múltiples dobleces, los cortes según los dados de la punzonadora, los diámetros de los repujados, las dobles curvaturas en las superficies, los empalmes entre caras mediante el uso de soldadura, la complejidad de la línea de partición, entre otros, pues existen muchas razones que pueden inducir a la fabricación del molde por chapa metálica, que es la evaluación inicial, y otras, a la fabricación de un molde en caliente, que sería en fundición de aluminio, donde las restricciones de forma están ligadas al proceso de rotomoldeo y no al del proceso del molde, pero donde la diferencia entre costos y acabados puede ser notable, por lo que se asume como la segunda opción. Ver figura 5.



Figura 5. Molde de rotomoldeo – draga.

Fuente: El autor. Foto tomada en ROTOPLAST S.A

- Acabado superficial:

Los acabados superficiales, que cobran relevancia para el molde, son propiamente los que se quieren replicar en el producto final, lo que hace

que este proceso sea muy versátil en cuanto a las texturas, pues se puede ejecutar procesos como:

- *Granallado:*

Consiste en la proyección de partículas abrasivas (granalla) a gran velocidad (65 - 110 m/s) que, al impactar con la pieza tratada, produce hendiduras en la superficie. Esta textura resultante es conocida como “cascara de naranja”<sup>16</sup>.

- *Sandblasting:*

Al igual que el proceso de granallado, se proyectan partículas abrasivas, que en este caso es tierra, donde lo fino de esta determina el tipo de textura. Adicional a esto, este mismo proceso de aspersion a altas presiones sobre las superficies, se puede hacer con sílice, corindón, escoria de cobre, microesferas de vidrio, agua a presión, entre otras, cuyo resultado difiere uno del otro, ya sea por la forma o por la capacidad de impregnación en relación a la profundidad.

- *Grafilados:*

Mediante el uso de rodillos preformados, se presiona la superficie hasta transferir el patrón geométrico que se encuentra en el rodillo. Por lo general es un patrón de líneas diagonales entre cruzadas, muy común para mejorar el agarre para la manipulación, aumentando los índices de fricción superficial.

- *Ataque químico (solo para chapa metálica):*

El uso de éste proceso es muy común para realizar grabados de bajo o alto relieve, pero de poco espesor, si se considera el espesor de la materia prima para los moldes de rotomoldeo. Consiste en imprimir la imagen que se desea instaurar en el molde en un papel adhesivo (especial para el proceso), teniendo en cuenta que queda en alto relieve y en consecuencia en bajo relieve en la pieza; luego, a la intemperie, se vierte en la superficie un ácido que corroe el acero y ataca las zonas que no están cubiertas, formando el negativo de la imagen impresa. Los espesores obtenidos en este proceso, por lo general están entre 0.8 mm a 1.2 mm, sin influir, finalmente, en el desmolde de la pieza fabricada.

- *Acabado espejo:*

Al finalizar el pulido de la superficie interna del molde, que se efectúa normalmente con gratas, se adiciona un proceso felpado, que brilla la superficie y que se replica al producto final, quedando con caras brillantes y lisas. Muchas veces para ahorrarse dicho proceso en el molde, prefieren realizarle un post proceso a la pieza final, conocido como flameado, que es la exposición a una llama abierta, que funde someramente la capa externa del producto, aumentando su brillo.

- *Laminas estándar (solo para chapa metálica)*

En el mercado se puede encontrar un sinfín de patrones geométricos sobre las laminas de acero, a las cuales se les denomina como alfajor o anti deslizantes, pero que para el proceso de rotomoldeo se emplea para generar texturas en

función de la forma y hasta reforzar caras planas para evitar pandeo.

- Flanche:

Los moldes de rotomoldeo como mínimo deben contar con 2 cavidades, cuentan adicionalmente con un fleje de 2" de ancho por 5/16" de espesor (generalmente), que rodea la periferia de las líneas de partición, siendo este quien determina el registro del mismo molde y el portador de los sistemas de sujeción para el ensamble entre cavidades. (Ver figura 6).

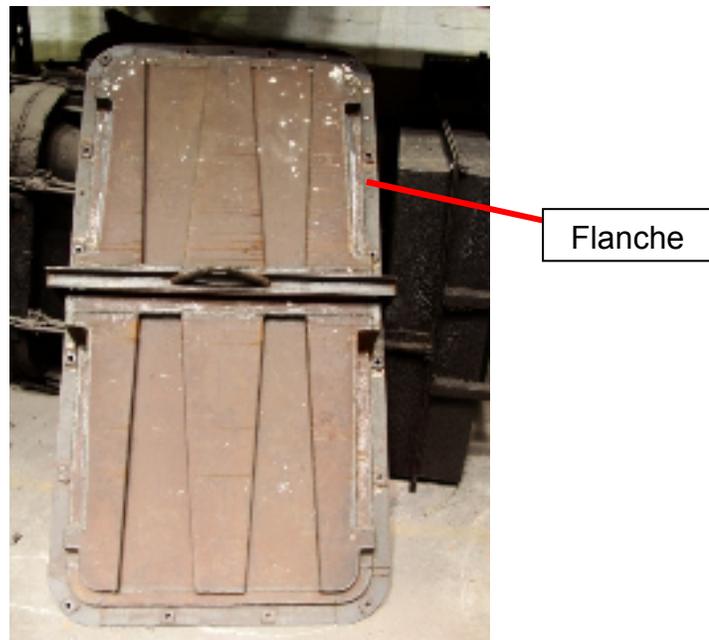


Figura 6. Molde de rotomoldeo – tapa contenedor multiusos – flanche.  
Fuente: El autor. Foto tomada en ROTOPLAST S.A

- Sistemas de cierre:

Existen dos sistemas de cierre en los moldes de rotomoldeo, el más común es el sistema de clamps, que es un mecanismo de cuatro barras, de cierre y apertura rápida, de un alto costo en relación a la segunda opción, que es un sistema de cierre mediante el uso de tornillería (Ver

figura 7), que aunque no es tan ágil, funciona eficientemente, impidiendo que se evacue el material en el momento en que se somete a las rotaciones biaxiales; claro que la agilidad de ensamble, mencionada anteriormente, puede mejorarse mediante pistolas neumáticas, que garantizan también un buen sello.



Figura 7. Detalle - molde draga – sistema de cierre.  
Fuente: El autor. Foto tomada en ROTOPLAST S.A

- Insertos:

Para el diseño de un producto rotomoldeado, se debe hacer una evaluación de la naturaleza y la posición de la línea de partición, con el fin de crear el mínimo número de cavidades posibles. Sin embargo, en muchos casos, el diseño puede tener geometrías que no saldrían del molde y que no ameritarían la creación de otra cavidad, por lo que se crean elementos extraíbles para facilitar la retirada de la parte y la conformación de la pieza según sean los requisitos (ver figura 8). Los casos más comunes son la conformación de roscas y agujeros, que al finalizar se retiran de la pieza y se emplea para conformar otra.

Otro tipo de insertos, son los fijo, que son elementos que al igual que los insertos móviles se introducen en el molde a la hora de ser procesados, con la diferencia de que estos quedan incrustados en la pieza y hace parte del producto final, evitándose un posible pos procesamiento, que se puede traducir en la eficiencia del proceso y en una reducción de costo operativo.



Figura 8. Detalle - molde sum – inserto extraíble.  
Fuente: El autor. Foto tomada en ROTOPLAST S.A

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los ensayos que se presentan a continuación, sobre las tres resinas de poliéster insaturado (ver marco teórico) son básicos y pretenden inicialmente, conocer su comportamiento en función de los porcentajes de catalizador suministrados, para que finalmente se pueda determinar los criterios apropiados para el procesamiento de dichos materiales, a través de la técnica de rotomoldeo y constatar los resultados en un producto a escala real, en el cual se evidencie las ventajas del proceso y de la composición (resina + catalizador) del material.

### **4.1. Ensayo de reactividad SPI:**

Este primer ensayo es con el fin de conocer los tiempos de gel y los picos exotérmicos (ver marco teórico) de las resinas de poliéster insaturado, a medida que se realiza una variación en el porcentaje de catalizador suministrado, para luego compararlas entre si y generar el primer filtro, en relación a los tiempos de montaje y procesamiento de los materiales termoplásticos en el proceso de rotomoldeo<sup>i</sup>.

#### **4.1.1. Equipo para el ensayo:**

En la tabla 3, se presentan los equipos requeridos para la ejecución del ensayo de reactividad para las resinas de poliéster insaturado, los cuales fueron suministrados por el laboratorio de suelos de la universidad de EAFIT.

---

<sup>i</sup> La documentación del ensayo se encuentra en el CD adjunto al trabajo de grado, como Anexo 1 – documentación ensayo de reactividad SPI.

Tabla 3. Equipo requerido para el ensayo de reactividad SPI.

Fuente: El autor.

| CANTIDAD | DESCRIPCION           | imagen   | ANOTACIONES                                  |
|----------|-----------------------|--|--|
| 1        | Multímetro            |    | Ubicarlo para medición en °C                 |
| 1        | Termocupla tipo K     |    | Conectarla al multímetro                     |
| 1        | cronometro            |   | Tomar el tiempo de reacción de las muestras. |
| 1        | Balanza digital       |  | Medición de centésimas de gramos             |
| 18       | Vasos desechable (PE) |  | Para almacenar las muestras                  |
| 1        | Agitador              |  | Para revolver las muestras                   |

|   |                    |  |   |
|---|--------------------|--|---|
| 1 | Termómetro digital |  | Medir la temperatura y la humedad relativa del ambiente |
|---|--------------------|--|---|

#### 4.1.2. Procedimiento:

El ensayo se realiza sobre las tres resinas seleccionadas (ver marco teórico -R835 Tereftálica, 851 ortoftálica y 872 Isoftálica), 6 veces por cada resina, en una muestra de 100 g nominales, que se depositan en el vaso desechable, siendo mezcladas con el catalizador (peróxido de metil etil cetona (MEK)), en las proporciones que se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Porcentaje de catalizador en relación al número de la muestra y a su referencia comercial.

Fuente: El autor.

| Referencia de la Resina de poliéster insaturada CRISTALAN | Número de la muestra | % de catalizador MEK |
|---|----------------------|----------------------|
| R835  | M1                   | 1.0                  |
|   | M2                   | 1.4                  |
|   | M3                   | 1.8                  |
|   | M4                   | 2.2                  |
|   | M5                   | 2.6                  |
|   | M6                   | 3.0                  |
| R851  | M7                   | 1.0                  |
|   | M8                   | 1.4                  |
|   | M9                   | 1.8                  |
|   | M10                  | 2.2                  |
|   | M11                  | 2.6                  |
|   | M12                  | 3.0                  |
| R872  | M13                  | 1.0                  |
|   | M14                  | 1.4                  |
|   | M15                  | 1.8                  |
|   | M16                  | 2.2                  |
|   | M17                  | 2.6                  |
|   | M18                  | 3.0                  |

Una vez se tengan los 100 gramos de resina mezclados con el porcentaje correspondiente según la muestra, se introduce la

termocupla tipo K en ésta (entre 0.5 a 1 cm), con el fin de censar la temperatura inicial, en este mismo momento se debe registrar la temperatura del ambiente y de la humedad relativa del mismo, para que luego se comience a mezclar la muestra durante un minuto. Transcurrido este tiempo se continua realizando la medición de la temperatura de la muestra cada 0.5 minutos a la distancia especificada.

A medida que se está realizando la prueba, se deben determinar el tiempo de gel y el tiempo de exotermia.

#### 4.1.3. Resultados obtenidos:

Durante el periodo de realización de estos ensayos, se tuvieron en cuenta las condiciones del ambiente ( $T^{\circ}$  y RH), las cuales fueron variables, debido a que los ensayos no se realizaron en un ambiente controlado, lo que se asume como una posible causa de error, debido a que la humedad puede afectar la polimerización de la resina.

Una vez se obtengan los resultados, se tabula la información y se compara los resultados, en función de la implementación de este material en el proceso de rotomoldeo, con el fin de generar un primer filtro que nos ayude a reducir la cantidad de materiales a utilizar.

- **Resina Cristalán R835 / Tereftálica.**

Para este ensayo se emplearon seis muestras de resina de poliéster insaturado de naturaleza tereftálica, teniendo como única variable, el porcentaje de catalizador, donde se destaca la relación entre temperatura y tiempo, tanto del punto de gel como el de exotermia.

En la figura 9, donde se realiza una comparación de temperatura de gel y de exotermia, se puede evidenciar que las temperaturas de gel no guardan un comportamiento ascendente a medida que se aumentan las proporciones de catalizador, razón que puede adjudicarse a que la polimerización apenas comienza a gestarse, induciendo a que el calor liberado en la muestra no sea homogéneo en ella misma y más si se considera que la evaluación de las condiciones de gelificación, son cualitativas, por lo que la medición es susceptible de un error humano en cuanto a la percepción del cambio de estado. Adicionalmente, influyen las condiciones ambientales, como la temperatura y la humedad relativa, las cuales no se controlaron, repercutiendo finalmente en la disminución o aceleración del punto de gel.

Por otro lado, la temperatura de exotermia en las muestras, se comporta de forma ascendente en función del aumento de las proporciones de catalizador, razón por la cual se evidencia una relación directamente proporcional entre la temperatura y la cantidad de catalizador suministrada.

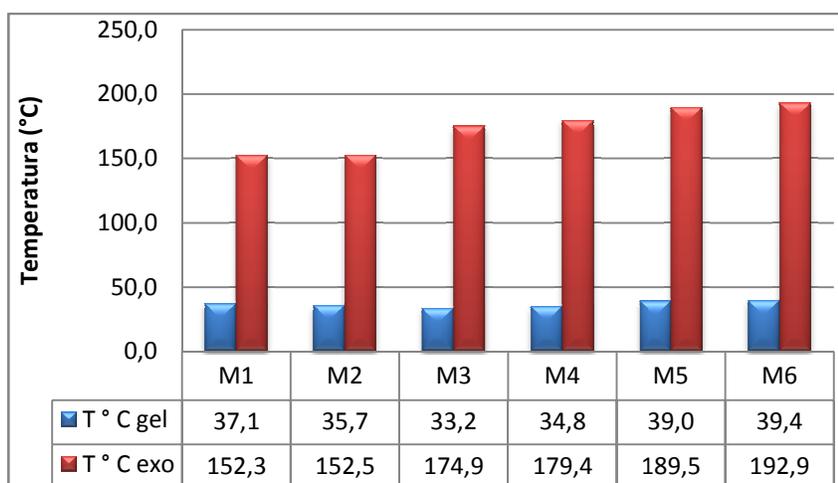


Figura 9. Comparación de la Temperatura de gel y de exotermia de las 6 muestras de la resina tereftálica R835. P(T°= 27.6°C, RH= 43%).

Fuente: El Autor.

En cuanto al tiempo en que se presentan estos dos momentos en la polimerización de la resina (ver figura 10), se puede evidenciar una tendencia descendente a medida que se aumenta el porcentaje de catalizador, por lo que se efectúa una relación inversamente proporcional, hecho que se vuelve concluyente en el momento en que se relaciona la temperatura en función del tiempo, pues se evidencia que conforme se aumenta la cantidad de catalizador en las muestras la temperatura se eleva y el tiempo en que se presentan estas dos etapas, disminuye, generando una relación inversamente proporcional entre tiempo y temperatura.

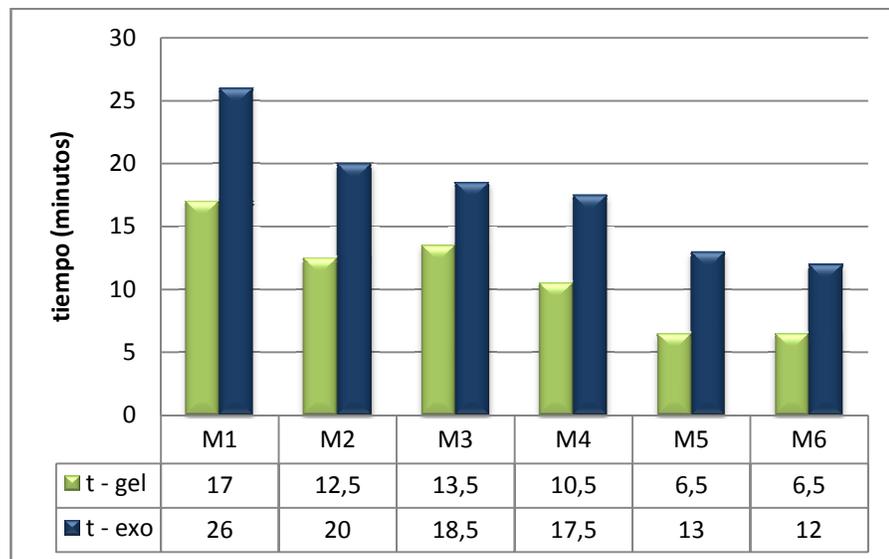


Figura 10. Comparación de los tiempo de gel y de exotermia de las 6 muestras de la resina tereftálica R835.

Fuente: El autor.

▪ **Resina Cristalán R851 / Ortoftálica.**

Para este ensayo se emplearon seis muestras de resina de poliéster insaturado de naturaleza ortoftálica, teniendo como única variable, el porcentaje de catalizador, donde se destaca

la relación entre temperatura y tiempo, tanto del punto de gel como el de exotermia.

Como se puede evidenciar en la figura 11, la temperatura censada en las muestras de la resina de naturaleza ortoftálica, para el punto de gel se presenta una tendencia ascendente en función de la proporción de catalizador suministrado, teniendo una relación directamente proporcional, pues a mayor cantidad de catalizador mayor es la temperatura en el momento en que la muestra se gelifica. A diferencia del punto de gel, las temperaturas para el punto exotérmico no presentan una tendencia definida en los datos arrojados, lo que se le puede adjudicar a la temperatura y la humedad relativa del ambiente, las cuales eran variables y no era posible controlar, repercutiendo finalmente en la disminución o aceleración del punto de gel.

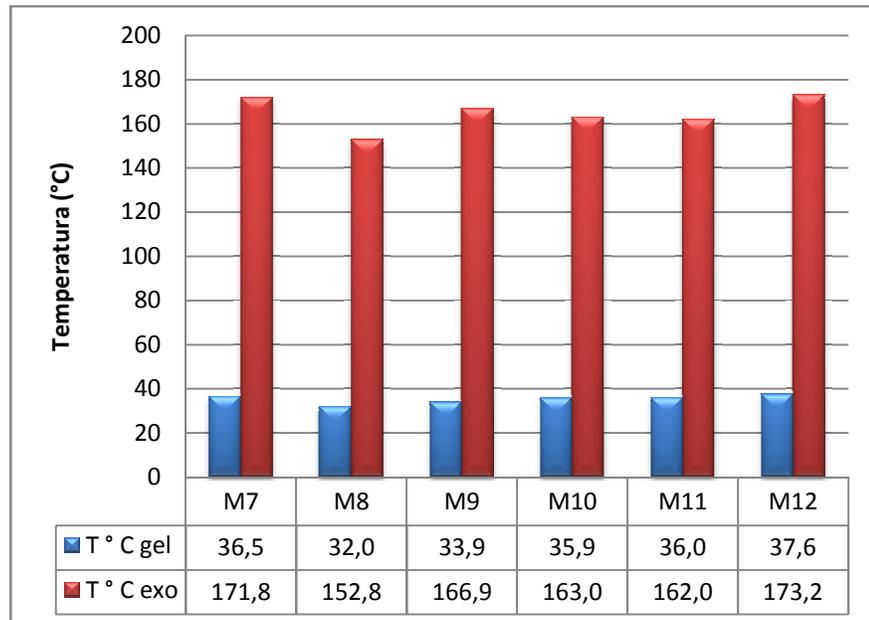


Figura 11. Comparación de la Temperatura de gel y de exotermia de las 6 muestras de la resina ortoftálica R851. P(T°= 27.0°C, RH= 51%)

Fuente: El autor.

En relación a los datos suministrados en la figura 12, donde se presentan los tiempos de gel y de exotermia de la resina en cuestión, se puede observar que para estos dos momentos destacados, existe un comportamiento descendente en función del aumento en las proporciones de catalizador, presentándose una relación inversamente proporcional.

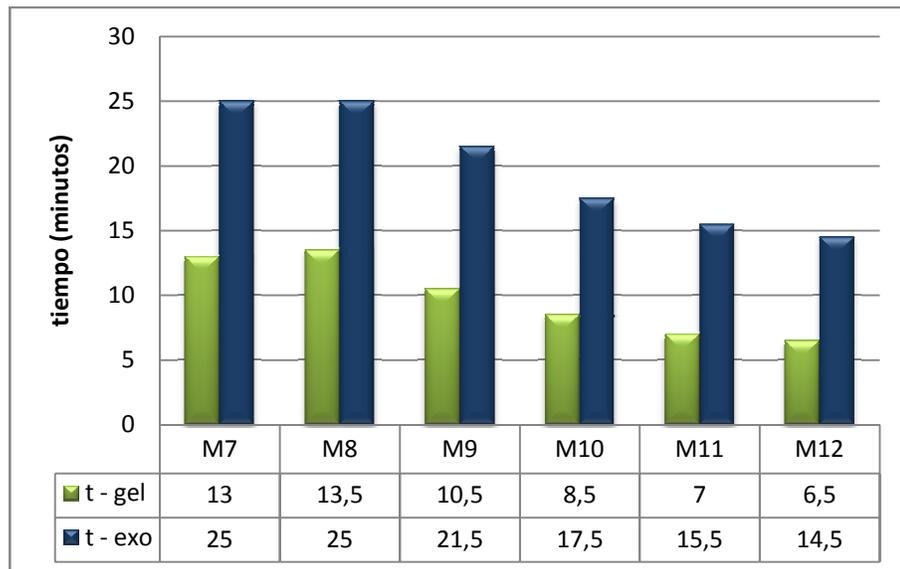


Figura 12. Comparación de los tiempo de gel y de exotermia de las 6 muestras de la resina ortoftálica R851.

Fuente: El autor.

Por lo tanto, a mayor porcentaje de catalizador la reacción se presenta a más corto tiempo, efectuándose un aumento en la temperatura de la muestra.

- **Resina Cristalán R872 / Isoftálica.**

Para este ensayo se emplearon seis muestras de resina de poliéster insaturado de naturaleza isoftálica, teniendo como única variable, el porcentaje de catalizador, donde se destaca la relación entre temperatura y tiempo, tanto del punto de gel como el de exotermia.

Para las temperaturas de los tiempos de gel y de exotermia (ver figura 13), en las muestras de la resina de naturaleza isoftálica, se evidencia que en ninguno de los dos momentos, se presenta una tendencia uniforme en relación a la cantidad de catalizador suministrado, razón que puede adjudicarse a las condiciones ambientales, pero que finalmente muestran una alta inestabilidad, lo que complica el hecho de establecer un patrón.

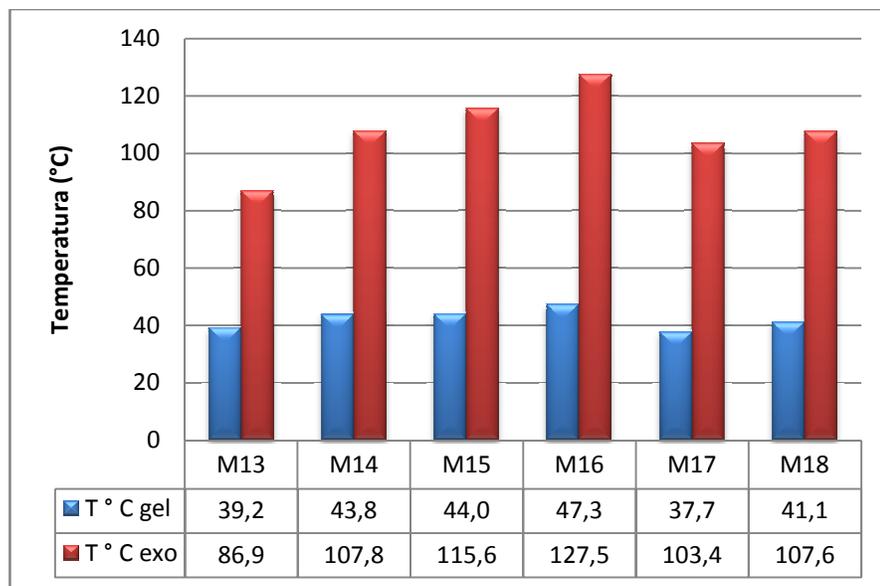


Figura 13. Comparación de la Temperatura de gel y de exotermia de las 6 muestras de la resina Isoftálica R872. P(T°= 27.0°C, RH= 54%)  
Fuente: El autor.

En relación a la figura 14, el tiempo en el que se presentan los puntos de gel y de exotermia, tiene la tendencia a disminuir a medida que se aumenta la proporción del catalizador, pero dicho comportamiento varía en gran medida en las dos últimas muestras, lo que reafirma la inestabilidad del material y lo difícil de predecir su comportamiento reactivo en función del tiempo.

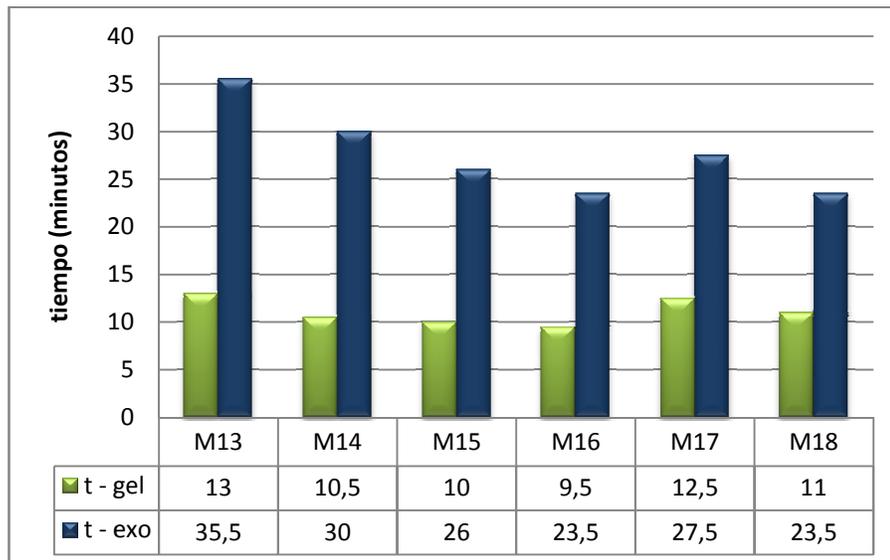


Figura 14. Comparación de los tiempo de gel y de exotermia de las 6 muestras de la resina isoftálica R872.

Fuente: El autor.

En relación a éste comportamiento evidenciado en las dos figuras anteriores, donde existe una notable inestabilidad, dificultaría el acoplamiento de dicho material en el proceso de rotomoldeo, pues las variables no se podrían controlar, llenando de incertidumbre los resultados e imposibilitando la estandarización del proceso.

#### 4.1.4. Discusión de resultados:

Como se puede observar en las figuras anteriores, la reactividad de estas tres resinas en frío, a partir de variaciones en el porcentaje del 1% al 3% en intervalos de 0.4%, está directamente relacionada con los tiempos de gel y de exotermia, y se presenta como común denominador, el hecho de que a mayor porcentaje de catalizador (MEK peróxido) los tiempos referidos anteriormente, que abarcan el proceso de polimerización, se presentan más rápido, acelerando la reacción y haciendo que estén durante su proceso exotérmico llegue a altas temperaturas.

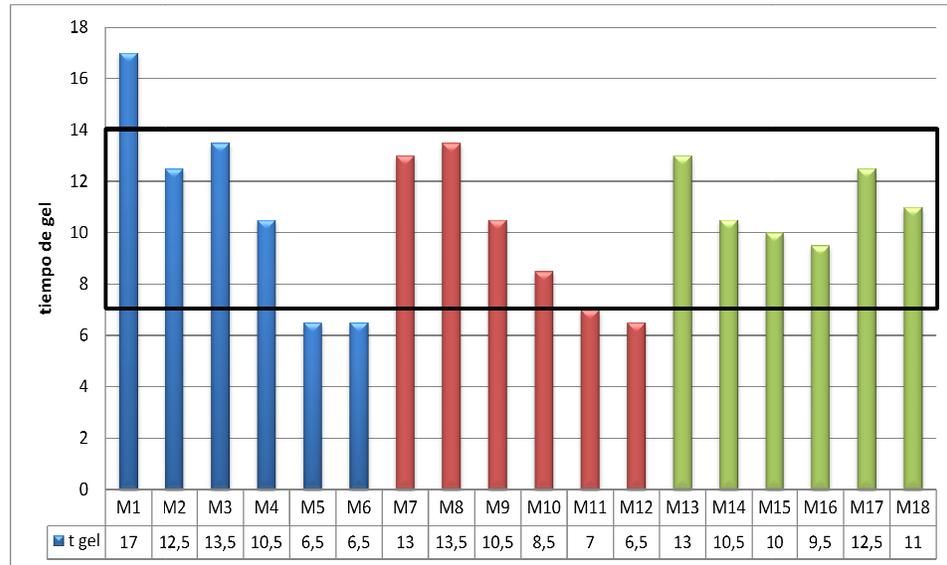
Así pues, puede concluirse que la estabilidad en la polimerización está supeditada a las condiciones de procesamiento del material, tanto a la temperatura como a la humedad del ambiente, sin excluir la naturaleza de la resina, que según su funcionalidad son sus propiedades y comportamiento físico.

Para la implementación de los materiales reactivos en el proceso de rotomoldeo, debe tenerse en consideración, los tiempos requeridos para cargar el material, el cierre del molde, la etapa de calentamiento y la de enfriamiento (*ver marco teórico*), que normalmente se llevan a cabo en el procesamiento de materiales termoplásticos, claro está, que se debe tener en cuenta la diferencia entre los materiales, pues finalmente son los criterios requeridos para la diferenciación en el proceso.

Por tal motivo, teniendo en consideración los tiempos promedio para el procesamiento de materiales termoplásticos (*tiempo de horno: entre 8 y 14 minutos, tiempo de enfriamiento: 14 y 22 minutos (ver marco teórico)*), se realizaron unos filtro a partir de las características antes mencionadas, con el fin de encontrar el material y la composición que mejor se desempeñe en el proceso de rotomoldeo.

- FILTRO 1:

En la figura 15, se establece una comparación entre los tiempos de gel de las tres resinas de poliéster insaturado evaluadas, y se realiza un filtro, seleccionando las muestras que se encuentren entre 8 a 14 minutos del tiempo referido, tiempo que se establece necesario para cargar el molde y ponerlo a procesar.



R. Tereftálica ■ R. Ortoftálica ■ R. Isoftálica ■

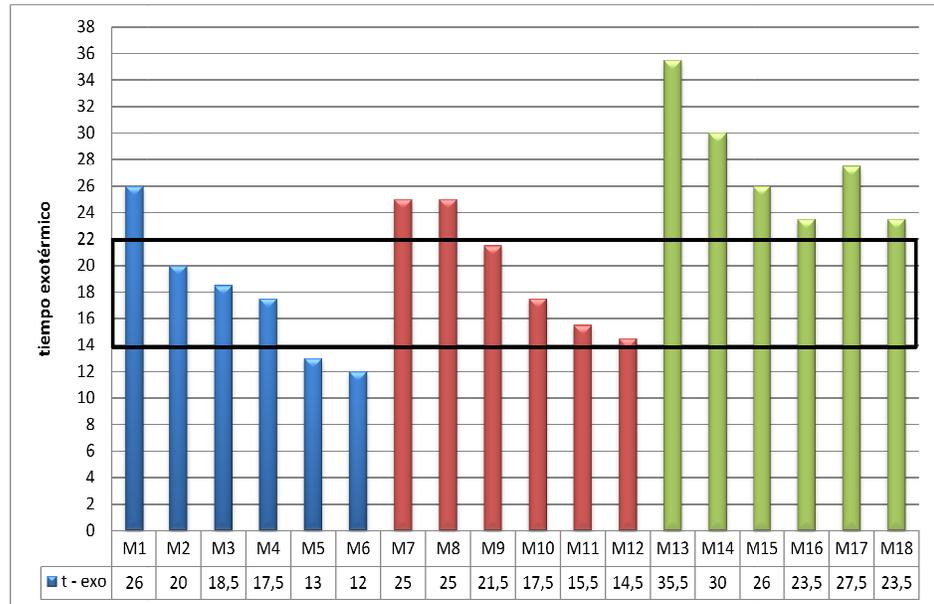
Figura 15. Filtro según los tiempos de gel de las 3 resinas evaluadas en el ensayo de reactividad SPI.

Fuente: El autor.

Las muestras que están dentro de este rango son: M2 - M3 - M4 - M7 - M8 - M9 - M10 - M13 - M14 - M15 - M16 - M17 - M18.

- **FILTRO 2:**

Se establece como segundo filtro un rango de 14 a 22 minutos de tiempo exotérmico, para hacer más eficiente el proceso, en función del tiempo de polimerización o conformación de la pieza. (ver figura 16).



R. Tereftálica    ■    R. Ortoftálica    ■    R. Isoftálica    ■

Figura 16. Filtro según los tiempos exotérmicos de las 3 resinas evaluadas en el ensayo de reactividad SPI.  
Fuente: El autor.

Las muestras que están dentro de este rango son:

M2 - M3 - M4 - M9 - M10 - M11 - M12.

Según el resultado de los filtros anteriores, las resinas que cumplen con estos dos criterios son:

Muestra M2    M3    M4    M9    M10

% de MEK    1.4    1.8    2.2    1.8    2.2

Finalmente estos son los porcentajes que se manejarán según la naturaleza de la resina (tereftálica y ortoftálica), para el ensayo de viscosidad relativa para los materiales reactivos.

## **4.2. Ensayo de viscosidad relativa para materiales reactivos.**

Debido a que en el proceso de rotomoldeo la distribución del material se efectúa por acción de la gravedad, es de vital importancia conocer el comportamiento de las resinas a la hora de fluir sobre una superficie, a medida que su viscosidad varía por acción del catalizador suministrado. Por éste motivo se realiza el ensayo de viscosidad relativa para materiales reactivos, y poder evaluar los índices de fluidez respectivos y poder seleccionar la resina requerida para la implementación de materiales termoestables en el proceso de rotomoldeo<sup>ii</sup>.

### **4.2.1. Equipo para el ensayo:**

El equipo que se requiere para este ensayo son los mismos que se emplean para el ensayo de reactividad SPI (ver tabla 3), con la inclusión del fluidímetro (ver figura 2).

### **4.2.2. Procedimiento**

El ensayo se realizará sobre las dos resinas resultantes del filtro realizado en el ensayo anterior (R835 Tereftálica y 851 ortoftálica), donde se prepararan 10 gramos nominales, que se depositan en el vaso desechable, siendo mezcladas con el catalizador (peróxido de metil etil cetona (MEK)), en las proporciones que se indican en la tabla 5.

---

<sup>ii</sup> La documentación del ensayo se encuentra en el CD adjunto al trabajo de grado, como Anexo 2 – documentación ensayo viscosidad relativa.

Tabla 5. Porcentajes de catalizador de las muestras para el ensayo de viscosidad relativa.

Fuente: El autor.

| Referencia de la Resina de poliéster insaturada CRISTALAN | Numero de la muestra | % de catalizador MEK |
|---|----------------------|----------------------|
| R835  | M2                   | 1.4                  |
|   | M3                   | 1.8                  |
|   | M4                   | 2.2                  |
| R851  | M9                   | 1.8                  |
|   | M10                  | 2.2                  |

Una vez se tengan los 10 g de resina mezclados con el porcentaje correspondiente según la muestra, se depositan 3 g en el contenedor del fluidímetro (se debe separar el contenedor para pesar el contenido de la muestra), luego se ensambla nuevamente el contenedor del fluidímetro, que en este momento debe estar en posición horizontal (para los procedimientos anteriores se define un tiempo de espera de 3 minutos), una vez pasado el tiempo de espera para la preparación y el montaje, se pone el fluidímetro de forma vertical, y se empieza la medición, una vez el fluido pase por la marca inicial, a partir de este momento se toma el tiempo cada 7 cm, hasta llegar al punto final, que son 49 cm (ver figura 17).

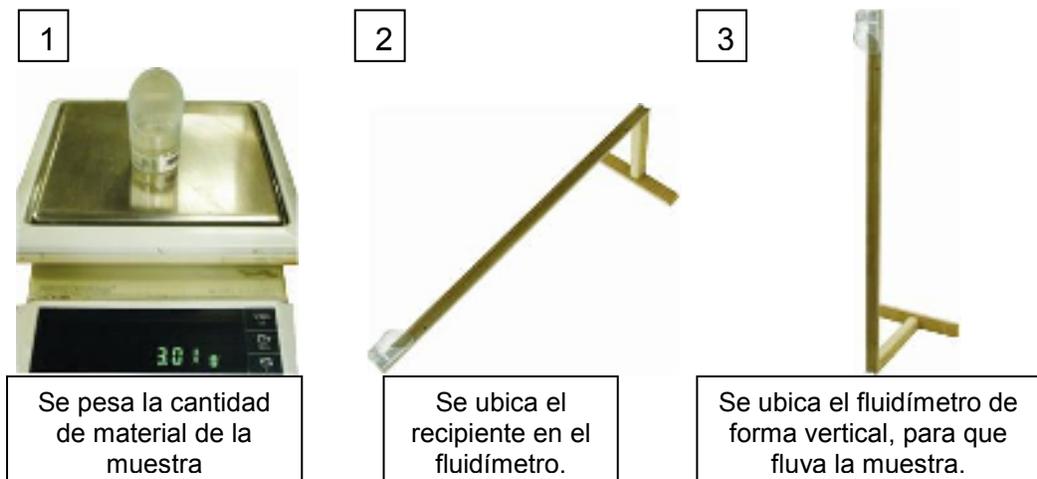


Figura 17. Pasos para el uso del fluidímetro.

Fuente: El autor.

Además, es necesario tener en cuenta que esta es una medida relativa que ha sido implementada para este proceso específico, por lo que el proceso se realizó 3 veces por cada muestra, con el fin de determinar el promedio y la desviación estándar de los resultados obtenidos y finalmente con el resultado del tiempo promedio final, se debe estimar el índice de fluidez ( $I_f = \text{gramos} / \text{segundos}$ ) de cada muestra, con el fin de elegir la resina que posea un mejor comportamiento en función del proceso de rotomoldeo.

**4.2.3. Resultados obtenidos:**

Una vez conocidos los comportamientos de las muestras se define el índice de fluidez (ver figura 18), determinado bajo la relación de la cantidad de material empleada en la muestra en relación al tiempo que fluye a través de una longitud específica.

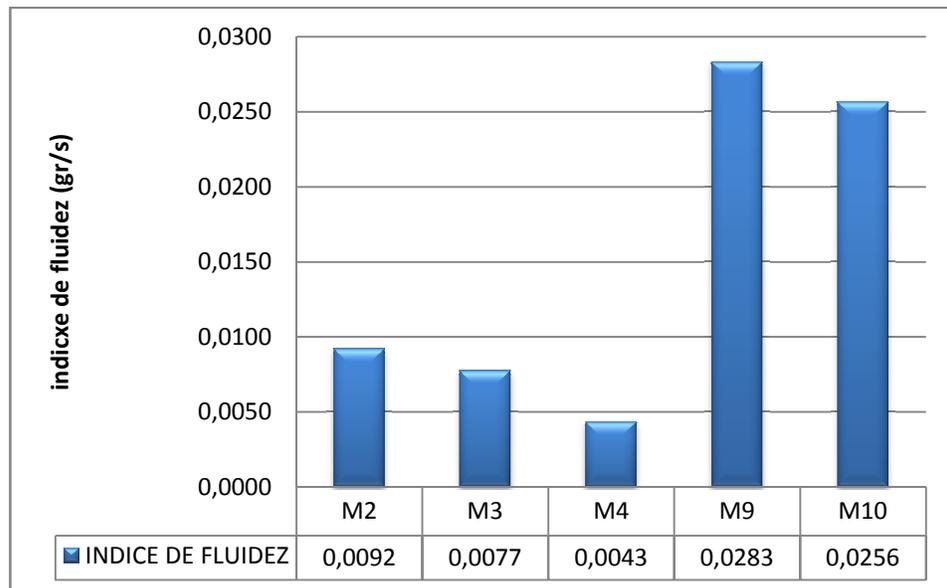


Figura 18. Comparación entre los índices de fluidez de las muestras para el ensayo de viscosidad relativa.

Fuente: El autor.

#### 4.2.4. Discusión de resultados

Como se pudo observar en la figura 18, el comportamiento a la fluidez del material en proceso de polimerización, está directamente relacionado con la cantidad de catalizador suministrado en la muestra, que a medida en que se aumenta la proporción, el tiempo en cubrir la distancia especificada, se vuelve más largo, en consecuencia, la fluidez disminuye.

En el caso de la resina de naturaleza tereftálica, que corresponde a las muestras M2, M3 y M4, la diferencia entre ellas es notable, lo que se aprecia en la diferencia de tiempo que requiere para cubrir la distancia, que entre M2 y M3 es de un minuto y entre M3 y M4 es de dos minutos.

Para el caso de la resina de naturaleza ortoftálica, que corresponde a las muestras M9 y M10, también se evidencia el mismo comportamiento en función del aumento de catalizador, al igual que con las muestras de la resina de poliéster insaturado de naturaleza tereftálica, pero sin que la diferencia sea tan notable, pues son solo once segundos de diferencia.

Finalmente, los resultados obtenidos en la figura 18, donde se comparan los índices de fluidez de las muestras, consolida las propiedades de fluidez de los dos tipos de resina implementados en el ensayo y destaca notablemente la eficiencia a la fluidez de la resina de naturaleza ortoftálica en comparación con la resina de naturaleza tereftálica, razón por la cual la primera resina se acoplaría de forma idónea para el proceso de rotomoldeo de termoestables, con el fin de que haga una eficiente distribución por todo el molde.

Por lo tanto, los ensayos para el procesamiento de materiales termoestables por la técnica de rotomoldeo, se efectuarán con la resina de poliéster insaturado de naturaleza ortoftálica y de referencia R851 (según Andercol S.A), con las proporciones de catalizador evaluadas en el ensayo de viscosidad relativa, que puede estar sujeto a cambios según se considere pertinente en relación a los resultados obtenidos.

#### ***4.3. Consideraciones para la fabricación de moldes de rotomoldeo para materiales termoestable.***

Un factor crucial en el proceso de rotomoldeo para termoplásticos, es el desarrollo de los moldes (ver marco teórico), pues de ellos depende en gran medida la calidad del producto final; ya sea en el registro entre las caras, el acabado superficial, la homogeneidad en los espesores de las paredes del molde, los sistemas de cierre, entre otros.

Así pues, para el procesamiento de materiales termoestables por el moldeo rotacional, la mayoría de consideraciones que se deben tener a la hora de fabricar los moldes para el procesamiento de termoplásticos con esta técnica, se deben tener para la fabricación de los moldes para materiales termoestables, considerando los ángulos de salida, las caras, las aplicaciones, ya sean como postizos o como insertos, los flanches, el sistema de cierre y apertura, los acabados superficiales, las geometrías, entre otros. Hay un criterio de vital importancia para los moldes de termoplásticos que no se requiere para los moldes de termoestables, el cual es la conservación de un espesor homogéneo en las paredes del molde, que es crucial en cuanto a la transferencia de calor que debe haber a la hora de

introducir el molde al horno, pues de esta manera se garantiza que el calor se propague de forma homogénea en toda la superficie interna del molde, fundiendo el termoplástico y generando espesores homogéneos con variaciones de más o menos 0.5 mm. Adicionalmente, a esta consideración, está ligada la implementación del material que debe tener muy buenas propiedades de propagación térmica, razón por la cual se emplea laminas de acero 1020 o la fundición de aluminio y por su relación costo beneficio.

Pero esta consideración citada anteriormente, no se tiene que tener con los moldes para termoestables, debido a que el proceso de polimerización no se efectúa mediante un factor externo o de forma endotérmica, sino, de forma exotérmica, mediante la combinación de acelerantes y endurecedores. Por este motivo no es estrictamente necesario la implementación del mismo material que se emplea para la fabricación de moldes para termoplásticos, pero si se podrían implementar.

En consecuencia, para la fabricación de moldes para rotomoldeo de termoestables, los materiales que se podrían implementar, son aquellos que no se vean alterados por el pico exotérmico del material, conservando la geometría, que posean resistencia a la fatiga térmica de una constante producción y resistencia a las presiones ejercidas por los sistemas de sujeción.

Estos criterios pueden ser cumplidos por muchos materiales, por lo que el análisis de fabricación finalmente debe recaer en la relación costo beneficio, el cual fluctúa según la forma de procesamiento. En el caso de éste trabajo, los moldes piloto se realizaron en laminas de

PET termoformados, que gracias a su translucidez se pudo evaluar el comportamiento del material en el molde.

Una opción para la fabricación de estos moldes, es la implementación de materiales compuestos, replicando la forma en que se efectúan los moldes para la transferencia de resina (RTM – siglas en inglés), donde se realizan laminados sobre el prototipo del producto a formar, teniendo en cuenta las consideraciones de los ángulos de salida y las líneas de partición, pero se realizan para formar piezas delgadas y para crear materiales compuestos, siendo este proceso el homologado del proceso de inyección para termoplásticos por lo que se requiere de un macho y una hembra, como mínimo. (ver figura 19).

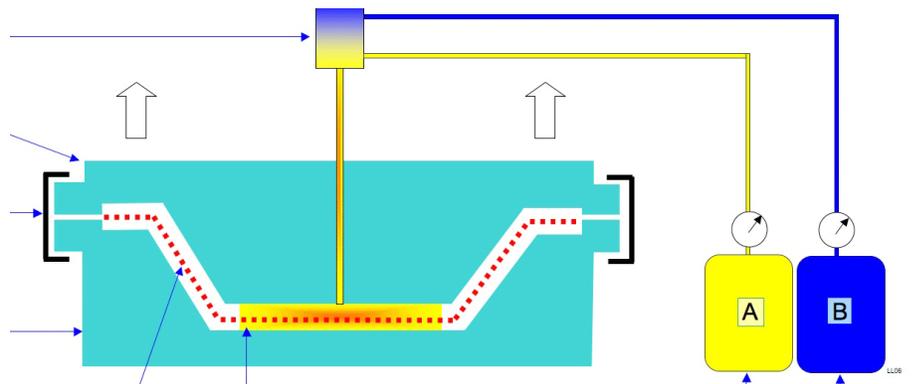


Figura 19. Proceso de RTM<sup>17</sup>.

Para la implementación de la técnica mencionada anteriormente, para la fabricación de moldes para el rotomoldeo de termoestables, se debe hacer la distinción que no se requiere un molde macho hembra, sino solo la cavidad, más todas las consideraciones referidas sobre la fabricación de moldes para rotomoldeo de termoplásticos.

#### **4.4. Ensayo sobre las condiciones de rotación en los ejes de la máquina de rotomoldeo, en función de espesores homogéneos.**

Anteriormente, se hizo alusión sobre la importancia de los moldes para la obtener un producto de buena calidad, siendo este uno de los factores determinantes en el procesamiento por la técnica de rotomoldeo. Pero existe otro criterio que cierra el círculo de los factores determinantes para el proceso de rotomoldeo, y es el de las relaciones de rotación entre los ejes de la maquina, pues depende de ésta, que la aspersion se realice de forma homogénea dentro del molde y así obtener espesores uniformes<sup>iii</sup>. (ver anexo 3).

##### **4.4.1. Equipo para el ensayo:**

El equipo que se requiere para este ensayo, es la utilización de una maquina de rotomoldeo, donde se efectúen las rotaciones biaxiales y donde estas puedan ser controladas. (ver figura 20)



Figura 20. Maquina de rotomoldeo – elaborada para la implementación del proyecto de grado.

Fuente: El autor.

---

<sup>iii</sup> La documentación del ensayo se encuentra en el CD adjunto al trabajo de grado, como Anexo 3 – documentación del rotomoldeo de las muestras.

#### 4.4.2. Procedimiento:

Para la ejecución de este ensayo se definieron tres tipos de geometrías básicas, que fueron: la esfera, el cono y el cubo. Estas fueron moldeadas en madera aglomerada (MDF), a partir de las cuales se realizaron moldes piloto (ver figura 21), por medio del proceso de termoformado, con laminas de PET calibre 40 (1.2 mm de espesor), con el fin de que la translucidez del material permitiera evidenciar el comportamiento de la resina de poliéster de naturaleza ortoftálica, durante las rotaciones biaxiales.



Figura 21. Moldes piloto para el procesamiento de materiales termoestables por la técnica de rotomoldeo.

Fuente: El autor.

Una vez se acoplaron los moldes piloto a la máquina de rotomoldeo, se realizaron las muestras, hasta el punto de obtener tres muestras bien conformadas de cada geometría, sobre las cuales se realizó una primera medición, para determinar la contracción de la pieza en relación a la pieza en madera, y una segunda medición, de los espesores, para conocer la uniformidad en función de las rotaciones de los ejes involucrados en el proceso de rotomoldeo, que mediante una observación cualitativa se iban variando, hasta obtener una relación entre ejes necesaria para una buena conformación de las muestras, que se contrastó determinando el promedio del espesor y a la vez la desviación estándar del mismo, para conocer la tolerancia

dimensional permisible en comparación con el rotomoldeo de termoplásticos.

#### 4.4.3. Resultados obtenidos:

En la figura 22, se aprecian unas de las tres geometrías básicas rotomoldeadas empleando la resina de poliéster insaturado de naturaleza ortoftálica (R851), las cuales cumplían con las características mínimas para tomar las mediciones, que mediante una observación cualitativa, se viera bien conformada la pieza y sin una concentración notable de material en alguna zona específica.



Figura 22. Muestras rotomoldeadas de resina de poliéster insaturado.

Fuente: El autor.

En la tabla 6, se consignan los resultados obtenidos de todas las muestras realizadas, en relación a sus variables, donde se destacan las rotaciones en revoluciones por minuto (RPM) de los ejes de la máquina de rotomoldeo, debido a que de estas depende la distribución del material en la cavidad o molde.

Hay que aclarar que la máquina de rotomoldeo posee 3 ejes, que son: el eje hueco, que es movido por un motoreductor y controlado por un variador de voltaje, el eje mayor, que se encuentra dentro del eje hueco y que a la vez es movido por otro motoreductor y controlado por un variador de voltaje, y por último está el eje menor, que es el resultado de la suma de rotación entre el eje hueco y el eje mayor,

por la relación del sistema piñón corona cónico helicoidal, donde el piñón realiza 1.53 vueltas por cada una de la corona.

**NOTA:** Los espacios que están sin llenar, es debido a la mala conformación de la muestra, por lo que no era posible tomar un medición concluyente para el ensayo, a excepción de la muestra 4 y 11 que fueron la recreación de 2 casos posibles en el rotomoldeo de termoplásticos.

Tabla 6. Muestras rotomoldeadas en relación a las variables a controlar.

Fuente: El autor.

| # de la Muestra | Descripción              | Cantidad (g) | % de MEK | Eje hueco (RPM) | Eje mayor (RPM) | Eje menor (RPM) | Des. Esta. espesor (mm) | % de contracción |
|-----------------|--------------------------|--------------|----------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------------|------------------|
| 1               | esfera                   | 50           | 2.2      | 19              | 11              | 46              | 0.258                   | 3.03             |
| 2               | esfera                   | 100          | 2.2      | 10              | 7               | 26              | 0.430                   | 2.96             |
| 3               | esfera                   | 100          | 2.2      | 10              | 6               | 24              | 0.214                   | 2.66             |
| 4               | semi - esfera postizo    | 50           | 1.8      | 10              | 6               | 24              | -                       | -                |
| 5               | cono - mala conformación | 80           | 2.2      | 10              | 6               | 24              | -                       | -                |
| 6               | cono - mala conformación | 80           | 2.2      | 10              | 3               | 20              | -                       | 2.78             |
| 7               | cono                     | 80           | 1.8      | 10              | 17              | 41              | 0.406                   | 1.95             |
| 8               | cono - mala conformación | 80           | 1.8      | 9               | 13              | 32              | -                       | -                |
| 9               | cono                     | 80           | 1.4      | 20              | 4               | 37              | 0.555                   | 2.89             |
| 10              | cono                     | 80           | 1.4      | 20              | 8               | 43              | 0.134                   | 2.76             |
| 11              | cono - inserto           | 80           | 1.4      | 20              | 8               | 43              | -                       | -                |
| 12              | cubo - mala conformación | 130          | 1.4      | 20              | 8               | 43              | -                       | -                |
| 13              | cubo - mala conformación | 130          | 1.4      | 10              | 1               | 17              | -                       | -                |
| 14              | cubo - fractura          | 130          | 1.4      | 10              | 3               | 20              | -                       | -                |
| 15              | cubo                     | 130          | 1.4      | 10              | 6               | 24              | 0.440                   | 2.62             |
| 16              | cubo                     | 130          | 1.4      | 10              | 8               | 28              | 0.169                   | 3.41             |
| 17              | cubo                     | 130          | 1.4      | 10              | 11              | 32              | 0.140                   | 2.85             |
| PROMEDIO        |                          |              |          |                 |                 |                 |                         | 2.79             |

#### 4.4.4. Discusión de resultados:

Dentro del análisis de las condiciones de rotación de los ejes de la máquina de rotomoldeo, consignado en la tabla anterior (ver tabla 6), se evidenció que en el rotomoldeo de termoestables, hay que tener en consideración algunos factores, como lo son: la cantidad de catalizador suministrado, la forma de la pieza a elaborar, las rotaciones de los ejes hueco, mayor y menor y la posición del molde en la máquina de rotomoldeo.

Como el procesamiento de los materiales termoestables por la técnica de rotomoldeo está ligado a las variables anteriormente mencionadas, pretender llegar a condiciones genéricas del procesamiento se dificulta considerablemente, por lo que fue imposible llegar a estimar las rotaciones en los ejes para cualquier tipo de forma, por lo tanto se estimaron las rotaciones para cada pieza o geometría a formar, lo que involucró un conocimiento previo del comportamiento del material a la hora de fluir y polimerizar dentro del molde, y a iteraciones de ensayo error, donde se constató la validez de las rotaciones en función de la homogeneidad de los espesores, teniendo como margen de tolerancia  $\pm 0.5$  mm, que teóricamente es el margen permisible en el rotomoldeo de termoplásticos (ver marco teórico).

Así pues, se puede llegar a determinar criterios de rotación para geometrías básicas, con el fin de que estos sean los puntos de partida para el procesamiento de productos que tengan cierta similitud formal, y a partir de éste, llegar a la estandarización única de dicha pieza mediante la medición de los espesores y la validación en función de la tolerancia dimensional permisible.

#### **4.5. Producto final:**

La creación de un producto a escala real, es con el fin de constatar la utilización del proceso de rotomoldeo para materiales termoestables, teniendo como base los resultados obtenidos en el estudio anterior.

Por lo tanto, el producto realizado es un cilindro que en interacción con otros cilindros de sus mismas características, tienen la posibilidad de ensamblarse de múltiples maneras, según la intención del usuario, para crear mobiliario con una tendencia vanguardista.

##### **4.5.1. CAD del producto:**

Mediante la utilización de herramientas modeladoras tridimensionales, en este caso Solid Works 2009, se llegó a una aproximación geométrica del producto a fabricar, como se observa en la figura 23.



Figura 23. Modelación del producto final.

Fuente: El autor.

##### **4.5.2. Análisis de elementos finitos:**

A raíz de que el producto final es modular, y puede estar sujeto a múltiples configuraciones y usos, se establece mediante el análisis de

elementos finitos los valores máximos de operación de éste, en relación a las posibles cargas aplicadas sobre los puntos de sujeción o de ensamble.

El software empleado para este análisis fue ANSYS Workbench, en el cual se establecieron las condiciones de barrera del material seleccionado, según la información suministrada en la ficha técnica de la resina de poliéster insaturado de naturaleza ortoftálica (marco teórico) y los 3 mm de espesor que tendría la pieza final.

Así pues, hubo tres simulaciones, en las cuales se aplico la carga en diferentes puntos, estas son:

- Simulación 1:

Como se observa en la figura 24, el soporte se aplica sobre un solo punto de sujeción de la cara superior del producto, y de igual forma la fuerza, se aplica sobre uno de los puntos de sujeción de la cara inferior.

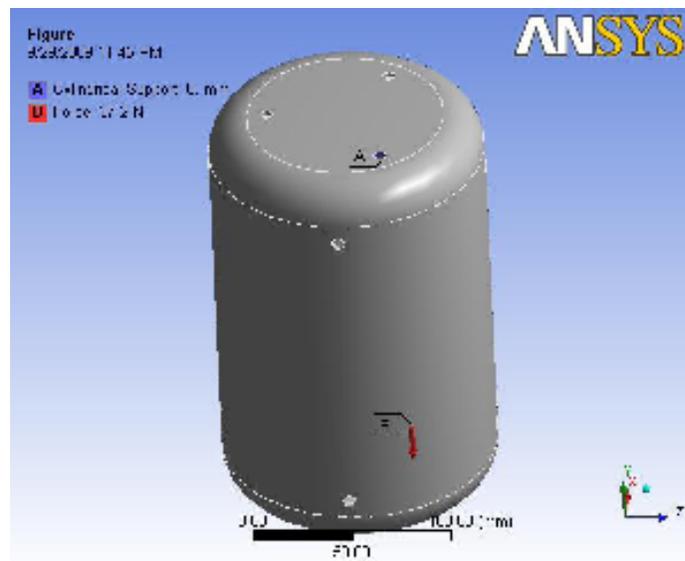


Figura 24. Soporte y fuerza para la simulación 1.

Fuente: El autor.

La carga admisible soportada por la pieza, en los puntos especificados es de 37.2 N es decir de 3.8 Kg, puesto que la resistencia a la tensión del material es de 62 Mpa. Sobre pasada esta carga, se presentaría una fractura, sin presentarse una deformación plástica muy notable, pues la resina de naturaleza ortoftálica presenta una elongación a la ruptura de 1.8%. (Ver figura 25 y 26).

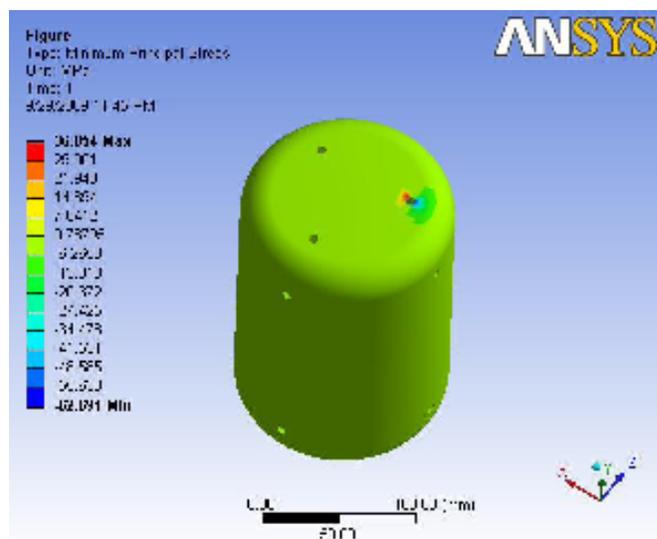


Figura 25. Análisis de esfuerzo mínimo principal – compresión. Simulación 1  
 Fuente: El autor.

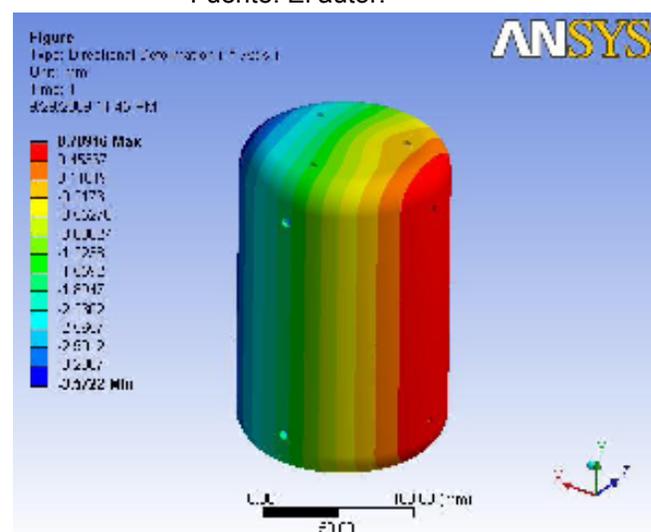


Figura 26. Resultado de Análisis de deformación direccional en el eje Y.  
 Fuente: El autor.

- Simulación 2:

Para esta simulación, el soporte se efectúa sobre los tres puntos de ensamblaje de la cara superior del cilindro y la fuerza se aplica sobre uno de los puntos de sujeción de la cara inferior. (ver figura 27).

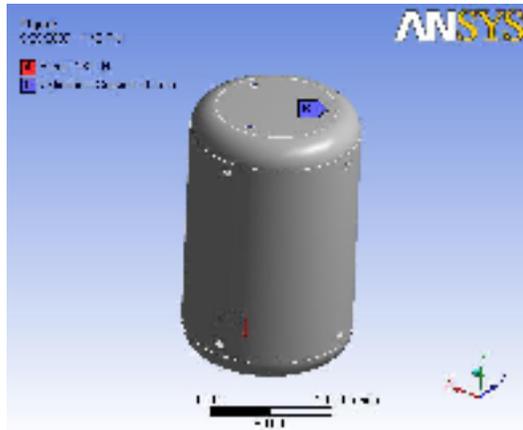


Figura 27. Soporte y fuerza para la simulación 2.  
Fuente: El autor.

Para esta simulación en la que el soporte se realiza sobre los tres puntos de ensamblaje de la cara superior, se evidencia una notable mejoría en relación a la carga soportada, ya que la carga máxima soportada en un solo punto de ensamblaje de las caras inferiores es de 231 N, es decir 23.5 Kg. (ver figura 28).

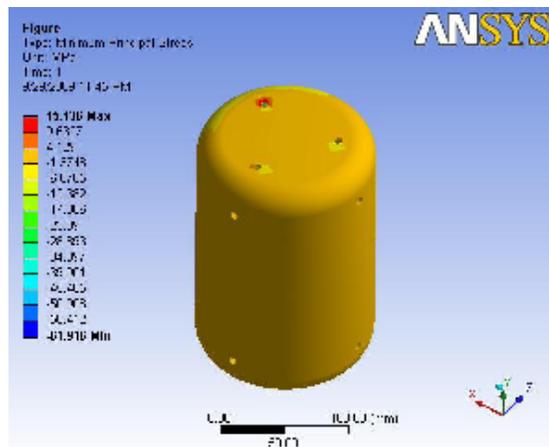


Figura 28. Análisis de esfuerzo mínimo principal - compresión – simulación 2  
Fuente: El autor.

- Simulación 3:

Para esta simulación se recrea el hecho de que el cilindro soporte una carga axial a compresión, aplicada sobre la cara superior del cilindro y simulando como si este estuviera apoyado en el piso. (Ver figura 29).

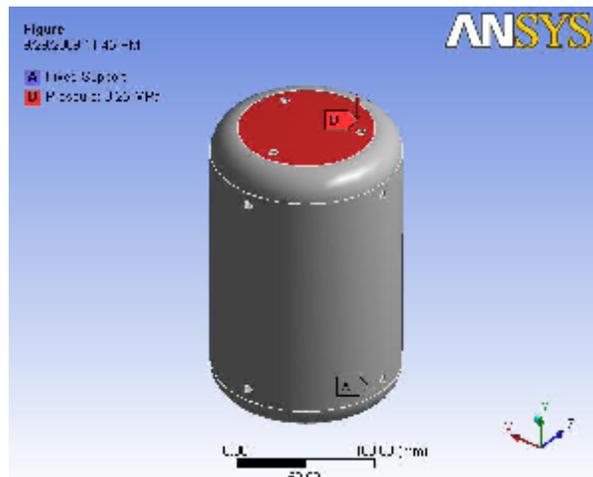


Figura 29. Soporte y fuerza para la simulación 3.  
Fuente: El autor.

Como se observa en la figura 30, la presión máxima permitida es de 0.25 Mpa, que equivale a 1940 N o a 198 kg sobre un área de 7760 mm<sup>2</sup>.

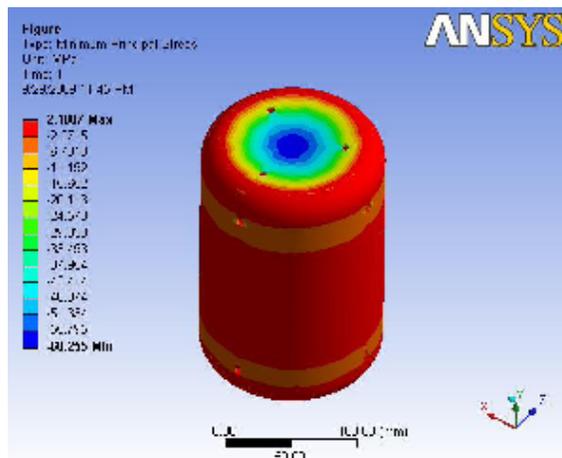


Figura 30. Análisis de esfuerzo mínimo principal – compresión – simulación 3.  
Fuente: El autor.

En relación a los resultados obtenidos en las simulaciones anteriores, el producto en función del material y de la geometría, tienen buenas capacidades, tanto a tensión como a compresión (ver tabla 7), lo que se traduce en múltiples configuraciones, siendo este muy versátil, si se le suma diferentes post procesos que puede tener, como la adaptación de sistemas de iluminación y de soporte.

Tabla 7. Resultado de las simulaciones de elementos finitos.

Fuente: El autor.

| Simulación | Espesor (mm) | Esfuerzo principal mínimo (compresión) Mpa | Esfuerzo principal máximo (tensión) Mpa | Deformación (%) | Carga máxima Kg |
|------------|--------------|--|---|-----------------|-----------------|
| 1          | 3            | 62.7                                       | 33.8                                    | 0.35            | 3.8             |
| 2          | 3            | 61.9                                       | 32.1                                    | 0.075           | 23.5            |
| 3          | 3            | 60.3                                       | 5.7                                     | 0.0005          | 198             |

#### 4.5.3. CAD del molde:

Al igual que el CAD del producto, este se realizó para llegar a una aproximación geométrica de los aspectos fundamentales que debía tener el molde, como lo es las líneas de partición, el numero de caras, los puntos de sujeción entre flanches y los postizos requeridos para formar las roscas internas, que finalmente son las que ensamblan con los otros cilindros.

Como se puede ver en la figura 31, el molde posee 4 caras, 2 de ellas forman las tapas superiores del cilindro, que contiene tres postizos por cada una, y forman la rosca y agujeros de 7.93 mm (5/16 in). Las otras dos caras forman el cuerpo del cilindro y cada una posee cuatro postizos que tienen como intención aumentar las posibilidades de crear diferentes configuraciones. Adicionalmente, posee 16 perforaciones de 9.525 mm (3/8 in), que son los puntos de ensamble entre los flanches de cada una de las caras, que se realiza mediante

tornillería, con el fin de que generen suficiente presión de cierre, para impedir que el material se salga del molde.

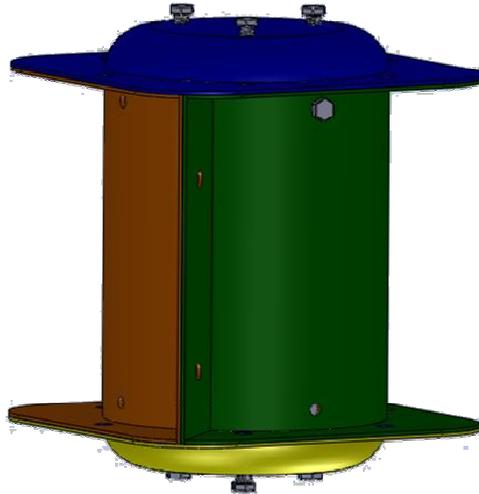


Figura 31. CAD del molde para el producto final rotomoldeado.  
Fuente: El autor.

#### 4.5.4. Molde del producto final.

Partiendo del diseño del producto en el modelador tridimensional, se procedió a realizar el prototipo en madera blanda (Ver figura 32), empleando un torno horizontal y dándole una sobre medida de 3% de las dimensiones reales, con el fin de asumir la contracción dimensional.



Figura 32. Prototipo en madera blanda para el producto final.  
Fuente: El autor.

Teniendo el prototipo listo, con un buen acabado superficial, se procedió a realizar el molde según se propuso en la modelación, definiendo las cuatro caras respectivas y realizándolas con la técnica sugerida en el apartado de la creación de moldes para el rotomoldeo de termoestables, mediante el laminado de fibra de vidrio con aplicación manual (ver figura 33). Así pues, para garantizar un buen registro entre las caras, se procedió a realizar una por una, teniendo como referencia la que ya se hubiera formado, con el fin de que si existían irregularidades, estas se compensaran en el otro flanche y determinara por defecto los puntos precisos de ensamble.



Figura 33. Molde en fibra de vidrio para el rotomoldeo del producto final.  
Fuente: El autor.

#### 4.5.5. Producto final:

El producto final es en esencia un elemento modular con el cual se pueden crear una serie de configuraciones que creen otros productos, que a la vez pueden ser complementados mediante post proceso, para así explotar las características del material, del proceso y de la geometría. Por este motivo se presenta una configuración que explota las características anteriormente mencionadas y se complementa empleando otros elementos que proporcionan funcionalidad a la configuración mencionada. (ver figura 34).

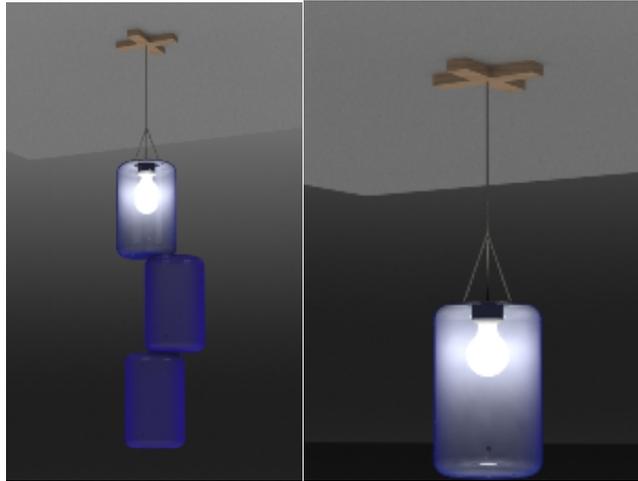


Figura 34. Configuración propuesta para el producto final.  
Fuente: El autor.

Una vez establecida la configuración propuesta en el software para el producto final, se procedió a realizar la lámpara con los tres módulos rotomoldeados en resina de poliéster insaturado, y como pos – proceso, se le adicionó un foco a 110V, un plafón, cables tensores, soporte en cruz de madera, cable eléctrico, tornillería y espárragos para ensamblar los módulos, como se muestra en la figura 35.



Figura 35. Producto final con 3 módulos rotomoldeados y aditamentos adicionales.

Fuente: El autor.

En la tabla 8 se establecen los criterios de procesamiento del producto final, en relación a la cantidad de catalizador suministrado, las rotaciones en los ejes y la tolerancia dimensional permisible en los espesores.

Tabla 8. Criterios de procesamiento del producto final.

Fuente: El autor.

| # de la Muestra | Cantidad (g) | % de MEK | Eje hueco (RPM) | Eje mayor (RPM) | Eje menor (RPM) | Des. Esta. espesor (mm) | % de contracción |
|-----------------|--------------|----------|-----------------|-----------------|-----------------|-------------------------|------------------|
| 1               | 450          | 1.4      | 9               | 7               | 24              | 0.458                   | 2.78             |
| 2               | 450          | 1.4      | 10              | 7               | 26              | 0.331                   | 2.86             |
| 3               | 450          | 1.4      | 10              | 6               | 24              | 0.214                   | 2.75             |
| 4               | 450          | 1.4      | 7               | 6               | 20              | 0.201                   | 2.82             |

En relación al tiempo de procesamiento, para elaborar un solo modulo, se demora en promedio 27 minutos, repartidos en 2 minutos para preparar y revolver el material termoestable a utilizar, 14 minutos para llegar al tiempo de gel a la cantidad de catalizador suministrado, 7 minutos para alcanzar el punto exotérmico y 4 minutos para descargar el molde y retirar la pieza.

## 5. CONCLUSIONES

En relación a los resultados obtenidos, el rotomoldeo para materiales termoestables, posee 3 variables que están directamente relacionadas, y dicha relación es la que determina el éxito del procesamiento.

La primera variable es el material reactivo con el que se va trabajar, por lo que se determinaron las condiciones de curado y de viscosidad de las

resinas de poliéster insaturado seleccionadas, y en donde se evidenció una gran influencia del porcentaje de catalizador suministrado en relación a los tiempos de gel y de exotermia, al igual que en la viscosidad relativa, que afectó directamente la capacidad de fluir del material, pues a mayor cantidad de catalizador, la polimerización se efectúa a un tiempo más corto, criterio que es de vital importancia para definir los tiempos de procesamiento de dicho material por la técnica de rotomoldeo.

La segunda variable, involucra el molde desde su fabricación, su geometría y su ubicación en la máquina de rotomoldeo, por lo que se definieron los criterios para los moldes de termoestable, en relación a los moldes para termoplásticos, donde se destaca una diferencia significativa, que recae sobre las propiedades de polimerización de la materia prima empleada. Pues para los termoplásticos, ésta se efectúa mediante la aplicación de calor por medio de una fuente externa; en cambio para los termoestables, se produce por medio de la adición de acelerantes y endurecedores, por lo que no es necesario aplicar calor. Esta diferencia determina el material del molde y los espesores del mismo, ya que para los termoplásticos deben ser de lamina de acero 1020 decapada o en fundición de aluminio con espesores delgados, a diferencia de los materiales termoestables, donde las características del material del molde, están determinadas por la adaptabilidad a la geometría requerida, a la resistencia a la fatiga térmica que se presenta en consecuencia del punto exotérmico y los ciclos de producción, a la resistencia mecánica requerida para soportar los sistemas de cierre y el constante uso y la adaptabilidad de postizos e insertos requeridos.

Una vez establecidas las diferencias y solucionadas, las consideraciones adicionales para la fabricación de moldes son iguales para los dos procesos, donde se involucra los ángulos de desmolde, los acabados superficiales, las

adaptaciones de los sistemas de cierre, la sujeción del molde a la maquina, el flanche y el acoplamiento de postizos e insertos.

La tercera variable a controlar son las rotaciones de los ejes involucrados en la máquina de rotomoldeo, que están ligadas a la complejidad de la geometría del molde y al comportamiento del material, lo que particulariza las condiciones para cada producto que se desee procesar, impidiendo definir criterios globales o generales sobre el procesamiento del material, por lo que se determinaron las rotaciones de los ejes involucrados para cada geometría procesada con los moldes piloto, en función de la desviación estándar obtenida de los espesores resultantes y siendo el punto de partida para otras geometrías enmarcadas en estas formas básicas.

En consecuencia, éstas variables en un sistema, imposibilita una concertación genérica del proceso, lo que hace que esté ligado a una intervención cualitativa, por medio de la cual se llega a controlar las variables, así sea para un producto en particular.

Por lo tanto se experimentó con un producto a escala real con el que se llegó a la implementación del proceso de rotomoldeo de termoestables, creando el molde con base en las condiciones establecidas para ello, empleando el material reactivo y sus condiciones estudiadas, y estimando la relación de rotación óptima en función de la desviación estándar sobre los 3 mm de espesor requeridos, teniendo como resultado un producto con unas características ligadas a las propiedades del material, en cuanto a la translucidez, su resistencia mecánica y al acabado superficial final, y a las condiciones de procesamiento, obteniendo una pieza hueca con agujeros roscados, evitándose pos procesos, que se traducen en la disminución del costo final del producto, en cuanto a la mano de obra requerida.

Hay que destacar que en el rotomoldeo para termoplásticos como para el rotomoldeo de termoestables, existen ventajas y desventajas, que son las que determinan finalmente su utilización en función del producto, por lo tanto en la tabla 9, se comparan estos dos procesos, con el fin de definir los pro y los contra, que permitan su aplicabilidad según las necesidades del usuario y las condiciones del producto.

Tabla 9. Comparación entre rotomoldeo de termoplásticos y termoestables.

Fuente: El autor.

| <b>Características</b>                     | <b>Rotomoldeo para termoplásticos</b>  | <b>Rotomoldeo para termoestables</b>   |
|--|--|--|
| <b>Tiempo de carga de la materia prima</b> | Entre 5 a 8 minutos, por la distribución requerida dentro del molde  | Entre 1 a 2 minutos, incluyendo la preparación del material y el vertido dentro de la cavidad.   |
| <b>Tiempo de horno</b>                     | Depende directamente del tamaño y del espesor de la pieza, pero en promedio está entre 15 a 22 minutos.  | No se requiere de esta etapa para el procesamiento del material, pero en asociación se puede aludir como el tiempo de gel y de exotermia, que difiere según el porcentaje de catalizador, pero que en promedio está entre 22 y 25 minutos. |
| <b>Tiempo de enfriamiento</b>              | Según se establezca el tipo de enfriamiento, si es aire - agua o aire - aire, pero en promedio está entre 15 a 25 minutos.   | No se requiere de esta etapa, pues una vez llega al punto de exotermia se puede desmoldar la pieza, puesto que el proceso de conformación se completa a este punto, por lo que se puede desmoldar la pieza de inmediato.                   |
| <b>Tiempo de desmolde</b>                  | Depende directamente de la cantidad de caras del molde, de postizos móviles que posea la pieza y del tamaño del molde, lo que hace que en promedio pueda demorarse entre 8 a 12 minutos. | Depende directamente de la cantidad de caras del molde, de postizos móviles que posea la pieza y del tamaño del molde, lo que el tiempo debe ser igual que para el rotomoldeo de termoplásticos. Entre 8 a 12 minutos.                     |
| <b>Velocidad de procesamiento</b>          | En relación a las 4 etapas requeridas para el  | Se requieren de tres etapas, como se mencionó  |

|   |   |   |
|---|---|---|
|   | procesamiento, una sola pieza puede producirse en un tiempo de 43 a 67 minutos, dependiendo directamente del tamaño del molde. Por lo que se emplean varios moldes con el fin de acortar los tiempos y hacer el proceso más eficiente | anteriormente que en total pueden durar entre 31 a 39 minutos y que para hacer más eficiente el proceso se pueden emplear más moldes al igual que en el rotomoldeo de termoplásticos.   |
| <b>Gasto energético</b>                   | Está ligado a la etapa de horno donde se emplea gas natural que alcanza los 375°C, para poder fundir el material.   | Como la polimerización no se produce mediante una fuente de calor externa, en consecuencia no hay gasto energético.   |
| <b>Postizos móviles y fijos</b>           | Se pueden acoplar este tipo de postizos, con la restricción de que no le afecte la temperatura del horno, por lo que tienden a ser metálicos.   | Se pueden acoplar este tipo de postizos y pueden ser de cualquier material, pues no hay fuentes de calor externas que las afecten, por lo tanto pueden ser en madera, caucho, termoplásticas y metálicas.   |
| <b>Costo de los moldes</b>                | Si se compara con los moldes de inyección, los moldes para rotomoldeo de termoplásticos pueden ser 3 veces más baratos, debido a su materia prima y la mano de obra empleada.   | Como el material de los moldes para rotomoldeo de termoestables es tan versátil, es difícil llegar a una comparación precisa entre el costo final del molde, por lo que se evalúa su fabricación en materiales compuestos (resina de poliéster y fibra de vidrio), donde puede llegar a valer la mitad del molde para rotomoldeo de termoplásticos e inclusive menos. |
| <b>Eficiencia para altas producciones</b> | En comparación con otros procesos productivos, el rotomoldeo es un proceso lento de bajos volúmenes de producción, por lo que se puede aumentar su eficiencia si se aumenta el número de moldes.                                      |   |

|  |  |  |
|--|--|--|
| <b>Área de trabajo</b>                           | Se requiere de un área de trabajo muy grande, donde se separan las zonas de horno y las de enfriamiento, carga y descarga del molde.   | El área de trabajo requerida, se limita al espacio de rotación de los moldes, puesto que allí mismo se ejecuta la carga, la polimerización y la descarga del producto.                                   |
| <b>Tolerancias estrechas</b>                     | A razón de que el proceso es por la acción de la gravedad, existe una gran tendencia a que las contracciones oscilen entre 1 y 3%, por lo que se dificulta establecer tolerancias estrechas. |  |
| <b>Materias primas utilizadas</b>                | Los termoplásticos son materiales que se dejan reprocesar con facilidad, sin perder las propiedades mecánicas, beneficiando el reciclaje.  | Los termoestables son materiales que una vez conformados no pueden reprocesarse, lo que dificulta su reciclaje, aunque se pueden utilizar como agentes combustibles o como cargas para el mismo proceso. |
| <b>Esfuerzos residuales por el procesamiento</b> | No existen esfuerzos residuales, debido a que la conformación no se genera por presión, sino por acción de la gravedad.  |  |
| <b>Acabados superficiales</b>                    | Copian eficientemente cualquier gravado sobre la superficie, por lo que este debe estar bien definido y en consecuencia no debe haber errores superficiales.                                 |  |

Finalmente aunque el principio del proceso es el mismo, puede concluirse que las consideraciones que hay que tener para uno o para el otro tienen grandes diferencias, que radican en las variables a controlar y finalmente en la tipología de los productos, por lo que el rotomoldeo de termoestables no tendría la pretensión de reemplazar el rotomoldeo de termoplásticos, sino ampliar las posibilidades de procesamiento para otro tipo de materiales, como lo son los materiales reactivos, que son el comienzo para la implementación de materiales compuestos.

## BIBLIOGRAFIA:

<sup>1</sup> BANCOLDX, "Resumen sectorial para marzo de 2008", [artículo en internet] <[http://www.bancoldex.com/documentos/1192\\_Manuf\\_de\\_plastico\\_Marzo.pdf](http://www.bancoldex.com/documentos/1192_Manuf_de_plastico_Marzo.pdf) > [Consulta 10 de Junio del 2009].

<sup>2</sup> Materias primas para resinas de poliéster [Diapositivas], Medellín, Colombia. Asignatura Materiales compuestos de matriz polimérica, código IP0222, del pregrado de Ingeniería de Producción. Julio del 2007 [2 diapositivas preparadas por los Ing. Andrés Felipe Franco y Rodrigo Vergara].

<sup>3</sup> MIRAVETE, Antonio. Capítulo VIII Matrices. En: MIRAVETE, Antonio. Materiales compuestos. Zaragoza: INO reproducciones S.A; 2000. Tomo I, pág. 20 – 25.

<sup>4</sup> CRAWFORD, R. J. Capítulo I Introduction to Rotational Moulding. En: CRAWFORD, R. J. Rotational moulding of Plastics. Taunton, Somerset, England: Research Studies Press LTDA. 1992. pág. 1 – 24.

<sup>5</sup> VASQUEZ, Trinidad (entrevista telefónica, 5 de mayo de 2009), Directora de la gestión de información de la empresa ROTOPLAST S.A. Medellín, Colombia.

<sup>6</sup> LOPEZ, Jayson (entrevista 11 de junio de 2009) Director de la gestión técnica de la empresa ROTOPLAST S.A. Medellín, Colombia.

<sup>7</sup> Rotomoldeo [Diapositivas], Medellín, Colombia. Asignatura Procesos y productos, del pregrado de Ingeniería de diseño de productos. Julio del 2005/2 diapositivas preparadas por el Ing. Luis Fernando Patiño].

<sup>8</sup> Ibid. Pág. 143.

<sup>9</sup> MIRAVETE, Antonio. Capítulo I Materias primas. En: MIRAVETE, Antonio. Materiales compuestos. Zaragoza: INO reproducciones S.A; 2000. Tomo I, pág. 56 – 57.

<sup>10</sup> Ibid. Pág. 63.

<sup>11</sup> Ibid. Pág. 63.

<sup>12</sup> Ibid. Pág. 68 – 69.

<sup>13</sup> Ibid. Pag. 65

<sup>14</sup> CRAWFORD, R. J. Capítulo V, Sheet metal Moulds. En: CRAWFORD, R. J. Rotational moulding of Plastics. Taunton, Somerset, England: Research Studies Press LTDA. 1992. pág. 118 – 142

<sup>15</sup> Ibid. Capitulo 6, cast aluminium moulds, pág. 143 - 151.

<sup>16</sup> WIKIPEDIA, "Definicion del proceso de granallado", [artículo en internet] <<http://www.wikipedia.org/wiki/Granallado>> [Consulta 12 de Agosto del 2009].

<sup>17</sup> WIKIMEDIA, "RTM process". [artículo en internet] [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:RTM\\_process.png](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:RTM_process.png) [Consulta 15 de septiembre del 2009].