

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la  
Producción**

“Estudio de la Relación entre la Estructura, PIAT, Grado de  
Cura y Resistencia al impacto en Productos Monocapa de  
Polietileno Rotomoldeado”

**TESIS DE GRADO**

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO MECÁNICO**

Presentada por:

Rubén Eduardo Alarcón Salas

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2007

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, a mi madre, a mis hermanos, a mi familia y amigos por darme su apoyo siempre.

Además a mi director de tesis, Ing. Andrés Rigaíl por su valiosa colaboración y a la empresa AMANCO-PLASTIGAMA S.A.

# DEDICATORIA

A DIOS

A MI MADRE

A MIS HERMANOS

A MIS AMIGOS

## TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

---

Ing. Eduardo Rivadeneira P.  
DECANO DE LA FIMCP  
PRESIDENTE

---

Ing. Andrés Rigail C.  
DIRECTOR DE TESIS

---

Ing. Omar Serrano V.  
VOCAL

---

Ing. Bolívar Albán C.  
VOCAL

## **DECLARACIÓN EXPRESA**

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL).

---

Rubén Eduardo Alarcón Salas

## RESUMEN

En la actualidad, la industria de rotomoldeo procesa piezas grandes para fabricar productos monocapa de polietileno. El polietileno permite fabricar piezas moldeadas a bajo costo en diferentes tipos de procesamiento.

Debido a la falta de preparación en el país en el área de polímeros, las industrias plásticas producen piezas rotomoldeadas sin tomar en cuenta la importancia e influencia que tienen las condiciones de procesamiento sobre las propiedades mecánicas. La resistencia al impacto es la propiedad más crítica en la industria de productos rotomoldeados, la mayoría de fabricantes no verifican condiciones de procesamiento, normas o ensayos adecuados para asegurar la calidad final de sus productos. Esto origina una serie de reclamos y devoluciones de productos defectuosos por parte del cliente.

El objetivo de este estudio es analizar los parámetros que se deberían monitorear en un proceso de rotomoldeo y su relación con la resistencia al impacto a condiciones normalizadas. Esto permitirá fabricar productos con los correctos parámetros de procesamiento y máximas propiedades mecánicas posibles.

Se tomará muestras en una industria plástica con diversas condiciones de procesamiento de productos rotomoldeados monocapa. Posteriormente se evaluarán las propiedades de impacto, densidad y se determinará la Temperatura Pico de Aire Interno (PIAT) y su relación con las propiedades antes mencionadas. También se analizará la Resistencia al Impacto a diferentes velocidades de calentamiento y enfriamiento, el Grado de Cura del producto y por último se examinarán los Costos de Procesamiento y Resistencia al Impacto.

Con este estudio se conocerá técnicamente el procesamiento óptimo y propiedades del producto. Esperando reducir los costos de procesamiento y maximizar las propiedades de productos rotomoldeados monocapa. Esta optimización permitirá mantener la calidad del producto rotomoldeado y la confiabilidad de los clientes.

## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN .....	II
INDICE GENERAL.....	IV
ABREVIATURAS .....	VII
SIMBOLOGÍAS .....	IX
ÍNDICE DE FIGURAS.....	X
ÍNDICE DE TABLAS .....	XII
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPITULO 1	
1. BASES Y FUNDAMENTOS TEÓRICOS .....	3
1.1. Introducción a la Química del Polietileno.....	3
1.2. Tipos de Polietileno .....	5
1.2.1. Polietileno de Baja Densidad (LDPE).....	6
1.2.2. Polietileno de Baja Densidad Lineal (LLDPE).....	7
1.2.3. Polietileno de Alta Densidad (HDPE).....	9
1.3. Fuerzas de Unión .....	9
1.4. Termoplásticos Semicristalinos .....	12
1.5. Aditivos y Sustancias Auxiliares .....	14

## CAPITULO 2

2. TECNOLOGÍA DEL PROCESO DE ROTOMOLDEO.....	19
2.1. Materiales .....	19
2.1.1. LLDPE.....	22
2.1.2. Dióxido de Titanio (TiO <sub>2</sub> ).....	23
2.2.3. Pigmento.....	23
2.2. Procesamiento de Rotomoldeo de Productos Monocapa .....	24
2.2.1. Introducción .....	24
2.2.2. Características del Proceso de Rotomoldeo.....	25
2.3. Parámetros de Máquina Importantes en el Proceso.....	27
2.4. Condiciones a Monitorear durante el Proceso.....	29
2.4.1. PIAT.....	29
2.4.2. Rapidez de Calentamiento.....	31
2.4.3. Rapidez de Enfriamiento.....	33
2.4.4. Grado de Cura.....	35
2.5. Propiedades y Ensayos ARM de Productos Rotomoldeados. ....	36
2.5.1. Densidad (ASTM D-1505).....	37
2.5.2. Índice de Fluidéz (ASTM D-1238).....	38
2.5.3. Resistencia al Impacto (ASTM D-256 y ASTM D-3029)...	40
2.5.4. Módulos de Tensión y Flexión (ASTM D-790 y ASTM D-638).....	43
2.5.5. Fluencia Lenta (ASTM D-2990).....	44

2.5.6. Envejecimiento.....	45
CAPITULO 3	
3. ENSAYOS .....	46
3.1. Condiciones de los ensayos .....	46
3.2. Ensayos de Densidad.....	48
3.3. Ensayos de Impacto .....	51
CAPITULO 4	
4. ANALISIS DE RESULTADOS .....	62
4.1. Análisis de PIAT vs. Densidad.....	62
4.2. Análisis de PIAT vs. Resistencia al Impacto.....	64
4.3. Análisis de Rapidez de Calentamiento vs. Resistencia al Impacto .....	67
4.4. Análisis de Rapidez de Enfriamiento vs. Resistencia al Impacto .....	69
4.5. Análisis de Grado de Cura vs. Resistencia al Impacto .....	71
4.6. Análisis de Costos vs. Resistencia al Impacto.....	76
CAPITULO 5	
5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	78
5.1. Conclusiones .....	78
5.2. Recomendaciones.....	80
APÉNDICES	
BIBLIOGRAFÍA	

## ABREVIATURAS

ARM	Asociación de Rotomoldeadores
ASTM	Sociedad Americana de Ensayos y materiales
°C	Grados Centígrados
CA	Acetato de Celulosa
CAB	Acetato Butirato de Celulosa
CAP	Acetato Propionato de Celulosa
cm <sup>2</sup>	Centímetros Cuadrados
cm ó cc	Centímetros Cubicos
D	Densidad
EBA	Etileno Butilacrilato
EVA	Polímero de etileno y acetato de vinilo
°F	Grados Fahrenheit
ft	Pies
FDA	Administración de Alimentos y Medicamentos de EE. UU.
FEP	Copolímero de etileno-propileno fluorado
g	Gramos
HDPE	Polietileno de Alta Densidad
J	Joules
Kg	Kilogramos
LDPE	Polietileno de Baja Densidad
LLDPE	Polietileno de Baja Densidad Lineal
LMDPE ó MDPE	Polietileno de Media Densidad
MI	Indice de Fluidez
min	Minutos
mLLDPE	Polietileno de Baja Densidad Catalizado por Metaloceno
mm	Milímetros
MW	Peso Molecular
lbs	Libras
PBT	Polibutileno Tereftalato
PE	Polietileno
PET	Polietileno Tereftalato
pH	Potencial de Hidrógeno
PIAT	Temperatura pico de aire interno
PMMA	Polimetacrilato
POM	Polioximetileno

PP	Polipropileno
PTFE	Politetrafluoretileno
PVC	Policloruro de vinilo
rpm	Revoluciones por Minuto
TiO <sub>2</sub>	Dióxido de Titanio
ULDPE	Polietileno de Ultra Baja Densidad
UV	Radiación Ultravioleta
XLPE	Polietileno de Baja Densidad Entrecruzado

## SIMBOLOGÍA

A:	Suma de la columna $i \times n_i$
$d_h$ :	Cambio de Altura del Impactor luego de un evento
h:	Altura Promedio de Falla
$h_o$ :	Menor Altura donde ocurrió una falla
MFE:	Energía de Impacto

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1.1:	Esquema de una Molécula de Etileno y Polietileno ..... 3
Figura 1.2:	Características de las cadenas poliméricas de tres polietilenos comunes..... 4
Figura 1.3:	Familia del Polietileno..... 5
Figura 1.4:	Estructura de una molécula de LLDPE..... 8
Figura 1.5:	Moléculas de Polímeros ..... 10
Figura 1.6:	Fuerzas de Dispersión..... 11
Figura 1.7:	Fuerzas Dipolares ..... 11
Figura 1.8:	Fuerzas de Inducción ..... 11
Figura 1.9:	Fuerzas de Puente de Hidrógeno..... 12
Figura 1.10:	Regiones Cristalina (A) y Amorfa (B) en Poliolefinas ..... 13
Figura 2.1:	Materiales usados en Rotomoldeo ..... 20
Figura 2.2:	Tanques Monocapa de LLDPE..... 25
Figura 2.3:	Los pasos básicos en Rotomoldeo..... 27
Figura 2.4:	Curvas de Temperatura de Aire Interno para dos espesores de pared..... 30
Figura 2.5:	Ciclo de curado para materiales rotomoldeados ..... 33
Figura 2.6:	Grado de Cura para un ciclo con temperatura de horno 300 °C. PIAT 180 °C. y enfriamiento aire forzado ..... 36
Figura 2.7:	Efecto de la Densidad en las Propiedades del Polietileno..... 38
Figura 2.8:	Esquema de un medidor de Índice de Fluidez ..... 39
Figura 2.9:	Efecto del Índice de Fluidez sobre las propiedades del polietileno ..... 40
Figura 3.1:	Medidor de Densidad ..... 49
Figura 3.2:	Muestras para ensayo de Densidad ..... 50
Figura 3.3:	Construcción del dardo de Impacto ..... 52
Figura 3.4:	Máquina de Impacto al Dardo ..... 53
Figura 3.5:	Muestras para ensayo de impacto..... 54
Figura 3.6:	Record para ensayo de impacto para la Muestra 1 ..... 55
Figura 3.7:	Falla Frágil..... 56
Figura 3.8:	Falla dúctil ..... 56
Figura 4.1:	Comparación de densidades a diferentes PIAT ..... 64
Figura 4.2:	Comparación de resistencias al impacto a diferentes PIAT .... 65
Figura 4.3:	Velocidad de Calentamiento y Enfriamiento para el Producto 3..... 67
Figura 4.4:	Comparación de resistencias al impacto a diferentes velocidades de calentamiento ..... 68
Figura 4.5:	Comparación de resistencias al impacto a diferentes velocidades de enfriamiento..... 69

Figura 4.6:	Variación del Grado de Cura a diferentes PIAT .....	72
Figura 4.7:	Comparación de la Resistencia al Impacto y Grado de Cura a diferentes PIAT.....	72
Figura 4.8:	Variación del Grado de Cura a diferentes enfriamientos .....	73
Figura 4.9:	Comparación de la Resistencia al Impacto y Grado de Cura a diferentes enfriamientos .....	74
Figura 4.10:	Comparación de la Resistencia al Impacto y Grado de Cura a diferentes calentamientos.....	75
Figura 4.11:	Comparación entre costos de fabricación de las muestras .....	76

## ÍNDICE DE TABLAS

		Pág.
Tabla 1	Rango de densidades de la familia del Polietileno .....	4
Tabla 2	Propiedades Generales de LLDPE.....	22
Tabla 3	Propiedades Generales del TiO <sub>2</sub> .....	23
Tabla 4	Propiedades Generales del Pigmento .....	24
Tabla 5	Valores relativos de coeficientes convectivos .....	35
Tabla 6	Resistencia al ambiente de los polímeros .....	45
Tabla 7	Condiciones de Procesamiento .....	47
Tabla 8	Resultados del ensayos de Densidad .....	51
Tabla 9	Energía de Impacto de las muestras .....	57
Tabla 10	Prueba de Impacto Muestra 1 .....	58
Tabla 11	Prueba de Impacto Muestra 2 .....	59
Tabla 12	Prueba de Impacto Muestra 3 .....	59
Tabla 13	Prueba de Impacto Muestra 4 .....	60
Tabla 14	Prueba de Impacto Muestra 5 .....	60
Tabla 15	Prueba de Impacto Muestra 6 .....	60
Tabla 16	Prueba de Impacto Muestra 7 .....	61
Tabla 17	Prueba de Impacto Muestra 8 .....	61
Tabla 18	PIAT y Grado de Cura obtenidos a diferentes condiciones de procesamiento.....	63
Tabla 19	Variación de la Energía de Impacto a diferentes PIAT bajo Temperatura de Horno 260 °C. ....	65

# INTRODUCCIÓN

La presente tesis se desarrolla en base a una inquietud que surgió en la industria de rotomoldeo local se trata del “Estudio de la Relación entre la Estructura, PIAT, Grado de Cura y Resistencia al Impacto en Productos Monocapa de Polietileno Rotomoldeado”, enfocado a la optimización de los parámetros de máquina para incrementar la resistencia al impacto del producto final, sabiendo que después de su obtención pasa por la distribución de los mismos, en esta transición se los apilan en camiones hasta su disposición final, la manipulación de los mismos producen cargas de impacto que ocasionan fallas, rupturas, o resquebrajaduras prematura, ocasionando reiteradamente reclamos y devoluciones.

Los productos rotomoldeados de LLDPE son en la actualidad los más seguros y confiables entre el resto de los materiales disponibles para rotomoldeo, ya que ofrecen una combinación de fácil procesamiento, estabilidad térmica y costo.

En este estudio radica la necesidad de procesar y realizar un control de calidad confiable y seguro, bajo normas ARM estandarizadas, lo cual implica reducción de costos para la industria plástica, y obteniendo así

valores de resistencia adecuados garantizando que su producto conservará su calidad y sus propiedades en el tiempo determinado.

Existen ciertos objetivos específicos que están presentes, entre los cuales tenemos:

1. Determinar los óptimos valores de PIAT, rapidez de calentamiento, enfriamiento y grado de cura para determinadas condiciones de procesamiento de productos monocapa rotomoldeados.
2. Establecer el ensayo normalizado por la ARM para evaluar las propiedades de impacto de los productos rotomoldeados.
3. Determinar la relación e importancia de los correctos parámetros de procesamiento en los costos de fabricación y su relación con la propiedades de impacto del producto final.

Para la obtención de las resistencias al impacto se empleó el método de Bruceton, estandarizado por la ARM, considerando los parámetros de máquina empleados por cada muestra, costos de fabricación, además de la curva Temperatura vs. Tiempo que nos da la rapidez calentamiento y enfriamiento.

# CAPÍTULO 1

## 1. BASES Y FUNDAMENTOS TEÓRICOS

### 1.1. Introducción a la Química del Polietileno

El polietileno fue desarrollado por los Laboratorios ICI en los treinta, fue producido de la polimerización de un monómero etileno normalmente en presencia de un comonómero como butano, hexano u octano.

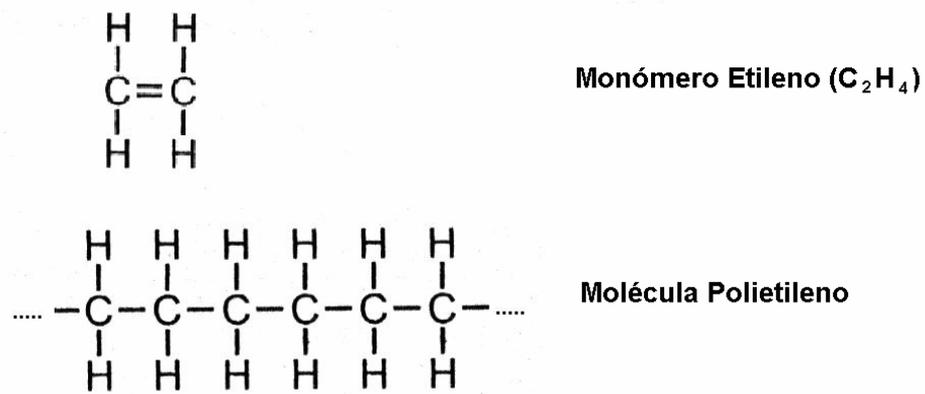


FIGURA 1.1 ESQUEMA DE UNA MOLECULA DE ETILENO Y POLIETILENO

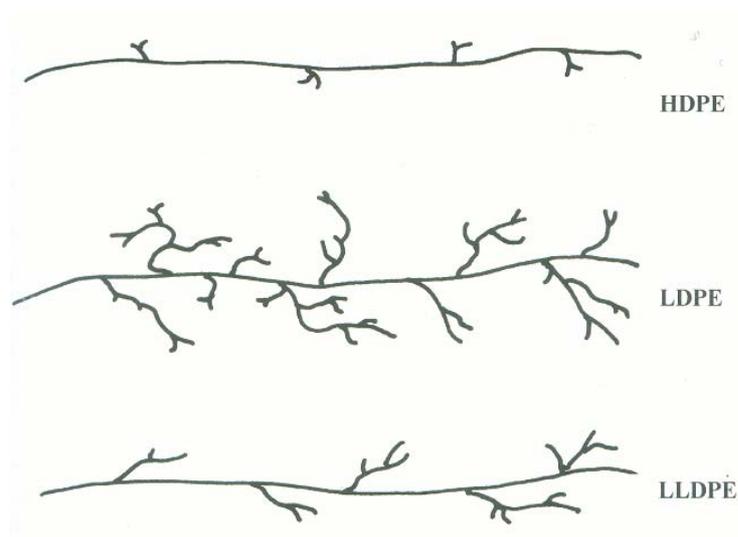
A continuación se presentarán las densidades correspondientes a tres clases de polietileno.

**TABLA 1**

**RANGO DE DENSIDADES DE LA FAMILIA DEL POLIETILENO**

Polietileno de Baja Densidad (LDPE)	0.915 a 0.925 g/cm <sup>3</sup>
Polietileno de Media Densidad (MDPE o LMDPE)	0.926 a 0.940 g/cm <sup>3</sup>
Polietileno de Alta Densidad (HDPE)	0.941 a 0.965 g/cm <sup>3</sup>

El LLDPE refiere a un tipo de material moderno que tiene densidades en el rango de los LDPE y MDPE.

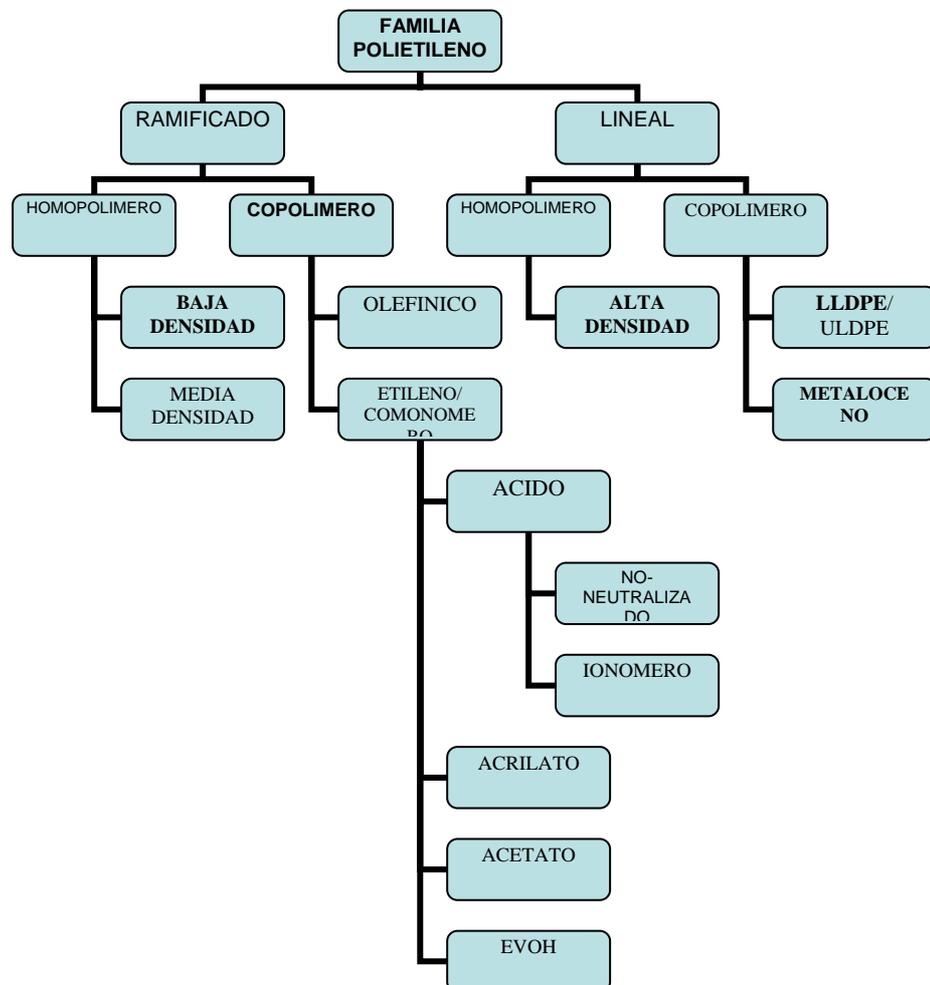


**FIGURA 1.2 CARACTERÍSTICAS DE LAS CADENAS POLIMERICAS DE TRES POLIETILENOS COMUNES**

## 1.2 Tipos de Polietileno

Por estructura química, la familia del polietileno es amplia, pero en este estudio sólo nos referiremos a las más utilizadas en el proceso de moldeo rotacional que son:

- Polietileno de Baja Densidad (LDPE).
- Polietileno de Baja Densidad Lineal (LLDPE).
- Polietileno de Alta Densidad (HDPE).



**FIGURA 1.3 FAMILIA DEL POLIETILENO**

### **1.2.1 Polietileno de Baja Densidad (LDPE)**

El polietileno de baja densidad tiene una estructura ramificada, parcialmente cristalina y es termoplástico, es fabricado bajo altas condiciones de presión y temperatura mediante un proceso de polimerización por radical libre.

La polimerización del etileno bajo estas condiciones produce un polímero ramificado que es en realidad una mezcla de largas moléculas con columnas vertebrales de diferentes longitudes y cadena ramificadas a los lados. La presencia de cadenas ramificadas en la estructura limita la formación de cristales de polietileno introduciendo así irregularidades en la estructura.

El LDPE tiene una baja cristalinidad entre 40 a 60% y consecuentemente una baja densidad entre 0.915 a 0.925 g/cm<sup>3</sup>.

El LDPE es muy versátil, se adapta a todo tipo de procesamiento de extrusión, inyección, etc; siendo su mayor aplicación y el más utilizado en la producción de películas para empaques, bolsas, fundas, etc.

El LDPE se caracteriza por su excelente flexibilidad, buena resistencia al impacto, maquinabilidad, resistencia a aceites, resistencia a químicos.

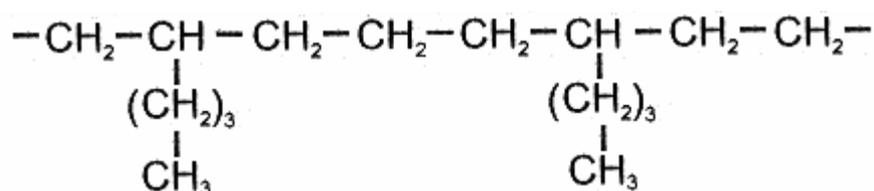
### 1.2.2 Polietileno de Baja Densidad Lineal (LLDPE)

Como se pudo apreciar en la figura 1.3, el polietileno lineal puede ser producido como un homopolímero, resultando el HDPE, o como un copolímero teniendo como comonomero, alquenos tales como:

- Buteno  $\text{H}_2\text{C} = \text{CH CH}_2 \text{CH}_3$
- Hexeno  $\text{H}_2\text{C} = \text{CH (CH}_2)_3 \text{CH}_3$
- Octeno  $\text{H}_2\text{C} = \text{CH (CH}_2)_5 \text{CH}_3$

La presencia de un comonomero en el proceso de polimerización, utilizando una catálisis stereo-específica, resulta en la producción de una cadena polimérica con muy cortas ramificaciones colgantes, este polímero es denominado polietileno de baja densidad lineal (LLDPE) o polietileno de ultra baja densidad lineal (ULDPE), dependiendo de la densidad alcanzada por la adición del comonomero. Mientras más grande sea la cantidad de comonomero añadido, más baja es la densidad del copolímero, por ejemplo si es utilizado

hexeno, los grupos colgantes quedan como se aprecia en la figura 1.4:



**FIGURA 1.4 ESTRUCTURA DE UNA MOLECULA DE LLDPE**

Normalmente la cantidad de comonómero tiene un rango entre 1 a 10% de su base molar. Las propiedades físicas del LLDPE son controladas por su peso molecular (MW) y densidad (0.916-0.94 g/cm<sup>3</sup>). Debido a su incrementada regularidad de su estructura y estrecha distribución molecular, LLDPE mejora las propiedades mecánicas, también hay un incremento de 10 a 15°C. en el punto de fusión en comparación al LDPE a la misma densidad.

Se ha encontrado que para densidades debajo de 0.91 g/cm<sup>3</sup> debido a la incorporación de altos niveles de comonómero, el nivel de hexeno extraíble supera el nivel del permitido por la FDA, estos extraíbles pueden oxidar. Dichos polietilenos con grandes cantidades de comonómero y consecuentemente densidades por debajo de el rango del LLDPE son

denominados polietilenos de muy baja densidad (VLDPE) o polietilenos de ultra baja densidad (ULDPE).

### **1.2.3 Polietileno de Alta Densidad (HDPE)**

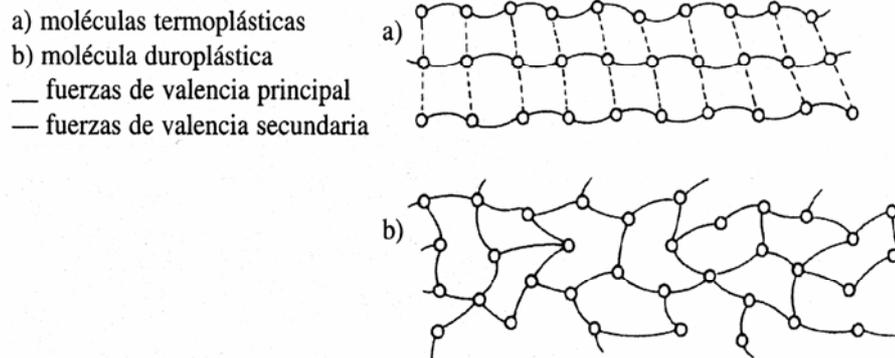
El HDPE es un termoplástico no polar lineal, de aspecto blanquinoso, su rango de densidades es entre 0.94 a  $0.965\text{g/cm}^3$  con un punto de fusión entre  $128\text{-}138^\circ\text{C}$ , es uno de los polímeros más versátiles, las cadenas moleculares de los homopolímeros HDPE son largas y rectas con muy pequeñas ramificaciones.

A medida que el HDPE se enfría por debajo de su punto de fusión, se forma en su estructura una larga fracción de regiones cristalinas ordenadas, en un porcentaje que va del 65 al 90% de cristalinidad y esto contribuye a que tenga una buena propiedad de barrera a la humedad, y volviéndolo opaco; por otro lado, posee una pobre barrera al oxígeno y a compuestos orgánicos.

## **1.3 Fuerzas de Unión**

Los tipos de enlaces se dividen en: enlaces químicos (valencias principales) de la composición de las cadenas macromoleculares y

las fuerzas de valencias secundarias, también conocidas como fuerzas intermoleculares.

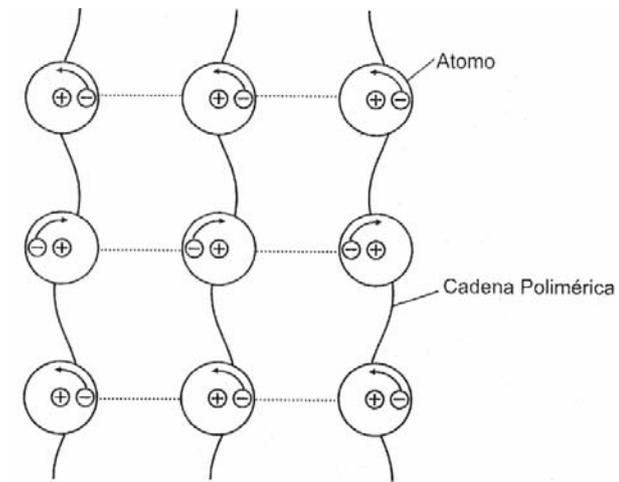


**FIGURA 1.5 MOLECULAS DE POLIMEROS**

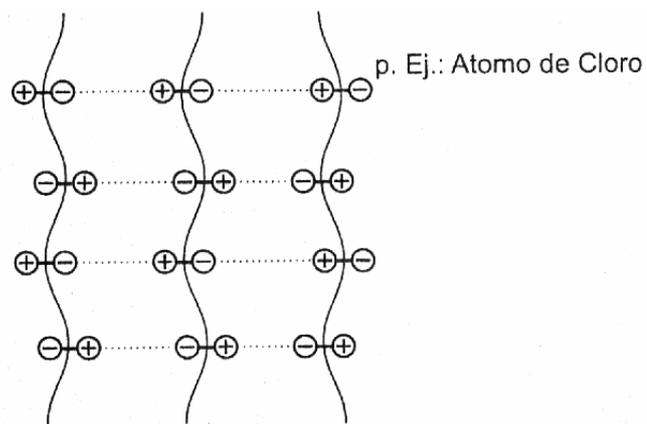
Las fuerzas de valencia secundaria actúan entre las cadenas moleculares de los termoplásticos y las mantienen unidas entre sí. Son notoriamente más débiles que las fuerzas de las valencias principales y resultan de las fuerzas de atracción electrostáticas cuyo origen se debe buscar en la naturaleza de la estructura atómica.

Se mencionarán las fuerzas de valencias secundarias existentes:

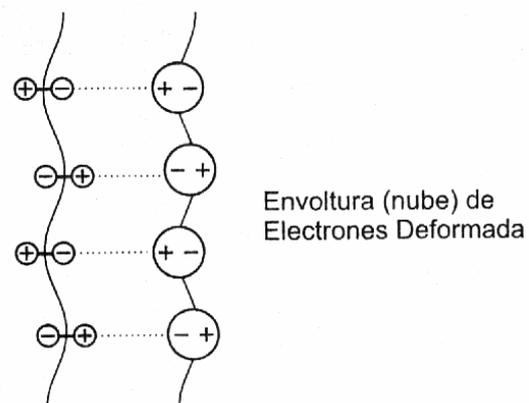
- Fuerzas de dispersión
- Fuerzas dipolares
- Fuerzas de inducción
- Fuerzas de puentes de hidrógeno



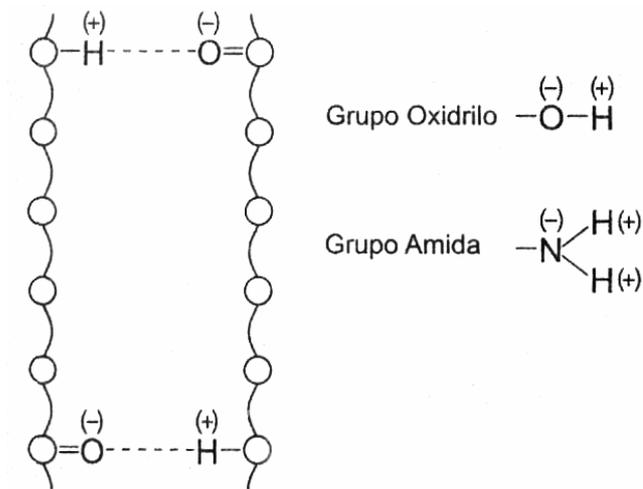
**FIGURA 1.6 FUERZAS DE DISPERSION**



**FIGURA 1.7 FUERZAS DIPOLARES**



**FIGURA 1.8 FUERZAS DE INDUCCION**



**FIGURA 1.9 FUERZAS DE PUENTE DE HIDROGENO**

En los polietilenos de baja y alta densidad, se pueden apreciar los diferentes efectos de las fuerzas de valencias secundarias. La separación entre las cadenas es mayor en las cadenas ramificadas (LDPE), con lo cual el efecto de las fuerzas de valencias secundarias es menor. Como consecuencia se presentan propiedades de resistencia, rigidez y resistencia al calor, más bajas a las de un polímero de cadena lineal (HDPE).

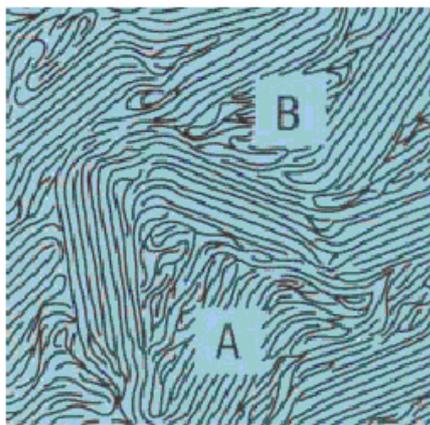
#### 1.4 Termoplásticos Semicristalinos

Las macromoléculas que presentan una estructura química y también geometría regular, pueden formar cristales en determinadas zonas. Se entienden como cristales, a agrupamientos paralelos en ciertas partes de la macromolécula o pliegues de la cadena (p. ej. esferulitas). Los termoplásticos que presentan esta estructura se

denominan polímeros semicristalinos. Una misma cadena puede pasar parcialmente por zonas amorfas y cristalinas, a veces puede pertenecer a varios cristales simultáneamente.

Los termoplásticos semicristalinos poseen una tonalidad blancuzca, esto es a causa de una interrupción del pasaje de la luz, debida a un ordenamiento denso de las moléculas en los cristales, ejemplos de termoplásticos semicristalinos son: PE, PP, POM, PTFE, PET, PBT, y otros más.

Por lo tanto, ningún polímero es completamente cristalino. La cristalinidad hace que los materiales sean resistentes, pero también quebradizos. Un polímero totalmente cristalino sería demasiado quebradizo como para ser empleado como plástico. Las regiones amorfas le confieren tenacidad a un polímero, es decir, la habilidad de poder plegarse sin romperse.



**FIGURA 1.10 REGIONES CRISTALINA (A) Y AMORFA (B) EN POLIOLEFINAS**

## 1.5 Aditivos y Sustancias Auxiliares

Los plásticos no pueden ser procesados tal como salen de las reacciones de formación. Recién con el mezclado de aditivos y sustancias auxiliares, se obtiene una masa plástica pronta para el procesamiento. Muchos plásticos ya vienen provistos, por el fabricante, de los más importantes aditivos, de forma tal que el procesador los puede utilizar directamente. He aquí una breve descripción de los más utilizados:

### **Estabilizadores**

Se utilizan para proteger a los plásticos de la influencia del calor, rayos UV, oxígeno del aire y humedad, lo cuales dañan los polímeros de tal forma que, se produce una descomposición de las cadenas, con lo cual se perjudican notoriamente las propiedades mecánicas. Los grupos más importantes de estabilizadores son:

- Antioxidantes.- Sirven para preservar la propiedades, están diseñados para reducir el efecto de oxidación particularmente, hablando de rotomoldeo de la capa mas interna del producto la cual esta en contacto con el aire. La oxidación es causada por un iniciador que produce radicales libres, al principio causa la separación de las moléculas del polimero seguido de un entrecruzamiento entre las moléculas por la combinación de los

radicales libres. Los antioxidantes son compuestos orgánicos complejos. Típicamente es una combinación de antioxidantes primarios y secundarios cuidadosamente seleccionados para actuar conjuntamente con los estabilizadores UV.

- Compuestos de plomo
- Jabones metálicos
- Compuestos orgánicos del estaño
- Compuestos orgánicos de nitrógeno
- Fosfitos orgánicos
- Compuestos epoxídicos
- Protectores UV

### **Lubricantes**

Sirven para atenuar las fricciones internas y externas de la masa fundida de plástico

### **Colorantes**

Son sustancias solubles o insolubles que dan color, los que se pueden agregar para el coloreado de los plásticos. En el caso de los colorantes solubles, se habla de tintas y en el de los no solubles, de pigmentos, los cuales se dividen en pigmentos orgánicos e inorgánicos. Ej. pigmentos inorgánicos:

- Blanco blanco de titanio, blanco de cinc
- Amarillo amarillo cromo, amarillo níquel-titanio
- Rojo rojo molibdato, oxido de hierro rojo
- Azul azul ultramarino, azul cobalto
- Verde verde cromo, verde cobalto
- Marrón oxido de hierro marrón
- Negro negro humo, oxido de hierro negro

La cantidad de pigmentos orgánicos utilizados es grande, ya que se trata de compuestos orgánicos complicados y una gran cantidad de denominaciones comerciales puede ser referida a una descripción del pigmento por medio del "Colour-Index". Ej: Pigmento azul 15 = ftalocianina de cobre.

### **Cargas o materiales reforzantes**

Por cargas o materiales reforzantes se entienden a los agregados sólidos que influyen de variadas formas en las propiedades del plástico. Las cargas no sirven únicamente para abaratar y "estirar" los plásticos por medio del aumento de su peso y volumen, sino que con ellas se pueden lograr mejoras deseadas de ciertas propiedades. En general también se mejoran tanto la resistencia a la deformación térmica como la contracción. Ej: carbonato de calcio, dolomita, caolín, talco, harina de cuarzo, mica.

### **Antiestáticos**

Los antiestáticos disminuyen la resistencia eléctrica superficial de los plásticos, descargan rápidamente la electricidad estática. Los antiestáticos son compuestos químicos que migran hacia la superficie de los plásticos y absorben humedad del aire. La película de agua formada evita carga de electricidad estática.

### **Espumantes**

Para la fabricación de plásticos espumados se deben agregar agentes espumantes, ya sea durante la fabricación del plástico o durante el proceso de moldeo.

### **Aditivos retardadores de llama**

En razón de su composición química, los plásticos son en mayor o menor grado combustibles. En la construcción y la fabricación de automóviles y otra amplia gama de aplicaciones, se exigen, a menudo obligatoriamente, plásticos provistos de protección contra el fuego, a través del uso de determinadas sustancias se lograrán las siguientes formas de acción:

- Aislamiento del oxígeno del foco ígneo
- Influencia en la descomposición del plástico
- Influencia del mecanismo de combustión

### **Peróxidos orgánicos**

Este tipo de sustancias se usa para reticular cadenas moleculares lineales, actúa también como dispersante. Un peróxido usado comúnmente es el peróxido de benzoilo (BP), que se comercializa como una pasta al 50% .

### **Inhibidores**

Estas sustancias evitan, o retrasan una reacción química. Se las utiliza, p. ej., para aumentar el tiempo de "vida útil" de resinas endurecibles (resinas poliéster) bloqueando una reacción de reticulación anticipada.

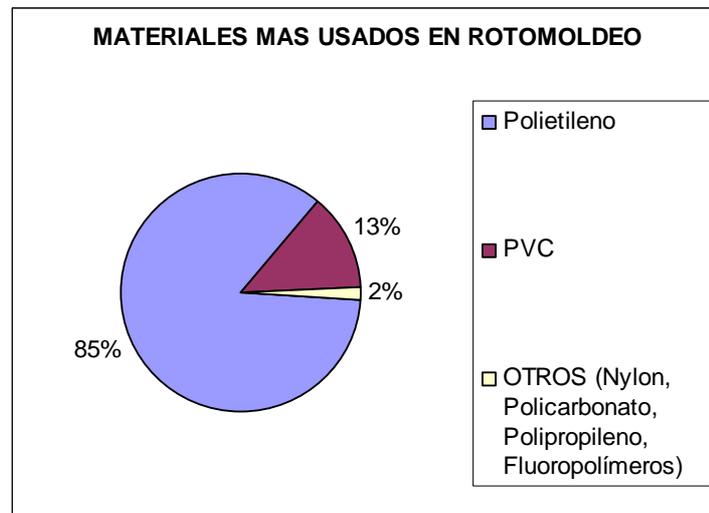
# CAPÍTULO 2

## 2. TECNOLOGÍA DEL PROCESO DE ROTOMOLDEO

### 2.1 Materiales

De todo el grupo de polímeros disponibles para todos los procesos de transformación del plástico, hay un rango estrecho de materiales que pueden ser fácilmente procesados en el proceso de rotomoldeo. La Asociación de Moldeadores Rotacionales expuso una excelente guía de la mayoría de materiales comercialmente disponibles para este proceso (ARM, 1997).

Desde una perspectiva comercial, los materiales más usados en la industria son:



**FIGURA 2.1 MATERIALES USADOS EN ROTOMOLDEO**

El polietileno se mantiene en la preferencia de la industria por ofrecer una excelente combinación de fácil procesamiento, estabilidad térmica y costo, motivo por el cual continúan dominando el mercado.

### **Características Deseables en los Materiales a Rotomoldear**

En el proceso de rotomoldeo se debe poner especial atención a la elección del material a utilizar para lo cual debe de cumplir un cierto número de propiedades en el que incluyen:

- Estabilidad Térmica para prevenir la pérdida de las propiedades durante la transformación de pellet a polvo en el proceso de pulverizado. La mayoría de materiales utilizados en rotomoldeo son estabilizados con antioxidantes para reducir los efectos de los largos ciclos de calentamientos que se utiliza en el moldeo

rotacional y para proveer buen tiempo de servicio especialmente en aplicaciones expuestas al medio ambiente.

- Baja viscosidad en estado de fusión, para que permita cubrir totalmente la superficie interna del molde y se funda en una masa homogénea la medida común utilizada para esto es el Índice de Fluidez (MI) medido en gramos g/10 min. Los materiales comercialmente disponibles para rotomoldeo tienen un MI entre 2 g/10min. y 8 g/10min. (2.16Kg/190°C).
- Buena resistencia al impacto usualmente es lo más crítico para aplicaciones a baja temperatura debido a esto, los materiales deben ser evaluados a – 40°C. para tener una buena referencia.
- Resistencia a la Flexión y Tensión debe ser lo suficiente para la aplicación requerida del material, los polietilenos tienen valores relativamente bajos de resistencia, materiales de ingeniería como nylon y policarbonatos ofrecen mejores niveles de resistencia.

A continuación se describen los materiales a utilizarse en esta investigación:

- Polietileno Lineal de Baja Densidad (LLDPE).
- Dióxido de Titanio (TiO<sub>2</sub>).
- Pigmento Azul.

### 2.1.1 LLDPE

La resina utilizada para la producción productos rotomoldeados tienen las características mostradas en la Tabla 2.

**TABLA 2**  
**PROPIEDADES GENERALES DE LLDPE**

PROPIEDADES	NORMA ASTM	UNIDADES	MAGNITUD	
Indice de Fluidez (MI)	D1238	g/10min	5	
Densidad (D)	D1505	g/cm <sup>3</sup>	0.934	
Temperatura de fusión HPC	--	°C	127	
Vicat Softening Point	D1525	°C	110	
Esfuerzo tensión	D638	Kg/cm <sup>2</sup>	Fluencia	140
			Fractura	170
Elongación hasta fractura	D638	%	650	
Dureza	D2240	Escala D	63	
Tensile Modulus (2% Secant Modulus)	D638	kg/cm <sup>2</sup>	6500	
Flexural Modulus	D747	kg/cm <sup>2</sup>	4600	
Ensayo IZOD a 23 °C	D256	kg.cm/cm	60	

### 2.1.2 Dióxido de Titanio (TiO<sub>2</sub>)

El Dióxido de Titanio tiene la particularidad de hacer menos translúcido el material lo que evita el paso de rayos solares que generen microorganismos. Las características del TiO<sub>2</sub> que se utiliza en la fabricación de productos monocapa rotomoldeados se muestran en la siguiente tabla.

**TABLA 3**

**PROPIEDADES GENERALES DEL TiO<sub>2</sub>**

Peso molecular (g/mol.)	80
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	4.1
Gravedad Específica	3.9- 4.2
Temperatura de Fusión (°C)	1830- 1850
Temperatura de Vaporización (°C)	2500- 3000
Color	Blanco

### 2.1.3 Pigmento

La finalidad en el uso del pigmento en productos rotomoldeados es estético, deben tener alta resistencia a los rayos UV ya que su aplicación es en el exterior. Las características del pigmento orgánico utilizado se muestran en la tabla 4.

**TABLA 4**  
**PROPIEDADES GENERALES DEL PIGMENTO**

Densidad (g/cm <sup>3</sup> )	1.6
pH	5 - 8
Superficie específica (m <sup>2</sup> /g)	58
FDA	Aprobado
Color	Azul
Termoestabilidad (° C)	300
Densidad de polvo (g/cm <sup>3</sup> )	0.32

## 2.2 Procesamiento de Rotomoldeo de Productos Monocapa

### 2.2.1 Introducción

El proceso de Rotomoldeo esta diseñado principalmente para manufacturar productos plásticos huecos de grandes dimensiones. Sin embargo entre procesos como el de soplado, termoformado e inyección, el proceso de rotomoldeo tiene particulares ventajas, como ejemplos podemos decir que los productos tienen relativamente bajos los niveles de esfuerzos

residuales y que los moldes empleados no son tan costosos en relación a los otros procesos.

En 2006, el mercado norteamericano consumió cerca de 364 Ktons. que corresponde a un valor de \$ 1500 millones de dólares, dos años después llegó a un valor de \$1900 millones de dólares, habiendo un crecimiento de 10 al 15% por año, estimulado principalmente por artículos como tanques, juguetes para niños, kayaks, canoas.



**FIGURA 2.2 TANQUES MONOCAPA DE LLDPE**

### **2.2.2 Características del Proceso de Rotomoldeo**

El principio del moldeo rotacional o rotomoldeo de plásticos es simple. Básicamente el proceso utiliza: altas temperaturas, el

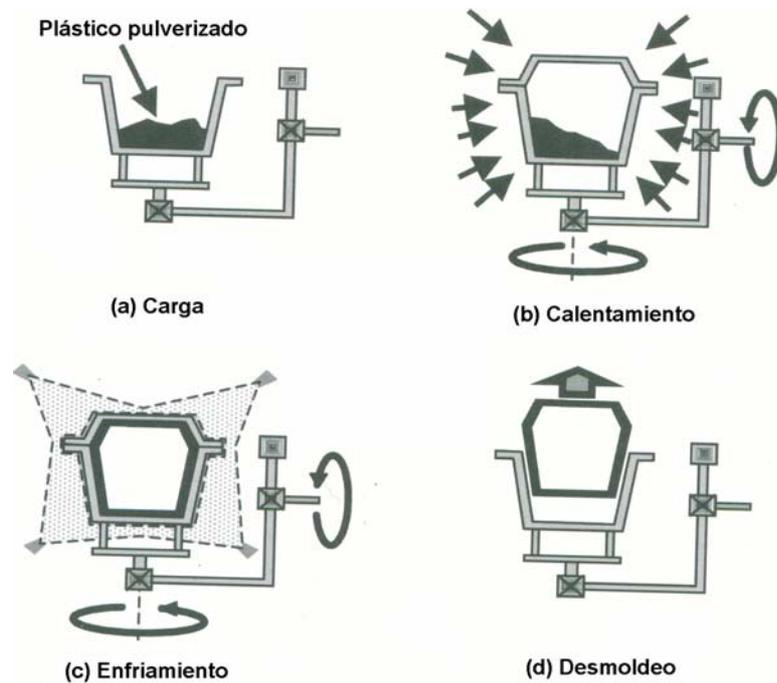
molde (manufacturado en una delgada pared de metal o compuesto), rotación biaxial en dos ejes perpendiculares, el material (polímero si es sólido finamente dividido o líquido), enfriamiento (se utiliza aire y/o agua), y el producto se caracteriza por salir sin costuras y con bajos esfuerzos residuales.

El moldeo rotacional tiene cuatro pasos básicos:

- Carga: Una cantidad previamente pesada de plástico (polvo, líquido) se introduce en una mitad del molde metálico y a su vez el molde fue montado sobre el brazo de la máquina moldeadora. Luego de la carga el molde es cerrado usando abrazaderas y pernos.
- Calentamiento: Al molde lo ponen en rotación biaxial y lo introducen en el horno donde se le aplica calor. El metal del molde empieza a calentarse y el polvo/líquido por la acción del movimiento rotacional empieza a tocar toda la superficie interna del molde. Luego el material caliente se pega en el molde en sucesivas capas para formar el producto.
- Enfriamiento: Cuando el material se ha fundido y se ha consolidado, el molde es retirado del horno y llevado hacia la estación de enfriamiento donde aire forzado, agua atomizada o una combinación de ambas, son utilizadas para bajar la

temperatura más bajo que la temperatura de cristalización o punto de solidificación del material. La rotación continua para prevenir que el material fundido no se desparrame.

- Desmoldeo: Una vez que la parte ha sido enfriada se procede a remover el producto.



**FIGURA 2.3 LOS PASOS BASICOS EN ROTOMOLDEO**

### 2.3 Parámetros de Máquina Importantes en el Proceso

En el proceso de rotomoldeo, están presentes los ciclos de calentamiento y enfriamiento por lo tanto para el procesamiento del material se deben tomar en cuenta los siguientes parámetros de máquina:

### Calentamiento:

Temperatura de horno.- Es la temperatura en °C. del recinto cerrado donde estará el molde en el calentamiento, cabe indicar que esta temperatura es superior a la temperatura máxima alcanzada por el molde en dicha fase.

Velocidad de Rotación de brazo.- Es la velocidad angular en rpm. del eje principal, la cual el molde rotará dentro del horno teniendo como eje el brazo de la máquina.

Velocidad de Rotación de plato.- Es la velocidad angular en rpm. del eje secundario, la cual el molde rotará dentro del horno teniendo como eje el plato.

Reversión.- Es el intervalo de tiempo en minutos en el que las rotaciones programadas cambian de sentido horario a antihorario.

Tiempo de Calentamiento.- Es el tiempo en minutos durante el cual el molde va a estar rotando dentro del horno.

### Enfriamiento:

Tiempo de Enfriamiento.- Es el tiempo total en minutos que va a durar el ciclo de enfriamiento.

Tiempo de Agua.- Es el tiempo en minutos que va a durar la alimentación de agua en el ciclo de enfriamiento.

Retardo de Agua.- Es el tiempo de retardo en minutos que le damos a la alimentación de agua para que luego de ese tiempo empiece a trabajar.

Velocidad de Rotación de brazo.- Es la velocidad angular en rpm. del eje principal, la cual el molde rotará afuera del horno es decir, a condiciones ambientales.

Velocidad de Rotación de plato.- Es la velocidad angular en rpm. del eje secundario, la cual el molde rotará afuera del horno es decir, a condiciones ambientales.

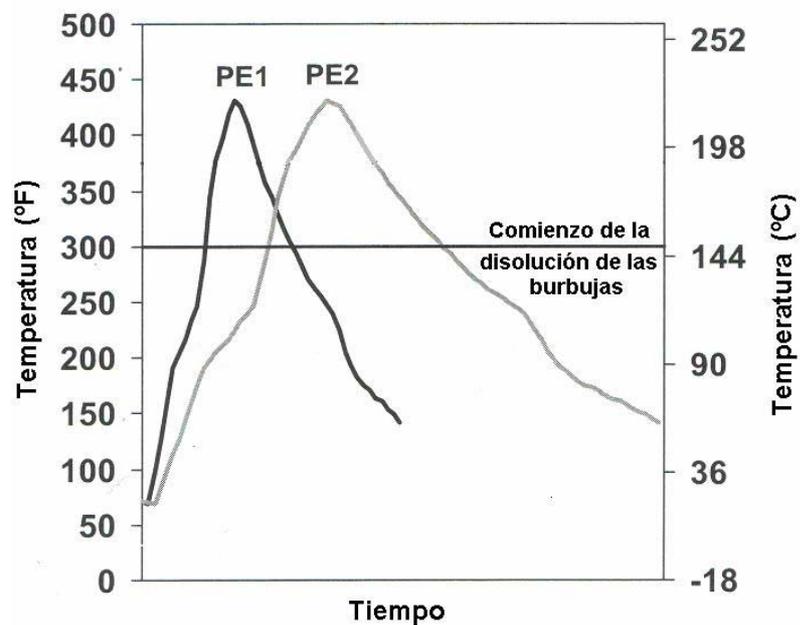
## **2.4 Condiciones a Monitorear durante el Proceso**

### **2.4.1 PIAT**

La temperatura pico de aire interno (PIAT) se denomina a la temperatura máxima del aire encerrado en el interior del molde, esta temperatura es un excelente indicador del curado de la parte producida. La temperatura del horno, el tiempo en el horno, el espesor del molde y el espesor de pared del producto son los parámetros dominantes en el PIAT.

En la figura 2.3 se muestra el perfil de temperatura interna del aire para dos partes de polietileno (PE1 y PE2), con diferentes espesores de pared. La transferencia de calor a través de la

parte más gruesa (PE2) es más lenta y el perfil de temperatura está más extendida en la línea de tiempo. Ambas partes han sido calentadas al mismo PIAT, sin embargo, el grado de cura que experimentarán las dos son muy diferentes debido a la diferencia en la historia térmica que fueron expuestas.



**FIGURA 2.4 CURVAS DE TEMPERATURA DE AIRE INTERNO PARA DOS ESPESORES DE PARED**

La línea a través del gráfico por los 300°F (150°C) es aproximadamente el punto al cual las burbujas empiezan a desaparecer de la sección transversal del material, debido a que la viscosidad del material comienza a decaer aproximadamente a la cuarta parte permitiendo que la superficie interna se torne lisa. Cabe indicar que el valor de temperatura pico de aire

interno es un valor variable, lo que se debe evitar es pasar la temperatura a la cual el material se degrade, ya que puede haber degradación a una menor temperatura en ciclos largos.

#### **2.4.2 Rapidez de Calentamiento**

Por cada temperatura de horno en la gráfica Temperatura vs. tiempo, se puede visualizar una velocidad de calentamiento distinta, la rapidez de calentamiento tiene influencia directa en la disolución de burbujas, en el tiempo en el horno que afecta directamente a la densidad y cura del producto final, la resistencia al impacto aumenta a medida que el PE va obteniendo un mejor curado, sin embargo a niveles más altos de velocidades, hay un punto en que la resistencia al impacto sufre una dramática caída. Este punto ocurre después que las primeras señales de degradación fueron evidentes en la superficie interna actúa como una zona de iniciación de fractura.

Es decir que para reducir ciclos no se debe alzar desmesuradamente la temperatura del horno, para evitar un daño en la estabilidad de las moléculas y por tanto en sus propiedades. Ciclos de calentamiento muy rápidos acortan el ciclo de producción pero el efecto final en la calidad del producto puede verse desmejorado.

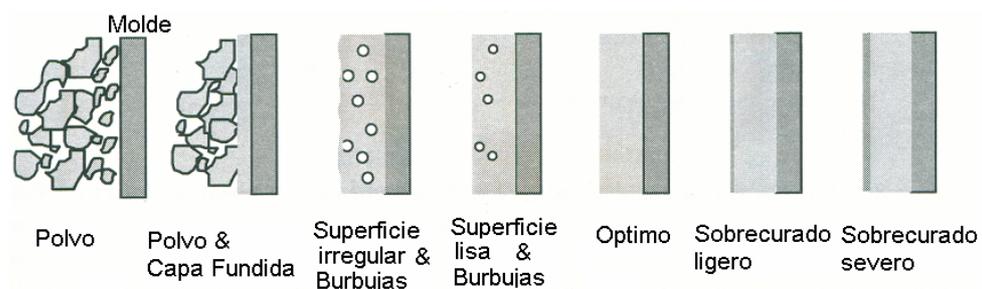
Otra característica es que la velocidad de disolución de las burbujas aumenta al incrementarse la rapidez de calentamiento, pero debemos tener en cuenta que la temperatura de aire interna le tomará menos tiempo en obtener un valor elevado por lo tanto se reduce el tiempo de calentamiento. De esta manera, las burbujas tendrán menos tiempo para poder diluirse significando que la densidad de la parte moldeada decrece. Este efecto es más significativo en la porción de material más cercano a superficie del molde.

Se puede obtener productos rotomoldeados de tres diferentes maneras:

- Curado pobre: son las partes que tienen la superficie interna irregular (posiblemente con polvo en la superficie interna) y muchas burbujas en la sección transversal. Esto se debe a que las partículas no se fusionaron completamente y como resultado las propiedades no son satisfactorias.
- Curado óptimo: éstas partes poseen su superficie interna lisa y con pocas burbujas en la sección transversal (sin embargo algunos materiales con bajo Índice de Fluidéz pueden retener burbujas incluso llegando a estar sobrecurado). Las propiedades mecánicas son maximizadas debido a que no

hubo degradación presente y que el material se fusionó en forma compacta.

- **Sobrecurado:** se las reconoce por que tienen una coloración en la superficie interna ( amarillo a café). Normalmente no hay burbujas en la sección transversal, se acompaña con una capa de material en donde se ha producido oxidación y olor ácido fuerte. Hablando de las propiedades físicas, la resistencia al impacto es la más afectada por la capa débil (capa oxidada) en la superficie interna que puede actuar como una zona de iniciación de fractura. Propiedades como resistencia a la tensión o flexión, no se ven gravemente reducidas, ya que la mayor proporción de material no afectado compensa este efecto.



**FIGURA 2.5 CICLO DE CURADO PARA MATERIALES ROTOMOLDEADOS**

### 2.4.3 Rapidez de Enfriamiento

Una vez que el molde sale del horno para la estación de enfriamiento esto no significa que haya alcanzado el PIAT,

debido a que dentro del molde la temperatura sigue creciendo por la existencia de un gradiente térmico que sigue ingresando calor hacia el interior del molde, este fenómeno se denomina inercia térmica.

Cuando la temperatura del aire interno del molde iguala a la temperatura superficial del molde se alcanza el PIAT, es decir, la temperatura máxima del aire dentro del molde durante todo el proceso, durante todo este intervalo los rotomoldeadores suelen enfriar el molde con aire para evitar un “choque térmico” para después de esto echar el agua atomizada, agua u otro tipo enfriamiento, es aquí donde la temperatura dentro del molde empieza a decaer rápidamente y teniendo en cuenta que el polietileno aún esta fundido y esta totalmente en estado amorfo. A medida que se sigue enfriando y se alcanza la temperatura de solidificación comienza el cambio de fase de líquido a sólido y en este punto comienza la cristalización, es también desde aquí que empieza la contracción del material.

Una alta velocidad de enfriamiento durante la cristalización tiene como consecuencia un producto final con baja cristalinidad y un menor porcentaje de contracción. Una baja velocidad de enfriamiento durante esta etapa permite un mejor agrupamiento

de la zona cristalina por lo tanto aumenta la cristalinidad como también el porcentaje de contracción pero produce baja resistencia al impacto y viceversa.

La rapidez tanto de enfriamiento como de calentamiento se obtiene de la pendiente de la curva Temperatura de aire interno vs. Tiempo.

**TABLA 5**

**VALORES RELATIVOS DE COEFICIENTES CONVECTIVOS**

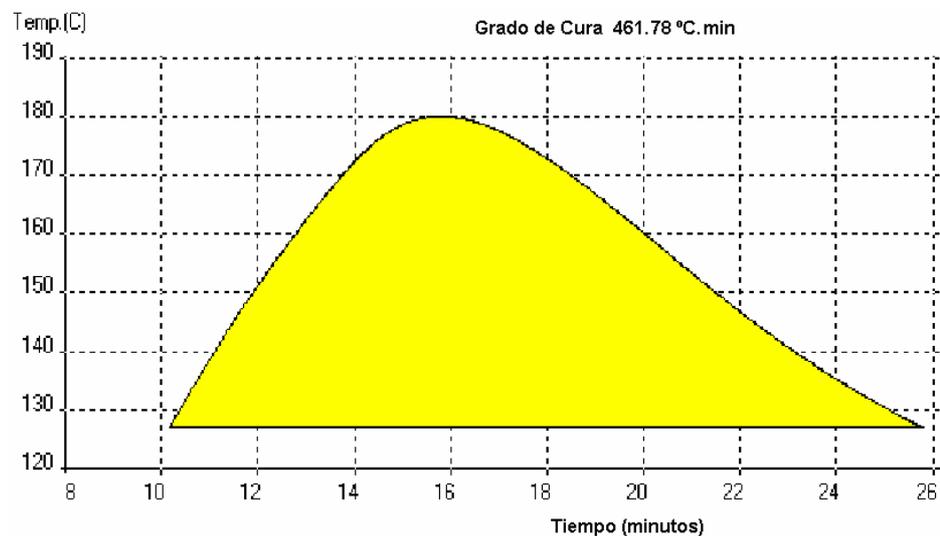
Aire quieto	1
Aire forzado	5
Agua quieta	50
Flujo de agua	200
Cambio de fase de agua	1000

**2.4.4 Grado de Cura**

Grado de cura es un indicador de la historia térmica que adquiere el polietileno durante el procesamiento. Para obtenerlo se traza una línea horizontal en la temperatura de fusión del LLDPE en nuestro caso 127 °C. en la gráfica Temperatura vs. Tiempo al valor de temperatura de fusión del material, el área

encerrada entre esta recta y la curva de temperatura interna de aire se le llama grado de cura, cuyas unidades son °C.min.

También es conocido como un indicador de control del proceso ya que se puede establecer con cierta exactitud si el producto saldrá con bajo curado, curado óptimo o sobrecurado ya que provee un control temperatura-tiempo.



**FIGURA 2.6 GRADO DE CURA PARA UN CICLO CON TEMPERATURA DE HORNO 300° C, PIAT 180° C Y ENFRIAMIENTO AIRE FORZADO.**

## 2.5 Propiedades y Ensayos ARM de Productos Rotomoldeados

A continuación se describen las propiedades y sus respectivos ensayos, de mayor uso e interés en la industria plástica:

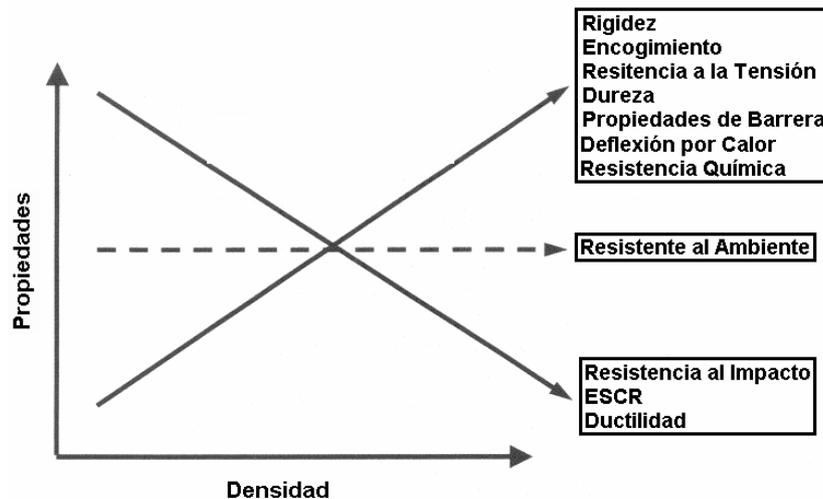
### **2.5.1 Densidad (ASTM D-1505)**

Densidad es definida como el peso por unidad de volumen. En el caso del polietileno viene dado en gramos por centímetro cúbico (g/cc). Esta medida indica cuán empaquetadas están las moléculas. Moléculas con pocos ramales (HDPE o LLDPE) se empaquetarán mejor que moléculas con bastantes ramales y en orden aleatorio (LDPE).

La medición se la realiza por medio de una columna de densidad que es creada usando una combinación de líquidos generalmente alcohol y agua que son vertidos suavemente sobre una columna de vidrio vertical.

#### **El efecto de la densidad en las propiedades del Polietileno**

En términos generales, propiedades como la rigidez, esfuerzo de tensión, dureza mejoran cuando la densidad aumenta. El siguiente dibujo muestra la relación entre la densidad y las propiedades del material.



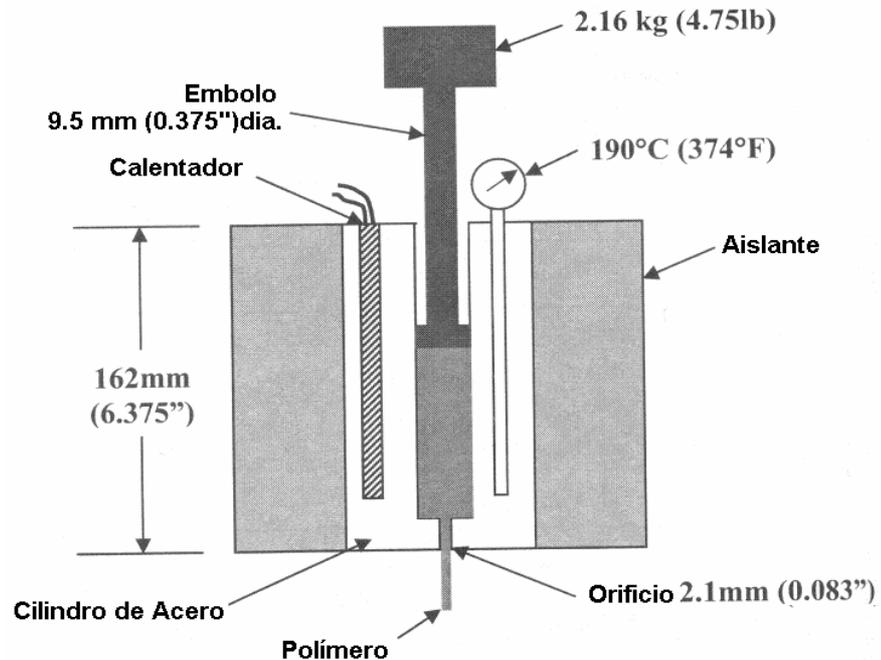
**FIGURA 2.7 EFECTO DE LA DENSIDAD EN LAS PROPIEDADES DEL POLIETILENO**

### 2.5.2 Índice de Fluidez (ASTM D-1238)

El Índice de Fluidez (MI) es medido colocando material en un tambor calentado a una temperatura estándar típicamente 190 °C (374°F) con una carga estándar 2.16 Kg. (4.75 lbs) para polietileno. La carga es aplicada a un pistón que fuerza al material a salir por un agujero específico 2.1 mm. (0.0825”).

El MI es tomado como la cantidad de material en gramos que fluye a través del agujero en diez minutos. Un valor alto de MI indica la facilidad de fluir del material lo que significa baja viscosidad y viceversa. También el MI se refiere al peso molecular promedio del polietileno mientras más alto sea el peso molecular el MI es menor debido a que las moléculas grandes no

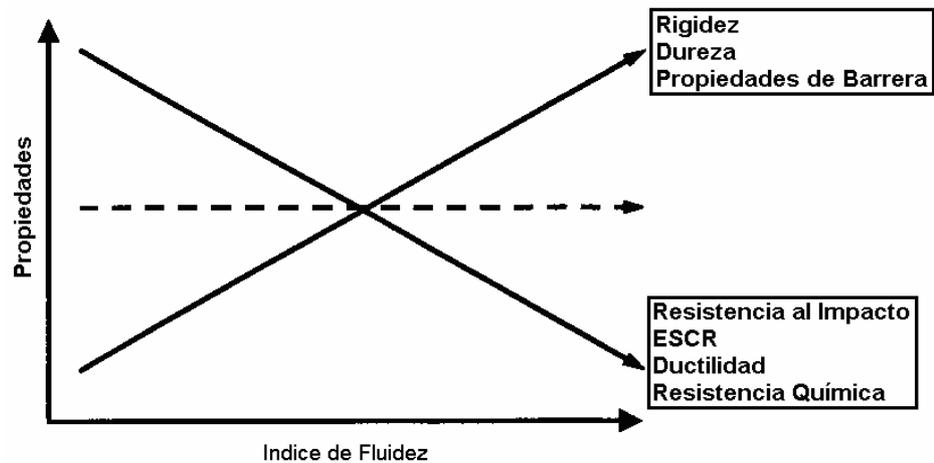
pueden moverse más rápido que las pequeñas. El rango más común para polietilenos rotomoldeados es 2 a 8 g/10min.



**FIGURA 2.8 ESQUEMA DE UN MEDIDOR DE INDICE DE FLUIDEZ**

### **El efecto del Índice de Fluidez en las propiedades del Polietileno**

Como en el caso de la densidad, las propiedades se alteran cuando se cambia el MI como es el caso de la moldeabilidad que se mejora a partir de un valor más alto de MI. En el siguiente gráfico se muestra la variación de las propiedades con relación al Índice de Fluidez.



**FIGURA 2.9 EFECTO DEL INDICE DE FLUIDEZ SOBRE LAS PROPIEDADES DEL POLIETILENO**

### 2.5.3 Resistencia al Impacto (ASTM D-256 y ASTM D-3029)

Por lo general los productos rotomoldeados están sometidos a esfuerzos de acuerdo a la aplicación para lo cual se los diseña, pero se debe de considerar que en la transportación, distribución y uso final de los mismos, reciben cargas de impacto siendo éste un punto importantísimo de estudio. Como resultado, la mayoría de plásticos son clasificados exhibiendo falla dúctil donde el polímero cede antes de fallar o falla frágil en el cual el polímero no cede antes de fallar.

En nuestro caso, el polietileno pertenece al grupo de las poliolefinas, esta familia de polímeros tienen la cualidad de fallar por cedencia dúctil donde el plástico se deforma localmente sin

rajaduras ni resquebrajaduras, tornándose en esa parte menos capaz de soportar esfuerzos.

Los siguientes factores tienen influencia sobre la resistencia al impacto de las partes rotomoldeadas:

- Grado de cristalinidad.
- Condiciones de proceso.
- Cantidad de burbujas.
- Temperatura.
- Velocidad de impacto.

Hay cuatro tipos de ensayos de impacto que se usan:

- Péndulo o peso oscilante que se impacta contra una barra estandarizada del material.
- Caída de un dardo para fracturar contra una muestra en forma de disco.
- Perforación a velocidad constante de un disco o sección del producto.
- Tensión de impacto.

De todos los dos primeros son normalmente usados en moldeo rotacional. ASTM D-256 detalla el ensayo del péndulo o peso oscilante. Si la muestra es una viga rectangular soportada en un extremo o cantilibre el ensayo se denomina Izod. Si la viga

rectangular es soportada en ambos extremos se llama ensayo Charpy. ASTM D-3029 denota el tipo de dardo para la prueba de impacto. Una antigua versión sugería usar una masa fija estándar la que era lanzada y se iba incrementando la altura hasta que la falla apareciera.

En este ensayo dos métodos son usados. El método Probit usa muchas muestras a diferentes alturas aleatorias. La energía de impacto esta dada por la altura que consiguió que el 50% de las muestras falle. En el método Bruceton también se usan muchas muestras, pero la altura de caída se obtiene primero escogiendo una altura aleatoria luego incrementa la altura si la muestra no falla y se decrementa si la muestra falla. En 1986 la Asociación de Moldeadores Rotacionales aprobó un ensayo de impacto a baja temperatura que sigue la norma ASTM D-3029 y recomienda el Método Bruceton para determinar la energía de impacto a  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

El método Bruceton es llamado también método escalera o “up and down”. La energía de impacto esta estipulada por la altura donde la muestra falla.

#### **2.5.4 Módulos de Tensión y Flexión (ASTM D-790 y ASTM D-638)**

El módulo es la pendiente de un polímero en una curva esfuerzo-deformación. Para plásticos, depende de la temperatura. Cinco módulos para polímeros pueden ser dados en las hojas técnicas como módulo de flexión, tensión, compresión, cortante, secante. Los primeros dos son importantes en moldeo rotacional. ASTM D-790 es el ensayo que determina el módulo de flexión. Es un ensayo en donde se aplica una carga en el centro de una viga simplemente apoyada, con un área transversal rectangular. La rapidez al que cada viga es flexionada (rapidez de deformación) debe ser suficientemente rápida para asegurar que el polímero está reaccionando elásticamente a la carga aplicada.

La norma ASTM D-638 señala el ensayo para hallar el módulo de tensión de un polímero. La muestra tiene forma de hueso, con un área transversal rectangular, la mayor área transversal que es en los extremos, se los utilizan para sujetar la muestra a las mordazas de la máquina. La aplicación de la carga debe de ser suficientemente rápida para asegurar su comportamiento elástico. Este ensayo incluso sirve para encontrar el punto de fluencia y la elongación hasta la ruptura. Otro aspecto que no se debe olvidar es que para ambos ensayos, es necesario que se

reporte el porcentaje de elongación por unidad de tiempo o %/min.

### **2.5.5 Fluencia Lenta (ASTM D-2990)**

En muchos casos los productos plásticos se ven sometidos a esfuerzos constantes o cargas estáticas por largos períodos de tiempo. A diferencia de los metales y cerámicos, los plásticos se deforman continuamente bajo una carga aplicada, incluso a bajas temperaturas (cercanas a temperatura ambiente).

El resultado es una permanente distorsión, así se haya removido la carga. ASTM D-2990 describe un estándar para fluencia lenta aplicada una tensión uniaxial, a través del cual un polímero es puesto verticalmente bajo la acción de una carga en el extremo inferior. El estrechamiento en función del tiempo de la muestra es llamado fluencia lenta. Si la muestra falla bajo esta carga, se denomina esta falla como ruptura por fluencia lenta. El valor de estrechamiento también es dependiente del valor de la carga. Como en otros aspectos la fluencia lenta y la ruptura por fluencia lenta se ven afectadas por la temperatura.

### 2.5.6 Envejecimiento

La mayoría de las aplicaciones de los productos rotomoldeados son al aire libre pero en contraste todos los materiales plásticos son sensibles a la radiación ultravioleta. Como uno de los materiales más usados para moldeo rotacional, el polietileno no es el más estable para aplicaciones externas.

Este puede ser degradado por altas temperaturas, elevadas construcciones donde UV o la lluvia ácida son intensas. Los laboratorios ahora cuentan con mecanismos aceleradores del envejecimiento que dan resultados confiables para predecir en condiciones ambientales normales. Hay algunas normas de interés para los moldeadores rotacionales como ASTM D-4364 y ASTM G-90.

<b>TABLA 6</b>		
<b>RESISTENCIA AL AMBIENTE DE LOS POLIMEROS</b>		
<b>Excelente</b>	<b>Media</b>	<b>Pobre</b>
Acrílicos	Policarbonatos	Polietilenos
PMMA	Poliéster	Polipropileno
FEP	CAB	Poliestireno
PTFE	CAP	CA

# CAPÍTULO 3

## 3. ENSAYOS

### 3.1 Condiciones de los ensayos

Para la obtención del producto monocapa rotomoldeado se utilizaron los siguientes materiales:

- Polietileno Lineal de Baja Densidad (LLDPE).
- Dióxido de Titanio.
- Pigmento Azul.

Para la realización de este estudio se generaron 8 productos los cuales no se varió la formulación, cada uno difiere del otro por la condición de procesamiento o parámetros de máquina al que fue sometido.

En las tabla 7 se puede apreciar los datos de los parámetros de máquina o condiciones de procesamiento que se ingresaron para la obtención de cada muestra.

**TABLA 7**  
**CONDICIONES DE PROCESAMIENTO**

<b>Muestra</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
Temperatura de horno (° C)	260	260	260	260	300	300	300	330
Velocidad de Rotación de brazo (rpm)	4.69	4.69	4.69	4.69	4.69	4.69	4.69	4.69
Velocidad de Rotación de plato (rpm)	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17	1.17
Reversión (min)	4	4	4	4	4	4	4	4
Tiempo de Calentamiento (min)	21	23	29	40	21	21	21	18
Tiempo de Enfriamiento (min)	31	29	31	37	61	35	16	35
Tiempo de Agua (min)	0	0	0	0	0	0	4	0
Retardo de Agua	0	0	0	0	0	0	8	0

Cabe resaltar que el enfriamiento utilizado casi para todas las muestras fue aire forzado con excepciones, como en la muestra 5 se empleó aire quieto y la muestra 7 se usó una combinación aire-

agua. A estas muestras se le hicieron ensayos de densidad e impacto las cuales se detallan a continuación:

### **3.2 Ensayos de Densidad**

Los ensayos de densidad que se realizaron a los productos monocapas rotomoldeados de este estudio fueron determinados por un medidor de densidad que se basa en el principio de Arquímedes en el que se debe poner un líquido de densidad conocida, en nuestro caso agua.

#### **Equipos**

El equipo utilizado para este ensayo, fue el siguiente:

- Medidor de Densidad
- Mínima escala: 0.001 g
- Tipo de Medición: Densidad
- Unidad: Gramos sobre Centímetros cúbicos

En la figura 3.1 se puede apreciar el medidor de densidad, utilizado para este ensayo :



**FIGURA 3.1 MEDIDOR DE DENSIDAD**

**Condiciones y Requerimientos:**

Las condiciones y requerimientos que se necesitan para poder realizar el ensayo son las siguientes:

- Las condiciones ambientales del ensayo son 23 °C.
- Las muestras consisten en paralelepípedos de cara cuadrada de 1 cm como se muestra en la figura 3.2.
- El ancho de la muestra varía por el espesor de la pared rotomoldeada.
- Las muestras deben ser cortadas con sumo cuidado, no deben poseer rebabas o bordes rasgados, debe ser un corte uniforme.

### Procedimiento

El procedimiento a seguir es el siguiente:

- Seleccionar tres muestras aleatorias del producto monocapa rotomoldeado.
- Sumergir cada muestra en el recipiente con agua del medidor de densidad. Esperar para cada muestra alrededor de un minuto para obtener el resultado y anotar.
- Obtener el promedio de las tres muestras.



**FIGURA 3.2 MUESTRAS PARA ENSAYO DE DENSIDAD**

### Resultados

Los resultados de este ensayo se mostrarán en la tabla 11, para mayor facilidad se le ha designado a cada producto rotomoldeado un número para evitar nombrar repetidamente los parámetros al que

fueron sometidas las muestras, las cuales fueron detalladas al comienzo del capítulo.

**TABLA 8**

**RESULTADOS DEL ENSAYOS DE DENSIDAD**

Muestras	1	2	3	Promedio
1	0.934	0.929	0.929	0.93
2	0.935	0.934	0.937	0.935
3	0.934	0.939	0.938	0.938
4	0.944	0.941	0.944	0.943
5	0.939	0.940	0.935	0.938
6	0.936	0.935	0.939	0.937
7	0.936	0.935	0.937	0.936
8	0.934	0.938	0.936	0.936

### 3.3 Ensayos de Impacto

Los ensayos de Resistencia al Impacto se realizaron según la norma ASTM D 5628-96, por el método de caída libre del dardo. A continuación se detallará el equipo y procedimiento utilizado:

## Equipos

Los equipos utilizados para este ensayo, fueron los siguientes:

- Máquina de Impacto al Dardo
  - Diámetro del Dardo: 12.7 mm.
  - Altura de Caída Libre: 0 – 1.1m., variando 152 mm. cada impacto.
  - Peso del dardo: 9706.88 gramos.
  - Anillo sujetador: 89 mm.



**FIGURA 3.3 CONSTRUCCIÓN DEL DARDO DE IMPACTO**



**FIGURA 3.4 MÁQUINA DE IMPACTO AL DARDO**

### **Condiciones y Requerimientos**

Las condiciones y requerimientos que se necesitan para poder realizar el ensayo son las siguientes :

- Las condiciones del ensayo son a  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Las muestras deben estar en el congelador de 4 a 12 horas.
- El ensayo emplea un dardo cuya cabeza tiene 12.7 mm de diámetro como se muestra en la figura 3.3, con un peso de 9706.88 gramos, que se deja caer desde una altura variable. Estos parámetros son estandarizados según la norma ASTM D 5628-96.

- Las muestras serán de 127 mm x 127 mm. y se tomarán de 20 – 24 muestras por cada producto monocapa rotomoldeado.



**FIGURA 3.5 MUESTRAS PARA ENSAYO DE IMPACTO**

### **Procedimiento**

El procedimiento a seguir es el siguiente:

- Elevar el dardo a una de altura en donde la muestra pueda fallar, para realizar esto se deben utilizar algunas muestras.
- Tomar una muestra con guantes y la ponerla boca arriba en el anillo sujetador.
- Cierre la puerta de seguridad.
- Libere el dardo desde la altura que se determinó anteriormente.
- Remueva la muestra y observe la condición de la misma.
- Anótela en el record.

- Si la muestra pasa, se incrementa la altura del dardo en 152 mm.; en cambio si la muestra falla, se disminuye 152 mm.
- Se repite el procedimiento para las siguientes muestras hasta conseguir 10 pasadas o 10 fallas.
- Realizar los cálculos pertinentes para obtener el MFE (Energía de Impacto), con la siguientes fórmulas:

$$h = h_0 + d_h \left[ \frac{A}{N} \pm 0.5 \right] \quad y$$

$$MFE = h \times \text{peso de impactor}$$

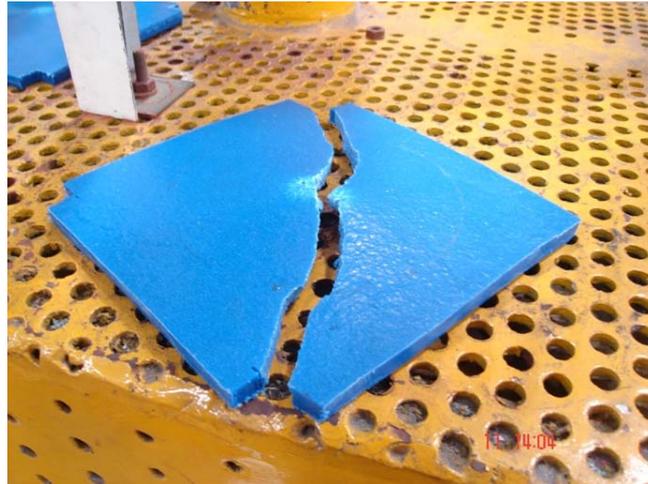
➤ Donde:

- N = número total de eventos
- A = suma de la columna  $i \times n_i$
- $h_0$  = menor altura donde ocurrió un evento
- $d_h$  = cambio de altura del impactor luego de un evento
- $h$  = altura promedio de falla
- MFE = Energía de Impacto

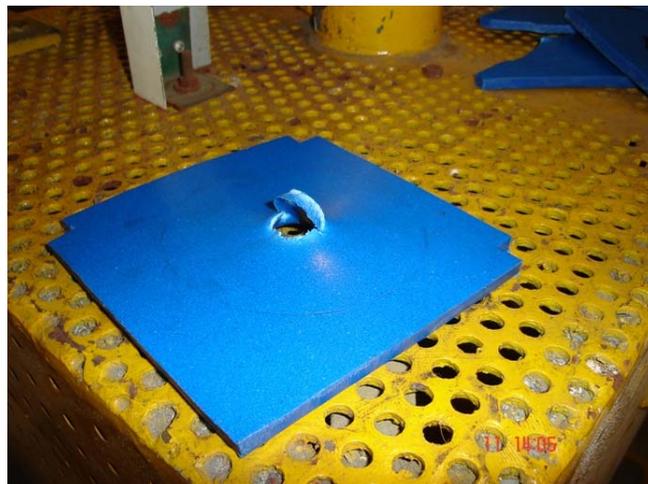
Altura Impacto (ft)	Resultados de Impacto Muestra 1																		n <sub>i</sub>	i	i x n <sub>i</sub>			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18						
3			ж				ж	ж	ж					ж		ж								
2,5		0	ж		0		0	0		ж		0			0		0		7	1		7		
2	0				0							0							3	0		0		
	TOTAL																		10		7			

**FIGURA 3.6 RECORD PARA ENSAYO DE IMPACTO PARA LA MUESTRA 1**

Es importante mencionar que las “pasadas” se refiere a que las muestras no han tenido fractura dúctil, ni frágil, en cambio para las muestras “falladas” se presentaron fracturas luego del impacto con el dardo.



**FIGURA 3.7 FALLA FRAGIL**



**FIGURA 3.8 FALLA DUCTIL**

## Resultados

Los resultados de este ensayo se mostrarán en la tabla 9, para mayor facilidad se le ha designado a cada producto rotomoldeado un número, para evitar nombrar repetidamente los parámetros al que fueron sometidas las muestras, las cuales fueron detalladas al comienzo del capítulo.

**TABLA 9**

**ENERGIA DE IMPACTO DE LAS MUESTRAS**

Muestras	Energía de Impacto (J)
1	75.44
2	77
3	101.55
4	13.06
5	95.7
6	114.6
7	118.9
8	100.1

Como manera de ejemplo se obtendrá la Energía de Impacto para la muestra 1:

**TABLA 10**  
**PRUEBA DE IMPACTO MUESTRA 1**

Altura de Impacto (ft)	ni	i	i x ni
2.5	7	1	7
2	3	0	0
TOTAL	<b>N = 10</b>	0	<b>A = 7</b>

Se aprecia en la tabla 10, extrae lo más relevante al record del ensayo de impacto de la muestra 1 mostrado en la fig. 3.6. Para el cálculo de la altura promedio de falla hay dos opciones: escoger las 10 primeras “pasadas” lo que implica signo positivo en la ecuación o signo negativo si es el caso de las 10 primeras fallas. En la muestra 1 hemos cogido las pasadas.

$$h = h_0 + d_h \left[ \frac{A}{N} + 0.5 \right] ft$$

$$h = 2 + 0.5 \left[ \frac{7}{10} + 0.5 \right] ft$$

$$h = 2.6 ft$$

$$MFE = h \times \text{peso de impactor} (lbs)$$

$$MFE = 2.6 \times 21.4 = 55.64 ft.lbs \Rightarrow 75.44 J$$

A continuación mostraremos las tablas de las pruebas de impacto realizadas de los otros productos monocapas rotomoldeados a analizar:

**TABLA 11**

**PRUEBA DE IMPACTO MUESTRA 2**

Altura de Impacto (ft)	ni	i	i x ni
3	2	2	4
2.5	4	1	4
2	4	0	0
TOTAL	<b>N = 10</b>		<b>A = 8</b>

**TABLA 12**

**PRUEBA DE IMPACTO MUESTRA 3**

Altura de Impacto (ft)	ni	i	i x ni
3.5	5	1	5
3	5	0	0
TOTAL	<b>N = 10</b>	0	<b>A = 5</b>

TABLA 13

## PRUEBA DE IMPACTO MUESTRA 4

Altura de Impacto (ft)	ni	i	i x ni
1.5	1	2	2
1	2	1	2
0.5	7	0	0
TOTAL	<b>N = 10</b>		<b>A = 4</b>

TABLA 14

## PRUEBA DE IMPACTO MUESTRA 5

Altura de Impacto (ft)	ni	i	i x ni
3.5	3	2	6
3	5	1	5
2.5	2	0	0
TOTAL	<b>N = 10</b>		<b>A = 11</b>

TABLA 15

## PRUEBA DE IMPACTO MUESTRA 6

Altura de Impacto (ft)	ni	i	i x ni
4	4	1	4
3.5	6	0	0
TOTAL	<b>N = 10</b>	<b>0</b>	<b>A = 4</b>

TABLA 16

## PRUEBA DE IMPACTO MUESTRA 7

Altura de Impacto (ft)	ni	i	i x ni
4	7	1	7
3.5	3	0	0
TOTAL	<b>N = 10</b>	0	<b>A = 7</b>

TABLA 17

## PRUEBA DE IMPACTO MUESTRA 8

Altura de Impacto (ft)	ni	i	i x ni
3.5	4	1	4
3	6	0	0
TOTAL	<b>N = 10</b>	0	<b>A = 4</b>

# CAPÍTULO 4

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

### 4.1 Análisis de PIAT vs. Densidad

Cabe señalar que para cada análisis se tomarán las muestras que difieren en una variable varíe, con esto lograremos ver su influencia en la propiedad de impacto o densidad.

Para este análisis se tomaron las muestras 1, 2, 3 y 4, la temperatura de horno y enfriamiento fueron los mismos, pero se varió los tiempos de calentamientos lo que genera que las muestras presenten diferentes PIAT y alcancen diversas densidades como se muestra en la Tabla 20, en el presente análisis no se establecen relaciones con las demás muestras por que tuvieron temperaturas de horno y tipo de enfriamiento distintos.

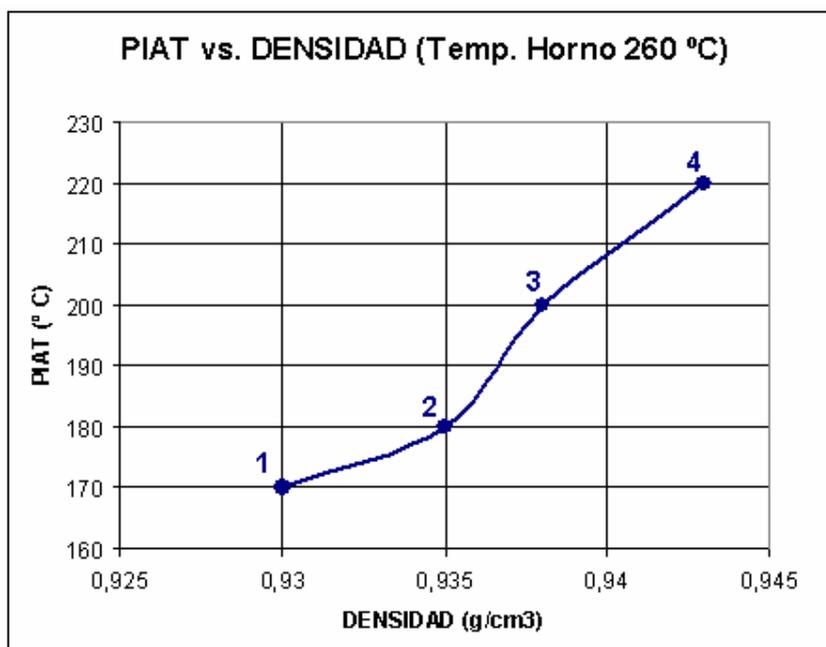
TABLA 18

**PIAT Y GRADO DE CURA OBTENIDOS A DIFERENTES  
CONDICIONES DE PROCESAMIENTO**

#	Temp. Horno (°C.)	Tiempo Horno (min)	Tipo Enfr.	PIAT (°C)	Densidad (g/cc)
1	260	21	Aire forzado	170	0.93
2	260	23	Aire forzado	180	0.935
3	260	29	Aire forzado	200	0.938
4	260	40	Aire forzado	222	0.943
5	300	21	Aire quieto	200	0.938
6	300	21	Aire forzado	200	0.937
7	300	21	Aire + agua	200	0.936
8	330	18	Aire forzado	200	0.936

En la figura 4.1, la muestra 4 presenta el mayor valor de densidad con 0.943 g/cm<sup>3</sup>. con respecto a las otras muestras en estudio, es importante mencionar que como tuvieron la misma temperatura de horno es decir un mismo gradiente de temperatura, todo dependerá del tiempo en el que polímero este en el horno mientras mayor sea este mayor será el PIAT, el producto 4 como se dijo anteriormente obtuvo la mayor densidad debido a que alcanzó el mayor tiempo, esto implica que se conjuguen dos factores fundamentales: primero que a una mayor temperatura en estado de fusión presente una mayor

reducción en las propiedades viscoelásticas y segundo a una mayor temperatura significa un mayor tiempo en el cual podrá migrar las burbujas dentro de la fundición haciendo que se logre una mejor densificación.



**FIGURA 4.1 COMPARACION DE DENSIDADES A DIFERENTES PIAT.**

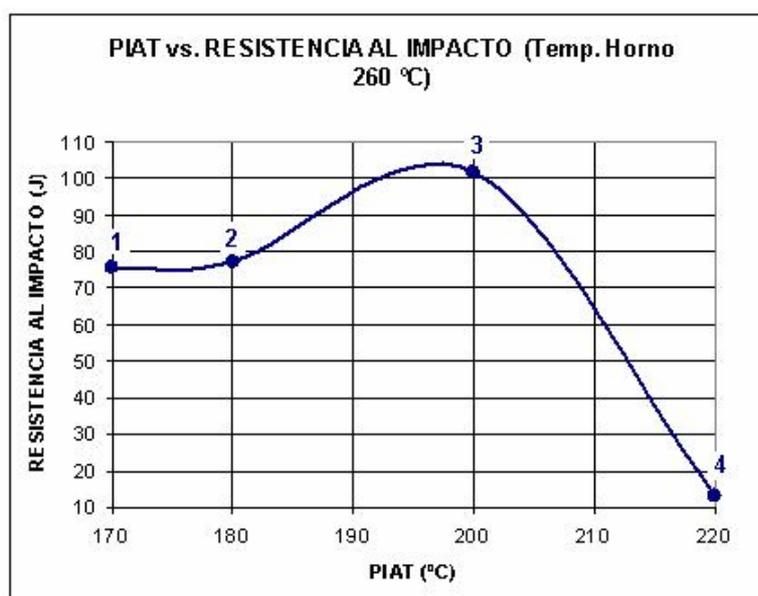
#### **4.2 Análisis de PIAT vs. Resistencia al Impacto**

En este análisis se cogieron las muestras 1, 2, 3 y 4, si nos damos cuenta fueron las mismas que se tomaron en el análisis anterior pero ahora la finalidad es apreciar la variación de la resistencia al impacto a diferentes PIAT dejando constante la temperatura del horno (260°C.) y el tipo de enfriamiento (aire forzado).

TABLA 19

**VARIACION DE LA ENERGIA DE IMPACTO A DIFERENTES PIAT  
BAJO TEMPERATURA DE HORNO 260°C**

#	PIAT (°C)	Densidad (g/cc)	MFE (J)
1	170	0.93	75.44
2	180	0.935	77
3	200	0.938	101.55
4	222	0.943	13.06



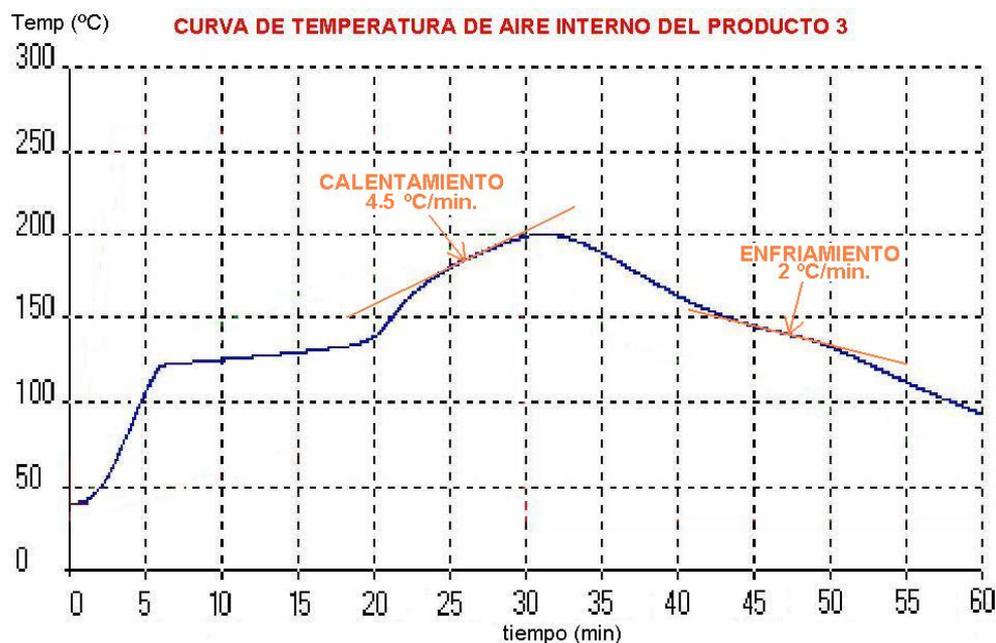
**FIGURA 4.2 COMPARACION DE RESISTENCIAS AL IMPACTO A  
DIFERENTES PIAT.**

En la tabla 19 se develan los valores que gobiernan el presente análisis, por medio de estas dos se puede observar que mientras aumenta la densidad se incrementa la resistencia al impacto hasta

cierto límite, más allá se produce una caída brusca que se explicará mas adelante.

La gráfica 4.2, demarca la tendencia que la resistencia al impacto va en aumento con respecto al PIAT hasta que llega a un pico en la muestra 3 con 101.55 J. luego cae dramáticamente, la explicación es simple, un mayor PIAT implica mayor calor, la capa más interna del producto es la más afectada por la presencia de oxígeno en el aire dentro del molde y excesivo calor afecta la estructura del polietileno lo que produce entrecruzamiento de sus moléculas debido a la división de su enlace covalente, esta estructura limita la capacidad del polímero a extenderse bajo cargas, la muestra 4 es un reflejo de lo dicho con 13.06 J.

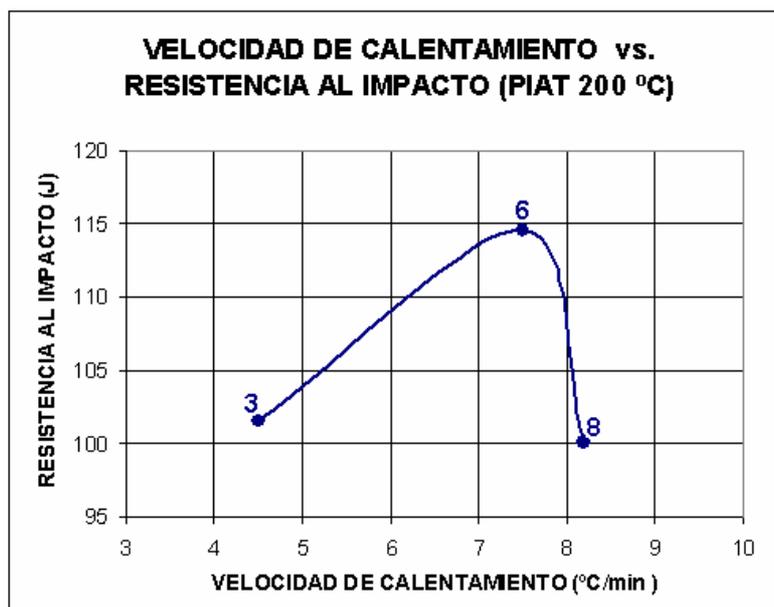
Para continuar los análisis 4.3 y 4.4 referentes a las velocidades de calentamiento y enfriamiento, debemos mencionar que se las obtiene por medio de la gráfica de temperatura de aire interno donde la pendiente en la zona de densificación y en la zona de cristalización nos dan las tasas aproximadas de calentamiento y enfriamiento respectivamente, a continuación se mostrará la curva para el producto 3.



**FIGURA 4.3 VELOCIDAD DE CALENTAMIENTO Y ENFRIAMIENTO PARA EL PRODUCTO 3.**

#### **4.3 Análisis de Rapidez de Calentamiento vs. Resistencia al Impacto**

Para efectuar el análisis se tomaron las muestras 3, 6 y 8, tipo de enfriamiento y PIAT idénticos, se varió la temperatura del horno lo cual influye a que haya un cambio en el gradiente térmico en el sistema molde-pared rotomoldeada y se altere la velocidad de calentamiento en la curva de aire interno para cada proceso.



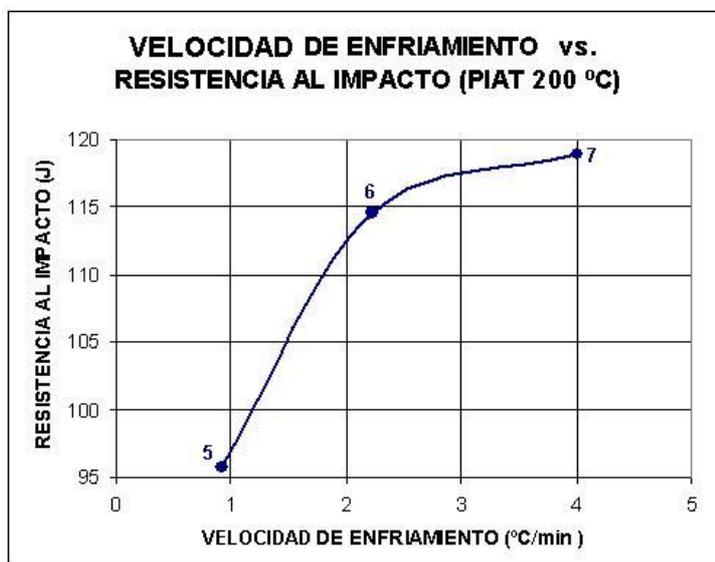
**FIGURA 4.4 COMPARACION DE RESISTENCIAS AL IMPACTO A DIFERENTES VELOCIDADES DE CALENTAMIENTO.**

El polímero en la etapa de calentamiento pasa de polvo a material fundido, por lo tanto habrá distintas velocidades de calentamiento reflejadas en la curva Temperatura de aire interno vs. tiempo, pero la clave es analizar la velocidad cuando el material está en la zona de densificación. Para las temperaturas de horno 260, 300, 330 °C., obtuvimos las velocidades de calentamiento 4.5, 7.5, 8.2 °C/min. en la zona de densificación, además se visualiza un pico en la muestra 6, esto quiere decir que la velocidad de calentamiento de 7.5 °C/min. tuvo el mejor efecto en la propiedad de impacto con 114.6 J. por lo que a esta velocidad se logra un tiempo de ciclo de calentamiento óptimo, provocando que se ingrese la cantidad de energía adecuada

al sistema que permita una buena migración de burbujas y que se refleje en una excelente densificación.

#### 4.4 Análisis de Rapidez de Enfriamiento vs. Resistencia al Impacto

Para analizar la velocidad de enfriamiento se debe hacer un estudio parecido al anterior, con la diferencia de enfocarnos a las muestras 5, 6 y 7, que tuvieron temperatura del horno y PIAT idénticos, los tipos de enfriamiento variaron para cada producto siendo aire quieto, aire forzado y la combinación aire-agua respectivamente, con esto se podrá validar cual enfriamiento produce la mejor microestructura para soportar mayores cargas de impacto.



**FIGURA 4.5 COMPARACION DE RESISTENCIAS AL IMPACTO A DIFERENTES VELOCIDADES DE ENFRIAMIENTO.**

En la figura 4.5, podemos ver las velocidades de enfriamiento de las muestras analizadas estas fueron: 0.92, 2.23 y 4 °C/min. respectivamente, lo que confirma una fuerte influencia de la resistencia al impacto vs. velocidad de enfriamiento, esto se debe a que el polietileno tiene un alto valor de rapidez de cristalización alrededor de 5000  $\mu\text{m}/\text{min}$ . y sometiéndolo a enfriamientos rápidos se pueden conseguir menores valores de cristalinidad alrededor de 35 a 45%, normalmente la cristalinidad del LLDPE esta en un 60%, el enfriamiento aire-agua debido a su mayor coeficiente convectivo, alcanzó la mayor rapidez de enfriamiento de 4 °C/min., lo que permite que se conformen la menor cantidad cristales posibles dejando más zonas amorfas y esto significa que el producto 7 obtenga la mayor resistencia entre los tres.

Para describir brevemente la fase de enfriamiento, para el aire forzado se aplica desde que el producto finaliza la etapa de calentamiento es decir una vez que alcanza el PIAT hasta el punto de desmoldeo, el enfriamiento aire-agua es una combinación al comienzo se emplea aire forzado desde el PIAT hasta el punto donde empieza la zona de cristalización, seguida de un corto período de agua, en este caso fueron 4 minutos con la finalidad de incrementar la rapidez de enfriamiento en esta zona lo que implica acortar el tiempo que tiene el

polímero para reagruparse y formar cristales volviéndolo tenaz, luego se vuelve al aire forzado hasta el punto de desmoldeo.

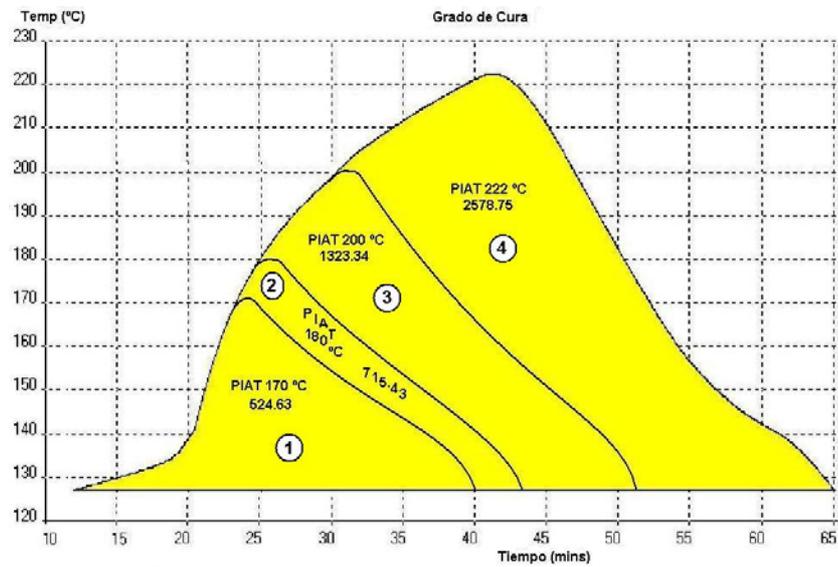
#### **4.5 Análisis de Grado de Cura vs. Resistencia al Impacto**

Para delimitar este estudio se lo analizará de tres maneras:

- Grado de Cura a diferentes PIAT.
- Grado de Cura a diferentes enfriamientos.
- Grado de Cura a diferentes calentamientos.

Para la primera parte del análisis correspondiente al grado de cura se tomarán las muestras 1, 2, 3 y 4, se basa en el criterio de selección de muestras del estudio PIAT vs. Densidad pero ahora vamos a ver como cambia el grado de cura a diferentes PIAT.

La Fig. 4.6 es una clara muestra que el grado de cura se incrementa mientras se alcanza un mayor PIAT por definición el grado de cura es el área encerrada bajo la curva de la curva Temperatura aire interno vs. tiempo y sobre la temperatura de fusión de nuestro polímero que en nuestro caso es 127 °C., hay que tener claro que no podemos administrarle tanta energía como queramos al material por que se puede presentar la degradación lo que conlleva la pérdida de las propiedades mecánicas.



**FIGURA 4.6 VARIACION DEL GRADO DE CURA A DIFERENTES PIAT**

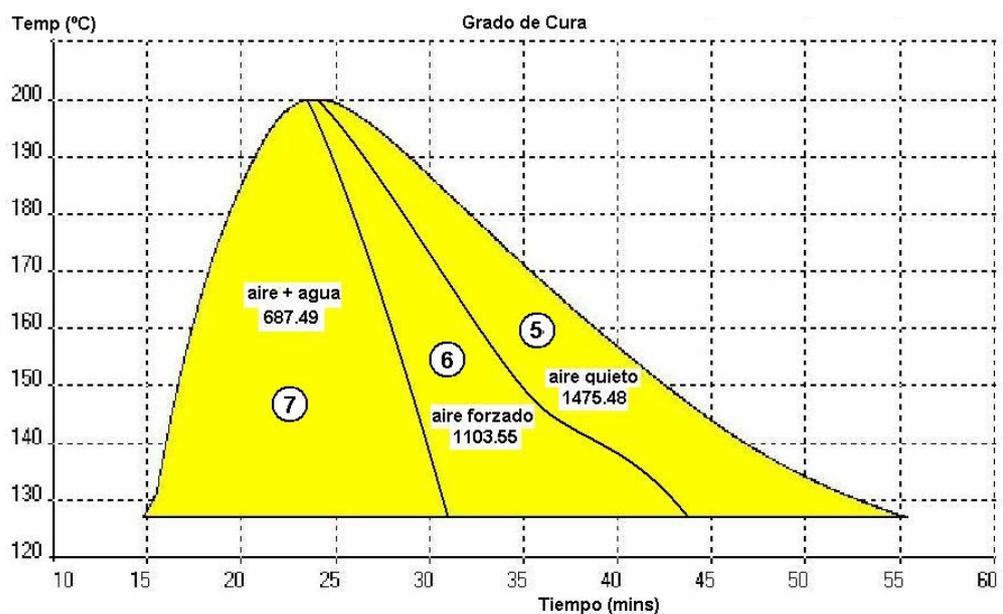


**FIGURA 4.7 COMPARACION DE LA RESISTENCIA AL IMPACTO Y GRADO DE CURA A DIFERENTES PIAT**

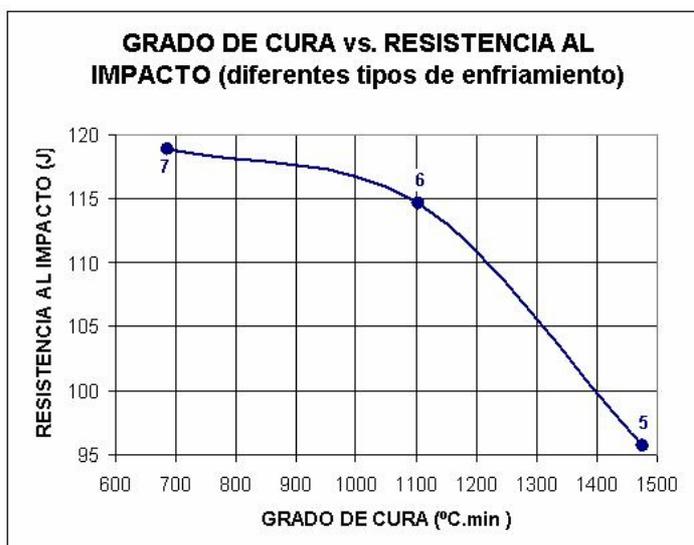
La muestra 3 que presenta un PIAT de 200 °C. alcanzó los 1323.34 °C.min. de Grado de Cura, se obtuvieron las mejores propiedades de

impacto posibles, más allá de ese valor de grado de cura se presenta una degradación del material lo que implica un descenso dramático en las propiedades de impacto como se corrobora en la muestra 4 con 2578.75 °C.min.

Para continuar el estudio ahora entraremos al Grado de Cura obtenido bajo diferentes enfriamientos donde se tomarán las muestras con diferentes enfriamientos 5, 6 y 7, con la finalidad de observar la influencia del Grado de Cura en la Resistencia al Impacto.



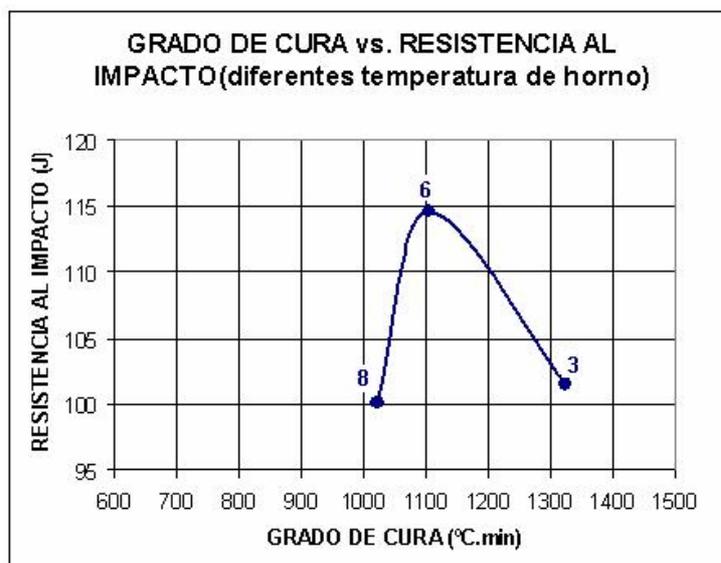
**FIGURA 4.8 VARIACION DEL GRADO DE CURA A DIFERENTES ENFRIAMIENTOS**



**FIGURA 4.9 COMPARACION DE LA RESISTENCIA AL IMPACTO Y GRADO DE CURA A DIFERENTES ENFRIAMIENTOS**

La variación del tipo de enfriamiento tiene mucha influencia en el grado de cura del producto, un tipo de enfriamiento leve hace que mayor cantidad de energía ingrese al material, como lo es el enfriamiento con aire quieto donde se obtuvo 1475.48 °C.min., con esto vemos que menor grado de cura obtendrá un tipo de enfriamiento más agresivo como la combinación aire-agua con 687.49 °C.min, y podemos decir llegaremos a obtener una mayor resistencia al impacto si impedimos que asimile la mayor cantidad de energía posible el polímero en la zona de enfriamiento.

La tercera parte del estudio sobre el Grado de Cura se centrará a muestras 3, 6 y 8 con diferentes temperaturas de horno 260°C, 300°C y 330°C.

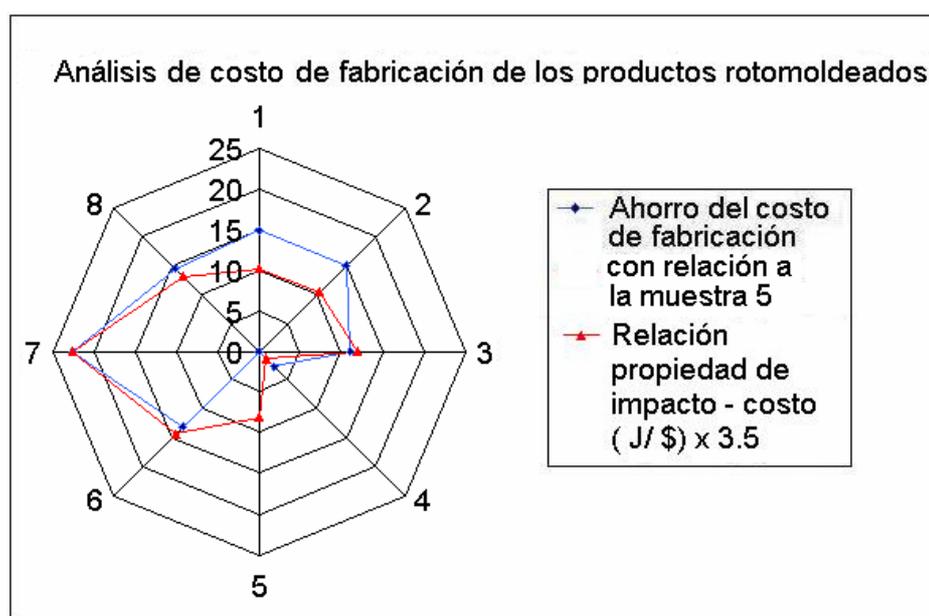


**FIGURA 4.10 COMPARACION DE LA RESISTENCIA AL IMPACTO Y GRADO DE CURA A DIFERENTES CALENTAMIENTOS**

En la Fig. 4.10 podemos ver que a medida que se incrementa la Temperatura de Horno se disminuye el Grado de Cura, esto se explica por el hecho que a una mayor rapidez de calentamiento se disminuye el tiempo en el que polímero debe estar en el horno para alcanzar dicho PIAT e ingrese menor cantidad de calor, se observa un pico en la resistencia al impacto alcanzado por la muestra 6 (Temp. Horno 300 °C) con un grado de cura de 1103.55 °C.min., podemos decir que a esta Temperatura de Horno hace que todas las variables inmersas en el proceso establezcan una relación óptima entre contenido de burbujas, densidad, y estructura cristalina del producto maximizando la resistencia al impacto.

#### 4.6 Análisis de Costos vs. Resistencia al Impacto

Para finalizar el capítulo se verá el ahorro en la fabricación entre los productos analizados con respecto a su resistencia al impacto.



**FIGURA 4.11 COMPARACIÓN ENTRE COSTOS DE FABRICACIÓN DE LAS MUESTRAS.**

Debemos analizar la relación beneficio-costos, en nuestro caso impacto/costo, esta proporción nos deja visualizar fácilmente el beneficio alcanzado por cada dólar invertido en cada producto, donde finalmente se basan las decisiones sobre el procesamiento más rentable para la empresa. Por lo tanto, como se ve en la figura 13, la muestra 4 que fue un producto degradado se ve claramente afectado en la relación impacto-costo ya que tuvo el menor valor de todas con (0.339 J/\$), las muestras 1, 2 y 5 tuvieron valores entre 2.5–3 J/\$., las

muestras 3, 6 y 8 oscilaron entre 3-4 J/\$ y la que logró la mayor proporción fue la muestra 7 con 6.43 J/\$. La curva del ahorro se lo hizo desde una referencia, el producto que alcanzó el mayor costo de fabricación (muestra 5) nos sirvió como patrón para comparar el ahorro relativo que se alcanza con los otros productos remitiéndonos a la Fig. 11 la muestra 7 tuvo el mayor ahorro 22.5\$, ahora tenemos razones de peso para afirmar que la muestra 7 obtuvo los mejores parámetros de máquina en nuestro estudio por concepto de mayor ahorro y relación impacto-costos.

# CAPÍTULO 5

## 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 5.1 Conclusiones

1. La óptima temperatura pico de aire interno (PIAT), para los productos rotomoldeados de PE es 200 °C, a esta temperatura pico dentro del molde se logra la mayor resistencia al impacto posible.
2. A medida que se incrementa velocidad de calentamiento del proceso o la temperatura del horno se disminuye la densidad del producto rotomoldeado.
3. Haciendo una comparación a PIAT constante de 200 °C., mientras se aumenta la temperatura de horno de 260 °C a 300 °C y 330 °C. se logra una notable reducción en el tiempo total del ciclo de 14%

y 21%, importante punto a considerar si debemos aumentar la productividad.

4. La migración de las burbujas en el producto rotomoldeado toma alrededor del 40% del tiempo total del ciclo.
5. Las propiedades mecánicas como la tensión y compresión no se ven notoriamente afectadas por un producto degradado en la capa interna, ya que la proporción de material en buen estado es mucho mayor que la dañada y los esfuerzos aplicados se reparten como consecuencia el efecto es mínimo, en el impacto no ocurre lo mismo la capa degradada (oxidada) tiene un efecto devastador ya que actúa como zona de inicio de fractura.
6. Bajo las mismas condiciones en el horno, si se eleva el PIAT se consigue mayor Grado de Cura, no ocurre lo mismo a PIAT constante, que disminuye el Grado de Cura cuando se sube la temperatura de horno.
7. La velocidad de enfriamiento en la zona de cristalización tiene una destacada injerencia en la resistencia final del producto,

mientras menor tiempo tengan los cristales para reagruparse en la zona de cristalización tendremos mayor resistencia al impacto.

8. Con un PIAT de 200°C, temperatura de horno de 300°C, y enfriamiento rápido aire+agua, se obtiene la mayor resistencia al impacto posible, utilizando la menor cantidad de recursos, reduciendo el tiempo de ciclo del producto y generando ahorros para la empresa.

## **5.2 Recomendaciones**

1. Meter una alimentación de aire caliente a temperatura del horno dentro del molde evitando gradientes altos lo que implica un calentamiento más rápido reduciendo el tiempo del ciclo.
2. La inclusión de presión de 0.1 a 1 bar dentro del molde durante la densificación en el calentamiento permitirá liberar mayor cantidad de burbujas a un menor PIAT lo que genera mejorar en 20% la propiedad de impacto y una disminución en el tiempo de ciclo de alrededor de 25%.
3. En el enfriamiento debe apuntarse a tener bajos gradientes térmicos a través del polímero fundido por lo que un enfriamiento

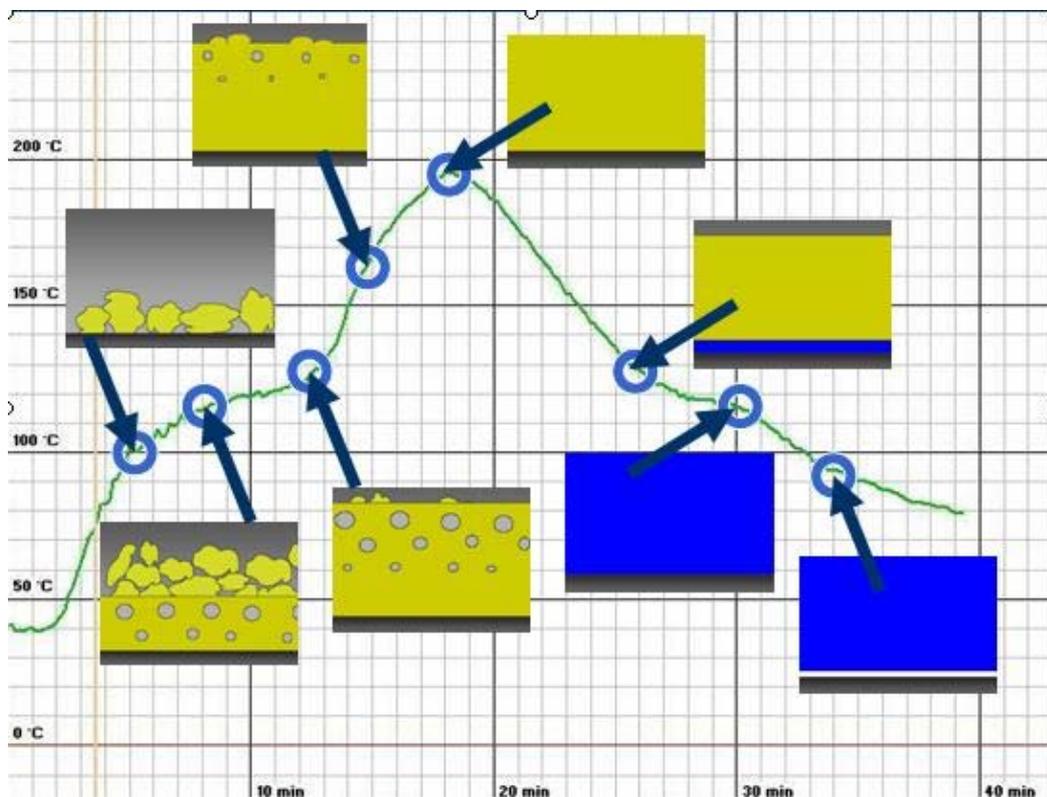
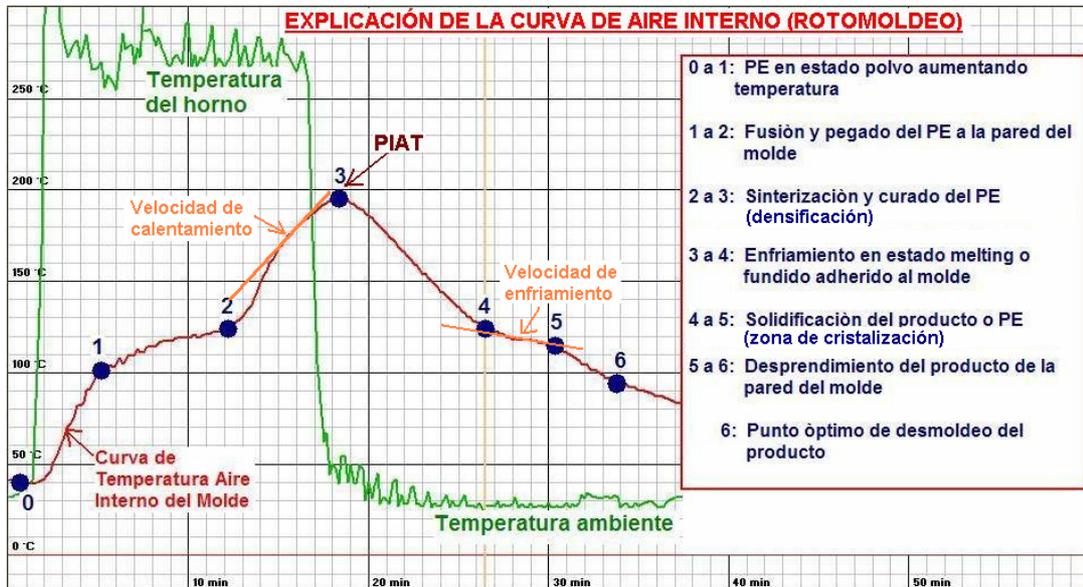
rápido provoca alabeo y un enfriamiento lento transforma al proceso en ineficiente.

4. En el enfriamiento sería un aporte importante la inclusión de presión ya que esto previene de la liberación del producto de la superficie interna del molde hasta la temperatura de desmoldeo y asegurar que el plástico retenga su forma deseable.
5. Otra recomendación es utilizar aire forzado con nube atomizada de agua, se alcanzaría valores más altos de velocidades de enfriamiento lo que significaría niveles más altos de impacto y achicamiento del tiempo de ciclo.
6. La selección de un apropiado desmoldante debido a que la rapidez de enfriamiento del plástico será altamente dependiente si esta o no el material en contacto con el molde. Deben escogerse para activar la liberación del plástico a una temperatura específica.

# APÉNDICES

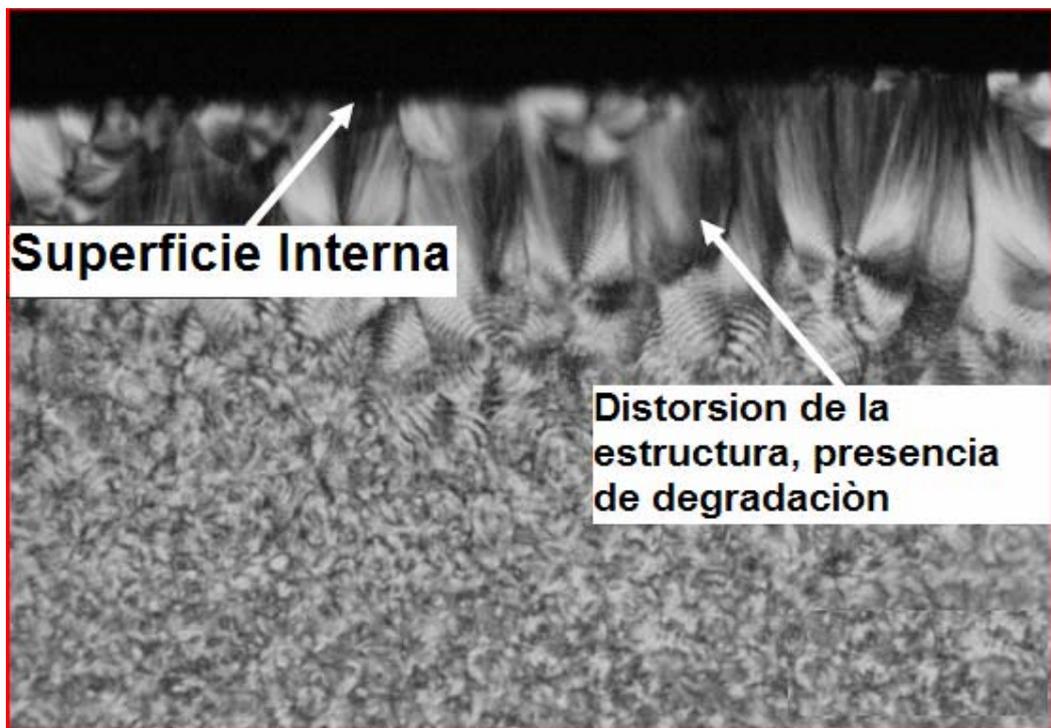
## APENDICE A

### DESCRIPCIÓN DE LA CURVA DE AIRE INTERNO.



## APENDICE B

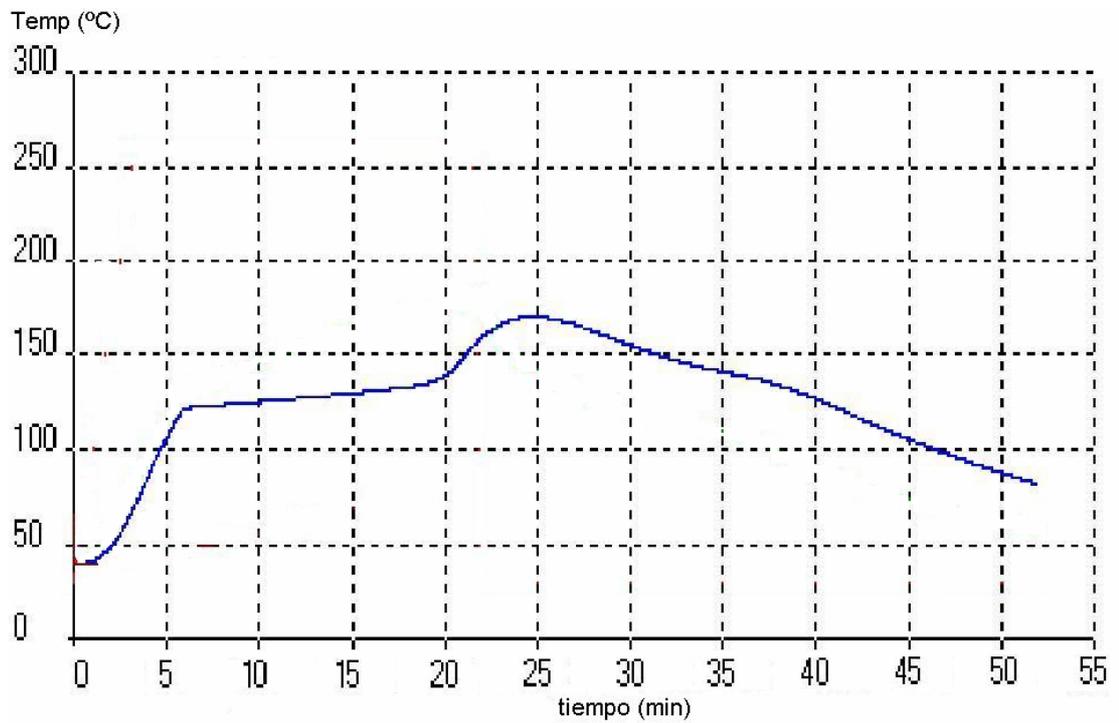
### PRODUCTO DEGRADADO



## APENDICE C

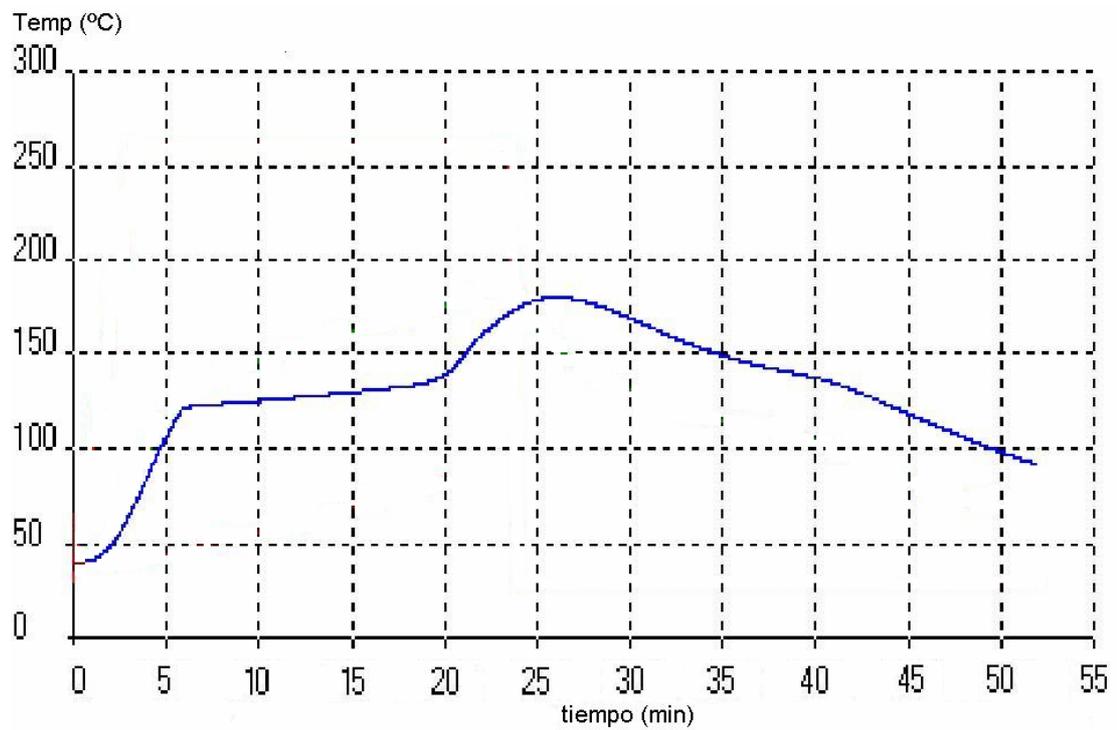
### CURVA TEMPERATURA DE AIRE INTERNO VS.

### TIEMPO DEL PRODUCTO 1



## APENDICE D

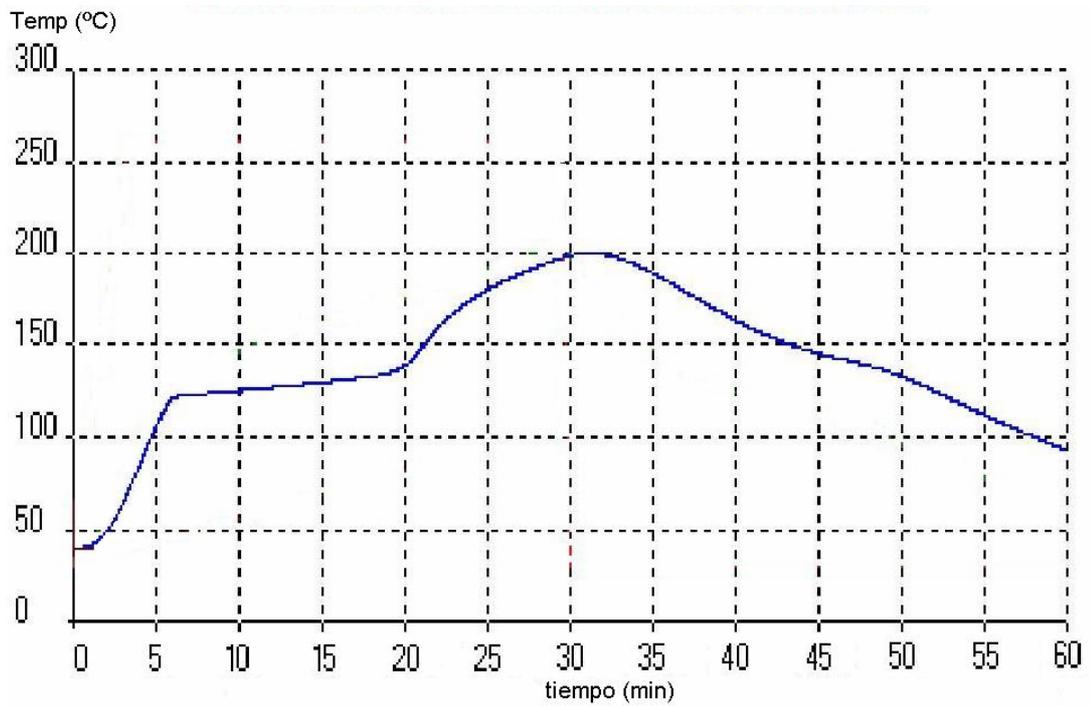
### CURVA TEMPERATURA DE AIRE INTERNO VS. TIEMPO DEL PRODUCTO 2



## APENDICE E

### CURVA TEMPERATURA DE AIRE INTERNO VS.

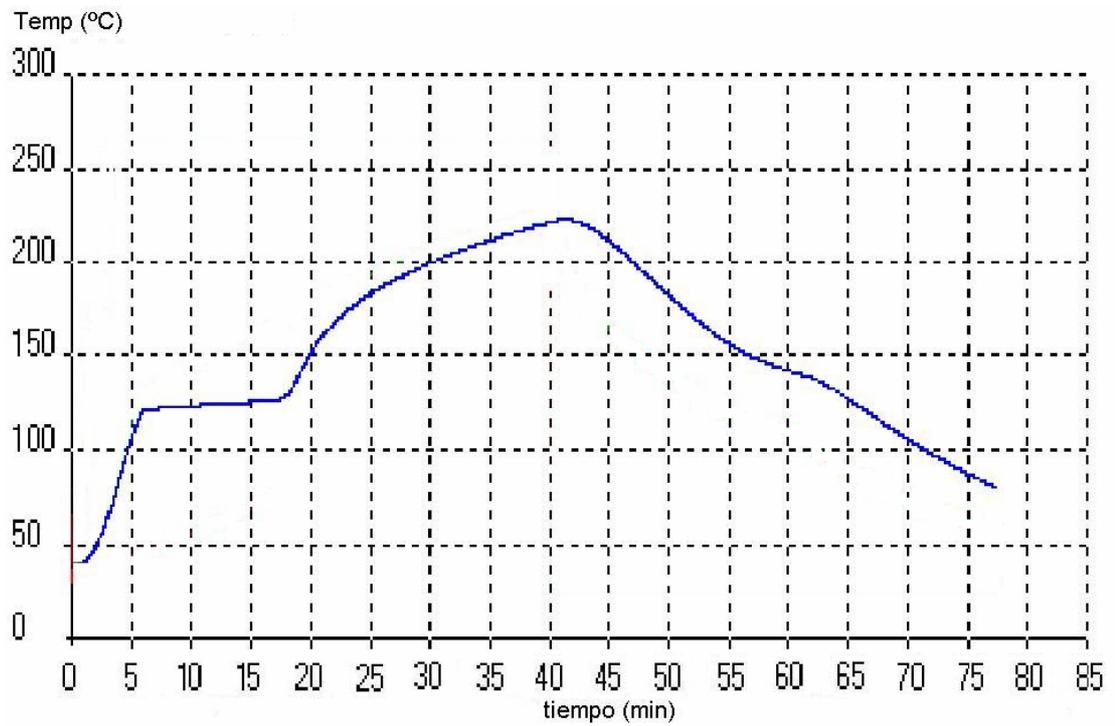
### TIEMPO DEL PRODUCTO 3



## APENDICE F

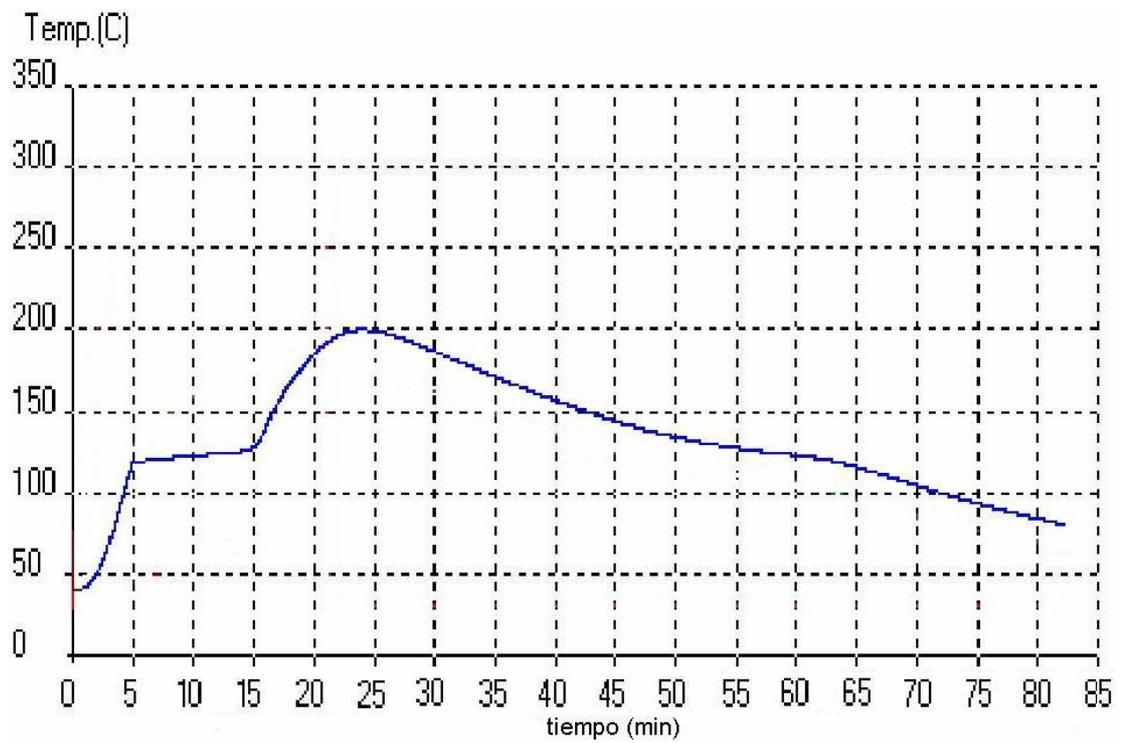
### CURVA TEMPERATURA DE AIRE INTERNO VS.

### TIEMPO DEL PRODUCTO 4



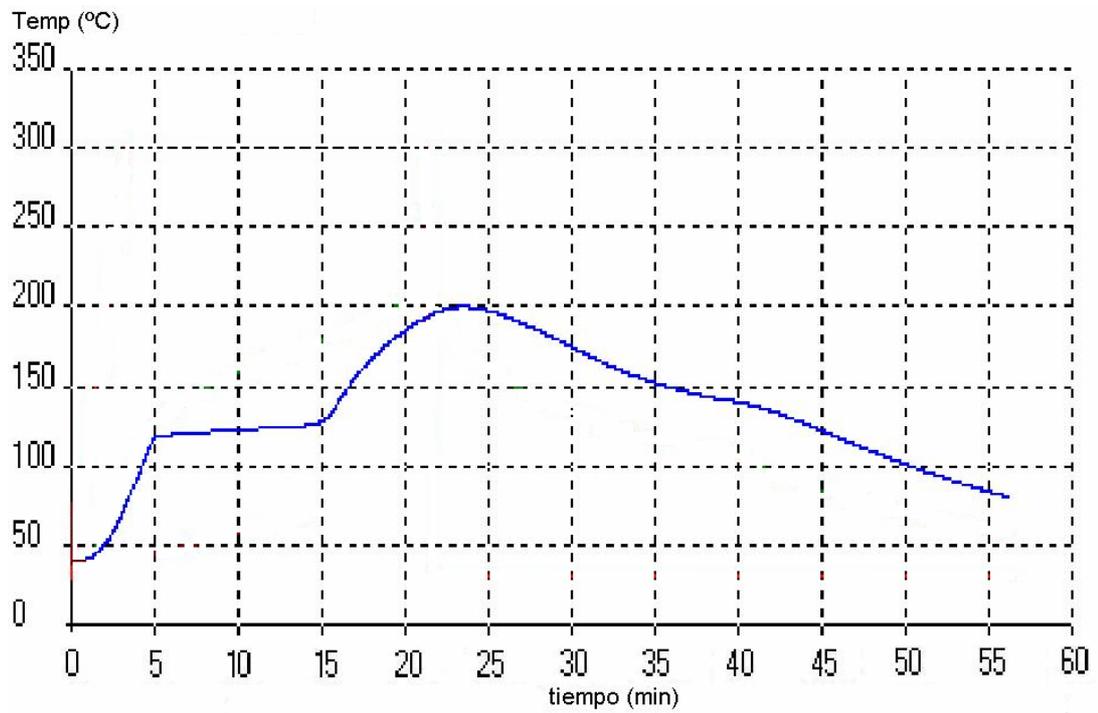
## APENDICE G

### CURVA TEMPERATURA DE AIRE INTERNO VS. TIEMPO DEL PRODUCTO 5



## APENDICE H

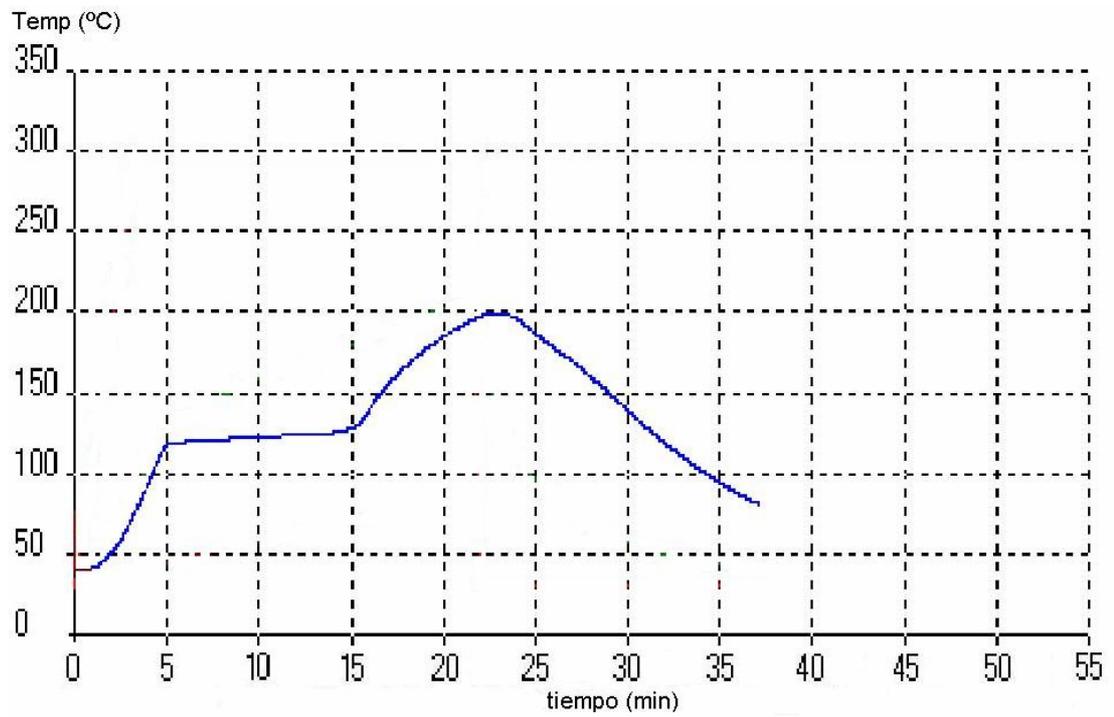
### CURVA TEMPERATURA DE AIRE INTERNO VS. TIEMPO DEL PRODUCTO 6



## APENDICE I

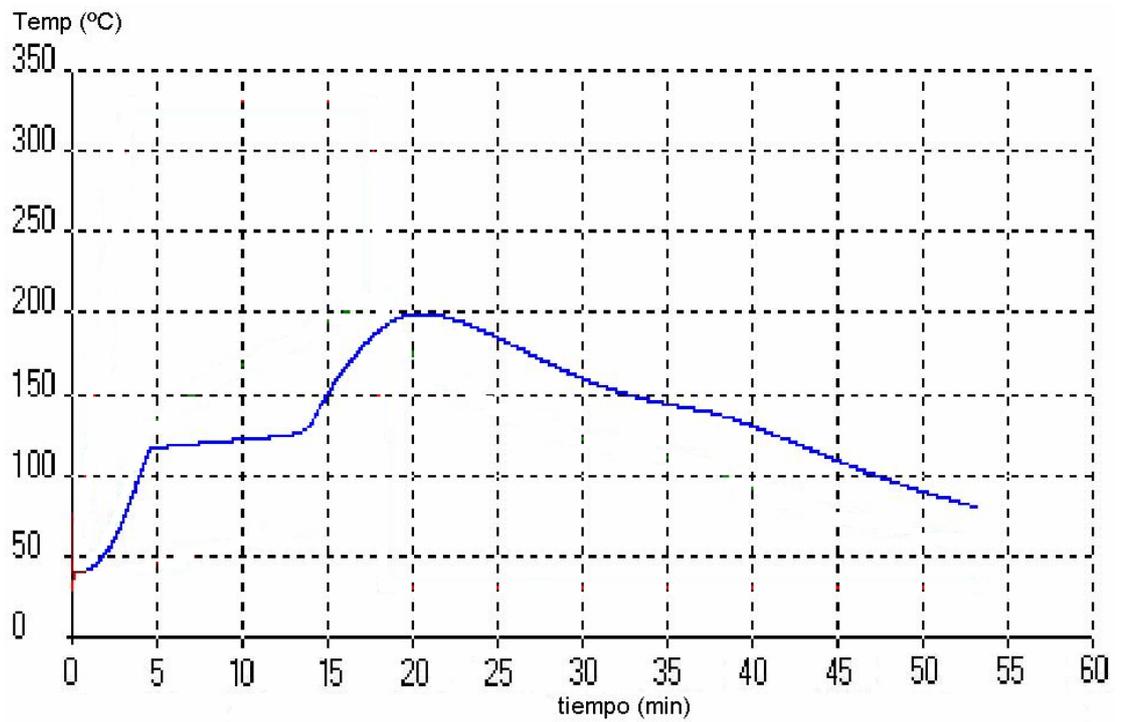
### CURVA TEMPERATURA DE AIRE INTERNO VS.

### TIEMPO DEL PRODUCTO 7



## APENDICE J

### CURVA TEMPERATURA DE AIRE INTERNO VS. TIEMPO DEL PRODUCTO 8



## APENDICE K

### HOJA TECNICA DE RESINAS HYUNDAI

Hyundai Petrochemical Co., Ltd.													
Linear Low Density Polyethylene													
Item	Property Method (ASTM) Grade/Unit	Melt Index (MI) D1238 g/10min	Density (D) D1505 g/cm <sup>3</sup>	Tm HPC °C	Vicat Softening Point D1525 Degree C	Tensile strength at break D638 Kg/cm <sup>2</sup>		Elongation at Break D638 %	Hardness D2240 D Scale	Tensile Modulus (2% Secant Modulus) D638 kg/cm <sup>2</sup>	Flexural Modulus D747 kg/cm <sup>2</sup>	IZOD Impact Strength 23 °C D256 kg.cm/cm	E. S. C. R. (F50) D1693
						Yield	Break						
Roto Moulding	SR646	4.5	0.932	123	110	140	230	900	62	6400	4600	65	>500
	UR644	5.0	0.934	127	110	140	170	650	63	6500	4600	60	>500
	UR646	5.0	0.934	127	115	140	180	650	63	6500	4600	80	>1000
	SR548	4.0	0.935	125	115	160	250	900	64	7200	5500	80	>1000

# APENDICE L

## CARACTERISTICAS GENERALES DEL DESMOLDANTE

### Mold Release Agent

#### Features

No chlorinated solvents  
High gloss and high slip  
No contaminating transfer  
Versatile - releases most polymers  
No mold build-up  
Room temperature cure

#### Properties

Appearance	Clear liquid
Odor	Hydrocarbon
Solvents Aliphatic	Hydrocarbon, Dibutyl Ether
Specific Gravity	0.760 +/- .010
Flash Point	31°C (88°F) Tag Closed Cup
Special Cautions	Moisture sensitive, keep container tightly closed when not in use.
Shelf Life	1 year from date of manufacture
Application Temp	55°F -275°F
Thermal stability when cured	750°F

#### Mold Preparation

The mold surface must be clean and free of any release agent or other contaminants for Frekote 700-NC to be completely effective. Remove any contaminants with Frekote PMC, PMC Plus or suitable cleaning solvent. Light industrial abrasives can be used to remove heavy resin build up.

New Molds: Full curing of new molds is advisable to ensure the best bonding of the Frekote to the mold surface. New fiberglass and epoxy molds should be cured per manufacturer's instructions before starting full scale production.

1. Only a thin wet film is required. Wipe or spray on a smooth, thin, continuous, wet film. Avoid wiping or spraying over the same area that was just coated until the solvent has evaporated. If spraying, hold nozzle 8-10 inches (20-30 cm.) from mold surface. It is suggested that small areas be coated working progressively from one side of the mold to the other.
2. Initially, apply two or more base coats, allowing up to 5 - 10 minutes after each application for complete solvent evaporation. The film should be dry and not feel tacky.
3. Aerosols may sometimes leave a matte surface finish. To enhance gloss, use a cotton cloth to gently buff up dry film, if required.

**Precaution:** Users of closed mold systems (i.e. rotomolding) must be certain that solvent evaporation is complete and that all solvent vapors have been ventilated from the mold cavity prior to closing the mold. An oil-free compressed air source can be used to assist in evaporation of solvents and ventilation of the mold cavity.

#### Flammability/ Storage

The product contains flammable solvents. The product should always be used in well ventilated areas. Store in a cool, dry place. Keep container tightly closed when not in use.

## **BIBLIOGRAFÍA**

1. CRAWFORD R. J., THRONE J. L., "Rotational Molding Technology", Editorial Plastics Desing Library, New York – United States,46-605.
2. NUGENT PAUL (2001), "Rotational Molding: A Practical Guide", 2-268.
3. DODGE PHILIP T., PERRY JEFFREY L. (2001), "Rotomolded Part Density and Its Relationship to Physical Properties", Equistar Quemicals, SPE Journal.
4. THRONE JAMES L. (2004), "Part Cooling: The Influence of Part Desing and Other Factors", Sherwood Technologies, SPE TOPCON Journal.
5. GOGOS GEORGE (2004), "Bubble Removal in Rotational Molding", University of Nebraska-Lincoln, SPE Journal.

6. CRAMEZ M. C., OLIVEIRA M. J., CRAWFORD R. J. (2002), "Prediction of Degradation of Polyethylene During Rotational Molding", University of Auckland, SPE Journal.
  
7. SPENCE ALBIN, SCOTT ROB (2004), "Rotational Molding Process Control", Centro Incorporated, SPE Journal.