



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

INFLUENCIA DEL PROCESO DE INYECCION EN LAS PROPIEDADES MECANICAS DEL POLIPROPILENO HOMOPOLIMERO NATURAL, CON CARGAS DE TALCO Y REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO
P R E S E N T A N :
ADRIAN MENDOZA TREJO
ALAN TAPIA VELEZ
ERNESTO VELASCO GODINES

ASESOR: M.I. MAGDALENA TRUJILLO BARRAGAN



MEXICO, D. F.

2002

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

PAGINACIÓN

DISCONTINUA

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo hace valer el empeño y paciencia para alcanzar mis metas que ha fomentado en mí la Universidad Nacional Autónoma de México y la Sociedad de Ingenieros Automotrices, rama estudiantil UNAM.

Agradezco su apoyo, compañía, impulso y amistad a:

Miriam Fabiola, Baltazar, Galo, Sr. Moisés, Claudia, Joel, Luis Alberto, Israel, Claudia Erika, Adrián, Octavio, Fabiola Odette, Hidalgo Alejandro, Miriam, Mauricio y Abraham; y a los seres especiales que me han acompañado.

Así como, a Magdalena Trujillo Barragán por guiarme y acompañarme durante esta formación profesional.

Especialmente al esfuerzo, empuje y amor que a lo largo de mi existencia ha demostrado mi padre Rafael Mendoza López; dedicándole a él principalmente esta tesis, con el pleno conocimiento que sus enseñanzas serán lineamientos fundamentales en mi vida. Sin olvidar a mi familia que quiero y que de algún u otro modo han estado conmigo y apoyado; a mis abuelos Margarita y Juan Manuel, a mis tías Silvia y Susana, a mis primos Manolo, Silvia, Peter, Daniel y Rosalba, a mis hermanos Leticia y Rafael, y a mi madre Leticia que la quiero.

Gracias por todo y a todos lo que me han enseñado.

“El poder te lo da el conocimiento”
Adrián Mendoza

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas de UNAM a difundir en formato electrónico e impreso el contenido de mi trabajo recepcional.

NOMBRE: Alan Tapia Vélez

FECHA: 12 / Noviembre / 02

A: [Firma]

AGRADECIMIENTOS.

Las personas que triunfan en la vida no hacen cosas extraordinarias, hacen cosas sencillas extraordinariamente bien; y la constancia es su mejor herramienta, además de la actitud con la que se enfrentan las metas fijadas, de donde se obtiene el éxito ó el fracaso.

De esta forma quiero agradecer a todos los profesores desde el inicio hasta el final de mi formación académica, ya que ellos me enseñaron a no mortificarme si no sabia algo y que es mejor ocuparse en estudiar y aprender. Además, he entendido que cualquiera que sobresale del nivel medio ha recibido dos educaciones; la primera, de sus maestros; la segunda, más personal e importante, de sí mismo. Especialmente, quiero agradecer a Magdalena, directora de este trabajo, por todas sus enseñanzas, paciencia y consejos, por que más que un asesor, es una amiga. Gracias por todo Magda.

Este trabajo lo dedico a:

Mi mamá y a mi papá por todo su amor, apoyo y comprensión; a mi hermano Arturo por darme un ejemplo a seguir; a Irai por dedicarme su tiempo, expresarme su cariño, paciencia y apoyo.

Especialmente a mi hermano Andrés, que a pesar de su corta edad, el supo vivir mostrándome como la perseverancia, así como el desear algo con todas sus fuerzas sin perder la fe, ayuda a lograr todas las metas fijadas.

Gracias a todos, por lo que me han dado.

Los quiere, Alan.

ÍNDICE

Capítulo I

| | |
|-------------------|---|
| Introducción..... | 1 |
|-------------------|---|

Capítulo II

DEFINICIÓN Y PROPIEDADES DEL POLIPROPILENO

| | |
|---|----|
| 2.1 Características estructurales, químicas, físicas y modificadores del Polipropileno..... | 3 |
| 2.2 Obtención del polipropileno..... | 12 |
| 2.3 Propiedades del polipropileno..... | 16 |
| 2.4 Aplicaciones del polipropileno..... | 23 |

Capítulo III

CONFORMADO POR INYECCIÓN

| | |
|--|----|
| 3.1 El proceso de inyección..... | 27 |
| 3.1.1 Descripción del proceso de inyección..... | 28 |
| 3.2 Parámetros de arranque en el proceso de inyección del polipropileno..... | 33 |
| 3.2.1 Parámetros que regulan la calidad de piezas inyectadas..... | 34 |
| 3.2.2 Ajuste de la máquina para obtener el llenado adecuado del molde..... | 35 |
| 3.3 La Máquina de moldeo por inyección..... | 38 |
| 3.3.1 Estructura y descripción de la máquina de inyección de plásticos DEMAG ERGotech proEE50/270..... | 39 |
| 3.3.1.1 Justificación de los parámetros de inyección utilizados en el proceso..... | 47 |
| 3.4 Moldes de inyección..... | 49 |
| 3.4.1 Configuración del sistema de alimentación en el molde..... | 49 |
| 3.4.1.1 Configuración de los canales de distribución..... | 50 |
| 3.4.1.2 Configuración de las entradas o canales de estrangulamiento..... | 53 |
| 3.4.2 Descripción de los moldes utilizados..... | 56 |

Capítulo IV

CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO POLIMÉRICO EN LA CAVIDAD.

| | |
|--|----|
| 4.1 Comportamiento del flujo polimérico en el molde..... | 61 |
| 4.2 El proceso de inyección en relación con la estructura y las propiedades del polímero..... | 64 |
| 4.2.1 Microestructura de los polímeros semicristalinos por efecto del flujo en la cavidad..... | 67 |
| 4.3 Estructura del Polipropileno (PP) como resultado del proceso de inyección..... | 74 |
| 4.3.1 Orientación de los polímeros inyectados reforzados con fibras..... | 76 |
| 4.3.2 Orientación de los polímeros inyectados cargados con partículas..... | 77 |

CAPÍTULO V

PARÁMETROS DE INYECCIÓN DEL POLIPROPILENO PARA MUESTRAS DE TRACCIÓN...79

| | |
|---|----|
| 5.1 Obtención de muestras mediante el proceso de inyección de plástico para polipropileno natural, reforzado con fibra de vidrio y con cargas de talco..... | 80 |
| 5.1.1 Determinación de los parámetros de inyección para muestras de pared gruesa..... | 81 |
| 5.1.2 Determinación de los parámetros de inyección para muestras de pared delgada..... | 85 |

| | |
|---|----|
| 5.2 Ensayos de tracción para muestras de pared gruesa y de pared delgada..... | 89 |
| 5.2.1 Ensayo de tracción para muestras de pared gruesa..... | 89 |
| 5.2.2 Ensayo de tracción para muestras de pared delgada..... | 90 |

Capítulo VI

| | |
|-----------------------------|----|
| RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 92 |
|-----------------------------|----|

Capítulo VII

| | |
|-------------------------------|-----|
| A. CONCLUSIONES..... | 104 |
| B. APORTACIONES A FUTURO..... | 105 |

| | |
|---------------|-----|
| GLOSARIO..... | 106 |
|---------------|-----|

| | |
|------------------|-----|
| REFERENCIAS..... | 112 |
|------------------|-----|

ANEXOS

INDICE DE FIGURAS, TABLAS Y GRÁFICAS.

FIGURAS

| | |
|--|-------|
| Figura 2.1 Estructura química de un polímero homopolímero..... | 3 |
| Figura 2.2 Estructura química de un polímero copolímero..... | 3 |
| Figura 2.3 Diversas estructuras copoliméricas..... | 4 |
| Figura 2.4 Ordenamiento de la estructura molecular de las cadenas poliméricas. a) Isotáctico, b) Sindiotáctico, c) Atáctico..... | 4 |
| Figura 2.5 Matriz polimérica sin orientación..... | 6 |
| Figura 2.6 Orientación de la matriz polimérica..... | 6 |
| Figura 2.7 Proceso Spheripol a) para homopolímeros, b) para copolímeros..... | 14,15 |
| Figura 2.8 Proceso Union Carbide Corporation (UCC) en fase de gas..... | 15 |
| Figura 2.9 Variación de la contracción del polipropileno con el espesor..... | 18 |
| Figura 2.10. Absorción de agua a diversas temperaturas del polipropileno..... | 19 |
| Figura 2.11 Efecto de la isotacticidad en las propiedades de tracción del polipropileno..... | 21 |
| Figura 2.12 Comparación del polipropileno modificado con algunos plásticos de ingeniería..... | 21 |
| Figura 2.13. Porcentaje de elongación del polipropileno comparado con algunos plásticos de ingeniería..... | 22 |
| Figura 3.1 Ciclo típico de moldeo: (1) fusión del material y cierre del molde, (2) el polímero fundido se inyecta en la cavidad, (3) dosificación mediante la retracción del tornillo y (4) enfriamiento de la pieza, el molde se abre y se retira la pieza..... | 28 |
| Figura 3.2 (a) Ciclo de inyección con respecto al tiempo: (1) inyección, (2) enfriamiento y solidificación (2a) empaquetamiento/sostenimiento, (2b) retracción del husillo y (2c) dosificación), (3) abertura del molde, (4) expulsión y (5) cierre del molde; (b) Presión y carrera del husillo durante el proceso..... | 29 |
| Figura 3.3 Relación entre la temperatura, la presión y la carrera del husillo: a) distribución de la temperatura a lo largo de la antecámara del cilindro; b) relación entre la temperatura y la presión; c) y d) relación entre la temperatura media del material, la presión y la carrera del husillo..... | 31 |
| Figura 3.4 Esquema de la disgregación del material en el cilindro de plastificación de una máquina de inyección horizontal..... | 32 |
| Figura 3.5 Relación entre la calidad y las fases del proceso de inyección, en una curva de presión en el molde de la máquina..... | 35 |
| Figura 3.6 Diagrama de una máquina de moldeo por inyección con husillo (tornillo sin fin)..... | 39 |
| Figura 3.7 Unidad de cierre y control, vista del operador..... | 39 |
| Figura 3.8 Unidad de cierre y control, vista posterior..... | 40 |
| Figura 3.9 Unidad de inyección EE 270..... | 40 |
| Figura 3.10 Cilindro plastificador EE 270..... | 41 |
| Figura 3.11 Sistema de enfriamiento, con el esquema del caudalímetro (enfriamiento del molde) y filtro de agua con entrada de agua de refrigeración..... | 41 |
| Figura 3.12 Terminal de mando (IBED)..... | 42 |
| Figura 3.13 Pantalla IBED número 83 para la "Configuración del IBED"..... | 43 |
| Figura 3.14 Pantalla IBED número 10 para establecer las condiciones del "MOLDE."..... | 43 |
| Figura 3.15 Pantalla IBED número 11 para establecer las condiciones del "EXPULSOR"..... | 44 |
| Figura 3.16 Pantalla IBED número 30 para establecer las condiciones de "TEMPERATURAS" dentro del cilindro..... | 44 |
| Figura 3.17 Pantalla IBED número 20 "Optimización del proceso" para establecer los parámetros del proceso..... | 45 |

| | |
|---|----|
| Figura 3.18 Pantalla IBED número 50 “Estadística de proceso” para observar el desarrollo del proceso de inyección. a) parámetros del proceso de inyección b) Gráfica estadística de la presión de inyección..... | 45 |
| Figura 3.19 Pantalla IBED número 2 “Alarmas” para establecer las alertas durante el proceso de inyección establecido..... | 46 |
| Figura 3.21 Secciones buenas y malas de los canales de distribución..... | 51 |
| Figura 3.22 Configuración y posición de los canales de estrangulamiento..... | 55 |
| Figura 3.23 Esquema de la placa de cavidades, del molde multicavidades..... | 57 |
| Figura 3.24 Corte transversal del arreglo del molde multicavidades..... | 58 |
| Figura 3.25 Configuración del molde para vasos de 200 ml de una cavidad..... | 60 |
| Figura 4.1 Diagrama esquemático del área de moldeo (DAM)..... | 61 |
| Figura 4.2 a) Flujo divergente durante el llenado en una cavidad en diferentes tiempos después de empezar el llenado (t_0), b) Chorro, c) Flujo en forma de disco durante el llenado con entrada central en diferentes tiempos después de empezar el llenado (t_0)..... | 63 |
| Figura 4.3. Representación esquemática del movimiento del flujo fuente, mostrando los perfiles de velocidad y cortante, por efecto de la deformación de un elemento cúbico de un polímero fundido..... | 63 |
| Figura 4.4 Flujo en un molde de disco con entrada central..... | 64 |
| Figura 4.5 Presión de inyección como función de la ubicación del frente de flujo en un molde de disco..... | 66 |
| Figura 4.6 Esferulita en fase α , obtenida bajo condiciones isotérmicas de cristalización de 115 °C..... | 67 |
| Figura 4.7 Cambios en el espesor de la estructura de 3 capas (fría-zona cortante-centro) de un vaso de PP como una función del recorrido del polímero desde la entrada a la cavidad..... | 68 |
| Figura 4.8 Vista idealizada del efecto del cortante en el enredo de las cadenas moleculares de un flujo polimérico fundido..... | 68 |
| Figura 4.9 Representación esquemática de las distribuciones de la orientación a través del espesor de una pieza inyectada..... | 69 |
| Figura 4.10 Distribución de la orientación a través de un plato de poliestireno inyectado desde la entrada (pared) al centro..... | 70 |
| Figura 4.11 Modelo de enfriamiento desarrollado por Struik para simular el desarrollo de esfuerzo residual en plásticos inyectados enfriados por ambas superficies..... | 71 |
| Figura 4.12 Esfuerzo residual (σ_R) como función de la profundidad de la muestra (z) para policarbonato inyectado..... | 72 |
| Figura 4.13 Formación y dirección de la orientación en las líneas de unión internas en plásticos inyectados..... | 73 |
| Figura 4.14 Muestra de Polipropileno inyectado a) micrografía óptica, b) Estructura de la capa fría altamente orientada..... | 75 |
| Figura 4.15 Orientación de la fibra en una pieza inyectada en un molde de disco con entrada central..... | 76 |
| Figura 4.16 Orientación de las partículas de talco como agregado en una matriz de polipropileno..... | 78 |
| Figura 5.1 Uso de los plásticos termoplásticos y termoestables..... | 79 |
| Figura 5.2 Probeta de pared gruesa tipo I ASTM D638-99 para ensayo de tracción..... | 90 |
| Figura 5.3 Probeta de pared delgada ASTM D882-97 para ensayo de tracción..... | 91 |

TABLAS

Tabla 2.1 Características del efecto de la fibra de vidrio como refuerzo en el PP, en el proceso de inyección y en sus propiedades.....9

Tabla 2.2 Características del efecto del talco como carga en el PP, en el proceso de inyección y en sus propiedades.....10

Tabla 2.3 Rangos de "índice de fluidez" con respecto a las características del flujo.....17

Tabla 2.4 Índice de fluidez del PP relacionado con su aplicación.....18

Tabla 2.5 Propiedades del PP homopolímero natural.....22

Tabla 2.6 Propiedades del PP copolímero impacto.....23

Tabla 2.7 Propiedades del PP copolímero "random".....23

Tabla 3.1 Parámetros de la máquina de inyección modelo ERGOtech pro 50-270.....57

Tabla 3.2 Dimensiones de los canales de estrangulamiento para cada probeta.....59

Tabla 3.3 Dimensiones para las cavidades dependiendo de la probeta a la que pertenece.....59

Tabla 4.1 Parámetros de la ley de la energía para el polipropileno.....70

Tabla 5.1 Características generales de la materia prima.....80

Tabla 5.2 Desarrollo del proceso de inyección para probetas de pared gruesa de polipropileno homopolímero natural.....82

Tabla 5.3 Desarrollo del proceso de inyección para probetas de pared gruesa de PP-30% Talco.....83

Tabla 5.4 Desarrollo del proceso de inyección para probetas de pared gruesa de PP-30% Fibra de vidrio.....84

Tabla 5.5 Desarrollo del proceso de inyección para probetas de pared delgada de PP homopolímero natural.....86

Tabla 5.6 Desarrollo del proceso de inyección para probetas de pared delgada de PP-30% Talco.....87

Tabla 5.7 Desarrollo del proceso de inyección para probetas de pared delgada de PP-30% Fibra de vidrio.....88

Tabla 5.8 Dimensiones de las probetas de pared gruesa Tipo I según la norma ASTM D638-99.....90

Tabla 5.9 Dimensiones de las probetas de pared delgada según la norma ASTM D882-97.....91

Tabla 6.1 Variación de los parámetros del proceso de inyección y su esfuerzo al 0.2 % de fluencia de a) probetas normalizadas ASTM D638-99 (pared gruesa) , y b) probetas con espesores de 0.6 mm según la norma ASTM D882 (pared delgada).....92,93

GRÁFICAS

Gráfica 6.1 Comportamiento del esfuerzo de tracción de probetas de pared gruesa, variando la presión de inyección, a velocidad de inyección constante de 70 mm/s, de a) PP homopolímero natural, b) PP-30% Talco y c) PP- 30% Fibra de vidrio.....96

Gráfica 6.2 Comportamiento del esfuerzo tracción de probetas de pared gruesa, variando la velocidad de inyección, de a) PP homopolímero natural, b) PP-30% Talco y c) PP-30% Fibra de vidrio.....97

Gráfica 6.3 Comportamiento del esfuerzo tracción de probetas de pared delgada de a) PP homopolímero natural, a velocidades de inyección de 60 y 110 mm/s, b) PP-30% Talco, a velocidades de inyección de 60, 80 y 110 mm/s y de c) PP- 30% Fibra de vidrio, a velocidades de inyección de 60, 80 y 110 mm/s.....98,99

Gráfica 6.4 Comportamiento del módulo de Young de probetas de pared gruesa, variando la presión de inyección, a velocidad de inyección constante de 70 mm/s, de a) PP homopolímero natural, b) PP-30% Talco y c) PP- 30% Fibra de vidrio.....100,101

Gráfica 6.5 Comportamiento del módulo de Young de probetas de pared delgada de a) PP homopolímero natural, a velocidades de inyección de 60 y 110 mm/s, b) PP-30% Talco, a velocidades de inyección de 60, 80 y 110 mm/s y de c) PP- 30% Fibra de vidrio, a velocidades de inyección de 60, 80 y 110 mm/s..... 101,102

Capítulo I

INTRODUCCIÓN

Desde los inicios del procesamiento de plásticos el objetivo principal de la industria de inyección polímeros ha sido obtener piezas de buena calidad baratas y de rápida producción, por lo que se puede describir ésta según sus características mecánicas, conformidad dimensional y apariencia. Sin embargo, se encuentra supeditada a muchos factores, siendo uno de ellos la determinación de los parámetros del proceso fundamentales en el moldeo por inyección.

Tradicionalmente en México, los parámetros del proceso de inyección se determinan en la industria a través del personal con experiencia en este ámbito debido a la escasa preparación de personal especializado en ésta área. Establecer estas medidas es un trabajo que requiere de mucha destreza, en base a la habilidad del operador y a la intuición adquirida a lo largo de su vida laboral en esta rama, además de conocimientos teóricos y analíticos. Frecuentemente se utilizan los conocimientos adquiridos para diseñar y conformar por inyección una pieza, por lo que es común aplicar el método de prueba y error durante el proceso, de manera que finalmente la calidad de la pieza cumpla con las características requeridas. De este modo, el tiempo que lleva realizar estos procesos depende de la práctica del personal.

Los proveedores de polímeros proporcionan lineamientos generales para ayudar a establecer los parámetros de inyección en función de las piezas a obtener; con el objetivo de adquirirlas de buena calidad con relación al cumplimiento de sus características mecánicas, conformidad dimensional y apariencia, principalmente. Sin embargo, esta información ofrece rangos muy amplios para seleccionar los parámetros del proceso de inyección adecuados, anexo 3, ignorando el comportamiento de sus propiedades mecánicas al variar las condiciones del conformado.

La competencia en la industria de la inyección del plástico, utilizando información muy ambigua del material que se está trabajando, coloca en desventaja a quien quiere enfrentarse a este mercado en crecimiento. Por lo anterior este trabajo tiene como objetivo plantear las bases para el estudio de la influencia del proceso de inyección, con base en la presión y velocidad de inyección, justificando su uso con mayor detalle en el capítulo 3; relacionándolos con la apariencia de la pieza y sus propiedades mecánicas, utilizando un termoplástico semicristalino de gran versatilidad en un amplio rango de aplicaciones en uso creciente como lo es el Polipropileno, para conocer su comportamiento ante tales condiciones de proceso y agilizando el moldeo y su aplicación. Este polímero tiene varias ventajas, destacando una alta resistencia mecánica, con propiedades de procesamiento adecuadas que permiten un moldeo continuo y bajos costos. Siendo su aplicación la producción de platos, vasos y recipientes para alimentos; tapas para la industria del envase; sillas y mesas; así como botones y perillas para electrodomésticos, carcasas para planchas y licuadoras, entre otros. De este modo se hace necesario el uso del Polipropileno (PP) como homopolímero natural y como un material compuesto con diferentes tipos de cargas y refuerzos de fibras, que mejoran las propiedades mecánicas del mismo. De este modo, se hará uso del PP homopolímero natural, con cargas de Talco y reforzado con fibra de vidrio.

Por lo anterior, se inicia esta tesis con la presentación de las propiedades físicas y mecánicas del Polipropileno, así como su forma de obtención y sus características estructurales, como homopolímero natural y modificado; haciendo mención de los tipos de modificadores y sus propiedades. Más adelante se expone el desarrollo del proceso de inyección, en base al ciclo y sus parámetros presentes en la obtención de una pieza con la calidad requerida, detallando las características de la máquina de inyección utilizada, justificando los parámetros del proceso relevantes para la obtención de las piezas de estudio, así como la configuración necesaria del molde para lograr el llenado del mismo. Posteriormente, se señala como se desarrolla el flujo del polímero dentro de la cavidad del molde, donde se mencionan sus implicaciones en la orientación dentro de la pieza; indicando las características alcanzadas en el polipropileno homopolímero natural, cargado y con refuerzo, por este hecho. A continuación, se indica el desarrollo del proceso de inyección realizado en base a la variación de los parámetros relevantes, tales como la presión y velocidad de inyección, para obtener las propiedades mecánicas a la tracción de piezas de pared gruesa y de pared delgada, del material ya citado. Mostrándose también los ensayos realizados para alcanzar este fin. Con lo anterior, se plantean los resultados obtenidos de las pruebas de tracción, mostrando los esfuerzos a la fluencia generados por las condiciones del proceso establecidas y analizando su comportamiento. Por último se generaron las conclusiones y observaciones de este trabajo, así como las propuestas para realizar a futuro.

Capítulo II

DEFINICIÓN Y PROPIEDADES DEL POLIPROPILENO

A mediados del siglo pasado se desarrolló un catalizador¹, hecho a base de cloruro de titanio y aluminio, con el que fue posible obtener el Polipropileno (PP). Sin embargo, la necesidad de nuevos productos y la sustitución de maderas, metales y vidrio; así como, las demandas de calidad de los consumidores de piezas de plástico a sus fabricantes hizo mejorar las propiedades del PP a través de su modificación. Estas demandas variarán dependiendo del producto, presentando una determinada resistencia a la tracción o al impacto, resistencia a la deformación por calor, estabilidad dimensional, valores de aislamiento eléctrico, resistencia química, resistencia a la intemperie, retardo a la flama, procesabilidad o un bajo costo. Para cumplir estas exigencias, los fabricantes de las resinas disponen de diferentes alternativas; tales como, una modificación química o física al polímero, así como una modificación con aditivos y agregados.

2.1 CARACTERÍSTICAS ESTRUCTURALES, QUÍMICAS, FÍSICAS Y MODIFICADORES DEL POLIPROPILENO.

El PP es un termoplástico semicristalino² que pertenece a la familia de las poliolefinas y se obtiene a través de la polimerización de propileno.

De acuerdo con el número de monómeros presentes en el proceso de polimerización del PP se distingue el **homopolímero**, que se denota por tener un solo tipo de monómero, figura 2.1, donde la reacción para su obtención, se lleva a cabo a través del uso de los catalizadores.



Figura 2.1 Estructura química de un polímero homopolímero.

También se presenta el **copolímero**, que se forma por la participación de dos o más monómeros de diferentes tipos (comonómeros), mostrados así en la figura 2.2.

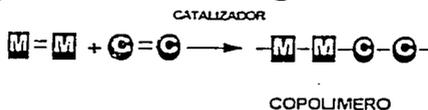


Figura 2.2 Estructura química de un polímero copolímero.

¹ Agente químico que en pequeñas cantidades, aumenta la velocidad de una reacción sin intervenir directamente en la misma, por lo que no se consume.

² Polímero o plástico capaz de moldearse en repetidas ocasiones, ya que se puede fundir y enfriarse, formando en su estructura zonas cristalinas y zonas amorfas.

De acuerdo con el arreglo que toman los diferentes monómeros en la cadena polimérica se presentan diferentes tipos de copolímeros: alternado, de bloque, azar (random) y con injerto, figura 2.3.

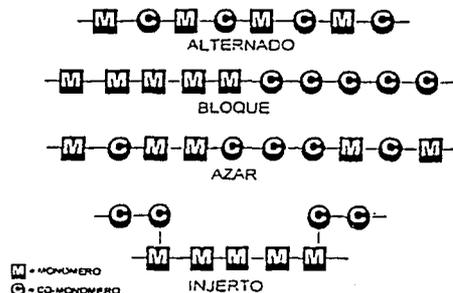


Figura 2.3 Diversas estructuras copoliméricas.

Las cadenas moleculares del PP tienden a ordenarse en formas regulares o irregulares dependiendo del orden que se en que estén colocados los grupos metilo CH_3 , así como del catalizador empleado para lograr la polimerización. Esta propiedad se denomina **tacticidad** y se clasifica en: un **ordenamiento isotáctico**, figura 2.4.(a), donde todos los grupos toman una posición regular durante la condensación polimérica. El catalizador utilizado, a base de cloruro de titanio y aluminio, acomoda a los monómeros de tal manera que todos los grupos CH_3 quedan colocados de un mismo lado de la cadena molecular, permitiendo el cristalizar; esto se refleja principalmente en valores altos de sus propiedades mecánicas y térmicas; en el **ordenamiento sindiotáctico**, figura 2.4 (b), los radicales metilo se colocan en posiciones regularmente alternas en la cadena molecular y en el **ordenamiento atáctico**, figura 2.4(c), el tipo de cadena polimérica de los radicales metilo se presentan en grupos atómicos que se colocan al azar a ambos lados de la cadena. El PP atáctico es una cera que apenas tiende a cristalizar, ya que carece de ordenamiento espacial. Por consiguiente, su densidad y resistencia mecánica son menores al isotáctico, así como también las temperaturas de reblandecimiento³ y fusión⁴, por lo que no tiene una aplicación como termoplástico. En toda polimerización se procura tener una mezcla de estos y se busca alcanzar los mayores porcentajes del tipo isotáctico.

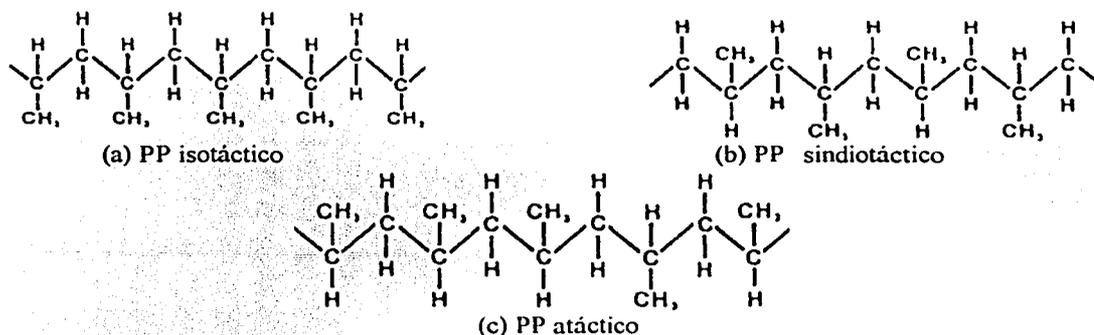


Figura 2.4 Ordenamiento de la estructura molecular de las cadenas poliméricas. a) Isotáctico. b) Sindiotáctico. c) Atáctico

³ Temperatura donde el material reblandece gradualmente antes de llegar a su estado líquido completamente.

⁴ Es la temperatura, en la cual el material cambia del estado sólido al líquido.

Si bien las formas isotácticas y sindiotácticas cristalizan por enfriamiento a partir de los materiales fundidos, los polipropilenos comerciales para inyección, por lo general, presentan una isotacticidad del 94 al 97 %. Entonces, a medida que aumenta la cantidad de material isotáctico, aumenta la cristalinidad, la temperatura de reblandecimiento, la rigidez, resistencia a la tracción, el módulo de elasticidad y la dureza; a pesar de que siempre existe atacticidad, normalmente presente por debajo del 5%. Las piezas fabricadas son 60% cristalinas, con variedad de formas y tamaños de esferulitas⁵, que dependen de las condiciones particulares de cristalización del material fundido. Así, el PP isotático tiene un alto grado de ordenamiento y cristalinidad, presentando buenas propiedades mecánicas y resistencia térmica.

Con el objeto de mejorar, mediante la química del material, las propiedades del PP, este es modificado resultando los siguientes tipos de Polipropileno:

El **Polipropileno homopolímero** es sinterizado a partir de una sola clase de monómero de propileno bajo condiciones controladas de presión y temperatura, en presencia de un catalizador. Este polímero presenta una mayor resistencia a la temperatura que los polietilenos, puede esterilizarse utilizando rayos gamma y óxido de etileno, tiene buena resistencia a los ácidos y bases a temperaturas abajo de 80 °C. A temperaturas menores a cero grados °C se vuelve frágil y quebradizo. Posee buenas propiedades dieléctricas, su resistencia a la tracción es excelente en combinación con la elongación, permitiendo ser biorientado. Este PP presenta una apariencia translúcida y bajos costos.

El **polipropileno copolímero impacto**, se obtiene mediante la reacción del propileno y el etileno, y un catalizador denominado de tercera o cuarta generación, el cual indica el grado de polimerización. De esta forma, se procesa un copolímero con mayor resistencia al impacto manteniendo las propiedades mecánicas, térmicas y eléctricas del homopolímero. Este copolímero presenta propiedades como un plástico heterofásico (dos fases: plástico y hule), que ayuda a la mejora en la resistencia al impacto.

Durante el proceso de obtención del PP homopolímero, se adiciona de 1.5 a 3.5% de etileno y un catalizador poco esteroespecífico⁶ y más activo, para obtener una mayor cantidad de PP atáctico; por lo que la combinación del polipropileno isotáctico y del atáctico con etileno, originará el **polipropileno "random"**.

La estructura del PP homopolímero es semicristalina lo que no permite el paso de la luz libremente. De este modo, al no ser transparente su aplicación en el mercado de los empaques y envases estaba limitada. Es por esto que los fabricantes del polímero desarrollaron al PP "random clarificado" que combina las propiedades del PP normal con una excelente transparencia. Para las necesidades de la industria automotriz, surgió una mezcla con hule de monómero de etileno-polipropileno-dieno (EPDM), que fue nombrado hule termoplástico. Así, el polipropileno se convierte en una familia de grados puros y modificados a los cuales pertenecen el PP homopolímero, el copolímero impacto, el copolímero "random", el modificado y el hule termoplástico (TPO).

⁵ Aglomeraciones esféricas de zonas cristalinas.

⁶ Sustancia que favorece la formación de polímeros con un ordenamiento fijo y definido en el espacio de sus grupos atómicos.

Una de las modificaciones físicas para los plásticos es la obtención de los mismos mediante la mezcla entre distintos polímeros conocida en el mercado como “Blend” o aleación de polímeros. Otra modificación física consiste en el estirado mecánico de las moléculas de un polímero, aumentando su ordenamiento. Esto se puede lograr mediante un proceso de orientación y estiramiento, que resulta del proceso de fabricación del producto, como en algunos productos de plástico como láminas, películas o cuerpos huecos como botellas sopladas, donde las moléculas se someten a un estiramiento durante el proceso de fabricación, ya que las fuerzas aplicadas alinean las macromoléculas en estado termoeelástico en la misma dirección del estirado; incrementando la resistencia a la tracción y al impacto, a temperatura ambiente; además de mejorar la barrera a los gases y al vapor de agua, así como la transparencia. En la figura 2.5 se puede observar la matriz polimérica antes del estirado de las moléculas, sin presentar alguna orientación.

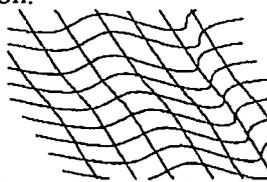


Figura 2.5 Matriz polimérica sin orientación

Cuando el PP es orientado en un sentido se obtiene la rafia y al realizar la orientación en ambos sentidos (axial y transversal, biorientación), se obtiene el OPP y el BOPP, respectivamente, como se observa en la figura 2.6.

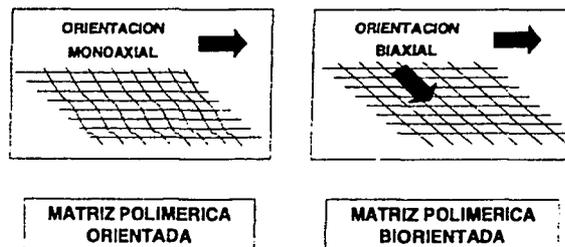


Figura 2.6 Orientación de la matriz polimérica

Una importante variedad de Polipropilenos tienen diversos **grados modificados con aditivos, cargas y refuerzos**, con lo cual se obtienen propiedades por encima de los rangos establecidos.

Los **aditivos** son sustancias que son agregadas a los polímeros orgánicos para mejorar sus propiedades y protegerlos de los efectos de la degradación de la luz, calor, y bacterias. Los aditivos son también usados para cambiar o modificar la densidad del polímero, la expansión térmica, las propiedades de procesamiento, para incrementar el retardo de flama, para mejorar y proteger el color, y otras características similares. Las **cargas y refuerzos** han sido usados como aditivos para los plásticos a través de la historia de la industria. La “carga” es frecuentemente considerada como un aditivo barato para un material costoso aplicado en los polímeros. Según la norma ASTM (American Society for Testing of Materials) D883 la define como un material, relativamente inerte, que agregado al plástico modifica su resistencia, su estabilidad, su procesabilidad y otras propiedades, reduciendo costos. Los polímeros cargados son conocidos por ser materiales heterogéneos, en los cuales la fase

continua o matriz, es un polímero de elevado peso molecular, mientras que la fase discreta, o carga, es un polvo sólido, fibroso, o un material laminar relativamente uniforme disperso a través del volumen de la matriz; así, la mayoría de las cargas son materiales inorgánicos, los cuales tienen superficies iónicas o polares; por esto, necesitan modificarse para incrementar la interacción con el polímero. El utilizar cargas proporciona una alta viscosidad, aún a altas temperaturas, así como una mayor rigidez, alta resistencia a la tracción, menor distorsión al calor y mayor densidad. Cada carga se modifica en particular, pero usualmente se necesita una cubierta superficial con un aditivo no polar; son generalmente clasificados como:

- **“Extender o carga”**, es un material de bajo costo, agregado para reducir el costo del material compuesto, ya que ocupa espacio y desplaza a la resina; formando un material compuesto de mayor volumen con la misma cantidad de matriz.

- **Los refuerzos** son cargas de mayor costo, agregados para mejorar las propiedades mecánicas, tal como la resistencia a la tracción.

En la producción mundial de los termoplásticos reforzados, el PP con cargas es un material compuesto en crecimiento, por la baja densidad de la matriz de polímero, su alta estabilidad al calor y a la deformación, su bajo costo, alta resistencia química y facilidad de procesamiento. Por esto, el efecto de las cargas en el polímero está determinado por las características de las mismas, tal como la forma y tamaño de las partículas, y su distribución, área superficial, empaquetamiento de partícula, composición química, entre otras. Sin embargo, su morfología no depende sólo de las características de las cargas, sino también del procesamiento.

Debido a que el PP tiene temperaturas baja de transición vítrea⁷, T_g (-25 °C) y de fusión, T_m , (190°C-230°C) bajas, permiten que la cristalización se presente rápidamente después del procesado. El grado de solidificación del polipropileno cristalino se incrementa con cargas, ya que aumentan el número de núcleos.

Entre las cargas y refuerzos existentes para uso en el PP están:

1. Talco
2. Fibra de vidrio
3. Carbonato de calcio
4. Mica
5. Kaolin
6. Micro-esferas de vidrio
7. Fibra de carbón
8. Asbestos
9. Cargas orgánicas
 - a) Materiales sintéticos
 - b) Materiales naturales
10. Cargas metálicas y magnéticas
11. Retardadores de fuego

Para este estudio, solo se tratarán las características de la fibra de vidrio como refuerzo y como carga el talco.

⁷ Temperatura conocida como T_g , es el punto en el que un plástico se vuelve semilíquido. Por encima de ésta el material se reblandece gradualmente y antes de ella se presenta rigidez, semejante al vidrio.

La *fibra de vidrio* es un refuerzo, utilizado para mejorar las propiedades de resistencia en el compuesto; se obtiene formando filamentos de vidrio obtenidos a partir de vidrio fundido filtrándolo a través de un orificio. Una cubierta inorgánica es aplicada a la fibra durante la operación de formado para facilitar el procesamiento, manteniendo la integridad de la fibra y mejorando el desarrollo del producto. Ésta consiste en emplear un agente acoplador de sileno y un formador de película; mejorando la adhesión de la matriz de polímero al vidrio y manteniendo las propiedades del compuesto bajo condiciones corrosivas, así como promoviendo la compatibilidad del polímero, mejorando la procesabilidad y las propiedades de resistencia, respectivamente.

La fibra de vidrio es uno de los refuerzos más usados en los polímeros en la actualidad, ya que ofrece un buen balance entre las propiedades del polímero y el refuerzo (tal como resistencia mecánica, módulo de Young, estabilidad dimensional y térmica) y costo. Las fibras y cargas minerales son considerablemente más económicas, pero solo ofrecen una fracción en las propiedades del compuesto como refuerzo. Otras fibras, tales como las fibras de carbono, de boro, y de aramid se utilizan cuando el costo no es un factor de peso.

La mayoría de los polímeros reforzados son producidos por una composición de vidrio llamada vidrio eléctrico (E-glass), siendo un vidrio de borosilicato especialmente diseñado para el mercado de los refuerzos. La nomenclatura "E" proviene de su principal aplicación eléctrica ("Electric"). El vidrio eléctrico tiene una resistencia a la tracción de 3,450 MPa, un módulo de Young de 72,400 MPa, una elongación a la fractura de 4.8%. Mientras que el vidrio impacto ("S-Glass" Shock impact), controlado y del tipo 2 son de alta resistencia. Su resistencia a la tracción, módulo de Young y elongación a la fractura son 4500 MPa, 85,500MPa y 5.7%, respectivamente. El vidrio impacto controlado (S-Glass) es utilizado en aplicaciones militares y aeroespaciales y el tipo 2 es para aplicaciones no críticas. La diferencia entre éstos es la buena calidad del controlado, así como en el tamaño.

La resistencia de un material hecho con fibra de vidrio, se incrementa en proporción al porcentaje de fibras agregado al polímero, pero cabe recalcar que ésta relación no es generalmente lineal. La orientación de las fibras en un compuesto determina la dirección y nivel del último esfuerzo y módulo de rigidez; una resistencia mayor puede darse en compuestos unidireccionales a lo largo de la dirección de la fibra, mientras las propiedades caen en dirección perpendicular a las fibras. Tanto como 80% mayor de refuerzo por peso puede ser obtenido en compuestos unidireccionales. En compuestos bidireccionales (tejidos) tienen algunas fibras colocadas angularmente respecto a otras y posicionadas en un plano o una serie de planos, y alcanza un esfuerzo casi uniforme en ambas direcciones. Los compuestos multidireccionales o compuestos pseudo-isotrópicos serán igualmente fuertes en todas direcciones. Estos compuestos son complicados de producir, además de que casi todos los polímeros reforzados tienen algún esfuerzo anisotrópico. El proceso industrial que más se utiliza para compuestos multidireccionales es el de inyección, existen variaciones considerables de esfuerzos relativos a la dirección que tienen en común muchos de estos componentes. En la tabla 2.1 se muestran los efectos que tiene la fibra de vidrio en el PP durante el proceso de inyección y en sus propiedades mecánicas.

| PROPIEDAD | EFEECTO DEL REFUERZO |
|-----------------------------|--|
| Viscosidad de la mezcla | Incrementa |
| Flujo del polímero | Disminuye |
| Temperatura del flujo | No efecto (puede actuar como eliminador de Calor) |
| Presión de inyección | Incrementa |
| Contracción de la pieza | Disminuye |
| Resistencia a la tracción | Incrementa |
| Resistencia a la compresión | Incrementa |
| Resistencia a la flexión | Incrementa |
| Estabilidad térmica | Incrementa |
| Estabilidad dimensional | Incrementa |
| Resistencia al impacto | Disminuye |

Tabla 2.1 Características del efecto de la fibra de vidrio como refuerzo en el PP, en el proceso de inyección y en sus propiedades.

Existen algunas desventajas de la fibra de vidrio, en las que se destaca de algún modo una superficie más rugosa, dificultando el pintado, además de una alta abrasión de las máquinas durante su procesamiento.

El *talco* es considerado como una carga en muchas aplicaciones en los polímeros debido a su forma aplanada o aspecto radial. Los compuestos cargados con talco plano siempre muestran una alta rigidez y alta resistencia a la fluencia. Por ejemplo cuando el PP tiene 40% de carga de talco, su rigidez se triplica. Pero una carga muy grande de talco usualmente reduce su resistencia al impacto. Este efecto puede ser minimizado a través de una selección uniforme del tamaño de las partículas y su distribución, tratado superficial y la formulación de la resina. El talco es también utilizado para aislamientos eléctricos, con alta resistencia al calor y a la humedad, y buena maquinabilidad si se requiere.

El talco se encuentra entre las cargas de mayor aplicación en el PP. El talco es la carga típica para aumentar rigidez, incrementar el valor de la temperatura de deflexión y estabilidad dimensional. Una de las mayores desventajas de la carga de talco para el PP es que reduce la resistencia al impacto a bajas temperaturas.

El talco, es un mineral que se obtiene naturalmente de silicatos de magnesio hidratados. Este cubre un amplio rango de productos con variadas composiciones, formas, purezas y acabados. Para propósitos comerciales el mineral pirofilita es frecuentemente clasificado como talco por la similitud en algunas de sus propiedades. El talco es un mineral muy suave con una textura grasosa. Sus grados para intereses comerciales y para varias aplicaciones en plásticos, están bien definidos para productos que consistan en placas delgadas de color blanco, con un bajo contenido de impurezas. Debido a que el aspecto relativo de las placas justifica que estos grados sean comparados contra las características de otros minerales, catalogándolo como un refuerzo donde su uso primordial es para formar compuestos donde se desarrollen sus propiedades. Su forma particular (placas), tamaño promedio, proporción de la distribución así como sus propiedades críticas son cualidades del talco como carga, obtenidos por el método de molido fino. Sin embargo, el tamaño de requerido comercialmente para aplicaciones en plásticos, en donde el tamaño máximo de partículas de talco no debe exceder 44 μm y deberá pasar a través de 325 mallas, según la aplicación.

Para minerales con un alto grado de impurezas se necesitan técnicas especiales de molienda, donde la flotación es comúnmente utilizada para retirar las impurezas del talco. También al agregar reactivos superficiales, se modifican las propiedades de las superficies de las impurezas y del talco, logrando la separación uno del otro.

El ajuste de las condiciones de la máquina y los cambios registrados en el proceso, así como en las propiedades del polímero se muestran en la tabla 2.2

| PROPIEDAD | EFECTO |
|------------------------------------|---|
| Viscosidad de la mezcla | Incrementa |
| Flujo del polímero | Decrece |
| Presión de inyección | Incrementa |
| Flujo del polímero | Decrece |
| Contracción | Decrece |
| Temperatura del flujo | Puede incrementar debido al esfuerzo cortante |
| Resistencia a la tracción y módulo | No hay efecto al incrementarse |
| Resistencia a la flexión y módulo | Incrementa |
| Resistencia al impacto | Decrece |
| Estabilidad dimensional | Incrementa |
| Conductividad térmica | Incrementa |
| Resistencia a la fluencia | Incrementa |

Tabla 2.2 Características del efecto del talco como carga en el PP, en el proceso de inyección y en sus propiedades.

La principal razón para usar talco en el PP homopolímero es para aumentar la rigidez del material compuesto y utilizarse a mayores temperaturas, además de compararse con muchos plásticos de ingeniería. Las ventajas adicionales para el PP cargado con talco son una buena calidad superficial de las piezas inyectadas, disminución de la contracción de la pieza y su fácil procesamiento, estabilidad dimensional. Mientras que una desventaja para el PP cargado con talco es que con altos porcentajes de carga, existe un decremento importante en su estabilidad. Sin embargo, este problema se elimina por la adición de estabilizadores o antioxidantes.

La aplicación principal del PP homopolímero con cargas de talco es en partes automotrices que requieran gran rigidez y una alta resistencia a la fluencia. También para tubería de bombeo de fluidos, ductos, paneles faciales, radiadores, partes de molinos, estructuras de lámparas de mano, entre otras.

Los *lubricantes* tienen como función disminuir el esfuerzo del husillo de la máquina de inyección para transportar y comprimir los pellets, así como minimizar la fricción de la masa fundida en la maquinaria. El lubricante empleado para el polipropileno es un compuesto de zinc, que lubrica a nivel molecular y superficial. Este lubricante se aplica en cantidades de 0.25 a 1.0 %.

Los *estabilizadores de luz UV* son empleados en gran medida, dado que el polipropileno es muy sensible a la radiación UV, por lo que la mayoría de los artículos son fabricados contra la luz UV, sin importar si se van a utilizar en aplicaciones exteriores. La degradación del polipropileno se manifiesta por pérdidas de brillo, formación de grietas, manchas y una reducción de las propiedades mecánicas.

La estabilidad a la luz UV de un artículo disminuye debido a los siguientes parámetros: espesor de la muestra, grado de orientación y cristalinidad, pigmentación, presencia de cargas y agentes reforzantes, además de otros aditivos como antioxidantes y estabilizadores.

Para la estabilización del PP se utilizan aditivos como compuestos de níquel y se utilizan exclusivamente en secciones delgadas como cintas y películas donde los absorbedores UV son poco efectivos. Los pigmentos pueden tener fuerte influencia sobre la estabilidad del polipropileno, sin embargo, también así deben considerarse otros factores como: la calidad del PP, la preparación de las muestras y el lugar de exposición.

Para evaluar la efectividad de los *antioxidantes* en el polipropileno se han seguido varios métodos, siendo uno de ellos la medición de sus propiedades físicas, sometido a envejecimiento acelerado en una cámara a temperatura controlada en presencia de aire u oxígeno.

El PP es bastante estable bajo la presencia de calor, pero con ausencia de oxígeno y con esta condición resulta sensible a la oxidación. Por lo tanto, este polímero se estabiliza antes de llegar a su procesado. El polipropileno normalmente se procesa a temperaturas entre 220 y 280 °C, y se degradará al no estar correctamente estabilizado, lo cual se manifiesta con el aumento del índice de fluidez. Los antioxidantes más utilizados para proteger al polipropileno comercial durante su procesado son los compuestos de fósforo.

Los *retardantes a la flama* inhiben las características de flamabilidad de los plásticos. El polipropileno tiene una flamabilidad del tipo no autoextinguible. Con el polipropileno, los compuestos bromados son los más utilizados en porcentajes de 3 a 15 %. Sus principales características son:

- Liberan bromo gaseoso.
- Poseen alto retardo a la flama.
- Existen varios tipos de grados de acuerdo a la temperatura de procesamiento.
- Desprenden gases altamente tóxicos.
- Tienen baja estabilidad a la luz.

Los *modificadores de impacto* aumentan la resistencia al impacto del polímero, ya que proporcionan mejores características de elasticidad, absorbiendo los golpes que recibe el producto. El polipropileno utiliza como modificador al hule EPDM con porcentajes de 5 a 15 %.

Los *agentes nucleantes* incrementan la cristalinidad del polipropileno. Estos aditivos se pueden adicionar al polipropileno homopolímero, copolímero impacto o copolímero "random". Los agentes nucleantes mejoran las propiedades mecánicas del polímero, reduciendo los ciclos de moldeo y ayudando a la cristalización en el molde.

El proceso de cristalización puede ser controlado para incrementar o reducir la velocidad de formación de cristales mediante dos mecanismos, que son: la nucleación que es función de la temperatura, la trayectoria del flujo y el uso de aditivos como el Benzonato de Sodio, y el crecimiento de láminas que consiste en el control del tamaño de redes tridimensionales del polipropileno, las cuales se doblan entre sí a partir de un núcleo, para formar redes llamadas "esferulitas".

Cada plástico semicristalino tiene una velocidad de cristalización definida, así como los plásticos de la misma familia. Por ejemplo en condiciones isotérmicas (sin cambio en la temperatura alrededor de 120°C), la velocidad de cristalización para el PP Homopolímero es de uno a tres minutos, mientras el PP Copolímero "Random" es mayor a 5 minutos, pero cuando se agregan agentes nucleantes, la velocidad se reduce hasta 0.3 minutos.

Los agentes nucleantes se clasifican en dos tipos: los inorgánicos como el talco y caolín, que no se funden durante el proceso y son muy difíciles de distribuir dentro de la masa fundida y los orgánicos que se pueden fundir durante el procesamiento y tiene una gran facilidad para distribuirse en la resina. El talco se utiliza como un agente inorgánico de nucleación para el PP. Con agentes orgánicos, la transparencia del PP alcanza su máximo valor como agregado alrededor del 0.3 al 0.5 porcentaje en peso; mientras que, con el talco como agente inorgánico, la rigidez y resistencia al calor se incrementan con la cantidad de éste. Así, mientras los agentes orgánicos se utilizan para incrementar la transparencia, los inorgánicos se aplican para mejorar las propiedades mecánicas del PP.

2.3 OBTENCIÓN DEL POLIPROPILENO.

Uno de los procesos comerciales más antiguos para la producción de PP es la polimerización en solución; actualmente se le considera obsoleto por su alto costo y a una variedad limitada de productos que se pueden obtener, aunque todavía lo utiliza la empresa Texas-Eastmun debido a su fuerte posición de mercado en productos especiales. La polimerización se realiza en reactores con agitación que se alimentan con propileno, un disolvente hidrocarbonado y catalizadores de Ziegler. La solución del polímero se concentra por evaporación instantánea para eliminar el propileno disuelto y parte del disolvente; luego se filtra caliente para eliminar residuos del catalizador. El filtrado se transfiere a un tanque con agitación y se enfría para separar la fracción isotáctica. Esta porción insoluble se separa por centrifugación, se somete de nuevo a extracción con hidrocarburo y se centrifuga, se lava y seca.

El proceso común para producir PP es el de formar una suspensión en un diluyente hidrocarbonado, por ejemplo, hexano o heptano. El proceso se realiza por lotes en reactores con agitación o en reactores continuos. Los proveedores norteamericanos que producen por lo menos una parte de su polipropileno con esta tecnología son Amoco, Arco, El Paso, Exxon, Gul, Himont, Shell, Soltex y USS Chemicals.

En el proceso de suspensión, se alimenta propileno de alta pureza (mayor que 99.5 %) a los reactores que contienen diluyente, mientras se carga una suspensión de partículas sólidas del catalizador. Las condiciones usuales de reacción varían entre 122 y 176°F (50 y 80°C) y 5 a 20 atmósferas. El polímero cristalino obtenido en estas condiciones es insoluble y forma un sólido granular muy fino alrededor de las partículas del catalizador. La adición del monómero continúa hasta que la suspensión contiene 20 a 40% de sólidos. El tiempo de residencia varía de unos minutos a varias horas, dependiendo de la concentración y actividad del catalizador, así como de las condiciones específicas de reacción. El peso molecular se puede controlar variando temperatura y tiempo; sin embargo, el método comercial preferido por su bajo costo es la adición de hidrógeno como agente de transferencia.

La suspensión de polimerización del PP se descarga a un separador donde el monómero residual se evapora para reciclarlo. El catalizador se inactiva y disuelve al añadir alcohol. En este punto, el diluyente, los catalizadores disueltos y el PP atáctico se separan por centrifugación. El polipropileno isotáctico se purifica por destilación con vapor y por lavado con agua, para después filtrarlo, lavarlo y

secarlo. Los polvos que se obtienen se conocen como "hojuelas" o "copos" según su tamaño y densidad. El polímero seco se puede almacenar, transportar o hacer una mezcla previa con estabilizadores para usarlo con o sin "peletización". Utilizando catalizadores modernos superactivos, se obtienen rendimientos de polipropileno hasta 100 veces mayores que con los catalizadores originales de Ziegler. Esto minimiza o suprime las costosas etapas de extracción del polímero y eliminación de residuos catalíticos que se tenían que realizar con los catalizadores originales.

Para superar la poca resistencia al impacto a temperaturas bajas del homopolímero del propileno, los productores han mezclado durante muchos años varios elastómeros con homopolímeros. Estas mezclas, que por lo general se llaman "aleaciones", todavía se producen hasta cierto punto por extrusión para satisfacer demandas especiales. Sin embargo, en años recientes la producción in-situ de copolímeros con etileno, como el comonomero⁸ en configuraciones de bloque o aleatorias, ha sido la técnica principal para obtener copolímeros de medio y alto impacto.

La producción de copolímeros aleatorios se puede realizar al agregar hasta 3.5 % de comonomero al propileno que se alimenta en los reactores. Los copolímeros de bloque se preparan alimentando secuencialmente propileno y etileno a dos o más reactores conectados en serie. El peso molecular (PM) y la distribución de pesos moleculares (DPM) de las fracciones de homopolímero y copolímero se controlan mediante reactores múltiples con condiciones de operación apropiadas y concentraciones de hidrógeno definidas para cada etapa.

El propileno se polimeriza muy bien en masa, es decir, en el monómero líquido mismo. Arco, El Paso, Phillips y Shell polimerizan en masa en reactores con agitación o anulares. En cualquier caso el propileno líquido (y el etileno si se desea obtener copolímeros aleatorios) se agrega continuamente al reactor, junto con un sistema catalítico de alta actividad y alta estereoespecificidad. Las temperaturas de polimerización varían entre 113 y 176°F (45 a 80°C) a presiones suficientes para mantener el propileno en estado líquido: 250 a 550 lb/pulg² (1.7 a 3.5 MPa). Para el control del peso molecular se usa hidrógeno. La suspensión del polímero, en el propileno líquido, contiene 30 a 50% de sólidos y se descarga continuamente de los reactores anulares a través de una serie de válvulas hacia una zona que contiene inhibidores y que se mantiene esencialmente a la presión atmosférica. En los sistemas originales de monómero líquido y catalizador de baja actividad, los residuos catalíticos y el polipropileno atáctico se eliminaban lavando con propileno líquido con alcohol e hidrocarburo. La suspensión concentrada se enviaba a una cámara de evaporación instantánea para obtener el polvo de polímero, secarlo y formar "pellets" con estabilizadores. Existen técnicas para producir copolímeros de bloque propileno-etileno mediante la polimerización en masa con reactores anulares o tanques con agitación; sin embargo, los detalles son confidenciales.

La técnica moderna de polimerización en fase de vapor está representada en un caso, por el proceso con agitación en fase gaseosa creado originalmente por BASF y usado bajo licencia por Norchem en Estados Unidos. El proceso BASF sin diluyente, así como el más antiguo creado por Amoco, se parecen en que el rendimiento de polímero por unidad de catalizador es lo bastante alto como para que sea innecesario eliminar los residuos del catalizador. Aunque los productos hechos de esta forma contienen concentraciones residuales de titanio y de aluminio altas, existe un método original durante la extrusión-formación de "pellets" que reduce los cloruros de esos metales a concentraciones inocuas.

⁸ Monómero alterno adicionado durante la polimerización con el objeto de modificar las características del producto.

Los reactores en el proceso BASF tienen un agitador de espiral o doble hélice para mover la cama de polímero. El enfriamiento crítico de la cama se logra al inyectar en forma continua propileno muy puro en estado líquido o semilíquido en la zona de reacción. Durante la polimerización, el propileno residual se extrae por la parte superior del reactor, se condensa y se reinyecta al reactor, junto con propileno nuevo. La evaporación del monómero absorbe el calor de polimerización y, además, produce una mezcla vigorosa entre el gas y las partículas sólidas de polímero. Son ventajosos los costos de energía en este proceso.

Avances importantes en la tecnología de los catalizadores Ziegler, que hicieron posible la producción de polietileno lineal de baja densidad al final de la década de los años setenta, se han combinado ahora con mejoras en los procesos y se han obtenido polímeros granulados que potencialmente pueden revolucionar la industria del polipropileno. El primero de esos procesos comerciales combina el sistema catalítico Spheripol creado por Montedison y Mitsui Petrochemical, con la nueva tecnología Montedison de polimerización en masa (propileno líquido) empleando reactores anulares. El proceso Spheripol puede producir directamente perlas de polipropileno relativamente grandes con la densidad adecuada para usarse sin "peletizar" en muchas aplicaciones. Montedison y Hercules Inc han formado la compañía Himont Inc, que tiene plantas en todo el mundo. Himont se responsabilizó de toda la producción y avance tecnológico el primero de noviembre de 1983.

El proceso con reactores anulares de Himont Spheripol se inicia al inyectar una mezcla especial de soporte con un catalizador en propileno líquido que circula en un reactor anular con una relación Longitud: Diámetro grande; luego se elimina el monómero como se representa en la figura 2.7.a. El homopolímero así obtenido se puede hacer pasar a través de reactores en fase de gas donde reacciona con etileno o con etileno-propileno, para la inserción de las fracciones de copolímero antes del agotamiento final del monómero como se observa en la figura 2.7.b.

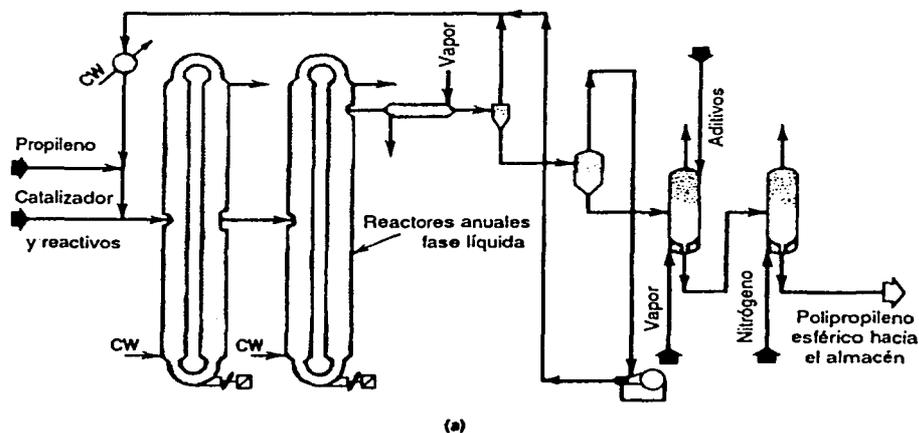
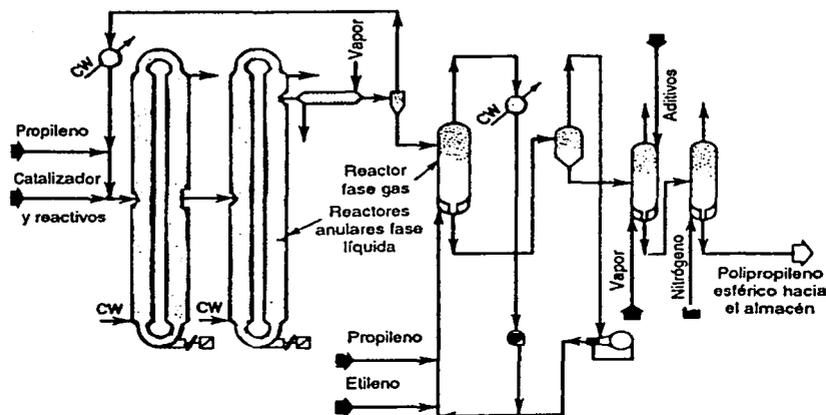


Figura 2.7(a) Proceso Spheripol para homopolímeros



(b)
Figura 2.7(b) Proceso Spheripol para copolímeros.

En 1977, Union Carbide introdujo el proceso en fase gas Unipol. El reactor funciona a baja presión en lecho fluidizado. Este proceso fue creado originalmente para polietileno lineal de baja densidad y ha sido adaptado recientemente para producir homopolímeros y copolímeros de polipropileno. La aplicación del proceso Unipol se hizo posible al incorporar la tecnología de catalizadores de alta actividad de Shell Chemicals. En la figura 2.8, aparece un diagrama simplificado del proceso Unipol en fase gas como se ha autorizado mundialmente para la producción de polietileno lineal de baja densidad. Se dice que la operación de este sistema de lecho fluidizado para la producción de polipropileno es semejante a la de producción de PEBD y permite producir de PE a PP.

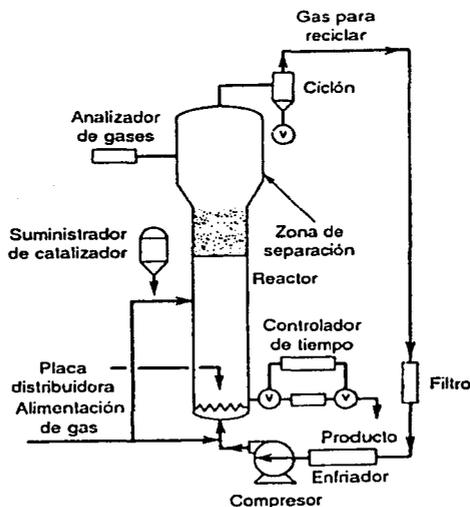


Figura 2.8 Proceso Union Carbide Corporation (UCC) en fase de gas.

El reactor Unipol consta de una zona de reacción en el fondo y una de salida de gases en la parte superior. Una placa porosa sirve para dispersar el monómero y lograr el fluidizado. La zona de reacción contiene partículas olefinicas suficientemente fluidizadas por la corriente gaseosa del monómero (o la mezcla del monómero y el comonómero) para capturar y distribuir el catalizador en forma uniforme. La fluidificación se mantiene debido a la alta velocidad de reciclado del gas (del orden de 50 veces la relación descarga/alimentación). El monómero residual se separa y se recicla mientras las partículas sólidas regresan a la cama para extraerlas en forma continua a través de una serie de válvulas.

Los procesos Spheripol y Unipol pueden producir polímeros en forma de gránulos o perlas, los cuales se comercializan directamente sin "peletizar". Se cuenta con sistemas de manejo de materiales para almacenarlos, mezclarlos y transportarlos. Sin embargo, todavía se requiere promover la aceptación amplia de este tipo de productos en el mercado estadounidense.

Independientemente del proceso de polimerización, los homopolímeros y copolímeros del propileno deben ser estabilizados para evitar su degradación oxidativa, porque de otra manera, habría reacciones en cadena por radicales libres, que producen peróxidos. Estas reacciones autocatalíticas son aceleradas por el calor, la luz ultravioleta y otras formas de radiación. Lo que se hace normalmente es incorporar pequeñas cantidades de estabilizador al polímero antes de someterlo a temperaturas altas, por ejemplo, durante la desecación o el almacenamiento prolongado. En algunos sistemas de almacenamiento y transferencia se usa atmósfera inerte. Durante la formación de "pellets" se mezclan con el polímero hasta 1 % más de estabilizadores. La selección de aditivos depende del proceso final de transformación, las características del producto terminado, el ambiente al que estará expuesto y la durabilidad necesaria.

De manera general las reacciones de síntesis utilizadas para producir los polímeros pueden ser dirigidas casi a la voluntad del individuo, con estos se pueden controlar los parámetros más importantes de las macromoléculas como la longitud de la cadena, la distribución del peso molecular, el grado de ramificación y la cristalinidad, los cuales inciden directamente en el comportamiento de los plásticos.

2.3 PROPIEDADES DEL POLIPROPILENO.

Las propiedades de los productos poliméricos tienen una variabilidad dependiendo de las propiedades físicas, químicas y mecánicas que se producen en ellos durante el proceso de obtención, por ello, las siguientes características merecen especial atención.

La **cristalinidad** en el polipropileno se puede determinar por la distribución de regiones o zonas cristalinas y zonas amorfas en su disposición atómica. En el estado sólido existen zonas donde las cadenas macromoleculares se entrelazan de una forma completamente desordenada por efecto de los grupos laterales CH_3 , constituyendo la matriz amorfa; mientras que en otras existen tramos de cadenas moleculares, que se agrupan paralelamente entre ellas, aunque con grandes imperfecciones, como resultado de puentes de hidrógeno y la existencia de dipolos permanentes o transitorios, estos últimos se presentan por el movimiento de los electrones, donde en cierto instante una porción de molécula se vuelve ligeramente negativa mientras que en otra región aparece una carga positiva equivalente, formándose así las zonas cristalinas. Por esto, el polímero tiene una estructura semicristalina. La proporción de masa cristalina con respecto a la masa total se designa como grado de cristalinidad.

La **transparencia** del PP sin cargas esta en función de la cristalinidad. Es decir, ya que el polímero presenta grupos laterales, moléculas ramificadas, existen las zonas cristalinas donde las cadenas quedan muy cercanas entre si impidiendo con esto el paso de la luz; mientras que éstos se encuentran rodeados de las zonas amorfas donde el paso de la luz se realiza con mayor facilidad, cuando el PP presenta una transparencia lechosa.

La **densidad** es útil para cuantificar la cantidad de materia prima a utilizar en la fabricación de un artículo determinado. La densidad está en función directa de su estructura molecular, es decir, ya que éste posee una estructura semicristalina provoca que existan zonas donde las moléculas están muy próximas, mientras que en otras se encuentran alejadas, observándose así un mayor volumen en la misma masa, presentando una menor densidad que si tuviera una estructura lineal sin grupos laterales como en el polietileno, donde sus moléculas se encuentran mucho más próximas entre ellas y con esto presenta una mayor densidad. El PP, en comparación con el polietileno, tiene una densidad más baja, permitiendo que su rendimiento en producción sea mayor. Así el rango de densidad del polipropileno es de 0.902 a 0.905 g/cm³.

El **índice de fluidez** (movimiento del flujo fundido), es una medida de la viscosidad del flujo fundido (resistencia del polímero fundido para fluir); también se utiliza para dar un estimado del peso molecular del PP. La elección del grado del material se determina de acuerdo al proceso de transformación que se va a utilizar. Este valor es inversamente proporcional al peso molecular, ya que si el índice es menor el peso molecular aumenta, por lo que la viscosidad del polímero fundido se incrementa y su rapidez disminuye. Por el contrario, si este valor aumenta el peso molecular es menor, aumenta la rapidez, facilitando la inyección en piezas de diseños complicados.

La viscoelasticidad del producto fundido puede dar información no solo acerca del grado de polimerización (peso molecular) de los termoplásticos, sino también de su comportamiento de fluidez. Para evaluar el índice de fluidez se han creado estándares de acuerdo con las normas ASTM (American Society Testing of Materials) D-569, en las que el resultado se denomina índice de grado (grade index) y consiste en fundir una cantidad determinada de la masa termoplástica en un cilindro caliente y comprimirla bajo una presión, también fija, a través de una boquilla de dimensiones conocidas; así, puede medirse el tiempo de salida para una cantidad determinada o bien la cantidad para un tiempo de salida establecido. El "índice de fluidez" o índice de rapidez del flujo fundido se expresa en g/10 min. Por lo que existen ciertos intervalos de flujo de polímero fundido de acuerdo a sus características, tabla 2.3.

| Rangos de índice de fluidez (g/10min) | Características del flujo |
|---------------------------------------|---------------------------|
| Debajo de 4 | Bajo flujo |
| 4 a 10 | Flujo medio |
| 10 a 20 | Alto flujo |
| Arriba de 20 | Extra-alto flujo |

Tabla 2.3 Rangos de "índice de fluidez" con respecto a las características del flujo.

Para cada proceso y aplicación del polipropileno, se cuentan con diferentes índices de fluidez. El índice de fluidez determinará en alguna medida el grado de aplicación del PP, tal como lo vemos en la tabla 2.4 para algunos casos.

| INDICE DE FLUIDEZ | APLICACIÓN IDEAL | PROCESO |
|-------------------|---|--|
| 1.5 | Piezas Técnicas | Soplado |
| 2.4 | Electrodomésticos Piezas Técnicas y Juguetes | Termoformado y Extrusión |
| 3.2 | Rafia y Película | Extrusión |
| 3.8 | Película y Embalaje Piezas Técnicas, Juguetes y Muebles para el Hogar | Extrusión |
| 5.9 | Muebles para el Hogar y Juguetes | Inyección |
| 6.1 | Embalaje Electrodomésticos y Piezas Técnicas | Extrusión Inyección |
| 9.5 | Película Cast y Embalaje | Extrusión |
| 12 | Juguetes Fibra | Inyección Extrusión |
| 20 | Piezas Técnicas Piezas Técnicas y Diversos | Inyección Inyección de Pared Delgada |
| 35 | Piezas Técnicas y Diversos | Inyección de Pared Delgada |

Tabla 2.4 Índice de fluidez del PP relacionado con su aplicación.

La **contracción** de una pieza de PP sirve de parámetro comparativo con otros plásticos durante el llenado de una cavidad; ya que en las piezas moldeadas por inyección dicha contracción continúa aún 24 horas después de ser extraídas del molde. De la figura 2.9 se puede decir que la contracción casi está directamente relacionada con el espesor de las piezas, en donde se puede observar como las secciones gruesas se contraen más que las delgadas. De hecho, la contracción es el principal argumento para poder realizar el moldeo de piezas con espesores constantes.

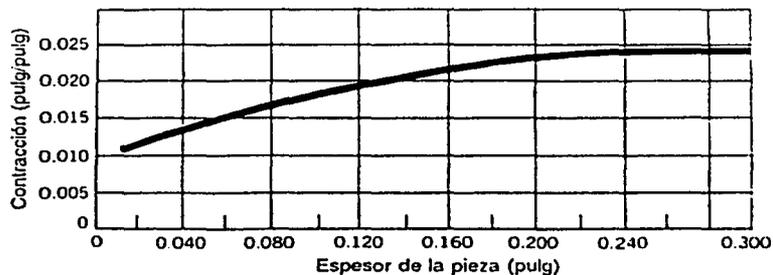


Figura 2.9 Variación de la contracción del PP con el espesor.

Si se presentan problemas de contracción, la temperatura del molde debe reducirse en intervalos de 6°C , observando su comportamiento hasta evitarse la misma. Con un molde más frío se forma una piel gruesa y se puede obtener solidificación completa antes de sacar la pieza del molde. Si persiste la dificultad, se aumenta el tiempo de curado. Esto producirá el mismo efecto que el enfriamiento del molde, pero aumentará la duración del ciclo de procesamiento. Otro recurso es bajar la temperatura del proceso para minimizar el enfriamiento en el molde. Sin embargo, al reducir la temperatura de la mezcla, aumenta la posibilidad de tensiones en las piezas. Como último recurso se puede aumentar la presión del proceso, la cual reduce la contracción pero causa tensiones en las piezas o hace que estas se peguen al molde.

Las causas posibles de la contracción excesiva son: el molde a una temperatura muy alta, tiempo de curado muy corto, temperatura de mezcla muy alta, mal diseño de piezas, paredes de espesor variable, presión de proceso demasiado baja.

Si la contracción es lineal, lo que para el polipropileno es del 1 al 2 %, ésta se puede determinar siguiendo la norma ASTM (American Society for Testing of Materials) D-995, que muestra la forma para obtenerla como lo muestra la ecuación 2.1

$$C_L = \left(1 - \frac{\text{Dimensión de la Probeta}}{\text{Dimensión del molde}} \right) \times 100 \dots \dots \dots \text{ecuación 2.1}$$

La **absorción de agua** del PP puede considerarse bajo dos aspectos, de tipo molecular y por la porosidad, esta última se presenta en polímeros obtenidos por condensación, lo que para nuestro caso no es de interés, ya que el PP se polimeriza en solución, en masa o en fase vapor. Por esto, la absorción de humedad es molecular ya que está directamente relacionada con los átomos que constituyen al polímero. En vista de que al PP básicamente lo constituyen átomos de carbono e hidrógeno que no reaccionan con el agua se considera que la absorción de humedad es muy baja, de 0.01 a 0.03 % del volumen total, aún inmerso en la misma, tanto a temperatura ambiente como a casi todas las bases y ácidos inorgánicos, incluso a alta concentración y temperaturas superiores a los 60 °C, por lo que evita su secado previo para procesarlo, manteniendo una buena estabilidad dimensional, incluso en ambiente altamente húmedos.

En la figura 2.10 se muestra el porcentaje de absorción de agua a diversas temperaturas a medida que pasa el tiempo.

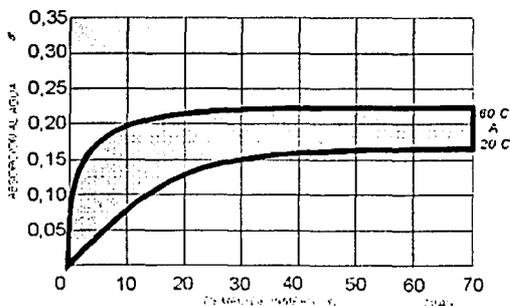


Figura 2.10 Absorción de agua a diversas temperaturas del PP.

La **conductividad térmica** que presenta el PP se da, en su mayor parte, mediante el aumento de la amplitud de las vibraciones moleculares. Además es favorecida por los átomos unidos por enlaces covalentes y por la presencia de las zonas cristalinas, donde los átomos están dispuestos ordenadamente en el espacio, pero ésta es amortiguada al pasar a las zonas amorfas. Por esto presenta un valor pequeño de conductividad térmica de 0.17 a 0.22 W/ m-K, ya que el calor que absorbe lo transmite lentamente; esto se refleja en ciclos más largos de enfriamiento durante su procesamiento. El polipropileno de estructura orientada presenta un valor de conductividad térmica mucho mayor en la dirección del estirado que en las otras, lo que se interpreta como consecuencia de la alineación de las cadenas moleculares. Particularmente, la resistencia al calor continuo que tiene el polipropileno de estructura orientada, le da la capacidad para soportar elevadas temperaturas libres de esfuerzos mecánicos, siendo uno de los materiales plásticos que más resistencia posee, utilizándose por ello en la inyección de acumuladores para automóvil.

Dada su baja conductividad térmica el PP presenta un valor elevado de **calor específico** 2.0 kJ / kgK (cantidad de calor que se necesita para elevar un grado centígrado la temperatura de un material por unidad de peso), consumiendo más energía para su transformación y enfriamiento.

En la práctica la **máxima temperatura** de utilización del polímero se determina en función de la temperatura a la que se producen deformaciones inaceptables y se obtiene por medio de un ensayo llamado **Vicat**. Este ensayo se define según la norma ASTM (American Society for Testing of Materials)-D1525 o ISO (International Standard Organization) 306, que consiste en determinar la temperatura a la que una aguja de 1mm² de área transversal penetra 1mm en una muestra normalizada (1/8 in de espesor, anchura mínima de 3/4 in) a una velocidad de calentamiento determinada (a menudo de 50°C/h) bajo la acción de una carga determinada (normalmente menos de 1kg). Con esto se tiene una **temperatura de reblandecimiento Vicat** alrededor de 150 °C, esto porque el polímero se encuentra formado por macromoléculas de diferentes tamaños, y por presentar fuerzas de enlace, tales como fuerzas de Van der Waals.

Este material tiene una temperatura de deformación bajo carga muy elevada como ya se ha dicho, por ejemplo a 110 °C soporta 9 MPa (4.5 Kg/cm²), por lo que es utilizado en la fabricación de piezas mecánicas como engranes, cafeteras eléctricas y freidoras. Ahora que con una temperatura de 55 °C soporta una carga de 37 MPa (18.5 Kg/cm²), pero si se refuerza con cargas como fibra de vidrio, talco o carbonato de calcio, la temperatura de deformación aumenta hasta 150 °C soportando la misma carga; esto ayuda a que el material se emplee para fabricar tableros automotrices, parrillas para auto y piezas mecánicas.

El polímero se vuelve frágil a 0°C, ya que una fracción amorfa se vuelve vítrea, presentando una temperatura de transición vítrea, T_g, de -14°C, donde el factor controlante es la flexibilidad de la cadena molecular.

Las **propiedades mecánicas** están en función del grado de cristalinidad (proporción de masa agrupada como zonas cristalinas con respecto a la masa total), del peso molecular (producto del peso molecular de la unidad estructural que constituye al polipropileno por el número de monómeros en el polímero o grado de polimerización) y de la isotacticidad (todos los grupos durante la condensación polimérica están colocados al mismo lado de la cadena molecular).

El PP posee una estructura semicristalina por la presencia de los grupos laterales, CH₃, promoviendo la formación de las zonas cristalinas que se encuentran constituidas por tramos de moléculas que se prolongan en las zonas amorfas y que actúan como centros de anclaje que dificultan el deslizamiento; originando así el entrelazamiento de las cadenas, que incrementan la rigidez, y con la ayuda de los grupos metílicos se tiene una estructura semirígida.

La *resistencia a la tracción* del PP presenta un valor promedio de 30 MPa. Un factor determinante en las propiedades de la tracción del material es la isotacticidad, donde todos los grupos metilo durante la obtención del polímero por condensación se colocan a un mismo lado de la cadena molecular, como se muestra en la figura 2.11. Así como, el incremento de su resistencia por el proceso de orientación presente por la fabricación de películas, rafia y cuerdas, promoviendo la competencia con otros plásticos de ingeniería, figura 2.12.

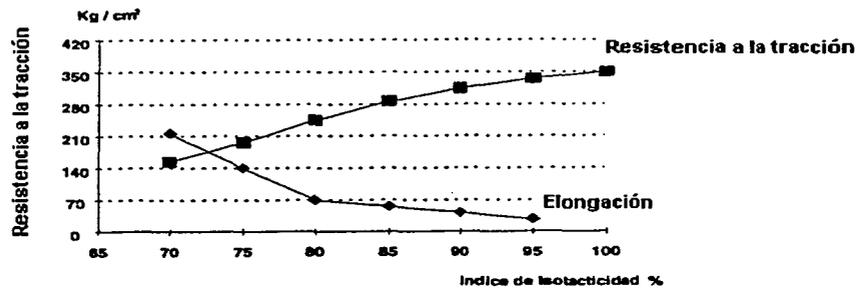


Figura 2.11 Efecto de la isotacticidad en las propiedades de tracción del PP.

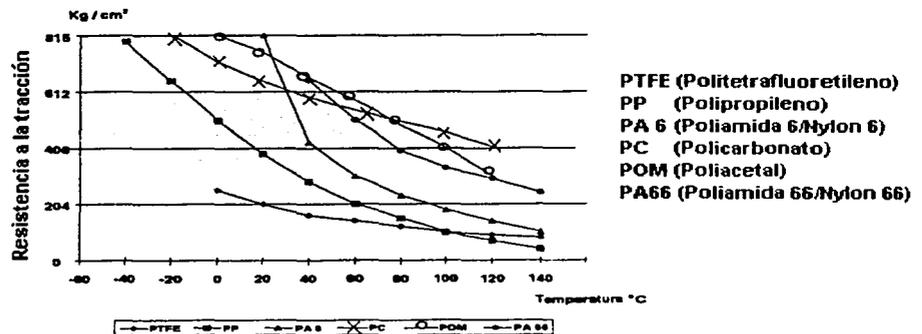


Figura 2.12 Comparación del PP modificado con algunos plásticos de ingeniería.

El *porcentaje de elongación a la ruptura* del PP tiene un excelente rango, ya que fluctúa entre 400 y 430 % utilizando cargas de 600 MPa a 800 MPa (300 a 400 Kg/cm²), lo que justifica el amplio uso de este material en la fabricación de películas, y que hace posible su estiramiento en dirección máquina (DM) y transversal (DT). Para rafia y cuerdas, solamente se hace el estiramiento en dirección máquina ya que aumenta de seis a ocho veces su tamaño respecto al tamaño inicial, produciéndose filamentos de alta resistencia a la tracción; como se demuestra en la figura 2.13, donde se compara el PP, respecto a otros materiales, y se observa que presenta un mayor porcentaje de elongación plástica que permite obtener películas biorientadas.

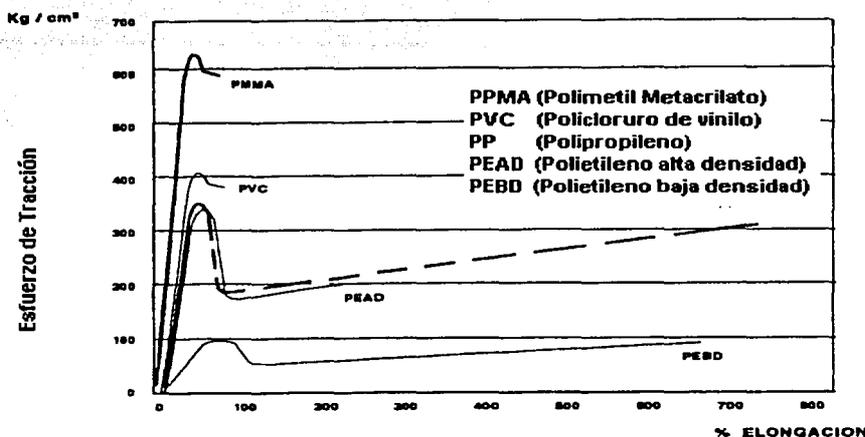


Figura 2.13 Porcentaje de elongación del PP comparado con algunos plásticos de ingeniería.

Ya que el PP es un material semi-rígido, presenta una **resistencia a la flexión** de 1100 MPa a 1300 MPa (550-650 Kg/cm²), por lo que se utiliza en la fabricación de carcasas de aparatos, cajas y contenedores de alimentos. Esta resistencia depende del **módulo de flexión**, que es una medida de la rigidez del material. La presencia de los grupos metílicos en el PP, proporciona una mayor rigidez con respecto al polietileno, incluso por encima de los 100 °C; utilizándose en la manufactura de popotes, cerdas para escoba y tapas con bisagra integrada. Además, este material tiene una **resistencia a la compresión** promedio de 1000 MPa (500 Kg/cm²).

La **resistencia al impacto** que presenta el PP homopolímero, en la prueba izod ranurado, es de 3.2 a 5 KJ/cm²; este es empleado para fabricar carcasas de electrodomésticos, gabinetes, portafolios, aspas para lavadoras y botellas.

En resumen las propiedades del PP homopolímero natural y del PP copolímero se exponen en la tabla 2.5 y 2.6. Se observa, que a temperaturas menores a 0°C el PP homopolímero se vuelve frágil y quebradizo. Al igual que el copolímero posee buenas propiedades dieléctricas; su resistencia a la tracción es mayor en combinación con su elongación, permitiendo su biorientación; presenta una apariencia translúcida y bajos costos.

| PROPIEDADES | UNIDADES | ALTO FLUJO | BAJO FLUJO |
|---|--------------------|------------|------------|
| Resistencia a la tracción | N/mm ² | 30 | 35 |
| Densidad | g/cm ³ | 0.901 | 0.905 |
| Temperatura de Fusión | °C | 160 - 165 | 160 - 165 |
| Resistencia al impacto "Izod Ranurado" | KJ/cm ² | | |
| @ 23°C | | 4 | 12 |
| @ 0°C | | 2 | 4 |
| @ -20°C | | - | 3 |
| Temperatura de Deflexión | °C | | |
| 1.86 N/mm ² | | 70 | 60 |
| 0.45 N/mm ² | | 130 | 110 |
| Resistencia Dieléctrica | KV/cm | 700 | 700 |
| Absorción de Agua | Mg | < 2 | < 2 |

Tabla 2.5 Propiedades del PP homopolímero natural

| PROPIEDADES | UNIDADES | ALTO FLUJO | BAJO FLUJO |
|---|--------------------|------------|------------|
| Resistencia a la Tensión | N/mm ² | 25 | 25 |
| Densidad | g/cm ³ | 0.907 | 0.912 |
| Temperatura de Fusión | °C | 160 – 165 | 160 – 164 |
| Resistencia al impacto "Izod Ranurado" | KJ/cm ² | | |
| @ 23°C | | 9 | 40 |
| @ 0°C | | 6 | 15 |
| @ -20°C | | 4.5 | 7 |
| Temperatura de Deflexión | °C | | |
| 1.86 N/mm ² | | 55 | 56 |
| 0.45 N/mm ² | | 105 | 110 |
| Resistencia Dieléctrica | KV/cm | 700 | 700 |
| Absorción de Agua | mg | < 2 | < 2 |

Tabla 2.6 Propiedades del PP copolímero impacto.

Con lo anterior, se observan propiedades similares para ambos polímeros; sin embargo, el PP copolímero posee una mayor resistencia al impacto a bajas temperaturas y aumenta si se modifica con hule EPDM⁹, incrementando su elongación, siendo más flexible que el tipo homopolímero.

| PROPIEDADES | UNIDADES | ALTO FLUJO | BAJO FLUJO |
|---|--------------------|------------|------------|
| Resistencia a la tracción | N/mm ² | 31 | 25 |
| Densidad | g/cm ³ | 0.907 | 0.912 |
| Temperatura de Fusión | °C | 150 – 160 | 150 – 160 |
| Resistencia al impacto "Izod Ranurado" | KJ/cm ² | | |
| @ 23°C | | 4.2 | 6.3 |
| @ 0°C | | - | - |
| @ -20°C | | - | - |
| Temperatura de Deflexión | °C | | |
| 1.86 N/mm ² | | - | - |
| 0.45 N/mm ² | | 90 | 85 |
| Resistencia Dieléctrica | KV/cm | 700 | 700 |
| Absorción de Agua | mg | < 2 | < 2 |

Tabla 2.7 Propiedades del PP copolímero "random".

En la tabla 2.7 se muestran las propiedades del PP copolímero "random". Posee un índice de fluidez de 30 g/ 10 min, según un proceso de inyección. A una temperatura de 4°C su resistencia mecánica disminuye. Sus propiedades más sobresalientes son: el incremento de su transparencia, flexibilidad y resistencia al impacto.

2.4 APLICACIONES DEL POLIPROPILENO.

Hay que mencionar que el grado del PP representa las distintas características que tiene, es decir, se refiere al uso que será sometido, índice de fluidez y los diferentes porcentajes de carga y refuerzo que pueden utilizar los polímeros, sin olvidar que estos intervienen en sus propiedades, dependiendo de la modificación hecha.

⁹ Hule con monómero de etileno-propileno-dieno

De este modo, el PP homopolímero tiene diversos grados de aplicación según su procesamiento, clasificados como:

- Uso General
- Alto y Bajo Flujo
- Cargados y Reforzados
 - 10 - 40 % talco
 - 10 - 40 % carbonato de calcio
 - 10 - 50 % mica
 - 40 % mica y modificado al impacto
 - 10 - 30 % fibra de vidrio
 - 40 % fibra de vidrio
 - 20 - 30 % fibra larga de vidrio
 - 40 % fibra larga de vidrio
 - 30% esferas de vidrio

Para el PP homopolímero, estos grados tienen sus principales aplicaciones en la industria, con la siguiente distribución:

- a) Es posible fabricar películas mediante diferentes procesos, las cuales son:

La Película "Cast"¹⁰ que presenta propiedades mecánicas menores a las obtenidas por el proceso de orientación biaxial, debido a que su obtención es más sencilla y resulta más económica en producciones menores. El uso más común de este material es para empacar prendas de vestir como camisas y medias, presentando ventajas en la impresión y sello, impulsando su desarrollo en productos para artes gráficas y publicidad.

La Película Biorientada obtiene resistencia a la humedad y transparencia, superiores a cualquier otro método de obtención de películas; el uso de éstas permite lograr grandes ventajas en el envasado de productos secos como botanas, pastas, galletas, pasteles y golosinas. Es posible su impresión, aplicando previamente un tratamiento, normalmente se lamina sobre la tinta con otra película biorientada de copolímero de polipropileno. Para evitar su desprendimiento la impresión permanece en forma de sándwich.

La producción de "Rafia"¹¹ utiliza al polipropileno homopolímero por ser ligeramente más rígido que el copolímero, además de que es fácilmente orientable. En su proceso se proporciona un estiramiento en dirección de la máquina, con el fin de disminuir su elongación y mejorar su resistencia a la tracción. Por sus propiedades y fácil manejo, se utiliza para tejer costales de diferentes tipos, como ejemplo esta el tejido totalmente cerrado, que se emplea para encostalar productos de grano como azúcar, sal, frijol, arroz y maíz.

- b) Como presenta mayor resistencia a la temperatura que los poliestirenos es utilizado para Productos Médicos, y se utiliza para jeringas e instrumentos de laboratorio que deben esterilizarse en equipos de autoclave a temperaturas por encima de los 100°C y presión.

¹⁰ Hoja o película de PP, obtenida por medio de un dado plano, enfriado con un rodillo o con agua.

¹¹ Filamento o cinta orientada uniaxialmente mediante un estiramiento.

- c) Para Productos domésticos como platos, vasos y utensilios de cocina, el polipropileno es utilizado por presentar una rigidez y resistencia mecánica necesaria, ya que presenta poca deformación dimensional y resiste mayores temperaturas que los poliestirenos.
- d) La industria del envase y empaque se beneficia con el uso de las tapas de polipropileno, por tener resistencia a la fatiga, permitiendo aplicaciones de bisagra, resiste al torque y por su baja densidad, permitiendo un mayor número de productos terminados por cantidad de material.

Sin embargo el PP copolimero impacto tiene menor número de grados de aplicación según su procesamiento:

- Uso general
- Alto y bajo flujo
- Cargados y reforzados (aleación)
 - 10 – 40 % talco
 - 10 – 20 % fibra de vidrio

Estos grados tienen sus aplicaciones más comunes, tales como:

- a) Sector de **consumo general**, los artículos que cubren este segmento, además de tener una excelente resistencia al impacto y menor rigidez, soportan bajas temperaturas, y se aplica en tuberías, perfiles, juguetes, recipientes para guardar alimentos, cajas de uso industrial y hieleras.
- b) Para **Empaque y Envases**, las películas de este polipropileno tiene mejor resistencia a la penetración (dureza), aparte de tener buena transparencia y mayor densidad que el homopolímero.
- c) En el **Sector Automotriz** el copolímero impacto presenta una temperatura de deformación baja. No obstante tiene excelente resistencia química, así como al medio ambiente. Se utilizan para acumuladores, tableros, puertas laterales, etc. Los grados de alta fluidez se emplean para las molduras interiores de los autos.
- d) Se aplica al sector de electrodomésticos, mezclado con aditivos; se utiliza en carcasas de aparatos, aprovechando su resistencia a productos químicos y al medio ambiente.

Por su obtención los grados de aplicación del PP “random” este polímero, según su procesamiento, son los siguientes:

- Uso General:
 - Alto Flujo
 - Bajo Flujo
- Modificado con Aditivos

Estos productos inyectados presentan mayor transparencia y resistencia al impacto que los homopolímeros; donde los diversos grados tienen sus principales aplicaciones industriales, tales como recipientes para comida, botellas, y algunas veces película “cast”:

- a) En el mercado de las botellas la transparencia era una limitante, por consiguiente, se creó al PP “random”, cuya característica principal es su elevada transparencia, además de mejorar la resistencia al impacto del homopolímero.

- b) Este tipo de PP se encuentra en envases para vinagre y salsas, agua purificada, cosméticos, mayonesas, jarabes y vacunas.
- c) En Película "cast" por su ventaja de tener baja temperatura de sellado, se utiliza en película de empaque, mejorando las condiciones de operación.
- d) Se aplica en artículos donde se necesita transparencia, ya que su baja temperatura de fusión, origina que sea fácil de procesar, cuenta con mayor flexibilidad, por lo que se utiliza en popotes, charolas, recipientes para comida, estuches para cintas de audio y video, displays y juguetes.

Capítulo III

CONFORMADO POR INYECCIÓN

3.1 EL PROCESO DE INYECCIÓN.

Es uno de los principales procesos para la transformación de los plásticos, pues este proceso transforma resinas, polvos, pellets, entre otros, en productos útiles y de gran variedad, ya que la cantidad de productos obtenidos por inyección que son usados en la vida diaria es enorme, tales como las carcazas de las computadoras y televisores, discos compactos, reproductores de éstos, lentes, cepillos de dientes, partes automotrices, calzado deportivo, artículos para oficina, entre otros miles de artículos más.

La elaboración de materias termoplásticas por el proceso de inyección ofrece amplias posibilidades de racionalización desde el punto de vista de producción económica, y se extiende a un amplio campo de aplicación. Las principales ventajas del procedimiento de inyección residen en el ahorro del material, espacio de fabricación y tiempo de producción. Pese a los costos de instalación, y de los moldes, el proceso ofrece considerables ventajas económicas, a partir de series superiores a mil piezas.

El proceso de inyección ofrece entre otras cosas:

- Máxima exactitud de forma y dimensiones de las piezas inyectadas. Posibilidades de formación de orificios, refuerzos, ajustes y marcas, así como de inserción de elementos de otros materiales, con lo que la producción se hace completa o las piezas quedan listas para el montaje.
- Superficie lisa y limpia de las piezas inyectadas.
- Buenas propiedades de resistencia a pesar de espesores de pared finos, con una configuración de las piezas adecuada al proceso y al material.
- Múltiples posibilidades en cuanto a un tratamiento posterior de las superficies.
- Rápida producción de gran cantidad de piezas en moldes duraderos con una o varias cavidades; esto permite plazos de entrega relativamente cortos y una capacidad de almacenaje reducido.
- Gran aprovechamiento del material empleado; en muchos casos puede efectuarse la trituración de las mazarotas directamente junto a la máquina de producción, mezclando de nuevo la molienda con el granulado fresco.

Desde el punto de vista puramente tecnológico, hay que valorar como máxima ventaja de la inyección el hecho de que la pieza inyectada queda determinada por el molde en todas sus superficies, en cuanto a forma y dimensiones. En los restantes métodos de elaboración que compiten con la inyección (moldeo en caliente y soplado) las tolerancias de forma y dimensiones quedan determinadas por la superficie de la cavidad del molde o del núcleo. Por ello, hay que considerar que estos procesos se diferencian por los productos, en cuanto a los espesores de pared y por las variaciones en la resistencia mecánica del producto final.

3.1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE INYECCIÓN.

El proceso inicia al verter una determinada cantidad de material en la tolva del dispositivo dosificador situado sobre la unidad de inyección de la máquina. Una cierta cantidad de este material cae ante el husillo del dispositivo dosificador, la cual se empuja hacia adelante por el husillo dosificador en el curso del ciclo de trabajo y pasa alrededor del husillo de inyección, moviéndose de nuevo hacia adelante cuando se efectúa un movimiento de retroceso (dosificación). El husillo de inyección impulsa al material hacia delante, al iniciar su movimiento de trabajo a través del cilindro de plastificación, donde las resistencias ó bandas calefactoras que se encuentran situadas en la superficie exterior del cilindro incrementan la temperatura del material para producir la transformación de la masa prensada en una fusión termoplástica.

El proceso de inyección es un proceso cíclico que se divide en los siguientes pasos básicos:

1. Fusión del material plástico en el sistema de plastificación, hasta alcanzar una consistencia plástica apta para la inyección, y finalizando con el cierre del molde.
2. Inyección del material termoplástico en las cavidades del molde cerrado.
3. Dosificación de una cantidad de granulado, correspondiente al volumen del molde, mediante el husillo de inyección (retracción del husillo).
4. Enfriamiento del material inyectado hasta la solidificación que permite el desmoldeo de la pieza, posteriormente se abre el molde y se retira la pieza.

En la figura 3.1 se representa esquemáticamente en la máquina el proceso de inyección en sus fases principales, es decir, en un ciclo típico de moldeo.

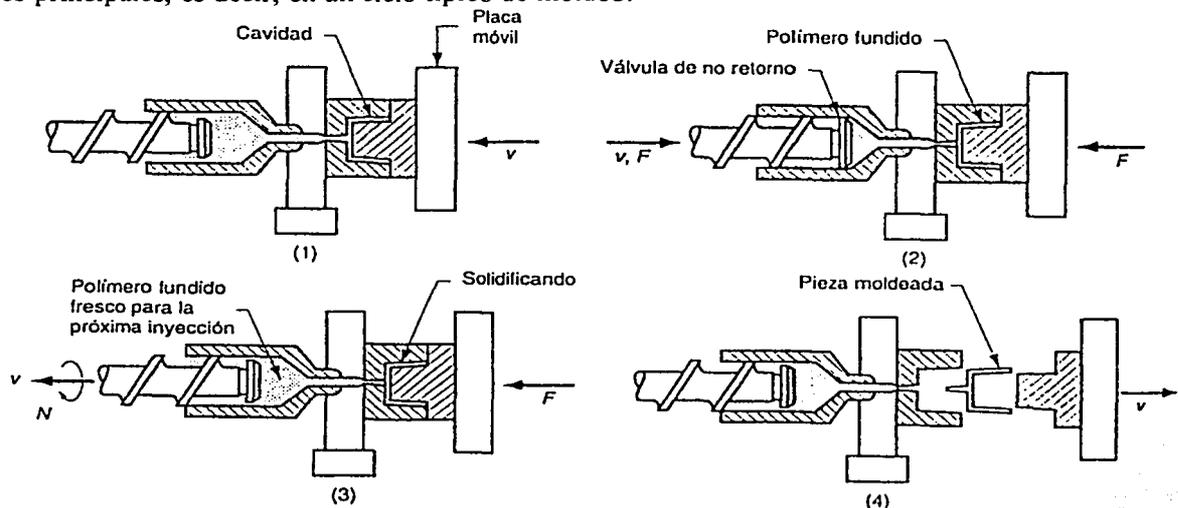


Figura 3.1 Ciclo típico de moldeo: (1) fusión del material y cierre del molde. (2) el polímero fundido se inyecta en la cavidad, (3) dosificación mediante la retracción del tornillo y (4) enfriamiento de la pieza, el molde se abre y se retira la pieza.

La pared interior del cilindro transmite continuamente el calor al granulado, que empieza rápidamente a modificar su consistencia sólida (pellets) bajo la influencia de la temperatura. Para mover el material hacia la pared interior del cilindro caliente y tener un control de flujo uniforme, se ha dispuesto en el interior del mismo un dispositivo de presión de la masa, conocido como válvula de antirretorno por su configuración hidrodinámica. Y dado que el proceso de inyección es intermitente, hace que el avance de material no sea total, sino que haya una cierta cantidad de la masa que permanece en el cilindro. Sin embargo, con cada avance se propicia la disgregación del material.

El molde de inyección es parte de la unidad de cierre de la máquina y consta fundamentalmente de dos mitades, ambas fijadas, respectivamente, a las placas (platinas) porta molde acordes a la posición de la boquilla y la otra mitad en posición del extractor o botadores (parte móvil). El material inyectado atraviesa el bebedero de la mitad del molde correspondiente al lado de la boquilla (parte fija) y llega a través de los canales de alimentación hacia las cavidades del mismo, que corresponden a la imagen en negativo de la pieza a fabricar. La cantidad de material dosificada debe ser tal que su volumen baste para llenar la cavidad o cavidades dispuestas en el molde. La masa plástica se enfría en poco tiempo dentro del molde, donde un sistema de enfriamiento dispuesto en forma de serpentín en sus dos mitades disipa el calor y acelera el proceso de solidificación de la pieza.

Finalizado el proceso de solidificación puede abrirse el molde, y extraerse la pieza con ayuda de los expulsores (botadores) del sistema eyector. Este último paso ocurre cuando casi se ha alcanzado la posición de apertura máxima de la placa porta molde del lado del extractor, donde el sistema del extractor choca con el tope del sistema de botadores del molde que se encuentra en la platina móvil de la máquina. Con el desmoldeo de la pieza inyectada termina el ciclo de trabajo. En la figura 3.2 se muestra el diagrama de presión y carrera del husillo, así como el ciclo de tiempo de llenado del molde durante el proceso.

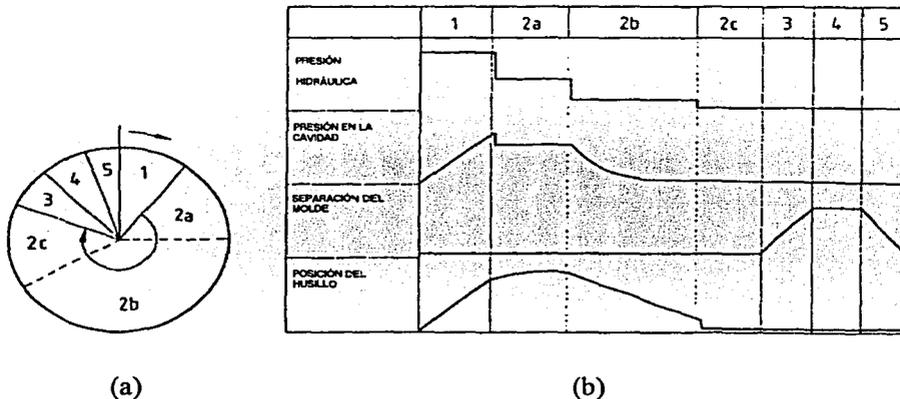


Figura 3.2 (a)Ciclo de inyección con respecto al tiempo: (1) inyección, (2) enfriamiento y solidificación (2a) empaquetamiento/sostenimiento, (2b) retracción del husillo y (2c) dosificación). (3)apertura del molde, (4) expulsión y (5)cierre del molde; (b)Presión y carrera del husillo durante el proceso.

Para calcular los parámetros fundamentales de un ciclo completo en una máquina de inyección, es necesario conocer: el volumen del artículo, cantidad de material a utilizar hasta el completo llenado

de la pieza dentro del molde, la velocidad de inyección, temperatura de plastificación, (temperatura adecuada de la mezcla para la inyección, incluyendo la temperatura de transición vítrea), tiempo total de permanencia de la pieza dentro del molde, tiempo de enfriamiento, presión posterior (presión de sostenimiento), tiempo de aplicación de presión posterior ó de sostenimiento, cojín de masa¹, presión específica de inyección y la fuerza de cierre del molde. El ciclo de moldeo se divide en tres fases: inyección, empacamiento y enfriamiento. En la fase de inyección, la presión en el molde durante su llenado es menor que las presiones que surgen en la segunda fase, siendo esta el resultado de la resistencia de la masa al flujo, a la viscosidad y la velocidad de inyección. En la fase de empacamiento, se compacta la masa para asegurar el correcto llenado de las cavidades del molde, para finalizar con la solidificación o enfriamiento de la pieza.

El parámetro de presión se puede modificar cuando tenemos variaciones en la temperatura del polímero, ya que a mayor temperatura es necesario reducir la presión de inyección, así como la velocidad de inyección.

En las máquinas de inyección sin plastificación previa, la presión generada por el husillo no se transmite íntegramente al material que llena el molde; ya que el 50 % de la presión se consume en la compresión del material y en la fricción producida entre el material, el cilindro y el husillo. El valor de las pérdidas y el carácter de la distribución de la presión en el molde dependen de las cualidades del termoplástico, su temperatura, su estructura, además de las dimensiones del cilindro de inyección, de la configuración del artículo a moldear y de los bebederos.

El camino del flujo del material plástico desde la boquilla hasta la cavidad del molde se diseña, en general, como un sistema de canales de distribución y bebedero. El bebedero consta de un canal cónico situado en la parte media del molde (parte fija). En los moldes múltiples este canal se ramifica en canales de distribución que conducen a las diversas cavidades del molde, donde su misión es el garantizar que el flujo plástico del material permanezca con una viscosidad baja hasta que llega a la cavidad del molde, su sección es relativamente grande y terminan poco antes de llegar a la cavidad y están unidos a ella mediante los canales de estrangulamiento o de corte. Debido a la forma especial de los canales de distribución, en los moldes múltiples se habla de una red de llenado (denominada en la industria "araña").

El flujo del material llena la cavidad del molde, y empieza a solidificar al contacto con la superficie de la pared debido a la disipación térmica del material, con el cilindro plastificador. El centro de la masa del flujo, que permanece plástico durante un tiempo máximo, permite, mientras permanece con consistencia plástica, un flujo posterior del material sometido a una presión (presión de sostenimiento), para compensar contracciones de volumen que se presentan en el curso del proceso de solidificación.

A pesar de que en las máquinas de husillo se alcanza una gran homogeneidad de la masa, el campo térmico en la antecámara del cilindro resulta heterogéneo. Se observa una temperatura en la zona del canal de la boquilla y cerca de la punta del husillo, en la zona central la temperatura es mucho mayor, figura 3.3(a). La caída de la temperatura en el canal de la boquilla, se debe a las pérdidas de calor y la caída de presión en el extremo del husillo por la reducción del rozamiento al retroceder el husillo. Esta caída de presión estará en proporción directa a la carrera y longitud del mismo. Para

¹ Cantidad de material dentro del cilindro que no permite el regreso de material fundido al mismo

obtener artículos de máxima calidad es preciso que la temperatura y la viscosidad del material inyectado sean constantes.

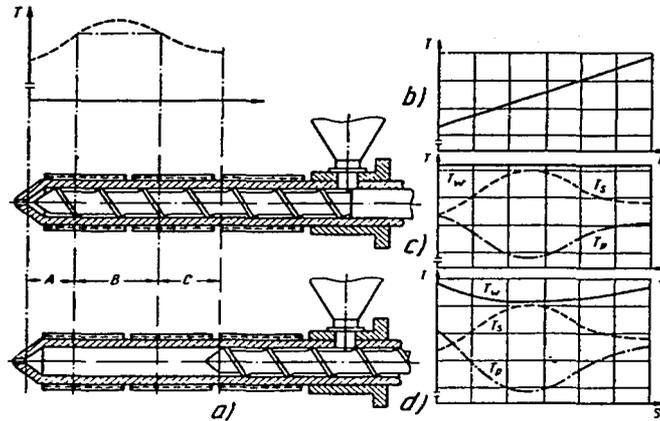


Figura 3.3 Relación entre la temperatura, la presión y la carrera del husillo: a) distribución de la temperatura a lo largo de la antecámara del cilindro; b) relación entre la temperatura y la presión; c) y d) relación entre la temperatura media del material, la presión y la carrera del husillo.

La temperatura de la masa depende de la presión desarrollada en los canales del husillo (fig. 3.3 (b)). En la figura 3.3 (c) y (d) se muestra la dependencia existente entre la temperatura media del material (T_w) y la presión en los canales del husillo y de su carrera (S); (T_s es la temperatura del material sometido a presión constante, T_p la temperatura al cambiar la presión de la masa al retroceder el husillo). La temperatura T_w se puede considerar como la suma de T_s y T_p .

Durante el funcionamiento de la máquina se puede elegir un régimen de transformación, que mantenga en la antecámara la temperatura T_w constante (véase la figura 3.3 (c)), o bien que en la zona central, sea ésta menor que en el canal de la boquilla y en la punta del husillo (fig. 3.3 (d)).

Para obtener artículos homogéneos deberá ser constante el control y la corrección de la presión y la velocidad de inyección. La intensidad del calor suministrado deberá estar correlacionada con la viscosidad de la masa en la antecámara.

La transformación en la consistencia de materias termoplásticas, desde el granulado hasta la masa plástica homogénea, con viscosidad estructural y lista para su procesamiento, tiene lugar en el cilindro plastificador de la unidad de inyección de la máquina.

La secuencia de disgregación del material de la masa de inyección recorre tres etapas distintas, cuyas transiciones no pueden delimitarse con nitidez a causa de las diversas longitudes de las cadenas macromoleculares. El material se encuentra en estado sólido cuando se suministra, que es cuando llega al cilindro de plastificación, posteriormente se empieza a alcanzar un estado plástico a la temperatura de reblandecimiento, el cual se caracteriza por una reducción de las fuerzas de cohesión intermoleculares, y por un descenso de resistencia del material debido a la disgregación de la estructura molecular. Al progresar la influencia térmica, se hace cada vez mayor la flexibilidad de los elementos

de unión intermoleculares, luego se hace posible un desplazamiento de la macromolécula. Aquí es donde el material ha alcanzado su estado de procesabilidad.

La plastificación empieza tras la entrada del granulado en la cámara interior del cilindro caliente, conjuntamente con una compresión que se produce por la influencia de la presión del tornillo plastificador (husillo), durante el movimiento de avance. Entonces una transmisión de calor sucede desde las resistencias hacia la parte internas del cilindro de plastificación que están en contacto con el material. En la zona de alimentación del material de inyección no se disponen elementos calefactores para impedir un reblandecimiento prematuro del granulado que podría influir en su posterior avance. En muchas máquinas, la unidad de inyección y el husillo están provistas de canales para circulación de agua de refrigeración, con objeto de disipar el calor transmitido.

Por otro lado, podemos observar que la mayor parte de todos los termoplásticos que se elaboran por el proceso de inyección posee una baja estabilidad a la temperatura, y la degradación molecular está ligada a la disgregación que produce una reducción de las propiedades mecánicas. Cuando el material se somete a un calentamiento muy fuerte o se expone durante un tiempo demasiado largo a la temperatura normal de trabajo, se provoca una degradación molecular en el material y las piezas inyectadas con éste muestran defectos. Debido a las malas propiedades de conductividad del material, existe siempre el peligro de un sobrecalentamiento de la capa expuesta directamente a las resistencias, mientras que las partes internas no han reblandecido aún. En máquinas con cilindro de plastificación horizontal, el ángulo presentado por el material fundido está condicionado por la caída de presión, como se muestra en la figura 3.4, y adicionalmente se provoca un flujo de material regular que se muestra con mayor intensidad en la parte inferior del cilindro.

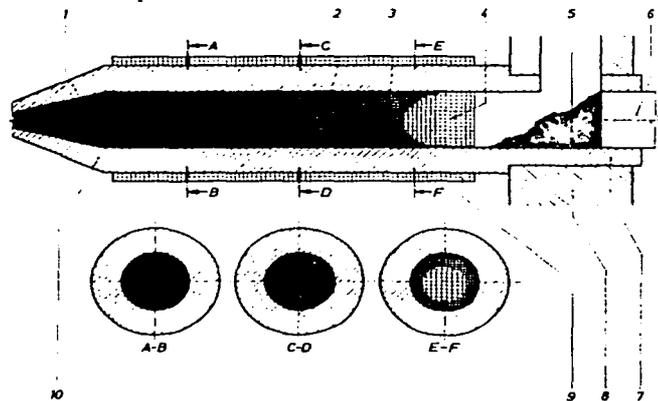


Figura 3.4 Esquema de la disgregación del material en el cilindro de plastificación de una máquina de inyección horizontal. Para una mayor claridad no se ha dibujado el elemento impulsor de la masa (husillo). En la representación de diversas zonas de influencia de temperatura se considera el flujo más intenso de la parte inferior del cilindro, debido al ángulo de talud del material dosificado. (1) material en estado termoplástico. (2) material notablemente disgregado. (3) material en estado plástico. (4) tapón de material sólido. (5) granulado dosificado. (6) parte posterior del husillo. (7) Extremo de fijación del cilindro. (8) placa transversal. (9) elemento calefactor. (10) cilindro de plastificación.

Con la disposición de varios elementos calefactores de control independiente sobre la superficie externa del cilindro de plastificación, existe la posibilidad de influir en la disgregación del material dentro de las diversas zonas de calefacción, y dado que en los primeros pasos del proceso se comprime el material a través del cilindro hasta lograr un reblandecimiento uniforme en todas las capas de

material, se logra también una disgregación homogénea de la masa. Un dispositivo impulsor de la masa, que está configurado de acuerdo con puntos de vista hidrodinámicos (forma del husillo), se encargó de la tarea de comprimir uniformemente la masa de inyección hacia la pared del cilindro, forzándola a formar capas finas, que pueden disgregarse mejor térmicamente.

3.2 PARÁMETROS DE ARRANQUE EN EL PROCESO DE INYECCIÓN DEL POLIPROPILENO.

El polipropileno tiene excelente balance de propiedades y procesabilidad, así que se adapta perfectamente a todos los tipos de máquinas de moldeo por inyección. Polímeros con amplio intervalo de condiciones de moldeo, buen flujo y buenas características de soldadura en estado fundido, se moldean en forma práctica y reproducible bajo tolerancias estrechas, mediante el cuidadoso control de temperaturas, presiones de cierre y velocidades de inyección. El polipropileno se puede procesar en máquinas comunes de pistón, las de pistón con preplastificador y las de tornillo recíprocante (husillo), bajo las indicaciones en los parámetros antes mencionados.

El tamaño de la carga en la zona de plastificación se estima en cm^3 y se compara con la capacidad nominal de la máquina. Las cargas del polipropileno (y de poliolefinas) corresponden aproximadamente a 75 % de la capacidad de inyección de la máquina, la cual se expresa siempre en términos del polietileno. Al aproximarse la carga al valor límite, la temperatura del cilindro debe aumentar, para que pueda lograrse la plastificación del material, además de que deberá ser mayor la velocidad de inyección, para poder lograr un buen llenado de las cavidades del molde.

Para una máquina de tornillo recíprocante se puede iniciar su operación en las condiciones abajo mencionadas:

- Temperatura del cilindro, 200 hasta alcanzar 260 °C.
- Temperatura del molde y la del ambiente, para este material se necesita mantener una temperatura constante entre 8° C y 14 °C.
- Presión de inyección, 60 % de la disponible.
- Velocidad de inyección baja, aproximadamente de 60 mm/s.

Aunque, el ciclo de moldeo es un factor importante en la determinación de las condiciones de procesamiento, no es posible definirlo con las condiciones de arranque, ya que depende también del diseño de la pieza, sus dimensiones y otros factores.

Independientemente de la máquina que se use, el objetivo debe ser alcanzar la temperatura máxima de 260°C en la mezcla fundida. Los incrementos posteriores en la temperatura del cilindro usualmente no se hacen para tener mayor temperatura en la mezcla fundida, sino principalmente para compensar el aumento en el flujo del material que se requiere para una velocidad mayor de producción.

La temperatura de arranque en el molde es normalmente la ambiental, lo cual asegura el llenado del molde, pero para lograr un proceso óptimo de producción, es necesario tener enfriamientos en el molde por debajo de dicha temperatura.

3.2.1 PARÁMETROS QUE REGULAN LA CALIDAD DE PIEZAS INYECTADAS.

Las máquinas de inyección actuales están dotadas con herramientas eficaces para analizar y llevar un control estadístico del proceso, con lo cual se puede tener parámetros controlados que influyan en la calidad de las piezas inyectadas. Así, el operario dispone de medios para realizar el control de la producción, elaborando evaluaciones estadísticas o detectando tendencias para anticiparse a ellas, además de poder aprovechar estas herramientas de forma eficaz, el operario tiene que saber en que medida influyen los distintos parámetros de máquina y proceso en la calidad de la pieza inyectada, aunque la importancia de estos parámetros, tal como lo enseña la práctica difieren de una aplicación a otra.

Así, los parámetros principales que puede controlar el operario encargado de una máquina de inyección son: Temperatura de cilindro y de la masa, Temperatura del molde, Presión de inyección, Presión de Sostenimiento, Velocidad de inyección, Tiempo de presión posterior, Revoluciones del husillo, Contrapresión, Descompresión, Temperatura de la zona de alimentación del cilindro, Tiempo de enfriamiento y Tiempo de ciclo; mientras tanto existen otras variables que se encuentran determinadas y no influyen directamente sobre el proceso, tales como: tiempo de permanencia del husillo en posición adelantada, tiempo de dosificación, tiempo durante el cual permanece cerrado el molde, tiempo durante el cual el molde permanece abierto y fuerza de cierre del molde.

Durante la inyección y después de la dosificación, que es cuando el husillo gira hacia atrás para llenar la parte anterior del cilindro para su fusión, el husillo realiza un movimiento de avance, sin girar, a través del cilindro actuando como un pistón y empujando al material ya fundido, desde la cámara de inyección hacia el molde, a una **velocidad de inyección**, para posteriormente pasar a través de la boquilla. La duración de esta operación se conoce como **tiempo de inyección**, se observa como la **presión de inyección** se incrementa gradualmente hasta una "presión máxima" (determinada según el tipo del molde y las características del material a inyectar), después de lo cual se presenta un decremento en la misma hasta alcanzar una presión, ahora llamada "**presión de sostenimiento o presión posterior**" y que permanece constante hasta finalizar el ciclo de inyección por un tiempo determinado al cual se le denomina *Tiempo de sostenimiento o de presión posterior* este compensará la contracción del volumen causada por el enfriamiento del material en la cavidad, un fenómeno característico provocado por la deficiencia del también llamado tiempo de remanencia será la formación de *vacuolos*, ("burbujas" en la pieza causadas por la contracción del material de adentro hacia afuera). Al instante que corresponde al paso de la presión máxima a la presión de sostenimiento se le denomina: *punto de corte*, el cual tiene como efecto el terminar de llenar el molde, para que no exista la posibilidad de que no se llene en su totalidad la pieza.

El tiempo de sostenimiento tiene relevancia hasta que el enfriamiento del punto de inyección se complete, después del cual el tiempo de sostenimiento se vuelve innecesario; al momento en que se presenta la acción antes descrita se le denomina *punto de bloqueo*. Algunos problemas debidos a un deficiente tiempo de sostenimiento serán:

| TIEMPO DE SOSTENIMIENTO DEMASIADO LARGO | TIEMPO DE SOSTENIMIENTO DEMASIADO CORTO |
|--|--|
| El tiempo restante no es suficiente para la solidificación | Oscilación en el peso de la pieza |
| | Medidas más pequeñas |
| | Zonas de rechupes e inclusiones de aire |
| Mayor consumo de energía | Reflujo de la masa del cilindro |

El desarrollo del proceso en relación a las fases del ciclo de inyección y la calidad de la pieza se muestra en la figura 3.5, mediante la curva de presión en el molde de la máquina.

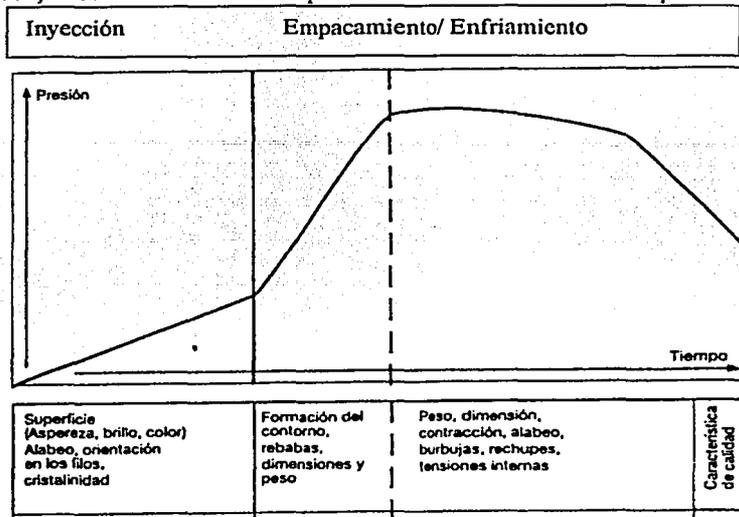


Figura 3.5 Relación entre la calidad y las fases del proceso de inyección, mediante una curva de presión en el molde de la máquina.

3.2.2. AJUSTE DE LA MÁQUINA PARA OBTENER EL LLENADO ADECUADO DEL MOLDE.

Al hacer ajustes en la máquina, es muy importante dar tiempo suficiente para que los cambios tengan efecto, esto es dependiendo del tipo de equipo, materia prima, moldes y tipo de producción que se desea alcanzar para que la máquina utilizada no presente algún problema en su funcionamiento.

La inyección de una **carga completa** (cantidad de material inyectado por disparo) se puede conseguir operando con un pequeño colchón de material ó cojín de masa, que hace referencia al material "remanente o sobrante" existente al momento de inyectar y representa un indicador de que el volumen del material frente al husillo permanece constante; así si el cojín de masa no varía, el proceso general será constante y controlado, además, de impedir la entrada de aire al momento de llevar a cabo la inyección del material.

El cojín de masa en la máquina de inyección debe representar entre un 3 y un 8% del volumen total de la carga, (esto para máquinas con diámetro de cilindros entre 14 y 100mm); sin sobrepasar el 25% del volumen total, debido a que una mayor cantidad de volumen provocará un incremento en la presión de inyección y por consiguiente, un mayor consumo de energía.

Existen factores como la contrapresión, que deben tomarse en cuenta, ya que ésta al modificar el volumen de plastificación refleja cambios en el cojín de masa.

El cojín de masa nos prevee la aparición de pequeñas imperfecciones en la pieza inyectada, como burbujas o rechupes al final del golpe del pistón. Se debe evitar que se acumule un colchón demasiado grande de material en inyecciones posteriores, debido a la degradación del propio material.

Suponiendo que se dispone de suficiente material para la alimentación, todavía se pueden producir cargas cortas durante el arranque.

Durante la etapa de ajuste, el llenado del molde se lleva a cabo paulatinamente, de tal forma que en sus últimas etapas, se aumente gradualmente la presión de inyección hasta obtener la carga completa.

Las causas posibles de cargas cortas del procesamiento incluyen: capacidad insuficiente de calentamiento del cilindro, alimentación insuficiente, tiempo de inyección, presión de inyección, temperatura de la masa demasiado baja, una restricción en el flujo originada por diámetro demasiado pequeño, desbalanceo en el molde con cavidad múltiple, y si se tuviesen problemas de moldeo, entonces se deberá a la influencia de la boquilla o los puntos de inyección, o una temperatura del molde demasiado baja.

Suponiendo que ya se ha fijado la presión máxima de cierre del molde, el primer paso debe ser reducir la presión de inyección en rangos pequeños en cada intento, para que no haya variaciones bruscas en el proceso. Esto generalmente es efectivo a las temperaturas de arranque. Además, de que es posible que en la primera carga de inyección no se llene el molde por completo, por lo que se puede aumentar la temperatura del cilindro en incrementos de 10 a 20 °C, antes de intentar otros cambios en el proceso. No debe aumentar excesivamente la temperatura, ya que la exposición prolongada del material a temperaturas mayores de 300 °C conduce a la degradación del polímero. A veces, una carga corta se debe a enfriamiento inadecuado del molde. Se podría corregir con una reducción en la presión de cierre, pero si hay fuga de material, es necesario mejorar el enfriamiento antes de poder continuar el proceso.

A temperaturas mayores, es preferible reducir gradualmente la temperatura del cilindro 6 a 12°C hasta lograr el llenado correcto del molde o bajar las temperaturas de arranque. Si persiste la dificultad, entonces el último recurso sería reducir la presión de inyección.

Por otro lado, si se observa material fuera de las cavidades, las causas posibles de fugas son: presión de cierre demasiado baja; temperatura del material demasiado alta; material extraño en las superficies de contacto del molde o presión de inyección demasiado alta.

Ante el problema de los **rechupes ó depresiones superficiales**, la mejor estrategia inicial es reducir la temperatura del molde en decrementos pequeños, cada vez, siendo el límite mínimo de temperatura el punto en que el llenado del molde ya no se complete.

Si los rechupes persisten, entonces se debe aumentar el tiempo de inyección. Además, si el contenido del canal de alimentación no se ha solidificado cuando el pistón se retira, algo de material será extraído del molde, produciendo rechupes en la pieza.

Una manera empírica de evitar rechupes consiste en sacar las piezas y enfriarlas rápidamente en agua. Esta técnica es muy útil cuando persisten los rechupes a pesar de reducir la temperatura del molde. Aunque al incrementar la presión se eliminarían los rechupes, habría problemas muy graves de tensiones internas en las piezas.

Las causas posibles de rechupes son: molde a temperatura muy alta, tiempo o presión insuficiente de inyección, mal diseño de la pieza, secciones no uniformes o paredes muy gruesas, punto de inyección mal colocado, enfriamiento lento de las piezas.

En las máquinas de inyección de husillo, la **plastificación** del material se puede mejorar variando la temperatura de la masa, la velocidad del tornillo o la presión de retroceso. Al aumentar la temperatura, la mezcla fundida se vuelve más fluida y se facilita la mezcla a una velocidad mayor del tornillo. Al aumentar la velocidad de inyección, se obtiene una mejor mezcla manteniendo las demás variables constantes; sin embargo, el efecto de una mayor velocidad implica mayor trabajo por parte del husillo al interactuar con la mezcla y una temperatura mayor debido a la acción cizallante del tornillo. Si los parámetros establecidos, ya son constantes, al aumentar la contrapresión, se retrasa el flujo en el cilindro y aumenta el tiempo de residencia en la sección de plastificación. Esto, también produce mejor mezcla y dispersión. La rugosidad en la superficie de las piezas, usualmente se debe a exceso de humedad, aunque también pueden contribuir las impurezas y las temperaturas demasiado altas en el material.

Las causas posibles de marcas de flujo, línea de soldadura, falta de brillo, mala distribución de pigmentos o superficie rugosa, incluyen: temperatura del material demasiado baja, llenado muy rápido del molde, humedad excesiva, mala dispersión de pigmentos, cavidad del molde sucia o rayada, exceso de lubricante en el molde, punto de inyección mal diseñado o mal colocado, ventilación inadecuada, presión de inyección demasiado baja.

Para minimizar la posibilidad de tensiones internas que contribuyen a la **fragilidad** de las piezas moldeadas, se recomienda aumentar gradualmente la temperatura del cilindro, sin llegar a degradar al material.

También se puede aumentar la temperatura del molde en incrementos pequeños, para facilitar el llenado del molde minimizando las tensiones internas en la pieza.

Para encontrar las condiciones óptimas de operación se deben hacer pruebas físicas a las piezas obtenidas a varios niveles de temperatura en los moldes y cilindros. Cuando sea posible, las pruebas físicas se deben hacer no menos de 24 horas después de moldear las piezas. Después de 24 horas, los resultados pueden diferir considerablemente de los obtenidos inmediatamente después del moldeado, debido al problema de las contracciones.

Las causas posibles de la fragilidad incluyen: material degradado en el cilindro, temperatura demasiado baja del material o del molde, uso de concentrados hechos con otra resina, contaminaciones, diseño inadecuado de la pieza.

La **distorsión** en los perfiles de la pieza es un problema grave, especialmente cuando las piezas tienen formas complicadas. La causa de las deformaciones, por lo general, es el mal diseño de las partes cuyo análisis debería ser el primer paso hacia la solución del problema. Las consideraciones de un buen diseño en el molde son: paredes de sección uniforme, esquinas redondeadas y flujo suave del material. Puesto que la distorsión es principalmente el resultado de las tensiones internas, se debe reducir la presión de inyección si no se puede modificar significativamente el diseño de la pieza. Una forma de evitar la distorsión total de la pieza, es variar la temperatura del molde en la sección de la cavidad (y no en el corazón del molde). El enfriamiento desigual es una causa frecuente de tensiones

internas por lo que se recomienda aumentar el tiempo de presión posterior para llenar más rápido el molde y lograr también mayor enfriamiento en el punto de inyección. También se puede aumentar la temperatura del cilindro, con su consecuente disminución en la presión.

El tener una **calidad irregular** en las piezas moldeadas, generalmente se atribuye al funcionamiento de la máquina o a su capacidad. Sin embargo, los cilindros con insuficiencias en volumen o en capacidad de calentamiento, producen mezclas que no tienen uniformidad de una carga a otra y eso origina las irregularidades en la calidad, cuyas causas son: insuficiencia de volumen dentro del cilindro y su calentamiento, ciclos no uniformes, variaciones en la temperatura de la mezcla, funcionamiento errático del equipo, sistema desbalanceado de bebederos o cavidades múltiples.

La duración mínima del ciclo para optimizar la producción se determina estudiando el orden en que ocurre cada componente de tiempo, es decir, la reducción del tiempo de inyección, la determinación del tiempo de sostenimiento de la presión, la reducción mínima del tiempo de enfriamiento y del tiempo de la extracción de la pieza.

La mayoría de los proveedores de resinas proporciona a través de su servicio técnico, procedimientos para la optimización y la detección de fallas, en piezas así como recomendaciones detalladas para el diseño de piezas y moldes con énfasis en sistemas computarizados.

3.3 LA MÁQUINA DE MOLDEO POR INYECCIÓN.

Las máquinas de moldeo por inyección para plásticos, son esencialmente una derivación de las máquinas de fundición a presión para metales. El primer ejemplar se desarrolla y termina en Estados Unidos en 1870, siendo esta la primera máquina para producción de piezas de materiales termoplásticos. Posteriormente y similar en su proceso, se construyó en Alemania en 1920 una máquina totalmente manual; tanto el cierre del molde como la inyección lo efectuaba el operador mediante mecanismos de leva.

Nuevamente en Alemania, en 1927, se desarrolló una máquina para materiales plásticos accionada por cilindros neumáticos, pero inmediatamente se presentó la necesidad de máquinas que manejaran presiones específicas superiores a las que en ese momento estaban disponibles.

Ya en 1947 aparecen en Italia las primeras máquinas por inyección hidráulicas autónomas, que realmente eran equipos que no requerían sistemas hidráulicos muy costosos o complicados para su operación. Dada su simplicidad constructiva se podían instalar en lugares pequeños. Desde entonces el desarrollo del proceso de inyección fue evolucionando necesariamente por el desarrollo de materias termoplásticas y fue acompañado desde sus primeros tiempos, por la exigencia de adaptar la técnica a las particularidades de elaboración de los nuevos plásticos que aparecían en el mercado. En el curso de este desarrollo se mostraron muy pronto los primeros signos de particularidades que caracteriza hasta el presente la problemática ligada al procedimiento de inyección. En la actualidad existen equipos totalmente automáticos, es decir, que no requieren intervención del operador, lo que facilita poder solventar ciertos problemas durante el proceso de inyección. En la figura 3.6 se muestra el esquema típico de las partes que componen a una máquina de inyección.

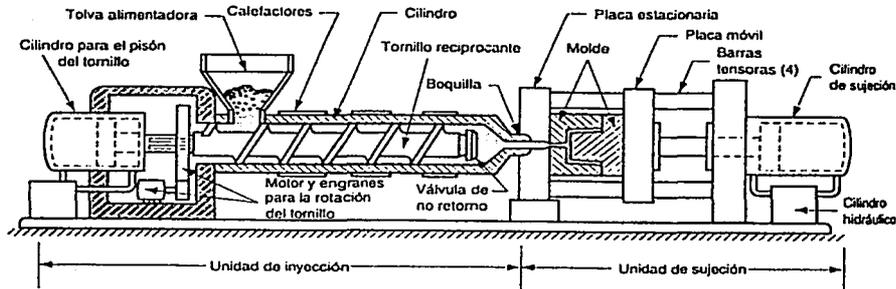


Figura 3.6 Diagrama de una máquina de moldeo por inyección con husillo (tornillo sin fin).

3.3.1 ESTRUCTURA Y DESCRIPCIÓN DE LA MÁQUINA DE INYECCIÓN DE PLÁSTICOS DEMAG ERGOTECH PRO EE50/270.

A continuación, se hará una breve descripción de la máquina con la que se cuenta en los talleres de Ingeniería Mecánica de la Facultad de Ingeniería, UNAM, debido a que el desarrollo experimental se llevó a cabo en ella.

La máquina de inyección DEMAG ERGotech pro EE50/270 esta compuesta por la unidad de cierre, unidad de inyección, el sistema de accionamiento y control. En la figura 3.7 y 3.8 se muestra la descripción esquemática de cómo esta estructurada la máquina de inyección, por ambos lados en vistas posterior y vista del operario.

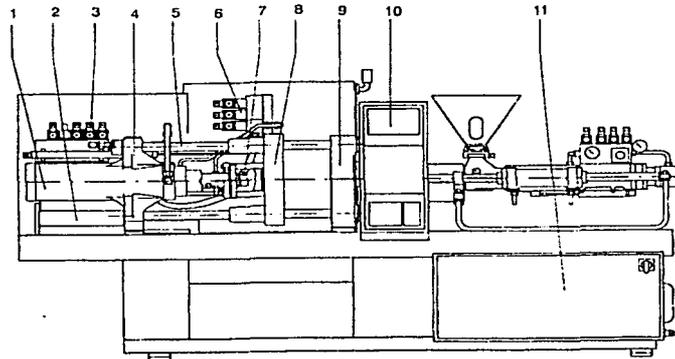


Figura 3.7 Unidad de cierre y control, vista del operario. 1. Cilindro de cierre. 2. Multiplicador de caudal. 3. Bloque hidráulico del sistema de cierre, 4. Placa final, 5. Columna, 6. Bloque hidráulico del botador y de las válvulas, 7. Botador, 8. Placa porta-moldes móvil (platina móvil), 9. Placa porta-moldes fija (platina fija), 10. IBED (tablero de control), 11. Armario de control (control y conexiones eléctricas).

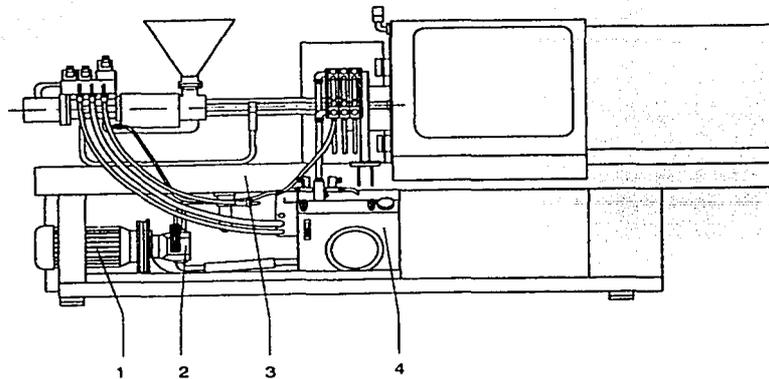


Figura 3.8 Unidad de cierre y control, vista posterior. 1. Motor de accionamiento de bomba, 2. Bomba de regulación, 3. Bancada, 4. Depósito de aceite

En las figuras anteriores se muestra la posición de la unidad de inyección, la cual se encuentra sobre la bancada, en la figura 3.9 se muestra como esta estructurada la unidad de inyección modelo EE270 para esta máquina de inyección.

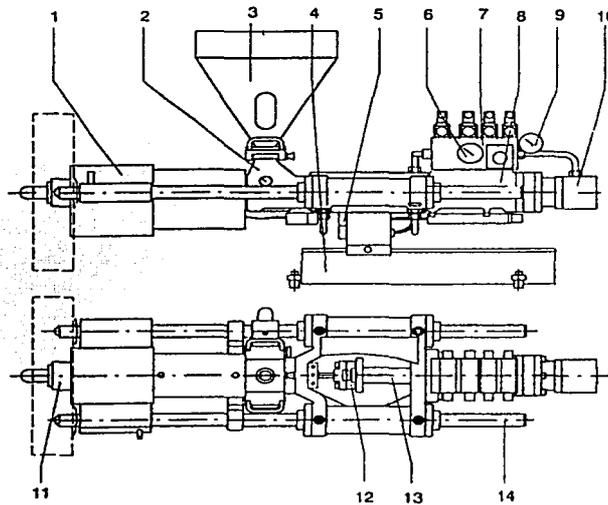


Figura 3.9 Unidad de inyección EE 270. 1. Protección de boquilla, 2. Unidad de desplazamiento, 3. Tolva de material, 4. Soporte, 5. Conector para resistencia y termopar, 6. Manómetro presión de bomba, 7. Bloque hidráulico, 8. Cilindro de inyección, 9. Manómetro de contrapresión, 10. Accionamiento y cojinetes, 11. Unidad de plastificación, 12. Embrague, 13. Pistón de inyección, 14. Columna - guía

Otra parte importante de la unidad de inyección y que forma parte del cilindro de inyección, es el cilindro plastificador ó cañón, en la figura 3.10 se muestra la distribución de las diferentes partes que lo componen.

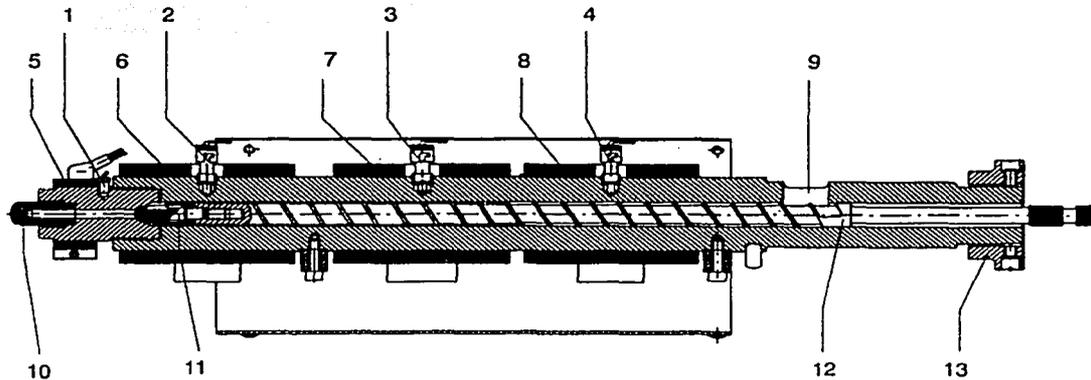


Figura 3.10 Cilindro plastificador EE 270. 1. Termopar - Zona de regulación DH, 2. Termopar - Zona de regulación MH3, 3. Termopar - Zona de regulación MH2, 4. Termopar - Zona de regulación MHT1, 5. Resistencia de boquilla - Zona de regulación DH, 6. Resistencia de cámara - Zona de regulación MH3, 7. Resistencia de cámara - Zona de regulación MH2, 8. Resistencia de cámara - Zona de regulación MH1, 9. Abertura para alimentación de material, 10. Boquilla abierta, 11. Válvula antirretorno, 12. Husillo, 13. Tuerca de fijación para el cilindro de plastificación

El sistema de enfriamiento se encuentra definido en la figura 3.11. En lo referente al agua de refrigeración se debe tener precaución cuando se toma agua proveniente de la red de agua potable, donde el usuario se compromete a no mandar de regreso esta agua de refrigeración de nuevo a la red. La presión del agua de enfriamiento es de aproximadamente de 7 a 8 bares a una temperatura constante de 15 °C, en la figura se muestra como esta formado el caudalímetro que es el que se encarga de distribuir el agua de enfriamiento hacia el molde.

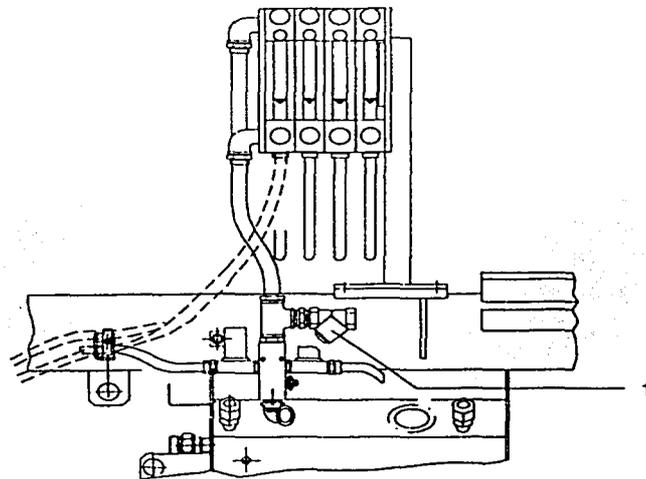


Figura 3.11 Sistema de enfriamiento, con el esquema del caudalímetro (enfriamiento del molde) y filtro de agua con entrada de agua de refrigeración (1).

El filtro del agua (1) para el aporte de agua de refrigeración debe evitar la entrada de impurezas en el sistema de refrigeración de la máquina (interferencias en el cuadro de mandos, por ejemplo, válvulas electromagnéticas). Este filtro se encuentra colindante a la conexión principal de entrada del agua de refrigeración. El elemento de filtrado se monta con dirección de flujo horizontal en el sistema de refrigeración. De esta manera se pueden depositar las impurezas en la cámara de filtrado diseñada a este efecto. El filtro tiene una malla de 0,25 mm. Los períodos de limpieza del cartucho filtrante dependen del ensuciamiento del agua refrigerante.

La máquina de inyección DEMAG ERGOtech pro 50-270 se controla automáticamente mediante un dispositivo digital, colocado a un lado de la unidad de inyección, llamado terminal de mando (IBED) figura 3.12.

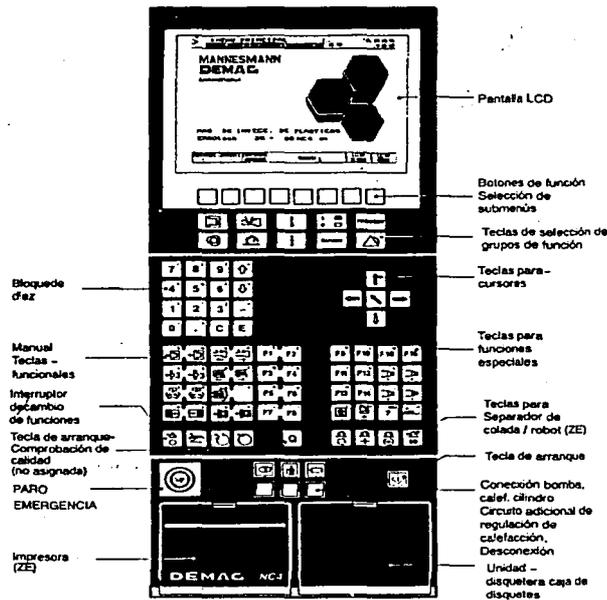


Figura 3.12 Terminal de mando (IBED)

Para controlar los parámetros de inyección hay que elegir las diferentes pantallas que se encuentran en el software de la terminal de mando. El IBED funciona por comandos accionados por botones para la elección de las pantallas de los grupos de función (submenús) y los diferentes grupos de función (proceso, molde, cilindro, entre otros) que se reflejan en una pantalla, como se muestra en la figura 3.12. La presentación de las pantallas se divide en tres partes: la información de la cabecera, los parámetros de máquina para su manejo y supervisión, y los botones de submenús.

Para realizar el proceso de inyección de las piezas hay que establecer los parámetros necesarios utilizando las diferentes pantallas y seleccionando el grupo de función respectivo. De este modo, al encender la máquina aparece en el visor de la terminal de mando la pantalla IBED "(0)Menú

principal”, figura 3.12, donde se presenta la máquina a utilizar y las opciones de imagen de la misma. Posteriormente se selecciona el grupo de función de la pantalla IBED num.83 “Configuración IBED”, en donde se puede estandarizar las unidades y algunas características de presentación de la pantalla, impresora, periférico y resultados de posibles fallas durante el proceso, como se muestra en la figura 3.13.

ERGLech MC4 78440058 14/06/02 - 10:41:00

83 CONFIGURACION IBED 12.78 UI 14.06.02 10:41:00

ACTUAR "CLICK"
 CONF. REARMA AUTOMAT.
 PROTOCOLO DE CAMBIO

IMPRESORA TIPO RAZON CAMBIO

PARALELO INT EPSON FX
 PARALELO EXT HP-LASER
 COMA ROM/ROFF
 COMA ROM/BUST
 LONGITUD DE PAGINA LINEAS

ARC-10

| | COM2 | COM3 | COM4 |
|-------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 19200 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 9600 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 4800 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 2400 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| 1200 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

MEDIOS
 mm CONDENSAS
 (mm/s) U-SPR
 °C TEMPERATURAS
 (mm/s) OTRAS HUS.
 (mm) VOL/C. DE HUS
 bar PRESION
 p.p.p.p. PRESION

Stoppbits: 1 2 1 2 1 2
 PARADIDINDO
 IMPAR
 PAR

UI 14.06.02 10:41:00

ATMS DATOS IMPRIMIR CLAVE MANTENIM. PROTOCOLO DE CAMBIO

Figura 3.13 Pantalla IBED número 83 para la “Configuración del IBED”

Una vez hecho lo anterior, se dispone a establecer las condiciones para el molde, variando la velocidad de arranque, la de carrera y la final para su apertura y cierre, respecto a un porcentaje de un valor ya prescrito por la máquina; a determinadas distancias propuestas por el operador, pantalla IBED número 10 “Molde”, figura 3.14. De igual modo, el operador propone la fuerza de protección y de cierre de éste, ya que se utilizan para evitar que se abra por una sobrepresión de la masa plástica y para mover el molde por efecto de su peso, respectivamente. Así también, la velocidad y distancias de recorrido del expulsor también se pueden controlar como se ve en la pantalla del expulsor, figura 3.15.

ERGLech MC4 78440058 14/06/02 - 10:50:03

10 MOLDE 0.00 UI 14.06.02 10:50:03

| | DEBE | DEBE | ES |
|--------------------------|----------|----------------------------|----------|
| ABRIR MOLDE | -U1 35 X | START -V2 200.0 mm | |
| ABRIR MOLDE | -V2 75 X | START -U3 200.0 mm | |
| ABRIR MOLDE | -U3 65 X | STOP 250.0 mm | 291.6 mm |
| CERRAR MOLDE | -U1 65 X | START -V2 200.0 mm | |
| CERRAR MOLDE | -V2 40 X | START -U3 100.0 mm | |
| CERRAR MOLDE | -U3 35 X | STOP | |
| FUERZA PROTECCION MOLDE | 15.0 MPa | START 129.9 mm | |
| FINAL PROTECCION MOLDE | | STOP 0.4 mm | |
| PROTECCION MOLDE/REPETIR | 2.00 s | <input type="checkbox"/> 3 | 0.00 s |
| FUERZA DE CIERRE | 500 MPa | START 0.1 mm | |
| ACTUAR ESPESOR MOLDE | | <input type="checkbox"/> | 294.1 mm |
| PUESTA A PUNTO | U | P | |

EXPULSOR MOVES VALORES OPERAL DE INYECT. (C. INYECTADO)

Figura 3.14 Pantalla IBED número 10 para establecer las condiciones del “MOLDE.”.

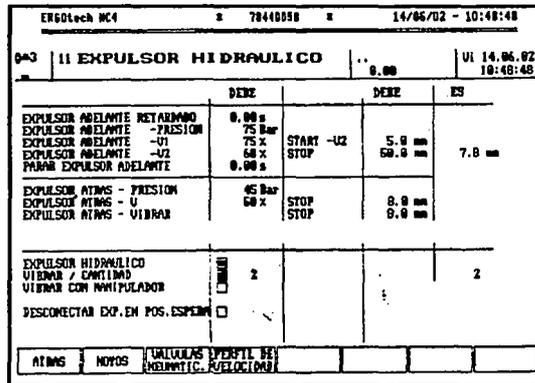


Figura 3.15 Pantalla IBED número 11 para establecer las condiciones del "EXPULSOR".

Para regular el calentamiento del cilindro, la máquina realiza una auto-optimización de las temperaturas. Esta optimización requiere de la introducción de temperaturas en las diferentes zonas de calentamiento, de al menos 30°C por encima de las temperaturas reales. De este modo, la máquina de inyección ajusta las temperaturas para cada área de calefacción hacia el valor prescrito por el operador, obteniendo una temperatura real con tolerancias predeterminadas. Los valores predeterminados y reales para cada área de calefacción en el cilindro se indican con barras como lo indica la pantalla IBED número 30 "Temperaturas", figura 3.16. La temperatura del aceite de la máquina esta prescrita, por lo que el operador no propone ningún valor.

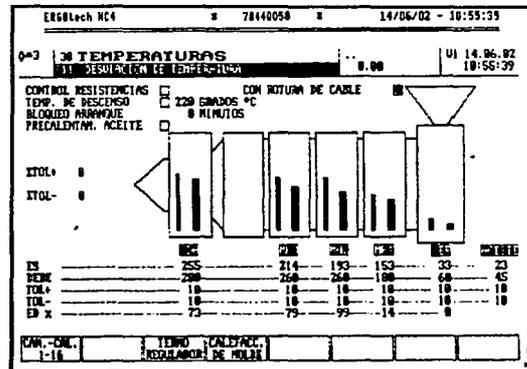


Figura 3.16 Pantalla IBED número 30 para establecer las condiciones de "TEMPERATURAS" dentro del cilindro.

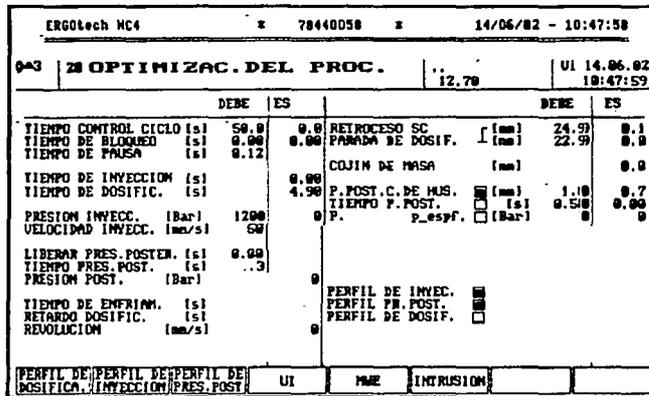
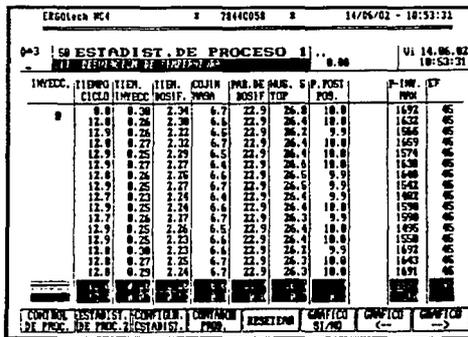
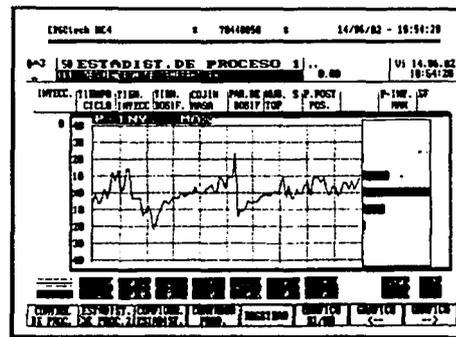


Figura 3.17 Pantalla IBED número 20 "Optimización del proceso" para establecer los parámetros del proceso.

La pantalla IBED número 20 "Optimización del proceso", figura 3.17, es de las más importantes, ya que contiene los parámetros del proceso más relevantes para la inyección del polímero. Para la dosificación se maneja el tiempo que tarda en completarse el ciclo, dependiendo de la cantidad de material y revoluciones del husillo; existiendo un tiempo de retardo para piezas que necesitan tiempos de remanencia y enfriamiento muy largos, así como una parada de dosificación donde el husillo recorre la distancia necesaria para el llenado del mismo. Existe un retroceso del husillo, una vez que se completa la dosificación, con el fin de evitar goteo del material, eliminando variaciones en el cojín de masa. Para la inyección del material intervienen su presión y velocidad, siendo parámetros fundamentales junto con la cantidad de material y de la velocidad del husillo en el tiempo de inyección. El cojín de masa es una distancia que recorre el husillo para conservar una cantidad de material en la boquilla, evitando la entrada de aire dentro del cilindro. La presión posterior se utiliza para comprimir el material (empaquetamiento), bajo un cierto tiempo. De este modo, la posición posterior del husillo (distancia que recorre el husillo durante la cual se aplica la presión posterior) influye en el tiempo de presión posterior y en la conmutación. El tiempo de enfriamiento inicia al final del sostenimiento (presión posterior). Esta pantalla da la opción de activar los perfiles de inyección, de presión posterior y de dosificación, para observar su comportamiento.



(a)



(b)

Figura 3.18 Pantalla IBED número 50 "Estadística de proceso" para observar el desarrollo del proceso de inyección. a) parámetros del proceso de inyección b) Gráfica estadística de la presión de inyección

Después de haber establecido los parámetros de inyección y haber llevado a cabo el proceso, se puede observar el comportamiento de los mismos con la ayuda de la pantalla IBED número 50 “Estadística de proceso”, figura 3.18 (a), donde se muestran los valores registrados por la máquina para cada inyección realizada, tales como el tiempo de ciclo, de inyección y de dosificación, el cojín de masa, la parada de dosificación y del husillo, posición posterior del husillo y la presión de inyección máxima. Si se quiere observar gráficamente el proceso de inyección en términos de la presión de inyección, o cualquier parámetro presente en la pantalla IBED número 50 (a), se selecciona en la zona de submenús la opción de gráficos, como se muestra en la figura 3.18 (b); donde se observa una desviación para cada inyección, aún manteniendo los parámetros constantes, esto nos ayuda a ver el momento en el cual el proceso ya se ha estabilizado una vez puesta en marcha la máquina.

| ERGOtech NC4 | | 78440050 | 14/06/02 - 10:58:28 |
|---|------------------|----------------|-------------------------|
| 043 | 2 ALARMAS | 0.00 | Ul 14.06.02 10:58:28 |
| III RESERVAION DE TEMPERATURA | | | |
| NOMBRE DE LA ALARMA | | ON | OFF |
| DESCRIPCION DE TEMPERATURAS | | | |
| FIN. DE CAR. 2-S1.2-S2 D. PUE. D. PROT. DEFECT. | 14/06-10:36 | 14/06-10:36 | 19 |
| PARO DE EMERGENCIA ACTUADO | 27/05-15:04 | 14/06-10:36 | 04 |
| CALEFACCION DE CILINDRO DESCONECTADA | 27/05-15:04 | 14/06-10:36 | 24 |
| BOMBA NO MARCHA | 27/05-15:04 | 14/06-10:36 | 25 |
| PUERTA DE PROTECCION ABIERTA | 27/05-15:03 | 27/05-15:03 | 15 |
| REJILLA DE BOQUILLA NO CERRADA | 27/05-15:00 | 27/05-15:00 | 12 |
| CALEFACCION DE CILINDRO DESCONECTADA | 27/05-14:56 | 27/05-14:57 | 24 |
| DESCENSO DE TEMPERATURAS ACTUADO | 27/05-14:56 | 27/05-14:56 | 19 |
| BOMBA NO MARCHA | 27/05-14:56 | 27/05-14:57 | 25 |
| PRODUCCION ALCANZADA | 27/05-14:56 | 27/05-14:57 | 00 |
| TIEMPO DE SEGURO DE MOLDE ACTUADO | 27/05-14:30 | 27/05-14:35 | 04 |
| TIEMPO DE SEGURO DE MOLDE ACTUADO | 27/05-14:30 | 27/05-14:30 | 04 |
| TIEMPO DE SEGURO DE MOLDE ACTUADO | 27/05-14:24 | 27/05-14:30 | 04 |
| PLASTIFICACION NO CONCLUIDA | 27/05-14:12 | 27/05-14:12 | 41 |
| HUSILLO ATRAS NO ALCANZADO | 27/06-14:12 | 27/05-14:12 | 30 |
| SALIR | | | |
| | | PULSAR ALARMAS | QUITAR ALARMAS |

Figura 3.19 Pantalla IBED número 2 “Alarmas” para establecer las alertas durante el proceso de inyección establecido.

Durante el proceso de inyección, la máquina puede registrar cambios considerables en los parámetros o en las condiciones establecidas diferentes a las propuestas por el operador, por lo que cuando existe una desviación más grande a la planteada se activa una alerta en la parte superior central de la pantalla, con fondo negro, que nos indica lo que esta sucediendo, pantalla IBED número 2 “Alarmas”, figura 3.19. Esta tolerancia es propuesta por el usuario, tal como una desviación de temperatura, producción no alcanzada, entre otras; por lo que estas condiciones que sobrepasan a lo estimado, que provocan la interrupción de la inyección, tienen que revisarse y corregirse para continuar con el proceso y seguir optimizándolo.

En la tabla 3.1 se muestran todos los parámetros de funcionamiento y características de la máquina de inyección ERGOtech pro EE50/270. Estos datos son obtenidos del manual de operación de la máquina.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

| MAQUINA DE INYECCIÓN MODELO "ERGOtech pro 50-270" | | |
|--|-----------------|--------------------|
| Medidas internacionales | | 500 – 700 |
| Unidad de Cierre | | 500 |
| Fuerza de cierre | kN | 500 |
| Carrera máxima de apertura | mm | 400 |
| Altura mínima de molde | mm | 210 |
| Distancia máxima entre platos portamoldes | mm | 610 |
| Platos portamoldes | mm | 540 x 540 |
| Distancia útil entre columnas | mm | 355 x 355 |
| Peso máximo de molde | kg | 400 |
| Expulsor Hidráulico | | |
| Carrera del expulsor | mm | 125 |
| Unidad de Inyección | | 270 |
| Diámetro del husillo | mm | 35 |
| Relación Longitud / Diámetro | | 20.0 |
| Presión de inyección | bar | 1890 |
| Volumen desplazado (max.) | cm ³ | 144.3 |
| Peso pieza inyectada (PS) | g | 128 |
| Carrera máxima de dosificación | mm | 150 |
| Carrera máxima de boquilla | mm | 250 |
| Profundidad de inmersión de boquilla | mm | 40 |
| Presión de apoyo de boquilla | kN | 66 |
| Potencia instalada de calefacción de cilindro | kW | 7.5 |
| Capacidad de tolva | L | 35 |
| Datos Generales | | |
| Capacidad del tanque de aceite | L | 135 |
| Potencia motobomba | kW | 11.0 |
| Potencia total instalada | kW | 18.5 |
| Medidas Largo x Ancho x Alto | M | 3650 x 1150 x 1770 |
| Peso neto sin aceite | kg | 2500 |

Tabla 3.1 Parámetros de la máquina de inyección modelo ERGOtech pro 50-270

3.3.1.1 JUSTIFICACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE INYECCIÓN UTILIZADOS EN EL PROCESO.

Con lo anterior, se hace de nuestro conocimiento que la máquina de inyección ERGOtech pro EE50/270 cuenta con un sistema de control que lleva a cabo el proceso de moldeo completo una vez después de haber establecido los parámetros. Por lo que a pesar de ingresar valores de parámetros de inyección, en algunas ocasiones la máquina los ajusta con el fin de mejorar el proceso, ya que tiene un

control automático. De este modo, tanto la máquina como la literatura establecen diversas limitantes para la selección de parámetros a variar, tales como:

1. La temperatura del cilindro, de la masa, del molde y de la zona de alimentación ya se encuentran establecidas dentro de ciertos rangos para cada material, como lo informa el manual de proceso de la máquina de inyección [18], libros técnicos [5],[7],[4] y anexo 3.
2. Esta máquina de inyección ajusta la *Presión de Posterior (Sostenimiento) y el tiempo de Presión Posterior*, bajo las temperaturas ya mencionadas,[18][4][7].
3. El uso de la *Contrapresión*² y la *Descompresión*³ no es necesario en el PP, ya que es un material que no presenta inconvenientes tales como contracción, rechupes y/o desprendimiento de gases durante su procesamiento, [5].
4. El *Tiempo de Enfriamiento del molde*⁴ y el *Tiempo de Ciclo*⁵ son dependientes de los parámetros previos.
5. Las revoluciones del husillo utilizadas en el PP, que ayudan al desplazamiento del material fundido y su distribución uniforme hacia la zona de inyección para una plastificación adecuada están limitadas, por lo que utilizar velocidades altas (>200 rev/min) aumenta la fricción de la masa plástica, incrementando su temperatura, lo que origina una degradación no deseada y a velocidades bajas (<100 rev/min) no se completa su plastificación; lo anterior se fundamenta en base a la experiencia y a la literatura [17] y [18].
6. Sin embargo, en la literatura [18],[17], [4], [7] y anexo 3, se proporcionan rangos de trabajo muy grandes para el uso de la *PRESIÓN DE INYECCIÓN*⁶ en el moldeo de una pieza de PP, desde 800 bares hasta 1400 bares, en promedio; y en el caso de piezas de pared delgada con diversas configuraciones, se proponen presiones de inyección mayores, hasta 1800 bares. Por lo que se hace necesario profundizar en el comportamiento del material, estudiándolo en relación a ésta diferencia de presiones tan grande, además de que la misma literatura hace de nuestro conocimiento de que es un parámetro que influye principalmente en el flujo del material dentro de la cavidad durante la fase de inyección, y este a su vez en la configuración cristalina del material moldeado.
7. Al igual que en la presión de inyección, la literatura, [18] y [17], recomienda solo lineamientos del uso de la *VELOCIDAD DE INYECCIÓN*, proporcionando una indicación general de la inyección en las piezas; es decir, para piezas de pared delgada recomienda velocidades altas para minimizar el cortante y el mejorar la apariencia de las piezas. Por lo que no proponen un valor o

² Presión adicional que ayuda al empaquetamiento generado por la presión posterior en la fase de remanencia, que evita la contracción excesiva y rechupes del material por la estructura cristalina presente y que dificulta la compactación del polímero dentro de la cavidad, presente en algunos polímeros como el PS alto impacto, PC, ABS, Nylon entre otros

³ Retiro del cañón del molde para evitar la gasificación generada por degradación térmica del material que algunos polímeros tales como el ABS, PVC y Nylon presentan

⁴ Tiempo durante el cual se aplica la temperatura de enfriamiento del molde, la cual estuvo se controla por el enfriador, a una temperatura constante de 15°C.

⁵ Tiempo completo de moldeo de una pieza.

⁶ Presión encargada de llenar la cavidad.

rango específico de valores que indiquen la influencia de éste parámetro. De este modo, se pretende estudiar el comportamiento del material en función de sus propiedades establecidas por la composición cristalina de la pieza determinada por la velocidad de inyección y la presión de inyección, como lo informa la misma literatura.

Con lo anterior, se fundamenta el uso de la presión y velocidad de inyección como parámetros a variar para nuestro estudio.

3.4 MOLDES DE INYECCIÓN

Una parte primordial del conformado por inyección son los moldes de inyección, ya que ellos proveen la forma de la pieza. El propósito del fabricante de un molde, fundamentado en los requerimientos del cliente, es el obtener una pieza con las dimensiones, propiedades mecánicas, calidad superficial y de apariencia estipuladas. Por lo que, la configuración de una pieza obtenida por moldeo está determinada por la forma y estructura de la cavidad del molde, como resultado del contacto del polímero entre dos o más de sus paredes internas; generando una distribución uniforme del flujo del polímero con la mínima caída de presión de inyección y un empacamiento total, antes de presentarse el enfriamiento o solidificación del polímero fundido. Además, hay que considerar un sistema de enfriamiento que promueva un flujo continuo con un enfriamiento rápido, considerando lo planteado. De este modo, disminuirán los requerimientos de presión de inyección y de empacamiento, minimizando la fuerza de cierre y las pérdidas de material (rebaba).

Un molde de inyección se divide en una placa, donde se localiza el bebedero⁷ y el punto de inyección de la pieza, y en una placa que define principalmente la forma de la pieza, figura 3.24. Cada placa posee un sistema de enfriamiento interno que permite el intercambio de calor óptimo ($\pm 5^{\circ}\text{C}$ la temperatura deseada del molde), según la pieza y material en uso. La inyección del material se logra por medio de la localización perpendicular de la boquilla de la máquina respecto al plano de partición⁸ del molde, y que esta próxima al bebedero.

El llenado de la cavidad del molde se realizará por medio de un sistema de alimentación que dirigirá al polímero fundido hacia la cavidad.

3.4.1 CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DEL MOLDE DE INYECCIÓN.

El sistema de llenado ó alimentación tiene como fin recibir la masa de moldeo fundida procedente del cilindro de plastificación y dirigirla hacia la cavidad del molde. Como muestra la figura 3.20, el sistema de llenado consta de varias partes. En moldes múltiples éstas son:

- 1- El cono del bebedero (mazarota, canal de entrada)
- 2- El canal de distribución (araña, repartidor de colada)
- 3- Los canales de estrangulamiento (nervios de colada, trabazones)

⁷ Parte del molde que origina la colada y se encuentra próximo a la entrada.

⁸ Plano en el molde donde se unen la placa móvil y la placa fija.

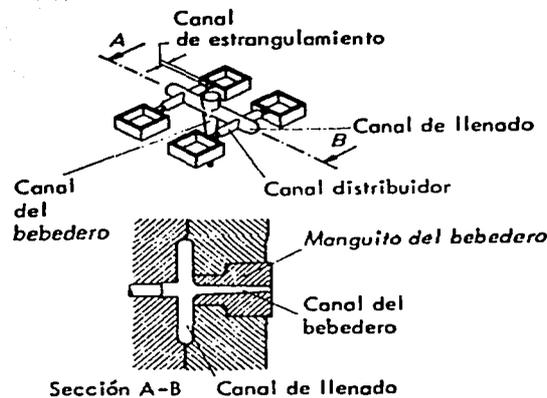


Figura 3.20 Sistema de alimentación o de llenado.

El cono del bebedero recoge la masa plástica directamente del cilindro de plastificación y la dirige hacia el plano de partición del molde, que por lo general se encuentra perpendicular a este plano. Si bien este canal de entrada varía según las normas de trabajo, generalmente tiene forma cónica para facilitar el desmoldeo. En los moldes simples, dicho cono constituye muchas veces la totalidad del sistema de llenado; se tiene entonces el bebedero de barra o mazarota. Para los moldes simples se emplea, además del bebedero de barra, o mazarota, el bebedero puntiforme, o sus variantes cuando se trata de piezas de paredes finas (espesores menores de 3 mm). El canal de distribución es la parte del sistema de llenado, en moldes múltiples, que une las distintas cavidades con el bebedero. Al conjunto del sistema de los canales de distribución se le denomina, por lo general, araña o repartidor de colada. Los canales se dimensionan de forma tal que el material llene simultánea y uniformemente las cavidades a igual presión y temperatura.

El canal de estrangulamiento constituye el elemento de transición desde el canal distribuidor hacia la cavidad del molde (pieza); para poder separar de forma fácil y limpia la pieza de la mazarota este canal debe ser muy estrecho. Los canales de estrangulamiento, llamados también nervios de colada o trabazones, unen el canal de distribución con la cavidad.

3.4.1.1 CONFIGURACIÓN DE LOS CANALES DE DISTRIBUCIÓN

Los canales de distribución constituyen la parte del sistema de llenado, en moldes múltiples o simples con desvío del flujo, uniendo las cavidades del molde con el cono de entrada. Estos tienen la misión de conseguir que el material penetre en todas las cavidades simultáneamente y a igual presión y temperatura.

La masa plastificada ingresa a gran velocidad en el molde frío. La disipación de calor enfría y solidifica rápidamente la masa que fluye junto a las paredes. Al mismo tiempo, la masa que fluye por el centro queda aislada respecto a la pared del canal, originándose así un núcleo plástico por el que puede fluir la masa necesaria para el llenado del molde. Este núcleo plástico debe conservarse hasta que la pieza esté totalmente solidificada; de este modo adquiere plena eficacia la presión de sostenimiento necesaria para compensar la contracción de volumen que ocurre durante el proceso de solidificación.

Es necesario determinar la relación superficie/volumen, tomando en consideración el ahorro de material y las condiciones de refrigeración, prefiriéndose que sea la menor posible. Por ende, las dimensiones del canal dependen del tamaño de la pieza, del tipo de molde y del tipo de material a utilizar. Por lo general, ha de considerarse que la sección del canal ha de ser mayor cuanto mayor es la pieza, o bien, para piezas semejantes, cuanto mayor sea su espesor. Una sección grande favorece el llenado, ya que la resistencia al flujo es menor que en los canales estrechos. La masa de moldeo ha de ser tanto más fluida cuanto más largos sean los canales o vías de flujo.

De este modo, el dimensionado de los canales adquiere mayor importancia, tanto para lo que se refiere a la calidad de la pieza como a la rentabilidad de la producción. El canal de estrangulamiento circular como se aprecia en la figura 3.21, cumple la condición de mantener mínima la relación superficie/volumen; con este canal se producen las mínimas pérdidas de calor y por cortante. Para poder desmoldearlo con facilidad, tiene que dividirse diametralmente en partes iguales, abarcando la mitad del molde lado boquilla y la mitad lado extractor, lo que resulta de difícil manufactura. Por ello se recomienda elegir una sección que se aproxime a la circular, pero de modo que el canal resultante pueda alojarse en una sola mitad del molde, para facilitar el desmoldeo, aplicándose en la parte móvil del molde.

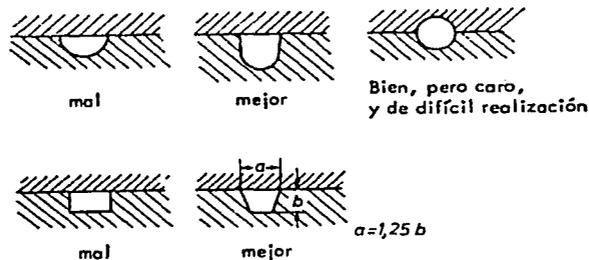


Figura 3.21 Secciones buenas y malas de los canales de distribución.

En la figura 3.21 se comparan algunas secciones buenas y malas de los canales. La sección parabólica (centro, arriba) es la más utilizada, por aproximarse mucho a las exigencias citadas aunque proporciona un poco más de desperdicio que en el canal circular.

La calidad de la superficie de los canales depende de la pieza a elaborar. El no pulir los canales ayuda a que el anclaje de la película solidificada junto a la pared exista, evitando el arrastre por el núcleo plástico; por lo que, al utilizar algunos polímeros hay que efectuar un pulido brillante y, a veces, un cromado, para no producir defectos en la pieza. Tales materiales son susceptibles a ello, por ejemplo, PVC, policarbonato y poliacetal.

En los moldes múltiples, los canales distribuidores tienen también la misión de conseguir que todas las cavidades se llenen simultánea y uniformemente. De producirse retrasos en el llenado de unas partes respecto a las otras, la presión de sostenimiento sólo actúa a su debido tiempo en determinadas cavidades, mientras que en el resto se produce prematuramente o demasiado tarde. El modo más sencillo de conseguir un llenado simultáneo consiste en hacer de igual longitud todas las vías de flujo hacia las cavidades, y en no modificar la sección de los canales de distribución y de estrangulamiento dependiendo del diseño. Para obtener vías de flujo iguales, lo mejor es disponer las cavidades en

círculo alrededor del punto central del bebedero. Una forma especial de este sistema lo es el canal anular; la masa plástica procedente del bebedero llega primeramente a un distribuidor principal en forma de anillo, el cual va conectado a las diversas cavidades mediante canales secundarios.

Si no es posible una distribución semejante, se emplea el llamado distribuidor de hileras. Este consta de un canal principal y diversos canales secundarios que terminan en el canal de estrangulamiento. Aunque se adoptan secciones distintas para el canal principal y los secundarios, puede ocurrir que las cavidades se llenen en forma defasada debido a las diferentes caídas de presión. Por esta razón, en la práctica, se hacen primero muy pequeños los canales de estrangulamiento que unen el canal de alimentación con la cavidad del molde y, posteriormente, en las inyecciones de ensayo, se van ensanchando hasta que todas las cavidades se llenan simultáneamente.

Además de compensar los distintos tiempos de llenado mediante el ajuste de los canales de corte, se pueden tomar otras medidas para que el flujo tenga recorridos de igual magnitud, con ello se consigue que todas las cavidades se llenen simultáneamente de masa en el mismo estado. Con la distribución en hilera se pueden obtener caminos de flujo iguales sin tener en cuenta el canal de estrangulamiento. Sin embargo, esto tiene como desventaja el gran volumen de la masa que se solidifica en los canales y se convierte en desperdicio.

Si después de analizar todas las medidas posibles no es posible situar las cavidades a igual distancia del bebedero, no cumpliendo el principio de caminos de flujo iguales, sólo queda la posibilidad de conseguir mediante secciones de paso distintas en los canales de estrangulamiento una resistencia al flujo de la masa hasta cada cavidad donde el llenado se produzca simultáneamente en todas ellas, a pesar de tener diferentes recorridos. Si bien estas secciones pueden determinarse previamente en forma aproximada, en la práctica se determina la sección más favorable efectuando ensayos de inyección y llevando a cabo las correcciones pertinentes. También una nueva manera de hacerlo es con la ayuda de programas de simulación por computadora, los cuales permiten el ahorro de material y trabajo de manufactura de los moldes considerados.

Se debe tomar en cuenta el efecto de la fricción durante el proceso de inyección, ya que las moléculas del polímero se pueden romper o dañar debido a la fuerza de acomodamiento que genera la presión de sostenimiento, provocando que el material se degrade. Esto no se observa a simple vista, sin embargo, las propiedades mecánicas lo pueden demostrar. La fricción puede considerarse como un recurso de calentamiento, que puede mejorar las características de flujo.

De este modo, el diseñar un sistema de canales de distribución óptimo implica minimizar el gasto de material en exceso, disminuyendo las pérdidas de presión de inyección y de temperatura del flujo fundido con la ayuda del control de la longitud del canal de distribución. Por esto, el llenado del molde multicavidades debe darse al mismo tiempo.

Así, la localización, forma y dimensiones de los canales de distribución se determina tanto por la cantidad y distribución de las cavidades como por las características térmicas y de flujo de los materiales plásticos.

En moldes de 4 a 8 multicavidades iguales, se recomienda balancear el flujo distribuyéndolo simétricamente. Sin embargo, en moldes con varias cavidades diferentes es necesario, para todas las trayectorias de flujos presentes, asegurar caídas de presión iguales. Así, este balanceo debe considerarse tanto en los canales de distribución, como en los canales de estrangulamiento o entradas y en las cavidades.

El cambio de la trayectoria del flujo es fundamental en las caídas de presión. Por lo que, lo más recomendable es evitar cambios de direcciones del flujo menores a 90°, ya que se presentaría una recirculación local del flujo⁹. De este modo, lo recomendable son cambios de trayectorias con ángulos rectos, para evitar este problema.

El sistema de llenado puede formarse con la presencia o ausencia de los canales de distribución. Esta ausencia se presenta en piezas que necesitan que el flujo de polímero mantenga su temperatura uniforme, principalmente en piezas de espesor delgado, con lo que la inyección es directa desde la boquilla con una cantidad mínima de colada¹⁰; por lo que se requiere solo el material necesario para el formado de la pieza, reduciendo las pérdidas de presión de inyección¹¹.

3.4.1.2 CONFIGURACIÓN DE LAS ENTRADAS O CANALES DE ESTRANGULAMIENTO.

El canal de estrangulamiento es la parte del sistema de llenado que une a la cavidad de la pieza con el canal distribuidor. El propósito del canal de estrangulamiento es controlar el flujo del fluido plástico en la cavidad. El tamaño del canal de estrangulamiento varía con cada material y su viscosidad, así como el tiempo en que pasa a través de este.

La entrada debe ser pequeña y de fácil desmoldeo, eligiendo su posición en la pieza de modo que no produzca marcas inoportunas. Sin embargo, no es posible hacer el canal de estrangulamiento tan pequeño como se desearía, por convertirse en un cuello de botella en el sistema de llenado, el cual opondría una considerable resistencia al flujo de la masa plástica, consumiéndose una parte importante de la presión de inyección. La resistencia ofrecida por el canal de estrangulamiento es tanto mayor cuanto más viscosa es la masa.

El tamaño recomendado del canal de estrangulamiento especifica una determinada abertura, que es un porcentaje de la parte más gruesa de la pieza, de un ancho dos veces la profundidad del canal de estrangulamiento. Los canales de estrangulamiento circulares aproximadamente son 10% más largos en diámetro que la profundidad. Por ejemplo, para una pieza con un grosor de pared de 0.090 pulgadas y una profundidad de dos terceras partes de la parte más gruesa, debería tener un canal de estrangulamiento rectangular con una profundidad de 0.060 pulgadas o un canal de estrangulamiento circular con 0.066 pulgadas de diámetro. Por ello, el tamaño del canal de estrangulamiento y su localización tienen una gran influencia en la calidad y apariencia del producto moldeado. En relación con la ecuación de flujo (4.1), se tiene:

⁹ Birley Arthur W., Haworth Barry, Batchelor Jim: Physics of Plastics, Processing, Properties and Materials Engineering; Editorial Hanser; Alemania 1992; pag. 176-177.

¹⁰ Material plástico sólido formado a partir del sistema de llenado ó alimentación que dirige al material fundido a la cavidad.

¹¹ Birley Arthur W., Haworth Barry, Batchelor Jim: Physics of Plastics, Processing, Properties and Materials Engineering; Editorial Hanser; Alemania 1992; pag. 174.

$$Q = \frac{P h^4}{9 \mu L}$$

..... ecuación 3.1

Donde:

- Q= Flujo volumétrico
- P= Presión del flujo
- h= Espesor de pared
- μ = viscosidad del flujo polimérico
- L= longitud del canal

Si se desean cambiar las dimensiones del canal de estrangulamiento se puede determinar un incremento en su tamaño tan solo en un 10 % de lo permitido del valor previsto. Esto asume que todos los otros factores restantes no cambian. Cuando el tamaño del canal de estrangulamiento es pequeño pueden esperarse las siguientes consecuencias en el proceso:

- 1- Los disparos de ciclo pueden variar en volumen y fuerza debido a un cambio en la viscosidad del polímero. Como lo indica la ecuación, el volumen aumenta cada segundo (cuando los otros factores son constantes) y es inversamente proporcional a la viscosidad; es por eso que un cambio en el flujo causaría una presión variable en la cavidad y por ende se afecta la consistencia del moldeo.
- 2- Al completar un ciclo de inyección algunas piezas pueden presentar rechupes y burbujas, ya que el enfriamiento en el canal de estrangulamiento termina antes de que la presión de empacamiento actúe en la cavidad comenzando la solidificación antes de que las condiciones de moldeo preestablecidas se hayan llevado a cabo. Es importante que el canal de estrangulamiento permita que se ejerza la presión del cojín de masa para su correcto llenado, además de que dicha presión sea aplicada a la cavidad antes de que el enfriamiento final termine.
- 3- Si el tamaño del canal de estrangulamiento se dimensiona de tal manera que no permita al molde el recibir suficiente presión, la pieza tendrá ciertas propiedades deficientes, además de presentar dimensiones incorrectas.
- 4- Al fluir por canales estrechos, la masa se ve obligada a recorrer el sistema de llenado a alta velocidad provocando un calentamiento notable. Si el canal de estrangulamiento es demasiado pequeño, no sólo obstaculiza el llenado, sino que puede producir también un sobrecalentamiento, con la consiguiente degradación térmica del material.
- 5- Un canal de estrangulamiento con un tamaño por debajo de lo normal puede provocar "abombamiento" de la pieza debido a una diferencia en los intervalos de enfriamiento del material tanto al final como al inicio de la cavidad.
- 6- En un canal de estrangulamiento más largo a lo establecido, la temperatura de la colada no aumentará un mínimo, es decir, tiene un lento enfriamiento, solidificándose el material en el canal prematuramente. La presión de mantenimiento que compensa la contracción

volumétrica producida al solidificarse el polímero no puede mantenerse durante un corto tiempo, incrementando así el tiempo de ciclo de la pieza.

Idealmente, la longitud del canal de estrangulamiento debería ser cercana a cero; pero un canal de estrangulamiento más largo que lo previsto reducirá la presión disponible para hacer que el material entre en la cavidad con mayor densidad, lo que puede causar un patrón de flujo indeseable, con esto, la baja presión en la cavidad causará rechupes o burbujas. Un canal de estrangulamiento demasiado largo puede también causar enfriamiento prematuro, interrumpiendo el llenado de material en las cavidades y causando variación dimensional y pobres propiedades en las piezas. Por tanto, la ubicación y la forma del canal de estrangulamiento quedan determinadas por el tamaño de la pieza, su forma y la viscosidad de la masa polimérica.

Con la configuración del canal de entrada, el fabricante tiene una última posibilidad de corregir el estado de la colada poco antes de que ésta penetre en la cavidad. En los moldes múltiples, donde los canales de distribución tienen frecuentemente longitudes desiguales, se puede conseguir que la resistencia al flujo sea igual por medio de la diversa constitución de los canales de estrangulamiento. Con ello se consigue un llenado uniforme de todas las cavidades.

La figura 3.22 muestra algunos ejemplos fundamentales en cuanto a la forma y posición del canal de estrangulamiento en el sistema de llenado. Se observan las posiciones centrada y excéntrica respecto al canal distribuidor, así como secciones circulares, semicirculares y rectangulares. Por lo que respecta a la forma del canal de estrangulamiento, son válidas las consideraciones antes mencionadas cuando se trata de los canales de llenado. Según estas los canales de distribución y de estrangulamiento permiten el paso de un volumen máximo con la mínima superficie de contacto, a fin de mantener bajo el enfriamiento y pérdidas por rozamiento.

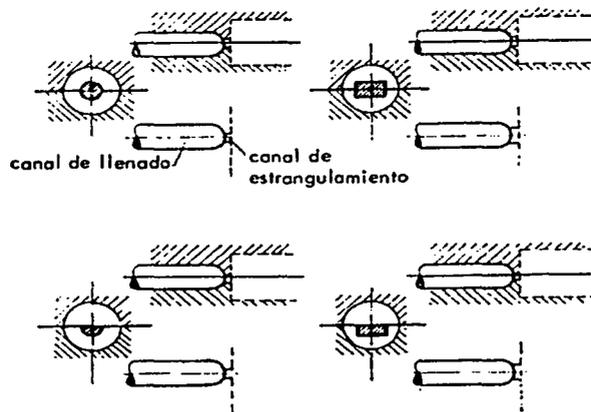


Figura 3.22 Configuración y posición de los canales de estrangulamiento.

De este modo el canal circular es la mejor opción, pero, como se mencionó antes al tener que trabajar las dos mitades del molde dificulta su fabricación. Si por razones económicas se requiere un canal rectangular situado en el centro de las vías de llenado, su anchura no habría de ser superior al 60 % del diámetro del canal de llenado.

La ubicación excéntrica de los canales de estrangulamiento respecto al eje del canal distribuidor será de fabricación más económica que la centrada. Por esta razón es también comprensible que se emplee frecuentemente el canal de estrangulamiento con la superficie situada en uno de los planos de partición que el centrado. Tal tipo de canal tiene también la ventaja de desmoldarse y desprenderse con más facilidad por lo que generalmente no es necesario un trabajo posterior. El canal de estrangulamiento debe situarse de forma que asegure caminos de flujo regulares sin la aparición de líneas de flujo, además de tener buenas condiciones de circulación y de llenado de la cavidad del molde. En ningún caso debe originarse un chorro de masa pastosa en la cavidad del molde, ya que esta masa no vuelve a derretirse, sino que da origen a la presencia de marcas inoportunas en la pieza. La masa se hincha en la cavidad del molde cuando es muy viscosa o fluye lentamente cuando se sitúa sin interrupción junto a una pared, o cuando las esquinas de la entrada están rotas formando cavidades. Sin embargo, es más seguro dirigir el chorro a una pared intermedia o contra un obstáculo, para romperlo.

Cuando el flujo entra por un canal de estrangulamiento que no está colocado correctamente ocurre el goteo. La consecuencia del goteo es una apariencia indeseable y una condición potencial de acumulación de esfuerzos en la pieza. El goteo es el resultado de las características del flujo del termoplástico. La viscoelasticidad de los polímeros indica que el diámetro dejado por el orificio se incrementa en tamaño. Esto puede observarse en la práctica al momento de la dosificación (que es cuando el husillo se retrae hacia atrás) y después cuando se inyecta la mezcla. Se ha encontrado que el “**chorro**”¹² de polímero no solo sale con un diámetro mayor al del husillo, sino que mantiene su uniformidad en su sección transversal sobre una distancia de varias pulgadas. Cuando un chorro de material plástico entra a un espacio libre y relativamente grande a un canal de estrangulamiento, donde su espesor es más pequeño que el de la cavidad, este se vuelve más grueso que la cavidad, donde porciones del chorro en las paredes inferior y superior se enfrían más rápido, antes que el resto solidifique. Por lo tanto, tenemos un intervalo de enfriamiento en el mismo chorro de material, lo cual condiciona al goteo. El goteo puede también ser eliminado algunas veces al hacer más grande el tamaño del canal de estrangulamiento, el cual disminuye los intervalos con los que el material entra en la cavidad.

Para piezas transparentes o ligeramente visibles, el canal de estrangulamiento requiere especial atención. En este caso es importante tener un flujo directo, ya que la última porción de la pieza moldeada que se llenó no está en el área donde la visibilidad se requiere. La localización del canal de estrangulamiento y del flujo principal de material debe estar conforme a este requerimiento.

3.4.2 DESCRIPCIÓN DE LOS MOLDES UTILIZADOS.

Como ya se mencionó, nuestro estudio se enfoca a obtener las propiedades mecánicas del PP homopolímero natural, con carga de talco y reforzado con fibra de vidrio, variando los parámetros del proceso inyección de piezas con espesores diferentes, con el objetivo de observar su comportamiento. De este modo, rigiéndonos bajo la norma ASTM D638-9 (Ensayo de tracción para plásticos), descrita posteriormente, se nos proporcionó una referencia según el espesor de la pieza de trabajo, ya que ésta establece que para piezas menores a 1 mm de espesor recomienda el uso de la norma ASTM D882-97 (Ensayo de tracción para hojas delgadas), por lo que denominamos a las muestras mayores a 1 mm de espesor de pared gruesa y menores a éste de pared delgada.

¹² Condición que presenta el polímero a la salida de la entrada y que provoca un llenado incompleto.

Para lo anterior, se utilizó una placa multicavidades, manufacturada bajo la norma ASTM D647-88, que indica el diseño de moldes para obtener probetas para ensayos de tracción de espesor de 3.2 mm, así como para probetas de flexión, probetas de impacto, probetas para obtener la temperatura de deflexión sometidas a una carga y probetas para determinar la absorción de agua de los polímeros, figura 3.23. Sin embargo, con el fin de comparar equitativamente las propiedades mecánicas según el espesor de las piezas, se utilizó solo la probeta de tracción, debido a que solo se manufacturaron muestras de 0.6 mm de espesor para ensayos de tracción según la norma ASTM D882 que se menciona más adelante, obtenidas a partir de vasos de 200 ml con el espesor mencionado e inyectados bajo las mismas condiciones de proceso que las probetas.

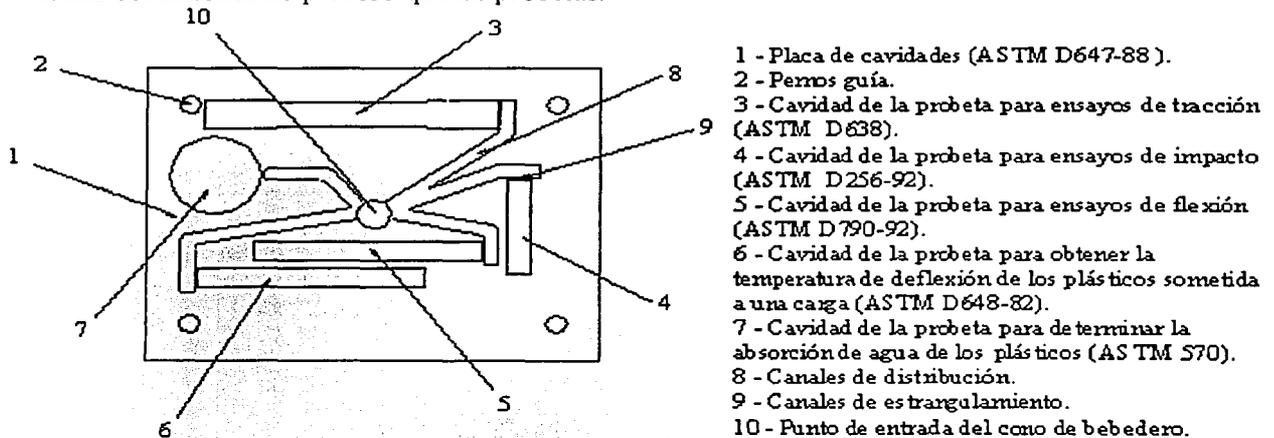


Figura 3.23 Esquema de la placa de cavidades, del molde multicavidades.

Para realizar la inyección de las probetas de plástico, el molde se compone de varias secciones, como se muestra en la figura 3.24, donde se observa como la placa de cavidades (ASTM D647-88), forma parte de la placa móvil y da forma a las piezas con la ayuda de la contraparte (placa fija). El sistema de enfriamiento en la placa fija está integrado a la contraparte, mientras que en la placa móvil se encuentra adjunto. En este caso la placa fija tiene el sistema de enfriamiento integrado, ya que en la placa móvil está adjunto; en esta sección se observa el centrador, que se utiliza para alinear al molde con el bebedero y la placa de cavidades, y es por donde el flujo del polímero pasa del cilindro al bebedero y a los canales de distribución.

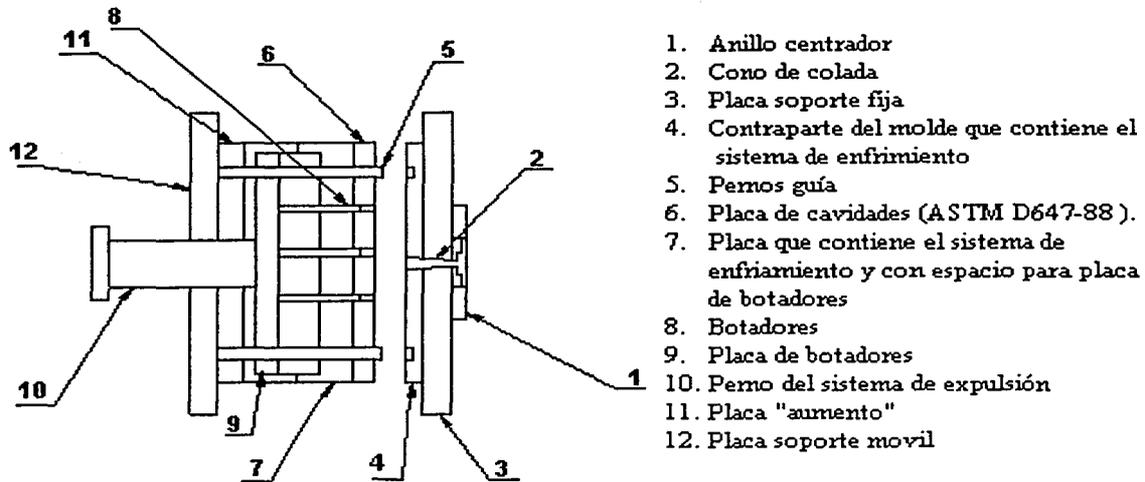


Figura 3.24 Corte transversal del arreglo del molde multicavidades.

En la unidad móvil del molde, además de la placa de cavidades, se encuentra la placa de enfriamiento; una sección de ésta y en conjunto con una próxima alojan a la placa de botadores, esta placa puede desplazarse en el interior de ambas, facilitando la expulsión de la pieza inyectada. Próxima se encuentra una placa "aumento" que amplía la longitud total del molde. El movimiento de la placa de botadores se realiza con la ayuda de un perno, logrando el desplazamiento longitudinal por medio del sistema expulsor de la máquina, permitiendo la expulsión de la pieza.

El flujo del polímero dentro del molde multicavidades inicia al ingresar la masa plástica a través del bebedero, el cual presenta un incremento diametral de 4 mm a 6 mm y una longitud de 46 mm, mostrando una forma cónica; lo que permite un flujo divergente. Al salir el polímero fundido del bebedero entra perpendicularmente en una sección circular de 19.5 mm de diámetro, presentando una distribución radial hacia los canales de distribución con una sección rectangular de 52.8 mm² y diferentes longitudes, como se muestra en el anexo 1. Se puede observar, como el recorrido del flujo del polímero hacia las cavidades es grande, en relación a lo que recomienda la literatura¹³, que sugiere que las longitudes de los canales distribución sean mínimas para evitar caídas de presión durante el proceso de inyección; además antes de ingresar a las cavidades existe un ligero cambio de dirección del flujo del polímero fundido, lo que puede provocar una recirculación local del flujo¹ ocasionando el mismo problema anterior, por lo que se recomienda un cambio de dirección $\geq 90^\circ$, para evitar este hecho. Esta característica si se cumple al entrar a los canales de estrangulamiento o entradas ya que el flujo choca contra una pared y cambia su dirección perpendicularmente, sin embargo, en este caso se tienen cambios drásticos de sección al ingresar a la cavidad, tabla 3.2.

¹³ Birley Arthur W., Haworth Barry, Batchelor Jim; Physics of Plastics. Processing, Properties and Materials Engineering; Editorial Hanser; Alemania 1992; pag. 176-177.

| PROBETA | DIMENSIÓN DEL CANAL DE ESTRANGULAMIENTO | | | SECCIÓN (mm ²) | RELACIÓN C.D.-C.E. ¹ |
|---|---|------------|------------|----------------------------|---------------------------------|
| | PROFUNDIDAD [mm] | ANCHO [mm] | LARGO [mm] | | |
| Probeta de Tracción (ASTM D638) | 1.5 | 6 | 1.5 | 9 | 6:1 |
| Probeta de Flexión (ASTM D 790) | 2.5 | 4 | 1.5 | 10 | 5:1 |
| Probeta de Impacto (ASTM D256) Método A izod ranurado | 2.5 | 4 | 1.5 | 10 | 5:1 |
| Probeta para obtener la temperatura de deflexión bajo carga (ASTM D648) | 1.5 | 4 | 1.5 | 6 | 9:1 |
| Probeta para determinar la absorción de agua de los plásticos (ASTM D570) | 1.5 | 4-6 | 2 | 9 | 6:1 |

¹ Canal de Distribución- Canal de Estrangulamiento, donde el canal de distribución es de 52.8 mm² de sección rectangular, de 8 x 6.6 mm

Tabla 3.2 Dimensiones de los canales de estrangulamiento para cada probeta.

Una vez que el flujo sale del canal de estrangulamiento se encuentra de nuevo con un cambio de sección, como se indica en la tabla 3.3, correspondiendo al paso del polímero fundido desde la entrada o canal de estrangulamiento hacia a la cavidad de la probeta. También se presentan relaciones de sección grandes que pueden provocar caídas de presión, por efecto de las turbulencias que se pueden generar, tanto por las pequeñas dimensiones del canal de estrangulamiento relativas a las de la cavidad como por la sección rectangular que presentan.

| CAVIDAD SEGÚN LA PROBETA | DIMENSIÓN DE LA CAVIDAD(PROBETA) | | | SECCIÓN (mm ²) | RELACIÓN C.E-CAV. ² |
|--|-----------------------------------|-----------------|------------|----------------------------|--------------------------------|
| | PROFUNDIDAD [mm] | ANCHO [mm] | LARGO [mm] | | |
| Probeta de Tracción (ASTM D638) | 3.2 | 20 | 167 | 60 | 1:7 |
| Probeta de Flexión (ASTM D 790) | 6.4 | 12.7 | 127 | 85.8 | 1:9 |
| Probeta de Impacto (ASTM D256) Método A izod ranurado | 6.6 | 12.7 | 65 | 85.8 | 1:9 |
| Probeta para obtener la temperatura de deflexión bajo carga (ASTM D648) | 3.2 | 12.7 | 127 | 41.6 | 1:7 |
| Probeta para determinar la absorción de agua de los plásticos (ASTMD570) | 3.2 | Diámetro= 52 mm | | 19.8 | 1:2 |

² Canal de estrangulamiento-Cavidad, donde la cavidad depende del tipo de probeta que se estudie.

Tabla 3.3 dimensiones para las cavidades dependiendo de la probeta a la que pertenece.

En tanto, las probetas de pared delgada (ASTM D882) se obtuvieron a partir de vasos de 200 ml de capacidad y espesor de 0.6 mm, como se había mencionado; por lo que el molde utilizado tiene estas características, siendo de configuración sencilla y de una sola cavidad, figura 3.25 y anexo 2. En este caso, la parte que da forma a la pieza está en la unidad o platina fija¹⁴, en conjunción con la cavidad del vaso que se encuentra en la unidad móvil y que determina el espesor constante del vaso. El sistema expulsor de los vasos es un disco, que empuja las piezas fuera de la cavidad del vaso; este disco se encuentra fijo a un perno que esta anclado al sistema expulsor de la máquina.

¹⁴ Parte fija del molde próxima a la boquilla.

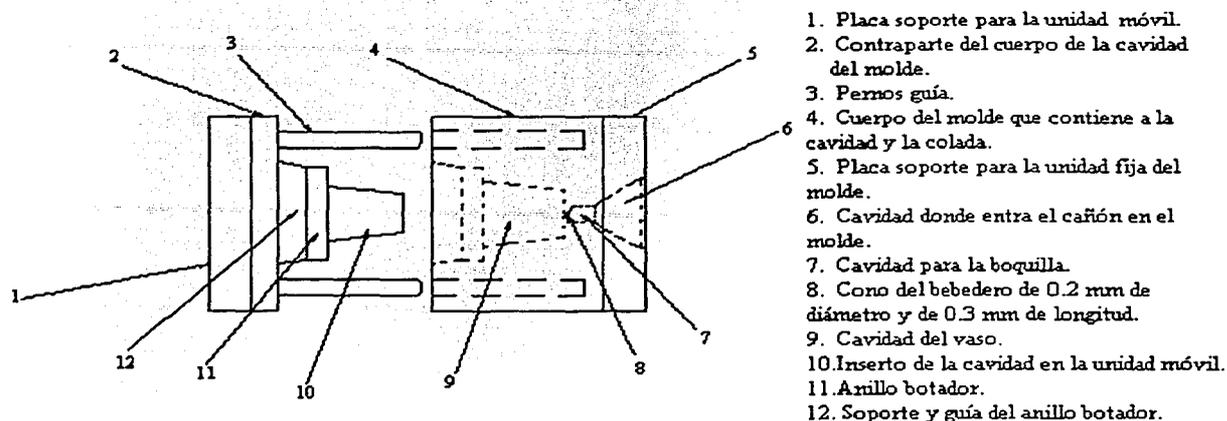


Figura 3.25 Configuración del molde para vasos de 200 ml de una cavidad.

Como se observa en la figura 3.25, la boquilla entra casi en contacto directo con la cavidad con el fin de reducir las distancias y caídas de presión el flujo, ya que el bebedero presenta un diámetro de 1.2 mm y 2 mm de longitud, sin canal de distribución; por lo que se establece un flujo directo al interior del molde. Al comenzar la inyección, la dirección del flujo del polímero hacia la cavidad es perpendicular a la base del vaso, ya que el bebedero es normal a éste; por lo que al ingresar el polímero fundido choca con la base distribuyéndose radialmente, cubriendo primero su totalidad. Posteriormente el flujo cambia de trayectoria, aproximadamente 90° , para darle forma a la pared del vaso hasta completar el llenado de la cavidad, sin presentar cambios de sección. Cabe recordar que los cambios de dirección $\geq 90^\circ$ son benéficos para reducir las caídas de presión, ya que evitan la recirculación local.

Capítulo IV

CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO POLIMÉRICO EN LA CAVIDAD.

4.1 COMPORTAMIENTO DEL FLUJO POLIMÉRICO EN EL MOLDE.

Los plásticos que actualmente son procesados por medio de inyección, tienen aplicaciones cada vez más complejas en cuanto a diseño y producción; por ello la competencia en la industria del plástico es muy grande, la que ofrece características próximas a las propiedades reales del polímero, constituyendo un punto determinante para la adquisición del producto. Por esto, se ha buscado obtener ciertas propiedades bajo condiciones predeterminadas del proceso (temperatura del cañón, velocidad de inyección, presión de inyección, entre otras), pues se ha visto que influyen directamente en la microestructura del plástico, así como en sus propiedades físicas. Por ello, la sensibilidad a los cambios en el proceso puede influir de tal modo que puede originar defectos en el producto, si éste no fuese el adecuado.

En cuanto al molde, éste debe distribuir rápida y eficientemente al polímero inyectado para adoptar la forma de la cavidad, evitando una caída de presión excesiva y dificultando la generación del flujo, por lo que el ciclo de inyección puede clasificarse en las siguientes etapas: llenado del molde, sostenimiento y solidificación (resultando en cristalización), aunque estas etapas no son consecutivas, ya que el llenado y sostenimiento se dan bajo condiciones no isotérmicas en un molde relativamente frío. Por lo tanto, el formado y solidificación en la inyección tienen efectos relevantes en la estructura de la pieza.

Así, la moldeabilidad de un polímero se define como el llenado de un molde con límites de temperatura y presión de inyección. Para entender esto se requiere de un análisis del proceso, el cual está en función de las propiedades térmicas y reológicas del polímero (las cuales son dependientes del desarrollo del cortante, temperatura y presión), las condiciones de proceso (grado del flujo, temperaturas, presiones) y la geometría del flujo, así como la transferencia de calor característica del molde.

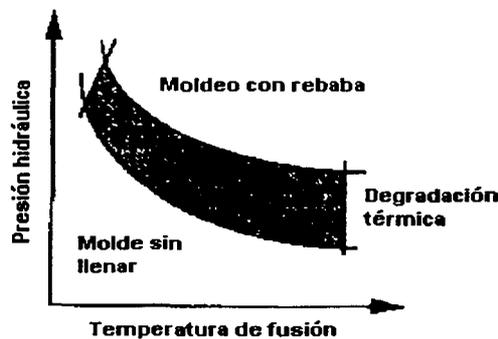


Figura 4.1 Diagrama esquemático del área de moldeo (DAM)

Antes de la aparición de las simulaciones por computadora comerciales, el moldeo era (aunque para algunos sigue siendo) materia de la experiencia y uso de técnicas empíricas. Para una combinación de molde/polímero en particular, una simple y empírica guía para el llenado del molde esta dada por el diagrama de área del moldeo (DAM) como se muestra en la figura 4.1; dentro del área especificada del plano de presión hidráulica contra temperatura de fusión, aquí el polímero es capaz de llenar el molde utilizado. El área de moldeo esta limitada por cuatro curvas. En el eje de la presión hidráulica la curva superior indica el punto en el cual una presión excesiva generada en la cavidad provoca que el molde se abra y se forme la "rebaba" (una hoja delgada de material que rodea al molde en la junta de las caras del mismo), mientras que la curva inferior indica una presión insuficiente para el llenado de la cavidad. En el eje de la temperatura de fusión, la curva izquierda muestra el punto en el cual el grado de solidificación es demasiado rápido dando una falta de llenado del molde, mientras que la de la derecha indica donde la degradación térmica del polímero inicia. El DAM aproximado puede aplicarse a otras variables de proceso y de máquina, o se puede aplicar a modo de generar un DAM tridimensional (3-D) (es decir, un diagrama de moldeo volumétrico). Otra aproximación empírica para el llenado del molde es la "Razón de la Trayectoria del Flujo" (RTF), la cual se define como la razón de la trayectoria mas larga del flujo dentro de la cavidad dividida entre el espesor característico. Los valores de RTF se determinan según los grados de los polímeros y se presentan usualmente como la longitud del flujo cuando llenan un molde en forma de espiral; el cual, tiene un canal muy estrecho y largo para que exista este efecto, por lo que estos datos para un polímero se calculan como la longitud del flujo presente (bajo condiciones típicas de proceso) dividida entre la profundidad del canal.

También, el llenado del molde es extremadamente importante, ya que el patrón total del flujo determina la localización de algunas líneas de unión y la distribución de la orientación molecular en el molde. El mecanismo de flujo más común, por lo menos durante el inicio del llenado, es el flujo laminar divergente como se puede ver en la figura 4.2. Las cavidades del molde, figura 4.2(a), usualmente tienen entradas que son mas estrechas que la cavidad misma pero no más delgadas. Al salir de la entrada de la cavidad, el polímero se desliza (equivalente al deslizamiento en una extrusión al salir del dado) y hace contacto con las paredes, siendo el frente de flujo divergente el que forme un perfil de flujo radial. Si el flujo saliente tiene un deslizamiento insuficiente para hacer contacto con las paredes del molde provocará la formación de "chorro", figura 4.2(b), el cual se proyecta a una distancia significativa dentro del molde. Una vez que éste ha hecho contacto con una pared, el chorro formará capas en zig-zag, ocasionando un acabado superficial pobre (marcas de chaflán) y la formación de múltiples líneas de unión con un decremento en las propiedades mecánicas. El chorro se da comúnmente con compuestos altamente reforzados (exceso de carga), ya que tienen una elasticidad del polímero reducida y por esto bajo deslizamiento. Para evitar la formación de los chorros, durante el diseño se localiza el lugar de la entrada de tal modo que el material inyectado choque sobre una pared muy próxima, el cual incrementa el espesor a lo largo de su longitud (desde el canal de distribución de la cavidad). Con modernos equipos de inyección se evita la formación del chorro controlando la fase de inyección, que permite que la velocidad del flujo polimérico disminuya a medida que se aproxima a la entrada de la cavidad.

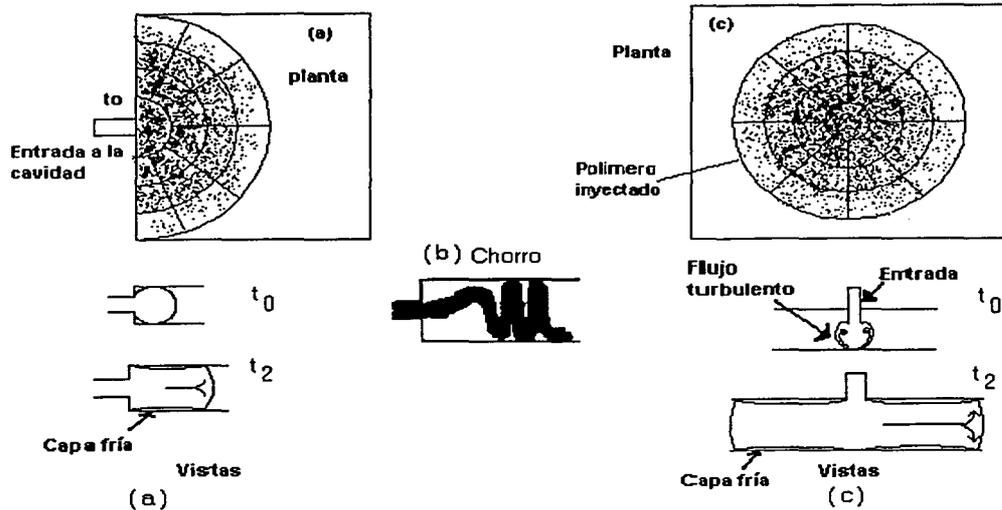


Figura 4.2 a) Flujo divergente durante el llenado en una cavidad en diferentes tiempos después de empezar el llenado (t_0), b) Chorro, c) Flujo en forma de disco durante el llenado con entrada central en diferentes tiempos después de empezar el llenado (t_0).

También, un flujo divergente se da como resultado de un flujo en un molde en forma de disco con cavidades centrales, ya que la entrada es normal a la dirección del flujo en la cavidad, figura 4.2(c). En este caso, el flujo puede ser inicialmente turbulento en la entrada, pero se establecen condiciones de flujo laminar a una distancia muy corta al encontrarse con las paredes del molde, dando un efecto de desaceleración que amortigua la turbulencia. En la figura 4.2(c) se muestra que el flujo divergente genera una orientación biaxial, por la deformación del polímero; mientras fluye desde la entrada de la cavidad (provocando orientación radial) también presenta un estiramiento transversal (provocando orientación circunferencial). En las figuras 4.2(a) y 4.2(c) se muestra también el mecanismo del flujo fuente de un polímero entrando al molde y la formación de la capa fría debido al contacto del material fundido con las paredes del molde, lo cual se presenta con más detalle en la figura 4.3.

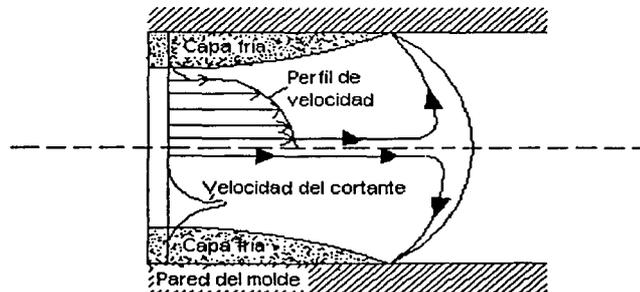


Figura 4.3. Representación esquemática del movimiento del flujo fuente, mostrando los perfiles de velocidad y cortante, por efecto de la deformación de un elemento cúbico de un polímero fundido.

El flujo fuente se genera por la condición de no deslizamiento entre el polímero y las paredes. Esta condición empuja al material fuera del centro del flujo hacia las paredes del molde, donde se forma la capa fría y se presenta el mayor flujo dentro de la cavidad, como se ilustra en la figura 4.3: mostrando un elemento cúbico polimérico viajando desde el centro del molde. Entre las paredes frías se genera un flujo llamado cortante, formando una capa muy delgada. Durante el llenado en un molde frío el cortante máximo se da por el enfriamiento del polímero, el cual reduce la velocidad del flujo en la pared y genera una distribución de velocidad en forma de campana.

4.2 EL PROCESO DE INYECCIÓN EN RELACIÓN CON LA ESTRUCTURA Y LAS PROPIEDADES DEL POLÍMERO.

Para la mayoría de los termoplásticos, las etapas principales del ciclo de inyección son: el **llenado**, **empacamiento (sostenimiento)** y **solidificación** (como resultado de la vitificación o cristalización), como ya se mencionó en capítulos anteriores. Sin embargo, éstas no son etapas consecutivas; donde el llenado y empacamiento se dan bajo condiciones no isotérmicas, dentro de un molde relativamente frío. La formación y solidificación simultáneas en la inyección tiene consecuencias en la estructura del polímero.

Las presiones necesarias para el llenado son dependientes del mecanismo del flujo, de la geometría de la trayectoria del flujo (boquilla, sistema de alimentación y cavidad), así como de las características de la viscosidad del polímero fundido (la viscosidad está en función del grado del esfuerzo cortante, de la temperatura y de la presión). Los altos gradientes térmicos generados, por las paredes frías del molde, y la disipación viscosa durante el llenado complican cualquier análisis. Existen modelos analíticos para ilustrar el llenado durante la inyección. Por ejemplo se presenta una solución de un modelo Newtoniano isotérmico para el llenado en un molde de disco con boquilla central, figura 4.4.

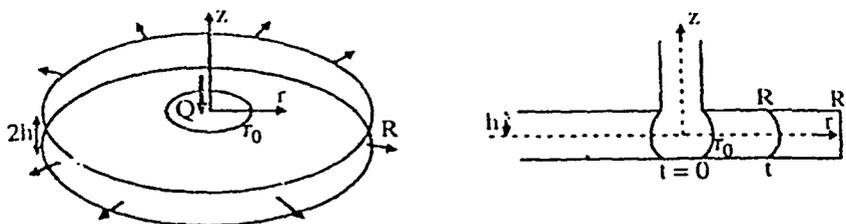


Figura 4.4 Flujo en un molde de disco con entrada central

En la figura 4.4 se supone que en el tiempo $t=0$ el polímero comienza a llenar la cavidad en forma de disco (de espesor $2h$), con un flujo puramente radial y volumétrico constante (Q); los perfiles de velocidad y presión para un fluido newtoniano, ecuación 4.1 (flujo polimérico, donde su viscosidad está en función de la temperatura y presión, pero independiente de la velocidad del cortante) bajo condiciones de temperatura constante, son dados por (Agassant, 1991):

$$\tau = \mu \left(\frac{d\gamma}{dt} \right)$$

..... ecuación 4.1

donde:

- τ = esfuerzo cortante
- μ = viscosidad newtoniana
- γ = deformación cortante

entonces,

$$v(r, z) = -3 Q \frac{(z^2 - h^2)}{8 \pi r h^3}$$

..... ecuación 4.2

$$P(r) = \frac{3 \eta Q}{4 \pi h^3} \ln \frac{R}{r}$$

..... ecuación 4.3

(Donde z es la coordenada cartesiana, figura 4.4) por lo que para un flujo constante, la posición radial R del frente de flujo en el tiempo, esta dada por:

$$t_f = \frac{2 \pi h}{Q} (R^2 - r_0^2)$$

..... ecuación 4.4

donde r_0 = radio de la boquilla o entrada. La ecuación 4.4 proporciona el tiempo de llenado de la cavidad si R es R_f (el radio de la cavidad). Del mismo modo, la presión de inyección para la cavidad se obtiene de la ecuación 4.3, tomando $r=r_0$. De acuerdo para un flujo no newtoniano, ecuación 4.5 (flujo polimérico, donde su viscosidad está en función tanto de la temperatura y la presión, como de la velocidad del cortante), las ecuaciones 4.2 y 4.3 serán:

$$\tau = m \left(\frac{d\gamma}{dt} \right)^n$$

..... ecuación 4.5

donde:

- τ = esfuerzo cortante
- γ = deformación cortante
- n = índice de la ley de la energía (tabla 4.1)
- m = consistencia (tabla 4.1)

$$v(r, z) = - \frac{2n + 1}{n + 1} \frac{Q}{4 \pi r h^{2+1/n}} (z^{1+1/n} - h^{1+1/n})$$

..... ecuación 4.6

$$P(r) = \frac{K}{h^{1-n}} \left(\frac{(2n + 1) Q}{4 \pi n h^2} \right)^n (R^{1-n} - r^{1-n})$$

..... ecuación 4.7

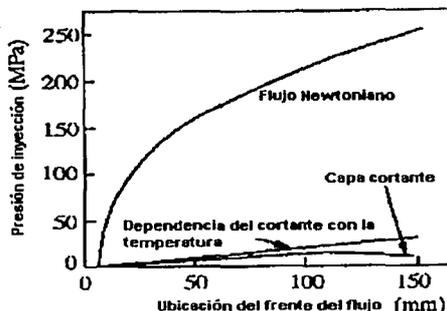


Figura 4.5 Presión de inyección como función de la ubicación del frente de flujo en un molde de disco.

En la figura 4.5 se muestran los resultados de la presión de inyección en función de la ubicación radial del frente del polímero fundido. El modelo newtoniano predice la aparición de alta presión, la cual disminuye al tomar en cuenta el comportamiento del cortante. También la figura 4.5 presenta el perfil de presiones generadas en un modelo no isotérmico (Agassant 1991), el cual muestra un aumento de la presión de inyección calculada, resultado del enfriamiento del polímero durante el llenado. Este modelo no toma en cuenta la reducción del espesor de la sección por efecto de la formación de la capa fría en el polímero sobre las paredes del molde, las que inducen también el incremento de presión. Este cambio de geometría del canal debe tomarse en cuenta cuando se utilizan los softwares de simulación comerciales, pues estos suponen que el comportamiento del polímero es sólo inelástico (es decir, sólo viscoso).

Las condiciones de proceso tienen efectos en la cristalización, siendo función de la velocidad de enfriamiento y presión, así como el desarrollo del cortante entre las moléculas del polímero. Los dos factores principales que influyen en el grado de cristalización del polímero son:

- **El grado de nucleación.** El cual aumenta a temperaturas de fusión bajas, presiones mayores y por la orientación de las moléculas.
- **La velocidad de crecimiento de los núcleos.** Está en función de la movilidad del sistema (viscosidad), la que disminuye al reducir la temperatura de fundición del material y a mayores presiones del polímero.

Por esto, para un polímero en particular existe un rango de temperaturas (ΔT), abajo del punto de reblandecimiento cristalino, en donde el grado de nucleación y la velocidad de crecimiento se combinan para dar un solo grado de cristalización. Esta ΔT aumenta a temperaturas mayores de reblandecimiento si el grado de nucleación incrementa, al incrementar la orientación molecular o con la misma presión existente de fusión, así como con el uso de agentes de nucleación. El grado de cristalización presente en una región está relacionado con el tiempo que el polímero necesita para alcanzar este rango de temperatura, el cual varía localmente con la presión de fundición y la velocidad de enfriamiento.

4.2.1 MICROESTRUCTURA DE LOS POLÍMEROS SEMICRISTALINOS POR EFECTO DEL FLUJO EN LA CAVIDAD.

Todas las características de la microestructura de los polímeros obtenidos por inyección son determinadas por el tipo y velocidad del flujo durante el llenado del molde, así como de la historia térmica durante la plastificación y las fases del enfriamiento. De este modo, el flujo fuerza impulsará al material desde el centro de la trayectoria hacia las superficies frías del molde, generando una capa fría. Próxima a esta capa se generan esfuerzos cortantes por la cercanía de las moléculas, las que tienen un apreciable alineamiento en la dirección del flujo, promoviendo orientación anisotrópica; la cual permanece en la pieza si la velocidad de enfriamiento es lo suficientemente rápida. Por esto las velocidades locales de enfriamiento y las presiones presentes durante la solidificación, promueven la relajación molecular del polímero e influyen en el grado de orientación. Así, más allá de la superficie de la cavidad, el material se impulsa a esfuerzos cortantes y velocidades locales de enfriamiento menores, disminuyendo la orientación al aproximarse al centro de la cavidad; por lo que se presenta diferentes morfologías cristalinas.

A medida que las velocidades de enfriamiento disminuyen como lo es en el centro del molde, se forman zonas cristalinas con crecimiento radial, resultando así las esferulitas, figura 4.6. El tamaño de éstas es inversamente proporcional a la velocidad de enfriamiento, presentando una textura cristalina más burda al interior.

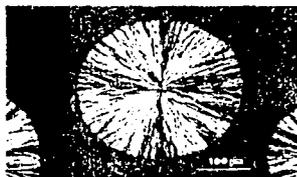


Figura 4.6 Esferulita en fase α , obtenida bajo condiciones isotérmicas de cristalización, a 115 °C

Para algunos polímeros varias formas de cristalización son factibles. Tal como, la fase beta que se puede presentar en el Polipropileno, la cual produce fragilidad; el fenómeno de transcristalinidad (nucleación alrededor de las fibras) aparece en termoplásticos semicristalinos reforzados con fibra de vidrio, como el mencionado anteriormente.

Para entender lo anterior en la figura 4.7 se ilustra el efecto del flujo del polímero en la formación de las capas de orientación de un termoplástico semicristalino. El espesor de las tres capas presentes (fría -zona cortante-centro) cambia a lo largo de la longitud de la cavidad por las variaciones en la orientación molecular y de la presión del polímero.

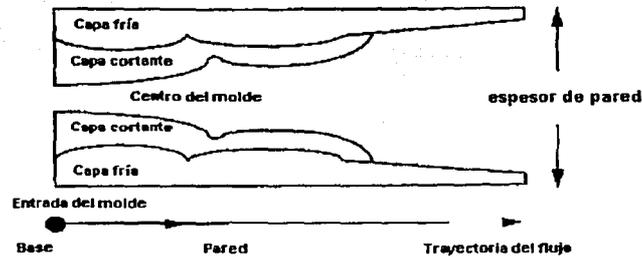


Figura 4.7 Cambios en el espesor de la estructura de 3 capas (fría-zona cortante-centro) de una pieza de PP como una función del recorrido del polímero desde la entrada a la cavidad.

La estructura de estas capas tiene un efecto relevante en las propiedades mecánicas del polímero inyectado. En probetas que se someten a pruebas de esfuerzo uniaxial, tal como tracción, flexión y de impacto, la orientación molecular de la capa fría juega un papel importante en el comportamiento mecánico. Así la rigidez y el esfuerzo serán mayores a lo largo de la línea del flujo; siendo dependiente del espesor de la capa fría también. Particularmente, una zona cortante compuesta de esferulitas en fase β nucleadas en fila provee pobre ductibilidad, por esto las fracturas usualmente inician en esta capa. En plásticos inyectados bajo condiciones de proceso que minimizan el desarrollo de la zona cortante (inyección rápida, temperatura de fundición mayor) presentan una mejor dureza. El origen de las grietas regularmente se da en los límites de las esferulitas, en el centro de la pieza; la resistencia a la fractura aumenta al reducir el tamaño de las esferulitas.

El comportamiento de la capa cortante se da por efecto del esfuerzo cortante en el enredo molecular. A una velocidad baja del cortante, el enredo impide el flujo, presentando una viscosidad alta. Mientras aumenta su velocidad, las cadenas moleculares comienzan a orientarse en la dirección del flujo polimérico, ocasionando el desenredo o disminución de la viscosidad. Las moléculas se orientan completamente en la dirección del flujo a velocidades muy altas, figura 4.8. En este punto, ya no es posible un enredo molecular estable, alcanzando la viscosidad su valor más bajo.

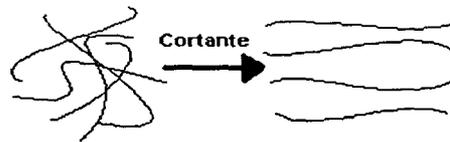


Figura 4.8 Vista idealizada del efecto del cortante en el enredo de las cadenas moleculares de un flujo polimérico fundido

Los mismos procesos que producen variaciones en la microestructura de los polímeros semicristalinos afectan el desarrollo de la estructura en materiales con multifases. Durante el llenado, el flujo fuente puede deformar las partículas de fase dispersa, formando estructuras en forma de fibrillas dentro de la capa fría del polímero. En algunos polímeros estas estructuras alargadas actúan como refuerzos que incrementan el esfuerzo y la rigidez. Sin embargo, en muchos polímeros endurecidos con partículas alargadas existe menor dureza que si se constituyeran de partículas esféricas, provocando una capa fría frágil con un centro más dúctil. En polímeros con una capa fría de mayor espesor (inyectados a bajas velocidades de llenado y a temperatura de molde/ fundición baja), se propicia la fractura en la

capa fría durante ensayos de flexión y fluencia, mientras que en la prueba de impacto, se produce la propagación de la fisura alrededor del perímetro de la pieza con un centro dúctil.

Este análisis sugiere que el grado de orientación final en el moldeo por inyección será principalmente determinada por las condiciones de proceso y con esto, los efectos en la orientación por inyección están dados por:

- **La temperatura de fusión:** la orientación disminuye con el incremento de la temperatura de fusión, su viscosidad se reduce, así como el cortante.
- **La temperatura del molde:** la orientación disminuye al aumentar la temperatura del molde. Esto se debe, principalmente, por el efecto de la relajación, relacionado con una menor transferencia de calor del material fundido.
- **La velocidad de inyección:** la orientación en la pieza disminuye con el aumento de la velocidad de inyección, donde la presencia de un flujo y un enfriamiento significantes ocurren simultáneamente en una inyección lenta.
- **Presión de sostenimiento:** la orientación aumenta con la presión y el tiempo de sostenimiento; los efectos pueden notarse cerca de la entrada al molde.

La distribución de la orientación a través del espesor de un molde en el instante en que es llenado puede darse por la superposición de la orientación por deformación longitudinal y por cortante, figura 4.9(a), aunque la orientación cortante inicial en la región del corazón (todavía fundido) se relaja hasta cierto punto antes que el material solidifique totalmente, figura 4.9(b). Por esto, el efecto combinado de la relajación y solidificación originará distintas zonas de orientación a lo largo del espesor, como se indica en la figura 4.9(b). Estas son las capas: fría, de cortante y al centro, respecto a las paredes del molde.

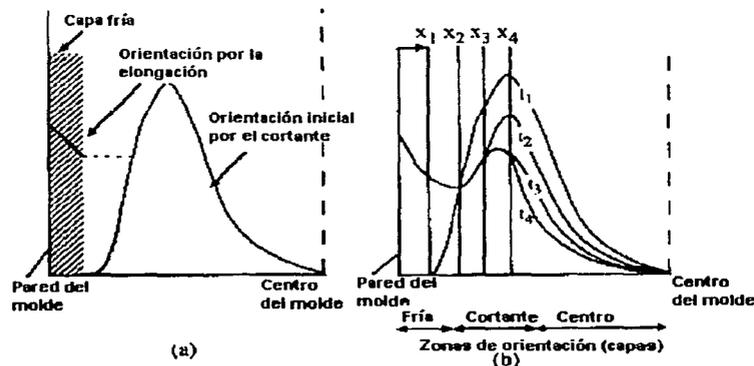


Figura 4.9 Representación esquemática de las distribuciones de la orientación a través del espesor de una pieza inyectada. a) Orientación por la elongación y cortante al instante en que es llenado, b) Cambios en la distribución durante el tiempo (X_i indica el espesor de la capa fría después del tiempo t_i), mostrando las tres zonas de orientación.

Además, se tienen distribuciones de orientación complejas en los moldes de inyección tanto a través de su espesor, como a lo largo del patrón del flujo en la cavidad. Estas distribuciones son generadas por la interacción de tres mecanismos principales: el flujo fuente y divergente descritos anteriormente, así como el empaquetamiento. Mientras el frente del polímero avanza dentro de la cavidad, la distribución del esfuerzo cortante varía de cero en el frente del flujo, en la boquilla, a un máximo en

la entrada del molde. Por esto, al momento de que el molde es llenado, el grado de orientación en un cierto punto es inversamente proporcional con la longitud del flujo (distancia medida desde la entrada hasta este punto) como se ejemplifica en la figura 4.10. La distribución final generada a lo largo de la trayectoria del flujo también es fuertemente influenciada por eventos durante la fase de empacamiento, en la cual material con viscosidad relativamente alta entra en la cavidad a alta presión. Como resultado de esto en la región de entrada del molde, frecuentemente se desarrolla una distribución de moléculas altamente orientadas.

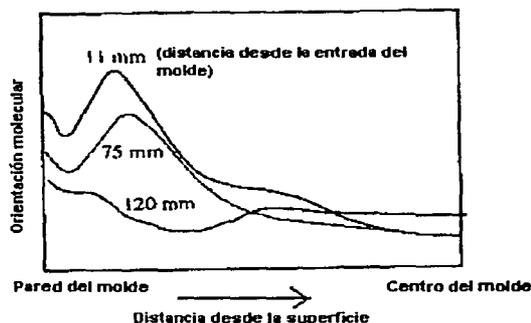


Figura 4.10 Distribución de la orientación a través de un plato de poliestireno inyectado desde la entrada (pared) al centro.

El grado de orientación molecular creado durante el proceso de inyección es dependiente de los esfuerzos generados, pero el nivel de orientación permanente en el molde variará con las velocidades locales de enfriamiento. El esfuerzo cortante generado en un flujo isotérmico en un canal (con espesor W y profundidad H) se determina por la ley de la energía en los fluidos, ecuación 4.8, resultando así:

$$\tau = m \left(\frac{6Q}{WH^2} \right)^n$$

. ecuación 4.8

donde

Q = flujo volumétrico

n = índice de la ley de la energía (ecuación 4.5, tabla 4.1)

m = consistencia (ecuación 4.5, tabla 4.1)

Esta ecuación muestra, que a mayores temperaturas de fusión se tendrá una menor m (consistencia, tabla 4.1, ecuación 4.5); lo que reducirá la orientación. La ecuación 4.8 también predice que a menor flujo volumétrico (Q) disminuye el grado de orientación, pero en este caso los efectos reológicos son opacados por las condiciones de temperatura no isotérmica. A una velocidad de flujo menor se origina un enfriamiento del polímero durante el llenado del molde, el cual impide la relajación molecular dando así altos niveles de orientación. En general, el incremento de la movilidad molecular por el aumento de las temperaturas del molde y del polímero fundido reducen la orientación. En la ecuación ya mencionada, se muestra como m es inversamente proporcional a n , ya que al aumentar n , que se incrementa con la temperatura, disminuirá m (tabla 4.1); lo que significa que el flujo polimérico se vuelve más newtoniano (menor cortante) al subir la temperatura.

| POLIMERO | TEMPERATURA (°C) | RANGO DE VELOCIDAD DEL CORTANTE (s ⁻¹) | m (N s ⁿ m ⁻²) | n |
|---------------|------------------|--|---------------------------------------|------|
| Polipropileno | 180 | 100-400 | 6.79 10 ³ | 0.37 |
| | 190 | 100-3500 | 4.89 10 ³ | 0.41 |
| | 200 | 100-4000 | 4.35 10 ³ | 0.42 |

Tabla 4.1 Parámetros de la ley de la energía para el polipropileno.

El aumento en la presión de inyección en el polímero decrementa la movilidad molecular, por esto con una menor presión y a tiempos más cortos de sostenimiento durante la fase de empacamiento disminuyen la orientación. Sin embargo, si se desea minimizar la orientación hay que manejar un cambio en ésta presión para obtener ciclos de moldeo rápidos, los cuales requieren el uso de mayores presiones y menores temperaturas.

El termino de **esfuerzos residuales** se usa para describir la presencia, durante el moldeo, de un estado de esfuerzos inducido durante la etapa de enfriamiento (no homogéneo). El estado local y la dirección del esfuerzo varía dentro del molde; la ocurrencia y magnitud de la componente deflectiva dependerán sobre todo de la geometría de la pieza, como resultado de la magnitud de la distribución de esfuerzos. Los esfuerzos internos no deben confundirse con orientación molecular; ni la orientación por el enfriamiento interno, esta debe ser clasificada como un tipo de esfuerzo, por lo que puede llamarse esfuerzo pasivo. En la contracción el esfuerzo se presenta si, por ejemplo, una muestra sin orientación alguna se calienta por arriba de la temperatura de fusión, provocando así una cierta orientación.

Struik¹ desarrolló un modelo simple para cuantificar el desarrollo de una distribución de esfuerzos residuales elásticos. En la figura 4.11 se supone un enfriamiento no homogéneo y se da en dos etapas. Cuando $t=t_1$, las superficies son enfriadas a la temperatura del medio (análogamente a las condiciones reales en la inyección) estando libre el polímero de contracción. Cuando el centro se enfría, $t=t_2$, la contracción térmica local se contrarresta por las capas externas ya rígidas; éste se encuentra en un estado de tensión, que se contrarresta por el estado de compresión existente en la capa fría.

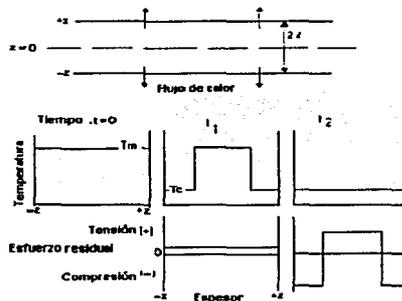


Figura 4.11 Modelo de enfriamiento desarrollado por Struik² para simular el desarrollo de esfuerzo residual en plásticos inyectados enfriados por ambas superficies. Note el gran esfuerzo de compresión en la superficie, equilibrado por la tensión hidrostática en el corazón.

Una pieza de geometría simple, enfriada homogéneamente por sus caras, puede presentar un perfil de esfuerzos casi parabólico, con el máximo esfuerzo de tensión en el plano medio, igual a la

¹ Struik, L.C.E.: Orientation Effects and Cooling Stresses in Amorphous Polymers; Polym.Eng. Sci.: 18: 1978; 799.

mitad del máximo esfuerzo de compresión en la misma superficie; la presión puede ser de 5 MN/m^2 , considerándose un esfuerzo mayor al de servicio.

La medición de la curvatura de una muestra es uno de los métodos más apropiados para generar perfiles cuantitativos de esfuerzos residuales en piezas obtenidas por inyección. Los perfiles típicos de esfuerzos residuales a lo largo del espesor de una pieza obtenidos por este método se presentan en la figura 4.12, para probetas de PC (policarbonato) obtenidas con diferentes condiciones de moldeo.

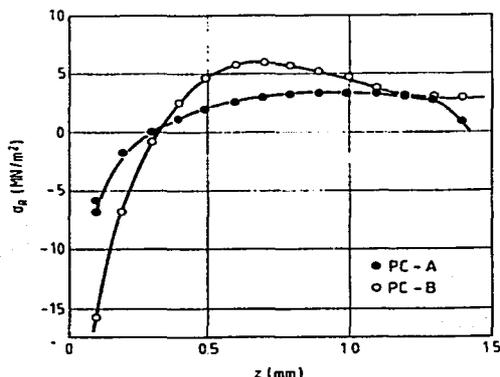


Figura 4.12 Esfuerzo residual (σ_R) como función de la profundidad de una muestra (z) para polycarbonato inyectado.

PC-A Temperatura de la mezcla 300°C ; temperatura del molde 115°C .

PC-B Temperatura de la mezcla 340°C ; temperatura del molde 75°C .

La magnitud del esfuerzo residual está relacionada con la velocidad de enfriamiento; lo que generalmente tiende a aumentar cuando la diferencia de temperaturas entre el polímero y el molde es muy grande.

En el encuentro de 2 frentes de flujos se presentan las líneas o zonas de unión con un cierto "enredo" molecular, las cuales inducen puntos de debilidad en la pieza, esto como resultado del:

- Flujo alrededor de un obstáculo. Aquí el frente de flujo se encuentra de frente.
- Flujo de polímero a través de dos o más entradas hacia la cavidad. Frecuentemente se requieren entradas múltiples con secciones delgadas en moldes de grandes áreas con muchos patrones de flujos (canales de alimentación) para un solo punto de alimentación, donde los frentes de flujo pueden chocar de frente.
- Flujo preferentemente a lo largo de secciones gruesas o restricción de flujo a través de una sección delgada.
- "Chorro" durante el flujo inicial a la entrada del polímero.

La figura 4.13(a) muestra la formación de una línea de unión de material orientado perpendicularmente a la dirección del flujo, resultado de la deformación de las moléculas en el frente de flujo. El esfuerzo en la región de unión ya sólida será entonces dependiente de los grados relativos de relajación molecular y solidificación molecular, además del grado de enredo molecular existente antes de la solidificación. Una línea de unión sana se puede dar por efecto de las altas temperaturas del polímero y del molde, las cuales mejoran la movilidad molecular y la interdifusión. Sin embargo las

altas velocidades de solidificación que se presentan en las paredes del molde provocan la formación de uniones débiles en esta región. Estos enlaces débiles actúan como fisuras superficiales, reduciendo significativamente el esfuerzo en una pieza inyectada. La disminución de las propiedades mecánicas en la línea de unión es más perceptible en materiales con cargas minerales o con fibras porque la ausencia de refuerzos sirve de unión en la interfase. En este caso la discontinuidad en la estructura no se afecta por la relajación molecular.

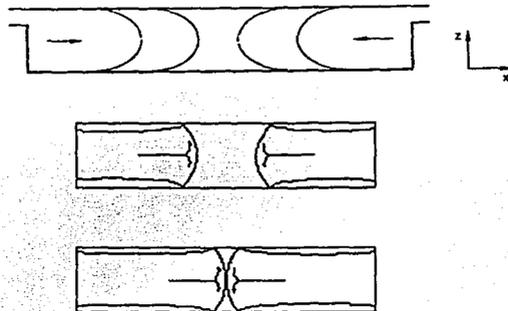
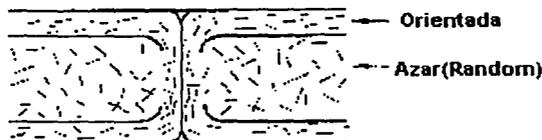


Figura 4.13 (a) Orientación molecular transversal en una resina no reforzada.



(b)La orientación transversal de las fibras cortas se da en el plano de contacto de los frentes de flujo.
Figura 4.13 Formación y dirección de la orientación en las líneas de unión internas en plásticos inyectados.

En la figura 4.13(b), se observan los frentes de flujos convexos que se mueven desde los extremos de la cavidad. En la región donde las corrientes chocan, el plano de unión inicia cerca del eje del molde y crece hacia las paredes de la cavidad. Localmente el polímero se expande perpendicularmente a la dirección del flujo, ya que la difusión molecular a través de la interfase desaparece mientras que se produce la orientación transversal. Por tanto, es probable encapsular aire en la interfase del plano de unión, lo que es una causa de fragilidad en los plásticos. Dado lo anterior, es indispensable tener en cuenta que una línea de unión es indeseable.

Los requerimientos de presión para el llenado de la cavidad son complejos, ya que son dependientes de la geometría del patrón del flujo (sistema de alimentación y cavidad) y de las características de viscosidad del polímero fundido (la viscosidad esta en función del cortante, temperatura y presión). Por esto, tanto el cortante como los gradientes de temperatura que aumentan a lo largo del espesor y longitud de la cavidad complican cualquier análisis. Una complicación posterior se presenta por el enfriamiento de la región donde el polímero está en contacto con las paredes frías, lo que provoca una variación en la forma del enfriamiento en la cavidad durante el llenado. Al pasar el

flujo fuente por una cavidad fría, el polímero se enfría con mayor velocidad en la zona próxima a la pared del molde, formando la capa fría, como se muestra en la figura 4.3, la cual incrementa su espesor durante el llenado.

Así, el mismo proceso que genera la orientación molecular en materiales sin cargas también induce una orientación compleja de la fibra durante la inyección de termoplásticos reforzados, la diferencia obvia es que la orientación de la fibra no se afecta por la relajación molecular (recuperación de la orientación original, ya que las moléculas del polímero regresan a sus estados de equilibrio). La efectividad del refuerzo de fibra corta es muy sensible a la orientación, pues se afecta por la geometría y lugar de la entrada, así como del patrón del flujo. Por esto hay que tener mucho cuidado durante el diseño de la pieza y molde para asegurar un mejor llenado.

La **contracción y distorsión** se presentan en los termoplásticos por tener altos coeficientes de expansión térmica ya que los esfuerzos de enlaces secundarios entre segmentos de cadenas moleculares adyacentes son sensibles a la temperatura. Los plásticos semicristalinos son vulnerables a la contracción térmica por la difusión tan grande entre las fases sólida (cristalina) y líquida. Por esto las piezas inyectadas sufren contracciones significantes durante la fase de enfriamiento, estas se definen como el cociente del volumen específico de la pieza (a presión y temperatura ambiental) y el volumen total de la cavidad (a temperatura y presión bajo condiciones atmosféricas).

Si el grado de contracción pudiera predecirse, sería fácil diseñar piezas de precisión cuya geometría pudiera prevenir esto, aunque se pueden tomar en cuenta algunos factores que propician la contracción, tales como:

- **Orientación**, el proceso de inyección ocasiona alta orientación molecular por lo que la orientación será anisotrópica (por el alineamiento de las cadenas), ya que las cadenas alineadas se contraen sobre todo en la dirección de la orientación. La contracción anisotrópica provoca distorsión al enfriarse la pieza. Una forma muy común de distorsión asociada con el plano interno de contracción es el alabeo; el que se ve frecuentemente en áreas largas, piezas de paredes delgadas, entradas tales que la orientación no sea simétrica o predominantemente uniaxial.
- **Espesor de la pieza**: La deflexión total en una región es dependiente del espesor de la sección. La deformación superficial se presenta con más frecuencia en secciones de mayor espesor, o en zonas sobre costillas y en filetes internos.

4.3 ESTRUCTURA DEL POLIPROPILENO (PP) COMO RESULTADO DEL PROCESO DE INYECCIÓN.

El Polipropileno presenta una relación estrecha entre su estructura y su proceso de inyección. Este material, como se ha mencionado, puede presentar diferentes fases de cristalización (regularmente las fases α y β), en forma de esferulitas. El grado máximo de cristalización de la fase α se presenta a mayores temperaturas que la fase β . De este modo, se muestra la variación de la microestructura a lo ancho de una muestra de PP inyectado, obtenido por efectos combinados de temperatura, presión y orientación molecular, vista en la micrografía óptica de la figura 4.14(a).

Durante el proceso de inyección del Polipropileno, las fases del ciclo se pueden redefinir en términos de su estructura como:

1. **LLENADO.** Durante esta etapa la presión es relativamente baja y la temperatura de fusión está por arriba de la de cristalización, excepto en la vecindad de las paredes del molde donde se forma la capa fría. Esta capa está compuesta de moléculas altamente orientadas (como resultado del esfuerzo del flujo fuente) las cuales cristalizan con poca o sin relajación molecular; donde su espesor aumenta a velocidades de enfriamiento más altas (temperaturas de fusión y/o de molde menores) y a velocidades de llenado menores. En polímeros orientados, la nucleación se puede presentar a lo largo la línea de flujo (nucleación en fila), donde los cristales nuclean centralmente y crecen transversalmente al campo de esfuerzos. La capa fría altamente orientada del polipropileno inyectado se compone de cristales "shish-kebab"² figura 4.14(b). Durante el llenado de la cavidad la orientación puede presentarse por el cortante y por deformación longitudinal, como se muestra en la figura 4.14(a).



Figura 4.14(a)

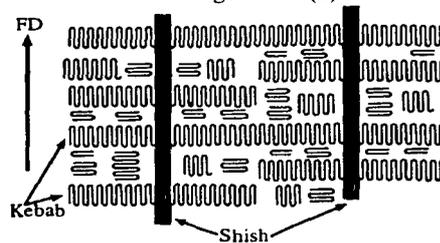


Figura 4.14 (b)

Figura 4.14 Muestra de Polipropileno inyectado a) micrografía óptica, b) Estructura de la capa fría altamente orientada

2. **EMPACAMIENTO.** Al solidificar, un frente de cristalización se traslada a través del espesor del molde hacia el centro, variando sus condiciones locales de temperatura, de orientación molecular y presión. Por ejemplo, un incremento súbito en la presión de la cavidad durante el empacamiento provoca un aumento de ΔT (rango de temperatura donde el grado de cristalización sería relevante). Además, si existe un aumento repentino de la presión se

² Crecimiento cristalino transversal a la dirección del flujo.

producirá un efecto similar al templado; al desplazarse el frente de cristalización al centro, se deja una capa con baja cristalinidad. Por esto el desarrollo de la estructura durante la fase de empacamiento depende de la velocidad de enfriamiento, de la presión de inyección y en la cavidad, una vez que el llenado se completó, la velocidad del polímero disminuye. Si la presión interna permanece baja, o si las velocidades de enfriamiento son bajas, comienza la relajación de la orientación molecular hasta que la temperatura cae lo suficiente para comenzar la cristalización. Las esferulitas en fase α en el PP predominan si el enfriamiento es lento y si las presiones son bajas; mientras tanto, si existe un rápido desarrollo de la presión de empacamiento, o si las velocidades de enfriamiento son mayores, se presentará relajación molecular antes de cristalizar, condiciones que favorecen la formación de esferulitas en fila en fase β en el PP.

3. **ENFRIAMIENTO.** La velocidad del frente de cristalización disminuye a medida que se aproxima al centro del flujo en el molde. Las velocidades de enfriamiento internas del polímero son bajas en el centro solidificando con poca o sin orientación, una vez que la presión en la cavidad comienza a disminuir cuando en la entrada el fluido se ha enfriado, por lo que la cristalización se da bajo condiciones de reposo presentando esferulitas con fase α en el PP a una velocidad de enfriamiento menor que provoca un incremento en el tamaño de las esferulitas ya presentes.

4.3.1 ORIENTACIÓN DE LAS FIBRAS EN LOS POLÍMEROS REFORZADOS INYECTADOS.

Una orientación compleja de las fibras se genera en polímeros inyectados reforzados con fibras. En común con la variación de la microestructura en polímeros sin cargas, la distribución de la orientación de las fibras se encuentra así en la capa fría, la cortante y la interna; aquí la orientación de las fibras no se afecta por la relajación molecular y se ilustran en la figura 4.15, son:

- **La capa fría** tiene orientación al azar de la fibra planar, como resultado del flujo fuente expandido radialmente.
- **La capa cortante**, presenta altos esfuerzos generados cerca de la capa fría durante el flujo cortante provocan una orientación radial de las fibras, paralela al flujo.
- **La capa interna o centro**, presenta fibras orientadas en dirección circunferencial, perpendicular al flujo. Esta orientación se da por el deslizamiento del flujo en un molde de disco, donde la componente tangencial del frente es 2π mayor que la componente radial.

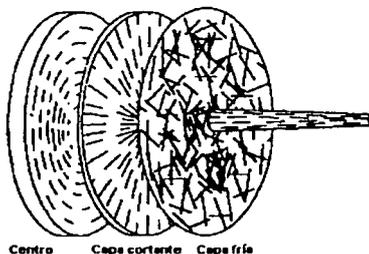


Figura 4.15 Orientación de la fibra en una pieza inyectada en un molde de disco con entrada central.

La efectividad del refuerzo de fibra corta es sensible a la orientación, por esto hay diferencias importantes en las propiedades mecánicas las que se dan por la distribución de la fibra y del espesor de la estructura en las capas. Durante el proceso, una velocidad de inyección lenta y un enfriamiento rápido tienden a incrementar el espesor de la capa fría; el comportamiento del flujo de la matriz polimérica tiene un efecto en el desarrollo de la capa cortante y del centro. El aumento en la pseudoplasticidad del material fundido genera un perfil de velocidad más plano, con una región cortante más estrecha, mientras que la capa cortante es más delgada y el centro con mayor espesor que aquellos formados en una matriz polimérica con un comportamiento newtoniano.

En este caso, también las **líneas de unión** son puntos de debilidad en un polímero reforzado inyectado. Estas se forman de material orientado perpendicular a la dirección del flujo, como resultado de la elongación del frente de flujo por el flujo fuente. El esfuerzo de la región de unión ya sólida es dependiente del grado de enredo previo a la solidificación por las altas temperaturas de fusión y del molde, que mejoran la movilidad e interdifusión molecular. La reducción de las propiedades mecánicas en la línea de unión se acentúa con refuerzos minerales o fibras orientadas perpendicularmente a la dirección del flujo, que no sirven de enlace entre las interfases.

Las altas velocidades de solidificación en las paredes del molde provocan la formación de enlaces de unión débiles en estas regiones. Estos enlaces débiles actúan como iniciadores de fisuras superficiales, disminuyendo los esfuerzos en una pieza inyectada. El esfuerzo de una unión está en función de la interdifusión molecular de los dos frentes de flujo. Así, una unión puede considerarse completa cuando las moléculas se han propagado.

4.3.2 ORIENTACIÓN DE LOS POLÍMEROS INYECTADOS CARGADOS CON PARTÍCULAS.

Los factores más relevantes que influyen en las propiedades de los compuestos de polipropileno cargados con partículas en base a su estructura y que deben controlarse para obtener productos de calidad, son el agregado, la distribución de la composición en el compuesto y la orientación de las partículas.

La interacción de las partículas es uno de los principales temas de interés durante la preparación y procesamiento de un compuesto cargado con partículas de polipropileno. Las interacciones entre las partículas ocasiona una distribución no homogénea de la carga, problemas en el proceso, apariencia pobre y malas propiedades. De este modo, se ve que los principales factores que influyen la tendencia en el agregado, son el tamaño de la partícula y la energía superficial libre. Por lo que al incrementar el tamaño de partícula y el contenido de la carga, disminuye su resistencia.

El efecto más importante de agregar cargas particuladas es por su habilidad de funcionar como agentes nucleantes en el polipropileno, lo que modifica su estructura cristalina. Un efecto importante es el fenómeno de transcristalización, presente en las cargas de partículas anisotrópicas como el talco (forma planar), donde se pueden formar en muchos casos las esferulitas con crecimiento epitaxial (alrededor de la superficie de las partículas de talco) sobre su superficie. La transcristalización se inicia por la orientación de moléculas poliméricas, inducidas por el cortante. Las propiedades de este fenómeno difieren según la fase de las esferulitas presentes, ya que poseen mayor rigidez y baja deformabilidad, lo cual lleva a que se presente fácilmente una grieta y su propagación. La orientación de las cargas es inducida por una distribución mayor en fase transcristalina dentro del compuesto y en un cambio en sus propiedades mecánicas.

Un fenómeno estructural inducido por el proceso de inyección es la orientación anisotrópica de las partículas de talco. Este fenómeno y la estructura resultante son similares a la forma en la que se presenta en los compuestos reforzados con fibras. La orientación y distribución en las propiedades de partículas anisotrópicas es determinada por el flujo presente y los esfuerzos cortantes desarrollados durante el proceso de inyección, donde las condiciones de compresión en el molde inducen una orientación evidente. Así, la orientación local de las cargas particuladas planares de talco está determinada por la dirección del flujo local y las condiciones de los cortantes, donde se observa una orientación paralela cerca de las paredes de la cavidad figura 4.16, mientras una distribución más aleatoria en el centro de la pieza; dando como resultado un incremento del esfuerzo, un módulo elástico más grande y mayor resistencia al impacto.

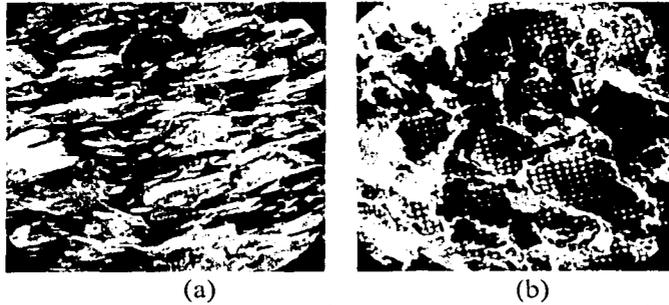


Figura 4.16 Orientación de las partículas de talco como agregado en una matriz de Polipropileno. Contenido de carga: 10% (a) partículas orientadas en la dirección del flujo, (b) partículas no orientadas.

Dado lo mencionado en los capítulos anteriores, para este trabajo se estudia la influencia de la presión y velocidad de inyección en el comportamiento mecánico del PP homopolímero natural, PP-30% talco y PP-30% fibra de vidrio; con el objetivo de mejorar mediante el proceso de inyección las propiedades mecánicas del polímero para piezas de pared delgada y pared gruesa, mostrando el efecto de los refuerzos particulados planares y fibrados sobre los parámetros de inyección ya mencionados.

Al comenzar el desarrollo del presente trabajo, se adquirieron polímeros de diferentes proveedores y se observó que las piezas inyectadas de espesor de pared de 3.2 mm (pared gruesa) presentaban burbujas en su interior, lo que por apariencia y según la teoría es un defecto que afecta a las propiedades mecánicas del material; estas piezas se formaron en un molde multicavidades (ASTM 647-88.a) para probetas de ensayos de tracción según la norma ASTM D638-99. Por ello, se seleccionó posteriormente un polipropileno de alta fluidez que mejoró el flujo del polímero.

La compañía CELANESE MEXICANA proporcionó el material bajo el nombre de Procel; el cual se encontró en forma de pellets ya premezclados con la cantidad de carga y refuerzo mostrados en la tabla 5.1.

| <i>Materia Prima</i> | <i>Marca</i> | <i>Agregado</i> | <i>% de agregado</i> | <i>Características</i> |
|-------------------------|--------------|----------------------|----------------------|---|
| PP homopolímero natural | Procel 100F | Homopolímero natural | 0 | Polipropileno homopolímero natural sin color de alta fluidez. |
| PP-30% Talco | Procel 300F | Talco | 30 | Polipropileno homopolímero de color negro, con carga semiesférica de talco. |
| PP-30% Fibra de vidrio | Procel 200F | Fibra de vidrio | 30 | Polipropileno homopolímero con refuerzo de la fibra de vidrio, sin color. |

Tabla 5.1 Características generales de la materia prima.

Las pruebas para ensayos de tracción en los polímeros se rigen bajo diferentes normas según el espesor de la probeta empleada, es decir, las normas existentes son la ASTM D638-99 para espesores de pared mayores a la unidad milimétrica (pared gruesa) y la D882-97 para espesores de pared menores a 1 mm (pared delgada). Por ello, se utilizó para las probetas de pared gruesa un molde multicavidades (ASTM 647-88.A), rigiéndose la probeta de tracción bajo la norma D638-99, y para las muestras de pared delgada, se uso un molde para inyección de vasos de 60 ml (9 gr.).

5.1 OBTENCIÓN DE MUESTRAS MEDIANTE EL PROCESO DE INYECCIÓN DE PLÁSTICOS PARA POLIPROPILENO NATURAL, REFORZADO CON FIBRA DE VIDRIO Y CON CARGAS DE TALCO.

El estudio de las características de los materiales antes señalados está estrechamente relacionado, como ya se mencionó, con los parámetros de inyección, es decir: Temperatura de cilindro y de la masa, Temperatura del molde, Velocidad de inyección, Tiempo de presión posterior, Revoluciones del husillo, Contrapresión, Descompresión, Temperatura de la zona de alimentación del cilindro, Tiempo de enfriamiento y Tiempo de ciclo. Sin embargo, en este trabajo solo se varió la presión de inyección y velocidad de inyección, tomando como fundamento la justificación expuesta en el capítulo 3.

Durante el proceso, se observó como la presión de inyección se incrementó gradualmente hasta alcanzar una "presión máxima" (determinada según el tipo del molde y las características del material a inyectar), después de la cual se presenta un decremento en la misma hasta alcanzar una presión, ahora llamada "presión de sostenimiento o presión posterior" y que permanece constante hasta finalizar el ciclo de inyección. Durante un cierto tiempo se mantiene la presión de sostenimiento denominándose *tiempo de sostenimiento o de presión posterior*, el cual compensa la contracción del volumen causada por el enfriamiento del material en la cavidad. El tiempo de sostenimiento será relevante hasta que el punto de inyección se enfríe o solidifique.

Para este estudio se utilizó la máquina para inyección de plásticos ERGOtech pro EE50/270, la cual se describió anteriormente, utilizando los moldes mencionados en el capítulo 3.

5.1.1 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE INYECCIÓN PARA MUESTRAS DE PARED GRUESA.

El ciclo de inyección en la máquina utilizada comienza con el cierre del molde, posteriormente la unidad de inyección se mueve hasta que la boquilla se coloca en su posición de apoyo sobre el molde, inmediatamente se realiza la inyección a las condiciones de tiempo, velocidad y presión de inyección predeterminadas, una vez inyectado el material dentro del molde y antes de su llenado total entra la presión de sostenimiento para terminar de rellenar la pieza dentro de molde, posteriormente se pasa al tiempo de enfriamiento en donde también se realiza la dosificación y plastificación del material, el ciclo termina con la apertura del molde y con la expulsión de la pieza inyectada por medio de los expulsores.

Para el ajuste de la máquina, según el manual de usuario, se debe variar un parámetro a la vez y observar el resultado en la pieza obtenida, al menos durante 5 ciclos en promedio. Solo de esta forma se puede determinar si las variaciones originaron una mejora en la calidad del artículo, siendo este un parámetro de medición cualitativo.

Al iniciar el proceso de ajuste del ciclo de inyección del **polipropileno homopolímero natural**, se manejaron temperaturas en el cilindro constantes, de 60°C en la zona de alimentación y de 260°C en la zona de boquilla, además de que la temperatura del molde se controló entre los 14°C y 22°C, por medio de un enfriador. Las revoluciones del husillo se mantuvieron constantes para todo el proceso en 150 rev/min; en este caso la contrapresión (presión que se aplica durante la dosificación para ayudar a la presión de sostenimiento) no es necesaria por ser el polipropileno homopolímero un material muy versátil y fácil de procesar, por lo mismo el uso de la descompresión (cuando el cañón se retira una cierta distancia del molde para permitir el escape de gases) no es necesaria. El tiempo de ciclo fue de 50 seg (tiempo máximo), dado que los dispositivos de seguridad de la máquina podrían interrumpir el proceso utilizando un menor tiempo.

La variación de presión de inyección comenzó a los 200 bares, a velocidades de inyección de 60 mm/s, 80 mm/s y 110 mm/s, se incrementó la misma hasta lograr el llenado del molde, para posteriormente ajustar la presión de sostenimiento. Con el fin de observar el comportamiento del llenado de las cavidades, tabla 5.2 se detallan las observaciones realizadas a diferentes presiones de inyección.

| <i>Presión de inyección predeterminada por el operador (Bar)</i> | <i>Velocidad de inyección (mm/s)</i> | <i>Observaciones.</i> |
|--|--------------------------------------|--|
| 200 | 60 – 80 – 110 | Llenado escaso de las cavidades |
| 300 | 60 – 80 – 110 | Llenado parcial del molde; al 50% en volumen. |
| 400 | 60 – 80 – 110 | El molde llena en un 70%; comienza a notarse una disminución por debajo de los 290 bar en la presión de inyección ajustada por la máquina. |
| 500 | 60 – 80 – 110 | Las cavidades se llenan al 80%; sigue presentándose la disminución por debajo de 290 bar en la presión de inyección ajustada por la máquina. |
| 600 | 60 – 80 – 110 | El molde se llena, casi en su totalidad. Se registra una disminución de la presión de inyección ajustada por la máquina por debajo de 300 bar. |
| 700 | 60 – 80 – 110 | Las cavidades se llenan casi en su totalidad en todos los intervalos de velocidad y se ajusta la presión posterior a 100 bar, pero existe un descenso en la presión de inyección registrada por la máquina por debajo de 300 bar a velocidades de 60 y 80 mm/s, pero a 110 mm/s se presentó un incremento de presión de inyección ajustada por la máquina entre los 300 y 330 bar. |
| 800 | 60 – 80 – 110 | El molde se llena en su totalidad con la presión de sostenimiento ya establecida, aunque sigue presentándose la disminución de presión de inyección ajustada de máquina por debajo de los 300 bar a velocidades de 60 y 80 mm/s; sin embargo a una velocidad de inyección de 110 mm/s se presentó un incremento de presión de inyección ajustada entre los 300 y 330 bares. |
| 900 | 60 – 80 – 110 | |
| 1000 | 60 – 80 – 110 | |
| 1100 | 60 – 80 – 110 | |
| 1200 | 60 – 80 – 110 | A partir de estas presiones solo se hicieron las variaciones para corroborar que se presenta el mismo patrón que en los anteriores. |
| 1400 | 60 – 80 – 110 | |
| 1500 | 60 – 80 – 110 | |
| 1800 | 60 – 80 – 110 | |

Tabla 5.2 Desarrollo del proceso de inyección para probetas de pared gruesa de polipropileno homopolímero natural.

Al incrementar la presión de inyección, a las velocidades establecidas, las piezas no llenaban por completo, aún ocupando una presión de sostenimiento mucho mayor de 100 bares. Posteriormente, al incrementar la presión hasta los 700 bares comenzó el llenado total de la pieza y el ajuste de la presión de sostenimiento, para mantenerse en 100 bares. El hecho más relevante fue la caída de presión de inyección que registra la máquina, a pesar de indicar en el panel de control (IBED) una presión de inyección superior (700 – 1800 bar) no se pudo controlar ésta durante el llenado, disminuyendo a valores menores de 350 bares. Aunque propusimos altas presiones de inyección tales como 1200 bares, 1400 bares 1500 bares y 1800 bares y de las variaciones de velocidad de inyección, no se observó cambio alguno en las condiciones ya descritas en la tabla 5.2.

Una vez realizado la inyección con el homopolímero natural, se procedió a inyectar el **PP-30% Talco**. Se manejaron las temperaturas en el cilindro constantes para todo el proceso de ajuste del ciclo de inyección, de 60°C en la zona de alimentación y de 240°C en la zona de la boquilla. La temperatura del molde se controló en un intervalo entre los 14°C y 22°C, por medio de un enfriador. Las revoluciones del husillo se mantuvieron constantes a 150 rev/min; en este caso tampoco la contrapresión no fue necesaria, así como el uso de descompresión. El tiempo de ciclo se mantuvo en 50 seg. Los parámetros a variar fueron los mismos que para el polipropileno homopolímero.

En la tabla 5.3, se muestran las variaciones de presión en los intervalos de velocidad, además de las observaciones durante el proceso.

| <i>Presión de inyección predeterminada por el operador (Bar)</i> | <i>Velocidad de inyección (mm/s)</i> | <i>Observaciones.</i> |
|--|--------------------------------------|---|
| 200 | 60 – 80 – 110 | Llenado parcial del molde; al 50 % en volumen. |
| 300 | 60 – 80 – 110 | |
| 400 | 60 – 80 – 110 | Llenado parcial del molde; al 75%. Se presentó una disminución por debajo de los 350 bares en la presión de inyección ajustada por la máquina. |
| 500 | 60 – 80 – 110 | Las cavidades se llenan casi en su totalidad y continua presentándose la misma caída de presión de inyección ajustada por la máquina . |
| 600 | 60 – 80 – 110 | El molde llena casi en su totalidad en todos los intervalos de velocidad y se ajusta la presión posterior a 100 bar, pero existe un descenso en la presión de inyección registrada por la maquina por debajo de los 340 bar a velocidades de 60 y 80 mm/s, pero a 110 mm/s se presentó un incremento de presión de inyección ajustada por la máquina entre los 370 y 390 bar. |
| 700 | 60 – 80 – 110 | El molde se llena en su totalidad con la presión de sostenimiento ya fija, 100 bares, aunque sigue presentándose la misma disminución de presión de inyección. |
| 800 | 60 – 80 – 110 | |
| 900 | 60 – 80 – 110 | |
| 1000 | 60 – 80 – 110 | |
| 1100 | 60 – 80 – 110 | Se presentaron condiciones similares a la anterior. A partir de esta presión de inyección ya no se realizaron pruebas a mayores presiones. |

Tabla 5.3 Desarrollo del proceso de inyección para probetas de pared gruesa de PP-30% Talco.

Durante el llenado del molde, ajustamos la presión de inyección a 600 bares, ya que por debajo de ésta se presentaron condiciones de llenado deficiente. La caída de presión de inyección es notoria, como lo fue con el polipropileno homopolímero natural, colocándose a valores menores de 340 bares y con velocidades de 60 y 80 mm/s; pero a una velocidad máxima de 110 mm/s y una presión propuesta de 600 bares, la presión registrada se incrementó hasta 390 bares. Para este bloque de pruebas no se utilizaron valores de presión de inyección propuestas superiores a 1100 bares, dado que el comportamiento en la caída de presión registrada por la máquina fue similar al del material anterior.

Posteriormente se inyectó **PP-30% Fibra de vidrio**. Para este material manejamos temperaturas del cilindro constantes menores a los otros materiales, siendo de 60°C en la zona de alimentación y de 200°C en la zona de boquilla para evitar la degradación del material dentro del cilindro plastificador. La temperatura del molde se controló entre los 14°C y 22°C, por medio de un enfriador. Las revoluciones del husillo fueron constantes para todo el proceso, en 150 rev/min, en este caso la contrapresión no fue necesaria, así como el uso de descompresión, dadas las características del material. El tiempo de ciclo se mantuvo en 50 seg. Los parámetros a variar fueron los mismos que para el PP homopolímero natural.

En la tabla 5.4, se muestran las variaciones de presión en los intervalos de velocidad, además de su correspondiente observación durante el proceso.

| <i>Presión de inyección predeterminada por el operador (Bar)</i> | <i>Velocidad de inyección (mm/s)</i> | <i>Observaciones.</i> |
|--|--------------------------------------|---|
| 200 | 60 - 80 - 110 | Llenado parcial del molde. Al 50% en volumen y se mostraron variaciones en la presión de inyección ajustada por la máquina. |
| 300 | 60 - 80 - 110 | Llenado parcial, al 50%, mostrándose un aumento en la presión de inyección ajustada por la máquina |
| 400 | 60 - 80 - 110 | Llenado parcial, al 75% presentándose una disminución por debajo de 340 bares en la presión de inyección ajustada por la máquina. |
| 500 | 60 - 80 - 110 | |
| 600 | 60 - 80 - 110 | El molde llena casi en su totalidad y se presentó una disminución por debajo de 330 bares en la presión de inyección ajustada por la máquina. |
| 700 | 60 - 80 - 110 | El molde llena casi en su totalidad en todos los intervalos de velocidad y se ajustó la presión posterior a 100 bares, pero existe un descenso en la presión de inyección registrada por la máquina por debajo de 300 bares a velocidades de 60 mm/s, de 330 bares a velocidad de 80 mm/s, pero a 110 mm/s se presentó un incremento de presión de inyección ajustada por la máquina entre los 360 y 385 bares. |
| 800 | 60 - 80 - 110 | |
| 900 | 60 - 80 - 110 | La pieza llena en su totalidad con la presión de sostenimiento fija y se presentó una disminución por debajo de 310 bares en la presión de inyección ajustada por la máquina, para todas las velocidades. |
| 1000 | 60 - 80 - 110 | |
| 1100 | 60 - 80 - 110 | Se presentaron condiciones similares, por lo que a partir de esta presión de inyección ya no se siguieron realizando inyecciones a mayores presiones. |

Tabla 5.4 Desarrollo del proceso de inyección para probetas de pared gruesa de PP-30% Fibra de vidrio.

Durante el proceso se presentó un llenado parcial mayor al 75% de las piezas a partir de los 400 bares de presión de inyección predeterminada por nosotros, ajustándose una presión de inyección registrada por la máquina por debajo de 340 bares. Al incrementar la presión de inyección hasta un valor de 700 bares las cavidades se llenaban casi en su totalidad para proceder al ajuste de la presión de sostenimiento a 100 bares, aunque con estos incrementos y el ajuste de la presión de sostenimiento se presentó una disminución en la presión registrada por la máquina entre los 300 y 385 bares. A presiones mayores el comportamiento fue similar y la disminución de la presión se mantuvo entre 295 y 310 bares. No se realizaron inyecciones a presiones superiores a los 1100 bares por tener las mismas características del proceso.

La caída de presión presente en el proceso de inyección de las piezas de pared gruesa fue determinante en el comportamiento del mismo. Donde este inconveniente puede determinar el comportamiento de las propiedades mecánicas del polímero.

5.1.2 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE INYECCIÓN PARA MUESTRAS DE PARED DELGADA.

El procedimiento para obtener los parámetros del ciclo de inyección para las probetas de pared delgada fue similar al que se realizó con las muestras de pared gruesa, aunque en este molde se utilizó una boquilla más larga. El uso de ésta ocasionó problemas con el flujo a la salida, ya que su longitud permitía que el material fundido se comenzara a solidificar y formara un tapón a la salida, impidiendo la salida del flujo plástico, por lo que las temperaturas a la salida de la boquilla fueron más altas que las recomendadas por la literatura. Al igual que en los procesos anteriores, los parámetros de inyección fueron los mismos ya que se utilizó la misma máquina de inyección y el mismo material.

En el proceso de ajuste del ciclo de inyección del **Polipropileno homopolímero natural**, se manejaron temperaturas constantes en el cilindro, de 60°C en la zona de alimentación y de 280°C en la zona de la boquilla. La temperatura del molde se controló en un intervalo entre 20°C y 35°C; este aumento en la temperatura del molde se debe a que es un ciclo muy corto por pieza. Las revoluciones del husillo se mantuvieron constantes para todo el proceso, a 150 rev/min. La contrapresión no fue necesaria por ser el polipropileno homopolímero un material muy versátil y fácil de procesar; por esta misma razón el uso de la descompresión no es necesaria, como se mencionó. El tiempo de ciclo real fue de 9 segundos por pieza, pero se mantuvo en 50 segundos para evitar que por algún motivo el ciclo sobrepase este tiempo y se interrumpa el proceso.

Al determinar los parámetros que se mantendrían constantes durante el ciclo, tal como la velocidad y la presión de inyección, se procedió a variarlos para determinar donde se estabiliza el ciclo. Cabe mencionar que para este molde por ser para probetas de pared delgada (inferior a 1 mm de espesor), las presiones de inyección estimadas por la teoría y la experiencia deberían ser superiores a 1000 bares para un proceso óptimo, así como una presión de sostenimiento mayor a 500 bares, con velocidades altas; utilizando estas condiciones para todos los materiales.

Se comenzó inyectando en el molde de pared delgada con una presión de 700 bares y a una velocidad de inyección inicial de 60 mm/s. De este modo, se incremento la presión de inyección predeterminada por nosotros a velocidades de inyección de 80 y 110 mm/s hasta lograr el llenado del molde, para luego ajustar la presión de sostenimiento. Los valores anteriores se tomaron en consideración para mantener el ciclo constante, ya que con estas condiciones la cavidad se llenaba; dado que a presiones inferiores a 700 bares el molde no completaba su llenado y se interrumpía el ciclo, pues era necesario retirar las piezas manualmente.

En la tabla 5.5, se observan las variaciones de presión en los intervalos de velocidad de inyección, además de las observaciones realizadas durante el proceso.

| <i>Presión de inyección predeterminada por el operador (Bar)</i> | <i>Velocidad de inyección (mm/s)</i> | <i>Observaciones.</i> |
|--|--------------------------------------|---|
| 700 | 60 – 80 – 110 | La cavidad llena parcialmente y hay un incremento en la presión registrada por encima de los 800 bares en las diferentes velocidades.. |
| 800 | 60 – 80 – 110 | La cavidad llena parcialmente y hay un incremento en la presión registrada entre 890 y 940 bares, a las diferentes velocidades. |
| 900 | 60 – 80 – 110 | La cavidad llena parcialmente y hay un incremento en la presión registrada entre 1000 y 1050 bares, a las diferentes velocidades. |
| 1000 | 60 – 80 – 110 | La cavidad llena parcialmente y hay un incremento en la presión registrada entre 1090 y 1130 bares, a las diferentes velocidades. |
| 1100 | 60 – 80 – 110 | La cavidad llena casi en su totalidad para todas las velocidades. Se ajusta la presión posterior a 800 bares, aquí el intervalo de presión registrado por la máquina, a las diferentes velocidades, está entre 1120 y 1190 bares. |
| 1200 | 60 – 80 – 110 | El molde se llena en su totalidad para todas las velocidades y con presión posterior de 800 bares. |
| 1300 | 60 – 80 – 110 | Se presentan condiciones similares a las anteriores y a una velocidad de 110 mm/s . Los intervalos de presión son los mismos. |
| 1400 | 60 – 80 – 110 | |
| 1500 | 60 – 80 – 110 | |

Tabla 5.5 Desarrollo del proceso de inyección para probetas de pared delgada de PP homopolimero natural.

Al iniciar el proceso de inyección, a presiones inferiores a 900 bares, algunas piezas no completaban el llenado, aún con la variación en la velocidad de inyección y con más de 5 piezas inyectadas para lograr estabilizar el proceso. Después de establecer presiones mayores a los 1000 bares la presión registrada por la máquina de inyección comenzó a mantenerse; a partir de los 1200 bares de presión de inyección y con velocidad de inyección de 110 mm/s el ciclo logró establecerse aún cuando se aumentaba la presión de inyección a 1300, 1400, 1500 o más.

Posteriormente se utilizó **PP- 30% Talco**. Para este material las temperaturas en el cilindro fueron constantes, de 60°C en la zona de alimentación y de 310°C en la zona de boquilla, para evitar el problema que ocurre en la boquilla. La temperatura del molde se mantuvo en un intervalo entre los 20°C y 35°C, este aumento se debe a que es un ciclo muy corto por pieza. Las revoluciones del husillo se mantuvieron constantes para todo el proceso, a 150 rev/min. En este caso la contrapresión se fija a 25 bares para ayudar a la presión de sostenimiento a lograr el llenado del molde. Con este material y con el uso de este molde no fue necesario el uso de descompresión. El tiempo de ciclo registrado por la máquina fue de 11.0 segundos por pieza, pero se fija en el panel de control a 50 segundos para evitar que por algún motivo el ciclo sobrepasé este tiempo y se interrumpa el proceso.

Se inició el proceso a una presión de inyección predeterminada por nosotros de 800 bares y una velocidad de inyección inicial de 60 mm/s, para luego incrementarse a 80 y 110 mm/s, hasta lograr el llenado de la cavidad. Después se ajustó la presión de sostenimiento a 800 bares. Estos valores mantuvieron un ciclo constante, ya que la cavidad se llenaba; porque a presiones inferiores a 800 bares el molde no completaba su llenado, interrumpiéndose el ciclo, siendo necesario el retiro de las piezas manualmente. Con lo anterior, se comenzó el proceso de inyección. El ciclo se estabilizó después de inyectar 10 piezas.

En la tabla 5.6, se observan las variaciones de presión en los intervalos de velocidad, además de las observaciones realizadas durante el proceso de inyección.

| <i>Presión de inyección predeterminada por el operador (Bar)</i> | <i>Velocidad de inyección (mm/s)</i> | <i>Observaciones.</i> |
|--|--------------------------------------|--|
| 800 | 60 – 80 – 110 | La cavidad se llena parcialmente. Hay un incremento en la presión registrada por la máquina entre 885 y 930 bares, a las diferentes velocidades. |
| 900 | 60 – 80 – 110 | La cavidad se llena parcialmente. Hay un incremento en la presión registrada por la máquina entre 910 y 1040 bares, a las diferentes velocidades. |
| 1000 | 60 – 80 – 110 | La cavidad se llena en su totalidad a las diferentes velocidades y se ajustó la presión posterior a 800 bares. El intervalo de presión registrado por la máquina, a éstas velocidades, fue de 1070 a 1130 bares. |
| 1100 | 60 – 80 – 110 | La cavidad se llena en su totalidad a las diferentes velocidades y se ajustó la presión posterior a 800 bares. El intervalo de presión registrado por la maquina, a éstas velocidades, fue de 1150 a 1200 bares. |
| 1200 | 60 – 80 – 110 | La cavidad se llena en su totalidad a las diferentes velocidades y se ajustó la presión posterior a 800 bares. El intervalo de presión registrado por la maquina, a éstas velocidades, fue de 1230 a 1295 bares. |
| 1300 | 60 – 80 – 110 | El molde se llena en su totalidad a las diferentes velocidades, con la presión posterior propuesta. A partir de estas condiciones el ciclo se estabilizó entre 23 y 35 piezas por ciclo. |
| 1400 | 60 – 80 – 110 | Se presentan condiciones similares a las anteriores, aunque a velocidad de inyección de 110 mm/s el intervalo de presión registrado por la máquina fue de 1000 a 1400 bares. |
| 1500 | 60 – 80 – 110 | |
| 1600 | 60 – 80 – 110 | |

Tabla 5.6 Desarrollo del proceso de inyección para probetas de pared delgada de PP-30% Talco.

Durante el proceso de inyección, a presión de 800 bares el molde no llenaba por completo con la variación en la velocidad, aun después de inyectar 10 piezas para estabilizar el proceso, donde se observaron incrementos de la presión registrada por la máquina. A partir de 900 bares de presión las piezas llenan casi en su totalidad y se denota un incremento en la presión registrada por la máquina. Después de establecer presiones predeterminadas mayores a los 1000 bares la presión registrada por la máquina de inyección comenzó a establecerse; a una presión de 1300 bares y velocidad de 80 mm/s el ciclo logró estabilizarse, aún aumentando la presión de inyección a 1300, 1400, 1500 o más.

Para el **PP-30% Fibra de vidrio**, las temperaturas en el cilindro fueron constantes en el proceso de ajuste; de 60°C en la zona de alimentación y de 340 °C a 360 °C en la zona de boquilla para evitar el problema de solidificación parcial del material, considerando las propiedades y el alto punto de fusión de la fibra de vidrio. La temperatura del molde se controló en un intervalo entre 20°C y 35°C. Las revoluciones del husillo se mantuvieron constantes, 150 rev/min. La contrapresión se incrementó hasta 45 bares para no interrumpir el ciclo y que se llenara la cavidad. No fue necesario el uso de la descompresión. No se presentó degradación térmica en el material, a pesar de tener una temperatura de 360°C en la zona de la boquilla, por ser un ciclo de inyección corto. El tiempo de ciclo fue el mismo que se utilizó con el PP homopolímero natural.

Todas las condiciones establecidas en el proceso anterior son las mismas para este material. Se inició inyectando a presión de inyección de 700 bares y una velocidad de inyección de 60 mm/s, se incrementó la velocidad de inyección a 80 y 110 mm/s hasta lograr el llenado, y después ajustar la presión de sostenimiento en 800 bares. El tiempo de presión posterior se mantuvo en 1.3 segundos.

Los valores que se tomaron en consideración son los mencionados en la tabla 5.7, ya que a una presión inferior a 700 bares la cavidad no se llenaba y el ciclo se interrumpía, retirando las piezas manualmente.

| <i>Presión de inyección predeterminada por el operador (Bar)</i> | <i>Velocidad de inyección (mm/s)</i> | <i>Observaciones</i> |
|--|--------------------------------------|--|
| 700 | 60 - 80 - 110 | El molde se llena parcialmente. Hay un incremento en la presión registrada por la máquina entre los 780 y 810 bares, con el incremento de velocidad. |
| 800 | 60 - 80 - 110 | El molde se llena parcialmente. Hay un incremento en la presión registrada por la máquina entre los 800 y 870 bares. con el incremento de velocidad. |
| 900 | 60 - 80 - 110 | Se estableció una presión de sostenimiento de 700 bares y el tiempo de presión posterior se redujo a 1.0 segundos. La cavidad se llena en su totalidad y hay un incremento en la presión registrada por la máquina entre los 830 y 910 bares, a las diferentes velocidades. |
| 1000 | 60 - 80 - 110 | Se conservan las condiciones anteriores. El molde llena en su totalidad. Hay un incremento en la presión registrada por la máquina entre los 820 y 950 bares, a las diferentes velocidades. |
| 1100 | 60 - 80 - 110 | La cavidad se llena totalmente a la velocidad de 60 y 80 mm/s. en el intervalo de presión de inyección registrado por la máquina entre 840 y 900 bares. A una velocidad de 110 mm/s y a una presión posterior de 600 bares, el intervalo de presión registrado por la máquina, a ésta velocidad, fue de 940 a 975 bares. |
| 1200 | 60 - 80 - 110 | Se conservan las condiciones anteriores. El molde se llena en su totalidad. Hubo un incremento en la presión registrada por la máquina entre los 820 y 970 bares, a las diferentes velocidades. |
| 1300 | 60 - 80 - 110 | La pieza llena en su totalidad a todas las velocidades con la presión posterior propuesta y a una velocidad de inyección de 110 mm/s. La presión de inyección registrada por la máquina en este punto fue de 940 a 980 bares. |
| 1400 | 60 - 80 - 110 | Se presentan condiciones muy similares a las anteriores. A una velocidad de inyección de 110 mm/s el intervalo de presión fue de 950 a 988 bares. |
| 1500 | 60 - 80 - 110 | |
| 1600 | 60 - 80 - 110 | |

Tabla 5.7 Desarrollo del proceso de inyección para probetas de pared delgada de PP-30% Fibra de vidrio.

En base a lo anterior, se plantea que a presiones por debajo de 700 bares el molde no llenaba, aún con la variación en la velocidad de inyección. Para estabilizar el proceso después de cada cambio de parámetro se inyectaban 15 piezas; considerando esta condición hasta una presión predeterminada por nosotros de 1100 bar, a velocidades de 60 y 80 mm/s. A partir de 900 bares de presión de inyección predeterminada, el molde llenaba en su totalidad con un incremento en las presiones registradas por la máquina. Ajustando de nuevo el proceso a una presión de inyección predeterminada de 1100 bares, con velocidad de inyección de 110 mm/s y un tiempo posterior de 1.0 segundos, a

presión posterior de 600 bares, el ciclo logró estabilizarse, aún al aumentarse la presión de inyección a 1300, 1400, 1500 bar o más.

Ya obtenidas y observadas las condiciones de operación de inyección, se procedió a evaluar al material respecto a sus propiedades mecánicas obtenidas por medio de ensayos de tracción en probetas de pared gruesa y de pared delgada.

5.2 ENSAYOS DE TRACCIÓN PARA MUESTRAS DE PARED GRUESA Y DE PARED DELGADA.

Los siguientes métodos de prueba se diseñaron para obtener las propiedades a la tracción para el control y descripción mecánica del polipropileno natural, con carga de talco y reforzado con fibra de vidrio. Hay que considerar que estas propiedades pueden variar tanto por el procesado del material, espesores de las probetas, velocidad de la prueba, el tipo de sujetador usado, así como la forma de medición y condiciones al momento del ensayo. Por esto, cuando se pretende obtener resultados precisos y comparativos, estos factores deben ser cuidadosamente controlados.

Este estudio tiene como propósito llevar a cabo una comparación del comportamiento mecánico a la tracción entre probetas de pared gruesa, normalizada según la norma ASTM D638-99, y de pared delgada, manufacturada según la norma ASTM 882-97; el espesor de pared gruesa fue de 3.2 mm y el espesor de pared delgada fue de 0.6 mm. Para ambas pruebas se utilizó una Máquina Universal de pruebas electromecánica, Modelo 4206, marca INSTRON con cabezal de movimiento longitudinal vertical a velocidad constante, con una celda de carga de 5 KN. Ésta se compone de dos mordazas, una estática y otra con movimiento vertical unida al cabezal y se utilizan para sujetar las probetas, las cuales tienen que colocarse de modo que el eje longitudinal de las mismas coincida con la dirección del movimiento vertical, así como con el eje central de las mordazas, de modo que no exista torsión que provoque deslizamiento entre las mordazas de las mismas.

5.2.1. ENSAYO DE TRACCIÓN PARA MUESTRAS DE PARED GRUESA.

Este ensayo determina las propiedades mecánicas a la tracción de plásticos naturales, cargados y con refuerzos a condiciones específicas de temperatura, humedad y velocidad de prueba de la máquina. Se utiliza para materiales de espesor de hasta 14 mm. Sin embargo, para piezas de prueba de forma de hojas delgadas, incluyendo películas menos de 1 mm de espesor, se recomienda ensayos tipo ASTM D882-97.

Se utilizaron 5 probetas por muestra para plásticos semirígidos (semicristalinos) del tipo I y sus dimensiones según la norma ASTM D638-99, las cuales se muestran en la figura 5.2 y en la tabla 5.8.

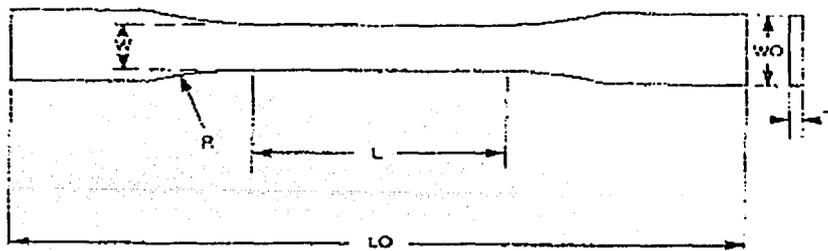


Figura 5.2 Probeta de pared gruesa tipo I ASTM D638-99 para ensayo de tracción.

| PROBETAS DE PARED GRUESA TIPO I SEGÚN LA NORMA ASTM D638-99 | |
|---|----------------------|
| T- Espesor de la probeta | 3.2 (± 0.4) mm |
| W- Ancho de la sección angosta | 13 (± 0.5) mm |
| L- Longitud de la sección angosta | 57 (± 0.5) mm |
| W0- Ancho total de la probeta | 19 (+ 6.4) mm |
| L0 - Longitud total de la probeta | 165 mm |
| R- Radio del filete | 76 (± 1) mm |

Tabla 5.8 Dimensiones de las probetas de pared gruesa Tipo I según la norma ASTM D638-99.

Una vez que las probetas se inyectaron en un molde de acuerdo a la norma señalada, se procedió a medirlas. Posteriormente se colocan las probetas en las mordazas, una vez que han sido montadas en la máquina, de modo que el eje longitudinal de la probeta esté alineado entre las mordazas para después apretar las mismas. Según la norma señalada, las condiciones determinadas por éste método de prueba y ya programadas son: velocidad de prueba de 50 mm/min $\pm 10\%$, mientras que las condiciones ambientales fueron a una temperatura de 18°C, con una humedad del 50 %.

5.2.2 ENSAYO DE TRACCIÓN PARA MUESTRAS DE PARED DELGADA.

Este método de prueba cubre la determinación de propiedades a la tracción en plásticos en forma de láminas delgadas, incluyendo películas menores a 1.0 mm de espesor. Las películas se consideran arbitrariamente como una lámina; la cual debe tener un espesor nominal no mayor a 0.25mm.

Según la norma ASTM D882-97 las probetas de pared delgada, de 0.6 mm de espesor, fueron de sección uniforme, de longitud de 50 mm mayor a la separación entre mordazas, para poder sujetar las probetas a las mismas. El ancho nominal de la muestra no debería de ser menor a 5.0 mm o mayor que 25.4 mm. Se recomienda en la norma una relación ancho-espesor por lo menos de 8. Hay que tener en cuenta que muestras estrechas incrementarían el esfuerzo al corte o grietas. Basándose en lo anterior y partiendo del hecho que habría que obtener probetas de vasos, de un molde ya manufacturado de

espesor de pared de 0.6 mm donde la longitud máxima a obtener a lo largo del perímetro de los mismos fue de 180 mm, se determinó un ancho de 6 mm. La velocidad de prueba fue de 50 mm/min \pm 10%; de acuerdo a la tabla 5.9 según muestra la figura 5.3.

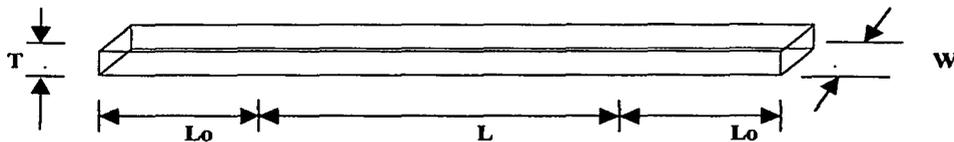


Figura 5.3 Probeta de pared delgada ASTM D882-97 para ensayo de tracción

| PROBETAS DE PARED DELGADA SEGÚN LA NORMA ASTM D882-97 | |
|--|--------|
| T- Espesor de la probeta | 0.6 mm |
| W- Ancho de la probeta | 6 mm |
| L- Longitud del área de prueba | 100 mm |
| L_0 - Longitud del área de la mordaza | 40 mm |

Tabla 5.9 Dimensiones de las probetas de pared delgada según la norma ASTM D882-97.

Capítulo VI

RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de aplicar las pruebas mecánicas pertenecientes según las normas establecidas. Así, el proceso de inyección de las piezas se realizó variando los parámetros de inyección fundamentales para lograr un óptimo llenado del molde, así como la calidad deseada de la pieza; tales como la presión y velocidad de inyección mostradas en la tabla 6.1. Esto se realizó en el polímero PP homopolímero natural, con carga de talco y reforzado con fibra de vidrio.

| PROBETAS DE PARED GRUESA DE PP HOMOPOLÍMERO NATURAL | | | | | | | | | | | |
|---|------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------|-----------------------------------|------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------|
| CAMBIOS DE PRESIÓN DE INYECCIÓN | | | | | | CAMBIOS DE VELOCIDAD DE INYECCIÓN | | | | | |
| PROBETA | VELOCIDAD DE INYECCIÓN | PRESIÓN MÁX. DE INYECCIÓN | PRESIÓN REAL DE INYECCIÓN | RESISTENCIA A LA TRACCIÓN | RIJIDEZ RELATIVA | PROBETA | VELOCIDAD DE INYECCIÓN | PRESIÓN MÁX. DE INYECCIÓN | PRESIÓN REAL DE INYECCIÓN | RESISTENCIA A LA TRACCIÓN | RIJIDEZ RELATIVA |
| | mm/s | BAR | BAR | MPa | MPa | | mm/s | BAR | BAR | MPa | MPa |
| PP1 | 70 | 400 | 282.60 | 33.17 | 825.28 | PP8 | 60 | 700 | 283.60 | 33.72 | 825.32 |
| PP2 | 70 | 500 | 286.80 | 33.89 | 866.23 | PP9 | 70 | 700 | 293.00 | 34.19 | 829.41 |
| PP3 | 70 | 600 | 291.63 | 34.23 | 852.97 | PP10 | 80 | 700 | 293.80 | 33.01 | 759.10 |
| PP7 | 70 | 1000 | 292.50 | 34.54 | 801.09 | PP11 | 90 | 700 | 295.00 | 32.84 | 755.00 |
| PP4 | 70 | 700 | 293.00 | 34.19 | 829.41 | PP12 | 100 | 700 | 307.56 | 33.41 | 755.68 |
| PP6 | 70 | 900 | 293.00 | 34.13 | 888.24 | PP13 | 110 | 700 | 328.00 | 34.09 | 740.79 |
| PROBETAS DE PARED GRUESA DE PP-30% TALCO | | | | | | | | | | | |
| CAMBIOS DE PRESION DE INYECCION | | | | | | CAMBIOS DE VELOCIDAD DE INYECCION | | | | | |
| PROBETA | VELOCIDAD DE INYECCIÓN | PRESIÓN MÁX. DE INYECCIÓN | PRESIÓN REAL DE INYECCIÓN | RESISTENCIA A LA TRACCIÓN | RIJIDEZ RELATIVA | PROBETA | VELOCIDAD DE INYECCIÓN | PRESIÓN MÁX. DE INYECCIÓN | PRESIÓN REAL DE INYECCIÓN | RESISTENCIA A LA TRACCIÓN | RIJIDEZ RELATIVA |
| | mm/s | BAR | BAR | MPa | MPa | | mm/s | BAR | BAR | MPa | MPa |
| PPT14 | 70 | 400 | 333.50 | 31.09 | 1696.3 | PPT21 | 60 | 600 | 332.80 | 31.68 | 1642.9 |
| PPT20 | 70 | 1000 | 334.80 | 31.53 | 1821.1 | PPT16 | 70 | 600 | 335.70 | 31.33 | 1810.8 |
| PPT19 | 70 | 900 | 335.60 | 31.29 | 1865.6 | PPT22 | 80 | 600 | 333.75 | 31.62 | 1877.8 |
| PPT17 | 70 | 700 | 336.10 | 31.13 | 1886.9 | PPT23 | 90 | 600 | 342.30 | 31.75 | 1839.7 |
| PPT18 | 70 | 800 | 336.30 | 30.81 | 1865.6 | PPT24 | 100 | 600 | 361.90 | 31.64 | 1712.9 |
| PPT15 | 70 | 500 | 336.56 | 30.52 | 1751.0 | PPT25 | 110 | 600 | 381.56 | 31.97 | 1688.4 |
| PROBETAS DE PARED GRUESA DE PP-30% FIBRA DE VIDRIO | | | | | | | | | | | |
| CAMBIOS DE PRESION DE INYECCION | | | | | | CAMBIOS DE VELOCIDAD DE INYECCION | | | | | |
| PROBETA | VELOCIDAD DE INYECCIÓN | PRESIÓN MÁX. DE INYECCIÓN | PRESIÓN REAL DE INYECCIÓN | RESISTENCIA A LA TRACCIÓN | RIJIDEZ RELATIVA | PROBETA | VELOCIDAD DE INYECCIÓN | PRESIÓN MÁX. DE INYECCIÓN | PRESIÓN REAL DE INYECCIÓN | RESISTENCIA A LA TRACCIÓN | RIJIDEZ RELATIVA |
| | mm/s | BAR | BAR | MPa | MPa | | mm/s | BAR | BAR | MPa | MPa |
| PPFV29 | 70 | 700 | 299 | 40.44 | 2208.1 | PPFV33 | 60 | 600 | 295 | 40.80 | 2588.3 |
| PPFV32 | 70 | 1000 | 304 | 40.44 | 2624.2 | PPFV34 | 70 | 600 | 297 | 40.07 | 2105.0 |
| PPFV30 | 70 | 800 | 305 | 40.42 | 2465.6 | PPFV35 | 80 | 600 | 315 | 39.89 | 2142.8 |
| PPFV28 | 70 | 600 | 321 | 40.01 | 2122.3 | PPFV36 | 90 | 600 | 336 | 40.53 | 2094.9 |
| PPFV27 | 70 | 500 | 327 | 40.49 | 2245.8 | PPFV37 | 100 | 600 | 350 | 39.65 | 2111.9 |
| PPFV26 | 70 | 400 | 337 | 41.31 | 2266.6 | PPFV38 | 110 | 600 | 371 | 39.72 | 2104.4 |

Tabla 6.1 (a)

| PROBETAS DE PARED DELGADA DE PP HOMOPOLIMERO NATURAL | | | | | | | | | | | |
|--|------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------|---------|------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------|
| PROBETA | VELOCIDAD DE INYECCIÓN | PRESIÓN MÁX. DE INYECCIÓN | PRESIÓN REAL DE INYECCIÓN | RESISTENCIA A LA TRACCIÓN | RGIDEZ RELATIVA | PROBETA | VELOCIDAD DE INYECCIÓN | PRESIÓN MÁX. DE INYECCIÓN | PRESIÓN REAL DE INYECCIÓN | RESISTENCIA A LA TRACCIÓN | RGIDEZ RELATIVA |
| | mm/s | BAR | BAR | MPa | MPa | | mm/s | BAR | BAR | MPa | MPa |
| VPP3 | 60 | 800 | 898.00 | 27.15 | 1195 | VPP2 | 110 | 700 | 812.00 | 27.55 | 1210 |
| VPP5 | 60 | 900 | 1006.00 | 35.1 | 1361 | VPP4 | 110 | 800 | 938.00 | 27.79 | 1296 |
| VPP7 | 60 | 1000 | 1091.00 | 29.9 | 1179 | VPP6 | 110 | 900 | 1038.00 | 31.32 | 1174 |
| VPP9 | 60 | 1100 | 1128.00 | 31.56 | 1263 | VPP8 | 110 | 1000 | 1121.00 | 32.81 | 1231 |
| VPP11 | 60 | 1200 | 1164.00 | 33.12 | 1324 | VPP10 | 110 | 1100 | 1186.00 | 33.35 | 1275 |
| VPP13 | 60 | 1300 | 1183.00 | 33.45 | 1308 | VPP12 | 110 | 1200 | 1222.00 | 34.91 | 1353 |
| VPP15 | 60 | 1400 | 1183.00 | 34.61 | 1316 | VPP16 | 110 | 1400 | 1239.00 | 32.71 | 1265 |
| | | | | | | VPP14 | 110 | 1300 | 1240.00 | 34.55 | 1347 |

| PROBETAS DE PARED DELGADA DE PP-30% TALCO | | | | | | | | | | | |
|---|------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------|---------|------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------|
| PROBETA | VELOCIDAD DE INYECCIÓN | PRESIÓN MÁX. DE INYECCIÓN | PRESIÓN REAL DE INYECCIÓN | RESISTENCIA A LA TRACCIÓN | RGIDEZ RELATIVA | PROBETA | VELOCIDAD DE INYECCIÓN | PRESIÓN MÁX. DE INYECCIÓN | PRESIÓN REAL DE INYECCIÓN | RESISTENCIA A LA TRACCIÓN | RGIDEZ RELATIVA |
| | mm/s | BAR | BAR | MPa | MPa | | mm/s | BAR | BAR | MPa | MPa |
| VPPT17 | 60 | 800 | 887.00 | 29.08 | 2523 | VPPT18 | 80 | 800 | 909.00 | 31.84 | 2541 |
| VPPT20 | 60 | 900 | 910.00 | 30.98 | 2511 | VPPT21 | 80 | 900 | 999.00 | 28.68 | 2266 |
| VPPT35 | 60 | 1400 | 1005.00 | 23.82 | 2162 | VPPT24 | 80 | 1000 | 1066.00 | 33.23 | 2523 |
| VPPT23 | 60 | 1000 | 1078.00 | 33.39 | 2342 | VPPT33 | 80 | 1300 | 1130.00 | 28.58 | 2487 |
| VPPT26 | 60 | 1100 | 1154.00 | 27.71 | 2347 | VPPT27 | 80 | 1100 | 1183.00 | 28.12 | 2454 |
| VPPT32 | 60 | 1300 | 1229.00 | 23.61 | 2139 | VPPT36 | 80 | 1400 | 1255.00 | 28.20 | 2626 |
| VPPT29 | 60 | 1200 | 1255.00 | 26.75 | 2332 | VPPT30 | 80 | 1200 | 1267.00 | 28.61 | 2332 |

| PROBETA | VELOCIDAD DE INYECCIÓN | PRESIÓN MÁX. DE INYECCIÓN | PRESIÓN REAL DE INYECCIÓN | RESISTENCIA A LA TRACCIÓN | RGIDEZ RELATIVA |
|---------|------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------|
| | mm/s | BAR | BAR | MPa | MPa |
| VPPT19 | 110 | 800 | 908 | 28.61 | 2464 |
| VPPT22 | 110 | 900 | 1033 | 26.51 | 2065 |
| VPPT25 | 110 | 1000 | 1126 | 33.68 | 2574 |
| VPPT34 | 110 | 1300 | 1197 | 22.31 | 2141 |
| VPPT28 | 110 | 1100 | 1208 | 32.04 | 2427 |
| VPPT31 | 110 | 1200 | 1291 | 25.01 | 2408 |
| VPPT39 | 110 | 1600 | 1348 | 26.87 | 2457 |
| VPPT37 | 110 | 1400 | 1365 | 26.40 | 2377 |
| VPPT38 | 110 | 1500 | 1443 | 24.78 | 2198 |

| PROBETAS DE PARED DELGADA DE PP-30% FIBRA DE VIDRIO | | | | | | | | | | | |
|---|------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------|---------|------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------|
| PROBETA | VELOCIDAD DE INYECCIÓN | PRESIÓN MÁX. DE INYECCIÓN | PRESIÓN REAL DE INYECCIÓN | RESISTENCIA A LA TRACCIÓN | RGIDEZ RELATIVA | PROBETA | VELOCIDAD DE INYECCIÓN | PRESIÓN MÁX. DE INYECCIÓN | PRESIÓN REAL DE INYECCIÓN | RESISTENCIA A LA TRACCIÓN | RGIDEZ RELATIVA |
| | mm/s | BAR | BAR | MPa | MPa | | mm/s | BAR | BAR | MPa | MPa |
| VPPFV40 | 60 | 700 | 788 | 22.39 | 2395.0 | VPPFV41 | 80 | 700 | 793 | 19.74 | 2481.2 |
| VPPFV61 | 60 | 1400 | 822 | 19.13 | 2041.0 | VPPFV44 | 80 | 800 | 813 | 18.81 | 2132.0 |
| VPPFV43 | 60 | 800 | 826 | 19.80 | 2229.0 | VPPFV53 | 80 | 1100 | 878 | 19.70 | 2242.0 |
| VPPFV49 | 60 | 1000 | 831 | 24.00 | 2406.0 | VPPFV47 | 60 | 900 | 885 | 17.27 | 1950.0 |
| VPPFV48 | 60 | 900 | 834 | 16.88 | 1829.0 | VPPFV50 | 80 | 1000 | 887 | 23.65 | 2451.0 |
| VPPFV58 | 60 | 1300 | 839 | 18.96 | 2014.0 | VPPFV56 | 80 | 1200 | 889 | 21.29 | 2180.0 |
| VPPFV52 | 60 | 1100 | 848 | 17.80 | 2068.0 | VPPFV59 | 80 | 1300 | 894 | 20.57 | 2037.0 |
| VPPFV55 | 60 | 1200 | 852 | 23.60 | 2382.0 | VPPFV62 | 80 | 1400 | 911 | 17.19 | 1916.0 |

| PROBETA | VELOCIDAD DE INYECCIÓN | PRESIÓN MÁX. DE INYECCIÓN | PRESIÓN REAL DE INYECCIÓN | RESISTENCIA A LA TRACCIÓN | RGIDEZ RELATIVA |
|---------|------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|-----------------|
| | mm/s | BAR | BAR | MPa | MPa |
| VPPFV42 | 110 | 700 | 800 | 23.72 | 2493.0 |
| VPPFV45 | 110 | 800 | 863 | 18.08 | 2083.0 |
| VPPFV46 | 110 | 900 | 892 | 18.18 | 1971.0 |
| VPPFV51 | 110 | 1000 | 939 | 17.35 | 1934.0 |
| VPPFV57 | 110 | 1200 | 950 | 18.69 | 1983.0 |
| VPPFV60 | 110 | 1300 | 950 | 16.35 | 1788.0 |
| VPPFV54 | 110 | 1100 | 975 | 20.49 | 2251.0 |
| VPPFV63 | 110 | 1400 | 976 | 18.16 | 1991.0 |

(b)

Tabla 6.1 Variación de los parámetros del proceso de inyección y las propiedades mecánicas respectivas de a) probetas normalizadas ASTM D638-99 (pared gruesa) y b) probetas con espesores de 0.6 mm según la norma ASTM D882 (pared delgada).

Durante el proceso de inyección del *PP homopolímero natural* de probetas de pared gruesa, a presiones bajas, tal como a 200 bares el molde tenía un llenado deficiente y por consecuencia las piezas obtenidas estaban incompletas. Por ello, se dispuso a aumentar la presión de inyección, predeterminada por el usuario (P_{max}), a incrementos de 100 bares hasta encontrar la presión necesaria para el llenado total de las cavidades del molde. Así se observó que, partiendo de una presión de 500 bares ya se presentaba el llenado del molde, sin embargo a 700 bares las características físicas de llenado de las piezas eran las deseadas, ajustando la presión de sostenimiento a 100 bares. Hay que mencionar que a cada incremento de presión se utilizaron velocidades de inyección de 60, 80 y 110 mm/s para observar en que medida se afectaba el llenado. Sin embargo, a pesar de completar el llenado completo del molde, bajo estas condiciones, la máquina ajustaba las presiones de inyección por debajo del valor propuesto por el operador, 700 bares, donde se presenta el llenado de las piezas. Por lo que la presión ajustada por la máquina fue entre los 300 y 330 bares, para esta presión, con una velocidad de 110 mm/s. Del mismo modo se realizaron variaciones a presiones cercanas a la ajustada por la máquina pero se presentó el mismo problema de llenado antes mencionado, aún incrementando la presión de inyección de 800 a 1200 bares y con velocidades de inyección altas.

Al igual que en el homopolímero natural, en el *PP-30% Talco* y *PP-30% Fibra de vidrio*, se presentaron los mismos problemas de llenado, con lo que se utilizó el mismo criterio de incrementar la presión de inyección hasta encontrar el valor adecuado para el llenado de las cavidades, utilizándose los mismos valores de velocidades de inyección y procedimientos similares para cada variación. En la inyección del PP cargado, el llenado se presentó a los 600 bares de presión de inyección predeterminada, mientras que en el reforzado fue desde los 700 bares, ajustándose la presión de sostenimiento a 100 bares para ambos materiales. Se presentaron diferentes variaciones en la presión regulada por la máquina, 340 bares a velocidades de 60 y 80 mm/s, pero a 110 mm/s se presentó un incremento de presión de inyección entre los 370 y 390 bar; a partir de esta presión y con esta velocidad de inyección no se presentan variaciones en los resultados y todos los valores tomados se encuentran en el intervalo mencionado. Por presentarse condiciones similares que en el homopolímero natural no se realizaron más incrementos desde los 1100 bares de presión. En el caso del PP reforzado se presentaron diferentes variaciones en la presión regulada por la máquina, 300 bares a velocidades de 60 mm/s, 330 bares a una velocidad de 80 mm/s, pero a 110 mm/s se presentó un incremento de presión de inyección ajustada por la máquina entre los 360 y 385 bares. Con estos parámetros de presión y velocidad, se presentaron variaciones notorias en los resultados obtenidos por la máquina como ya se ha visto. Pero a partir de una presión de inyección de 800 bares y casi en todos los valores de velocidad de inyección no se presentan variaciones en los resultados y todos los valores tomados de presión de inyección ajustada por la máquina, los cuales se encuentran en el intervalo de 295 a 310 bares.

En el proceso de inyección de las muestras de pared delgada se presentaron condiciones diferentes a las establecidas en las probetas de pared gruesa. Así, para el *PP homopolímero natural* inyectado en el molde de una cavidad, se apreció físicamente que al comenzar a inyectar dicho material a bajas presiones, a partir de 200 bares, el molde tenía un deficiente llenado de la cavidad y por ende el proceso de inyección se interrumpía, no pudiéndose controlar los parámetros del ciclo y retirándose las piezas manualmente. Así, se aumentó la presión de inyección, en incrementos de 100 bares hasta encontrar el valor adecuado para completar el llenado (estabilización del ciclo). Al alcanzar una presión de 700 bares las piezas inyectadas tenían un llenado parcial, sin interrumpirse el ciclo de inyección, con esto se pudo tener referencia del comportamiento de los parámetros. Las velocidades de inyección utilizadas fueron de 60, 80 y 110 mm/s, donde a cada variación de velocidad se incrementó la presión

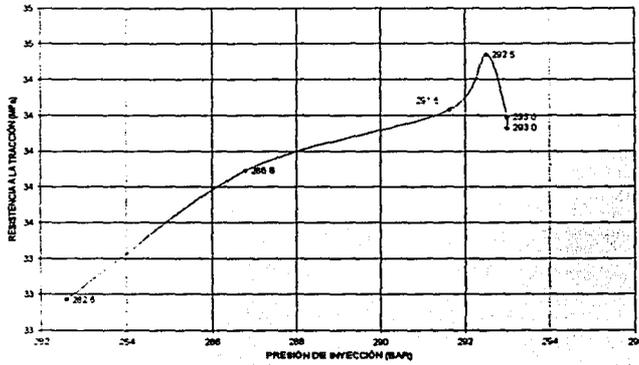
de inyección predeterminada con el fin de observar el llenado de las piezas. Se observó que a una presión de inyección predeterminada de 900 bares las piezas inyectadas tenían un llenado parcial pero mayor que a los 700 bares, presentando un incremento en la presión regulada por la máquina entre los 1090 y 1130 bares, a las velocidades especificadas. Después de establecer presiones mayores a los 1000 bares, la presión registrada por la máquina de inyección comenzó a estabilizarse, a condiciones de 1200 bares de presión determinada por el usuario y con una velocidad de inyección de 110 mm/s el ciclo logró estabilizarse, aún a presiones de inyección de 1300, 1400, 1500 o más.

Bajo las mismas condiciones de inyección que en el homopolímero natural, en el **PP-30% Talco** la presión de inyección en la que el ciclo se estabilizó sin presentarse ninguna variación fue a 800 bares de presión seleccionada por el operario, donde se presentó un incremento en la presión regulada por la máquina de 885 y 930 bares, a las velocidades antes señaladas, presentándose un llenado parcial de la cavidad, por lo que se prosiguió a incrementar la presión de inyección paulatinamente. Cuando se llegó a la presión de inyección de 1000 bares el molde casi completó su llenado, se ajustó la presión de sostenimiento a 800 bares, con lo cual se aseguró el llenado total. En este punto todavía no se logra la estabilidad del proceso debido a que se presentan variaciones en los parámetros registrados por la máquina. Cabe mencionar que con este material los ciclos no presentaban variaciones después de haber inyectado un promedio de piezas entre 23 y 35 piezas.

Para el **PP-30% Fibra de vidrio**. A una presión de 700 bares las piezas casi llenan en su totalidad pero se presentaron variaciones en la presión registrada por la máquina a las diferentes velocidades estipuladas. Esto se mantuvo al aumentar la presión de inyección a 800 bares, sin embargo al alcanzar una presión de inyección de 900 bares no se conservaron los valores de presión y tiempo de sostenimiento, por lo que el ciclo se interrumpía ya que las piezas eran retiradas manualmente. Con esto se disminuyó la presión de sostenimiento a 700 bares, ajustándose la máquina a una presión posterior en 1.01 segundos para lograr la estabilidad del ciclo, esto se mantuvo hasta que alcanzó una presión de 1100 bares donde las condiciones registradas por la máquina permanecieron constantes a velocidades de 60 y 80 mm/s. Al utilizar una velocidad de inyección de 110 mm/s se disminuyó la presión y el tiempo de sostenimiento a 600 bares y 1.0 segundos, respectivamente. A partir de estas condiciones, ya no hubo variación en el ciclo de inyección para este material, registrando la máquina de inyección una presión regulada entre los 940 y 1090 bares a una velocidad de 110 mm/s, aún incrementando la presión de inyección propuesta a 1200, 1300, 1400, 1500, 1600 o más con los diferentes valores de velocidad.

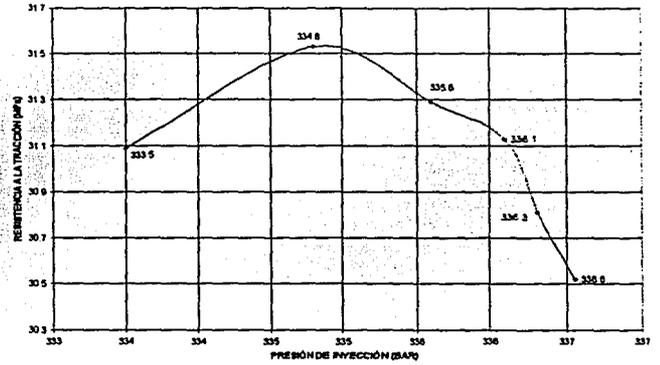
Con el fin de mostrar el comportamiento de la resistencia a la tracción respecto a la variación de la presión de inyección ajustada por la máquina y velocidad de inyección, se graficaron las variaciones de presión con respecto a las propiedades mecánicas correspondientes.

PROBETAS DE PARED GRUESA DE PP HOMOPOLÍMERO NATURAL. RESISTENCIA A LA TRACCIÓN. CAMBIOS DE PRESIÓN DE INYECCIÓN



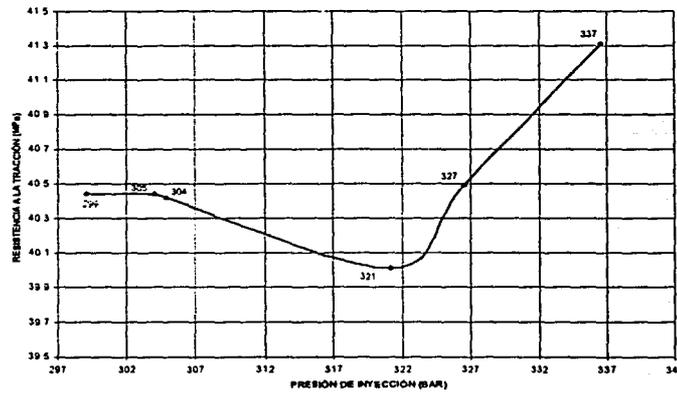
Gráfica 6.1(a)

PROBETAS DE PARED GRUESA DE PP-30% TALCO. RESISTENCIA A LA TRACCIÓN. CAMBIOS DE PRESIÓN DE INYECCIÓN



Gráfica 6.1(b)

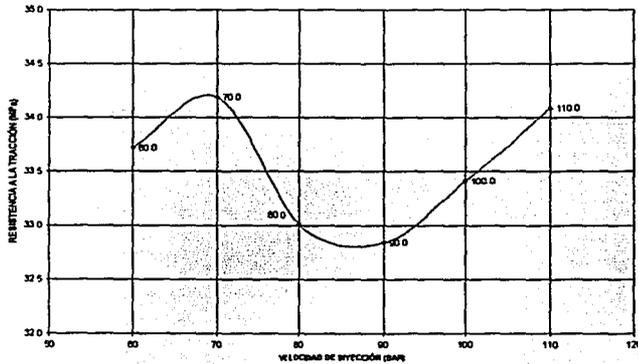
PROBETAS DE PARED GRUESA DE PP-30% FIBRA DE VIDRIO. RESISTENCIA A LA TRACCIÓN. CAMBIOS DE PRESIÓN DE INYECCIÓN



Gráfica 6.1(c)

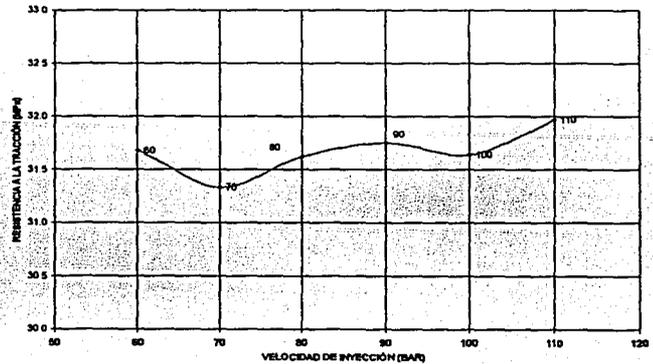
Gráfica 6.1 Comportamiento de la resistencia a la tracción de probetas de pared gruesa, variando la presión de inyección, a velocidad de inyección constante de 70 mm/s, de a) PP homopolímero natural, b) PP- 30% Talco y c) PP- 30% Fibra de vidrio.

PROBETAS DE PARED GRUESA DE PP HOMOPOLÍMERO NATURAL. RESISTENCIA A LA TRACCIÓN. CAMBIOS DE VELOCIDAD DE INYECCIÓN



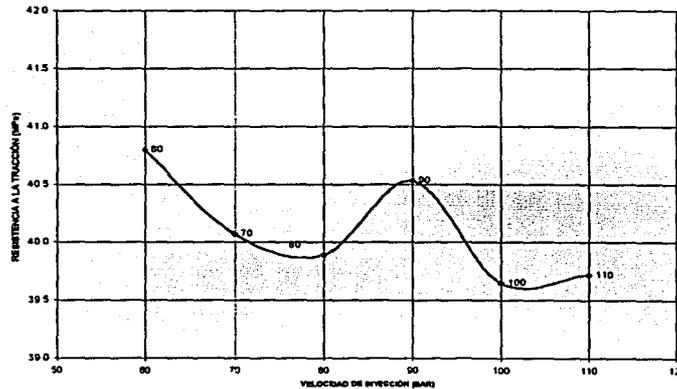
Gráfica 6.2(a)

PROBETAS DE PARED GRUESA DE PP-30% TALCO. RESISTENCIA A LA TRACCIÓN. CAMBIOS DE VELOCIDAD DE INYECCIÓN



Gráfica 6.2(b)

PROBETAS DE PARED GRUESA DE PP-30% FIBRA DE VIDRIO. RESISTENCIA A LA TRACCIÓN. CAMBIOS DE VELOCIDAD DE INYECCIÓN



Gráfica 6.2 (c)

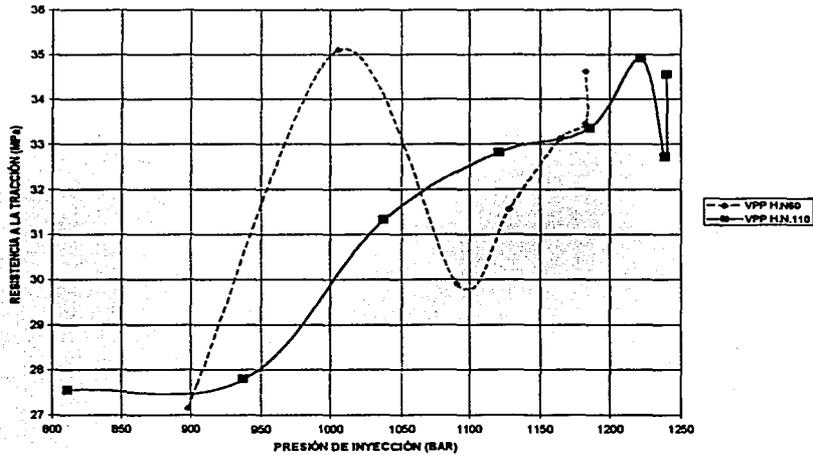
Gráfica 6.2 Comportamiento de la resistencia a la tracción de probetas de pared gruesa, variando la velocidad de inyección, de a) PP homopolímero natural, b) PP-30% Talco y c) PP-30% Fibra de vidrio.

En el caso de la variación de la velocidad de inyección de 60, 80 y 110 mm/s en la obtención de las probetas de pared gruesa, utilizando los mismos polímeros, se presentó una estabilización de la resistencia con una diferencia máxima de 1 unidad, entre los resultados obtenidos, a medida que la velocidad aumentó. Aunque con las primeras variaciones de velocidad se presentaron perturbaciones que no muestran un comportamiento determinado, tal como lo muestran las gráficas 6.2 a, b y c. La influencia de la presión de inyección en la resistencia a la tracción en las probetas de pared gruesa se discute posteriormente.

A pesar de que el molde fue manufacturado bajo norma ASTM de probetas para ensayos se presentó una caída de presión dentro del molde, por lo que la elección en las dimensiones y sección de los canales de distribución y de estrangulamiento puede determinar este inconveniente. Además de que el desgaste del molde, que es apreciable, también influyó.

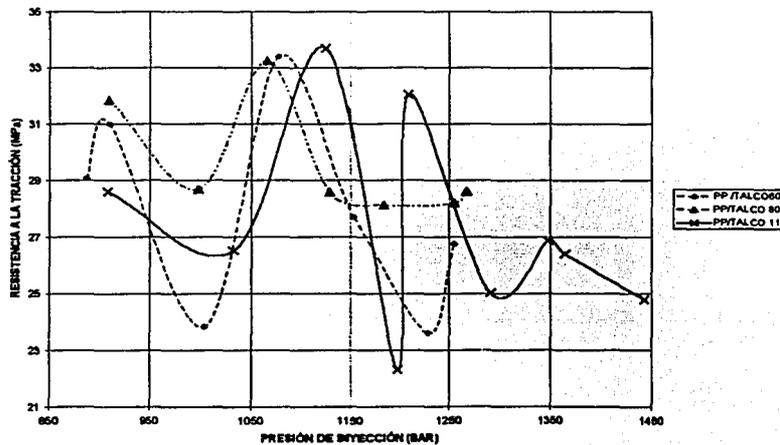
A diferencia de la falta de control de la presión de inyección en las muestras de pared gruesa, los parámetros de inyección propuestos presentaron poca variación en relación a los registrados por la máquina inyectando las probetas de pared delgada, como lo muestra la tabla 6.1 y las gráficas 6.3.

PROBETAS DE PARED DELGADA DE PP HOMOPOLÍMERO NATURAL. RESISTENCIA A LA TRACCIÓN. VELOCIDAD DE INYECCIÓN DE 60 Y 110 mm/s

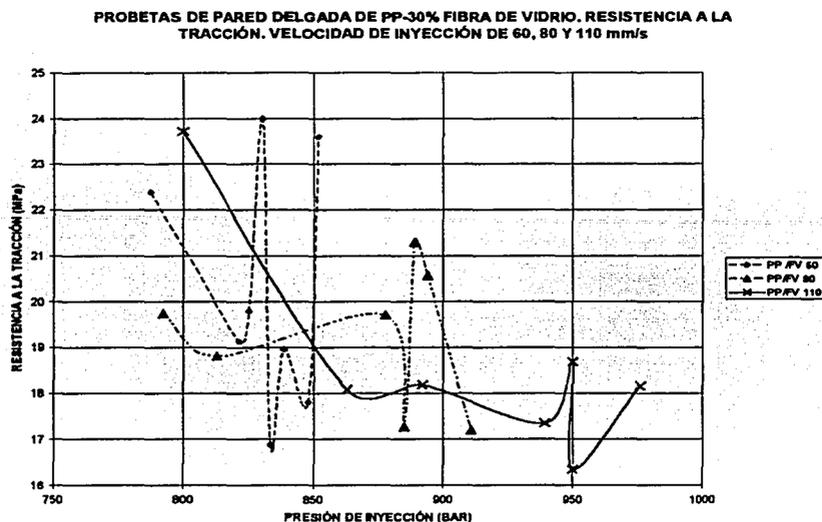


Gráfica 6.3(a)

PROBETAS DE PARED DELGADA DE PP-30% TALCO. RESISTENCIA A LA TRACCIÓN. VELOCIDAD DE INYECCIÓN DE 60, 80 Y 110 mm/s



Gráfica 6.3(b)



Gráfica 6.3(c)

Gráfica 6.3 Comportamiento de la resistencia a la tracción de probetas de pared delgada de a) PP homopolímero natural, a velocidades de inyección de 60 y 110 mm/s, b) PP-30% Talco, a velocidades de inyección de 60, 80 y 110 mm/s y de c) PP-30% Fibra de vidrio, a velocidades de inyección de 60, 80 y 110 mm/s.

Durante el proceso de inyección del Polipropileno homopolímero natural en las muestras de pared gruesa, las variaciones de las velocidades de inyección no se manifestaron. Esto como resultado de que el molde presentó una gran caída de presión, por lo que los valores de la velocidad de inyección se consideraron como uno promedio para la obtención de la gráfica resistencia a la tracción vs. presión de inyección, en un rango de presiones registradas por la máquina, entre 280 bares y 290 bares; obteniendo resistencias con una diferencia máxima de 1 unidad. Sin embargo, en las muestras de pared delgada la resistencia tuvo una variación máxima de 8 unidades, obtenidas a presiones elevadas (900-1250 bares); observando este comportamiento para velocidades de inyección de 60, 80 y 110 mm/s. Ambas curvas tienen una tendencia a la alta en la resistencia a la tracción, aunque no están claramente definidos los puntos obtenidos.

En el caso del PP-30% Talco, para las probetas de pared gruesa, la presión de inyección presentó un rango entre los 333 y 337 bares, más alto que para el homopolímero natural, esto debido a la presencia de la carga. Sin embargo, la resistencia a la tracción mueve su escala desde 33 MPa a 34 MPa, en el homopolímero natural, hasta de 30 MPa a 31 MPa, en el cargado; sin observarse ninguna tendencia en los valores de las probetas de pared gruesa. En pared delgada, la resistencia a la tracción tiene un rango de hasta 12 unidades de diferencia máxima, con una tendencia a la baja a mayor presión y velocidad de inyección, con presencia de carga de talco y refuerzo de fibra de vidrio, como se observa en las gráficas 6.3.

Se pudo observar como en las piezas de pared delgada con carga y con refuerzo caía el rango de resistencia a la tracción, comparándolas con el homopolímero natural, a condiciones de presiones y velocidades de inyección altas. Esto debido a que el efecto de la pared muy delgada no permitió que el

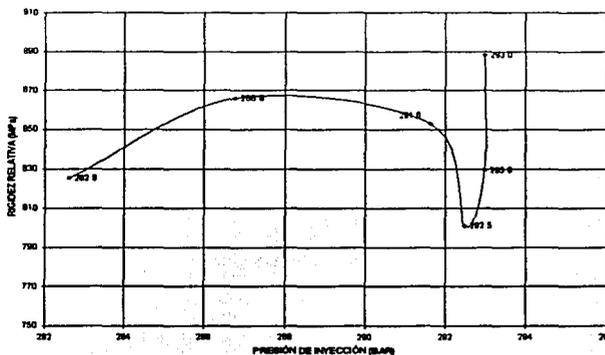
material reforzante trabajara como tal, sino que hubo concentraciones de esfuerzo que no permitieron el aumento en la resistencia.

Con lo anterior, se establece que el incremento de la presión y velocidad de inyección de piezas de pared delgada de PP homopolímero con el uso de agentes de refuerzo, particulados planares y fibrados, disminuye la resistencia a la tracción. Esto por efecto de que al aumentar la presión los refuerzos interactúan más entre ellos que con la matriz, con un comportamiento más marcado a una mayor velocidad de inyección. Por lo que origina que las fuerzas de unión interfaciales (fuerzas de Van der Waals) del compuesto sean menores; además de originar vacíos o espacios donde el polímero no hizo contacto con el refuerzo, ocasionando concentraciones de esfuerzos. Si se observa una mayor resistencia a la tracción a una menor presión de inyección, se supone la existencia de una menor velocidad de deformación por cortante del flujo, generando una menor velocidad de enfriamiento, lo que permite una mayor interacción entre el refuerzo y el polímero por la relajación molecular de las cadenas y así un aumento en la unión interfacial.

Sin embargo, el aumento de presión de inyección en el Polipropileno homopolímero natural, en espesores delgados, incrementó la resistencia a la tracción. Este comportamiento es originado por un aumento en el deslizamiento entre las cadenas moleculares, por lo que se hace presente una mayor velocidad de deformación de cortante, sin despreciar el aumento en la temperatura del flujo, acrecentando el esfuerzo cortante y disminuyendo la viscosidad, y con esto una mayor alineación longitudinal de las cadenas en la dirección del flujo.

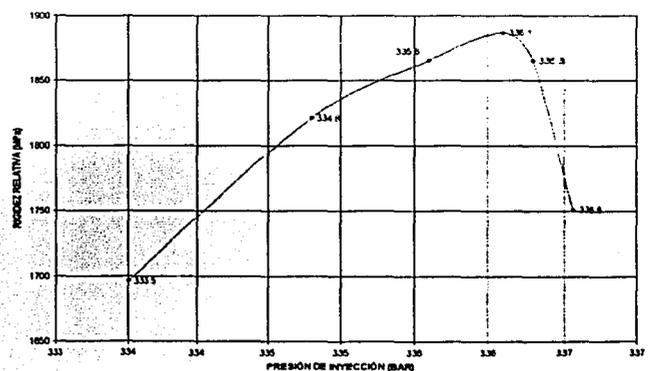
Si se comparan las piezas de pared gruesa respecto a las de pared delgada, el comportamiento constante de la resistencia a la tracción es similar al que se tiene en las muestras de menor espesor con refuerzo a menores presiones, ya que al presentar un mayor espesor permite una mejor interacción entre el refuerzo o carga y la matriz; porque al no restringir el movimiento de las cadenas moleculares deja que las moléculas se relajen con cierta facilidad y se presente este fenómeno.

PROBETAS DE PARED GRUESA DE PP HOMOPOLÍMERO NATURAL. RIGIDEZ RELATIVA. CAMBIOS DE PRESIÓN DE INYECCIÓN



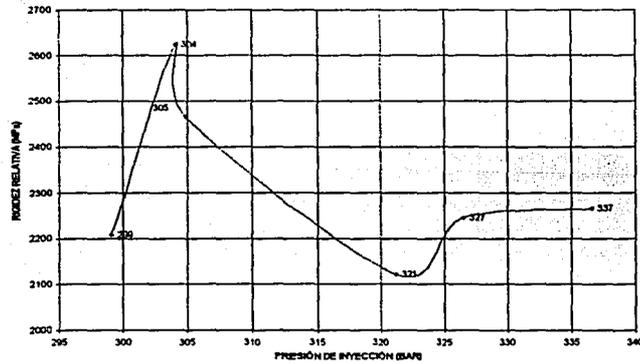
Gráfica 6.4(a)

PROBETAS DE PARED GRUESA DE PP-30% TALCO. RIGIDEZ RELATIVA. CAMBIOS DE PRESIÓN DE INYECCIÓN



Gráfica 6.4(b)

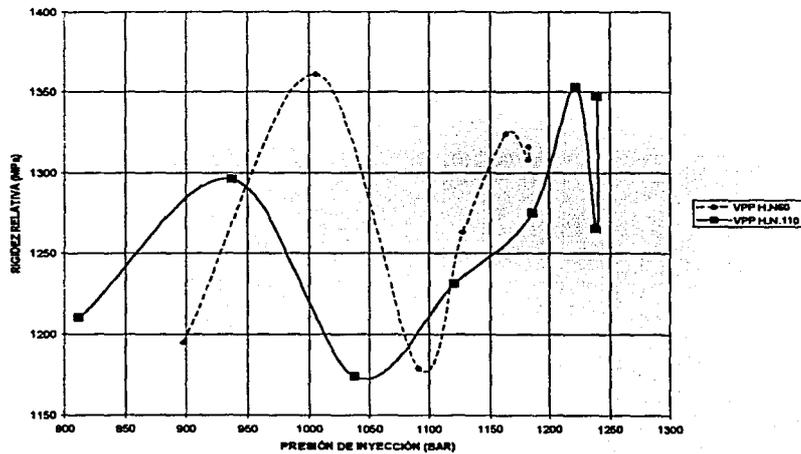
PROBETAS DE PARED GRUESA DE PP-30% FIBRA DE VIDRIO. RIGIDEZ RELATIVA. CAMBIOS DE PRESIÓN DE INYECCIÓN



Gráfica 6.4(c)

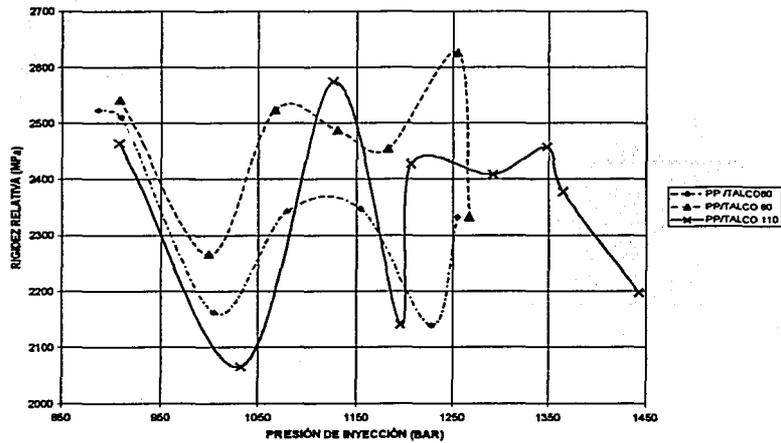
Gráfica 6.4 Comportamiento de la rigidez relativa de probetas de pared gruesa, variando la presión de inyección, a velocidad de inyección constante de 70 mm/s, de a) PP homopolímero natural, b) PP- 30% Talco y c) PP- 30% Fibra de vidrio.

PROBETAS DE PARED DELGADA DE PP HOMOPOLÍMERO NATURAL. RIGIDEZ RELATIVA. VELOCIDAD DE INYECCIÓN DE 60 Y 110 mm/s



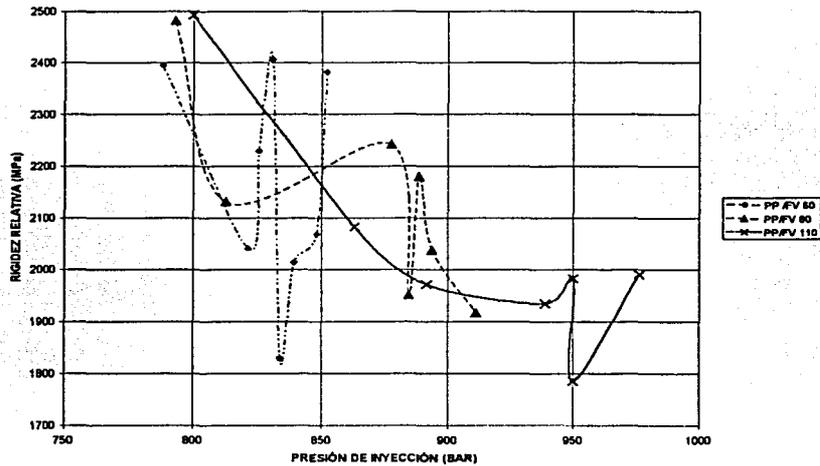
Gráfica 6.5(a)

PROBETAS DE PARED DELGADA DE PP-30% TALCO. RIGIDEZ RELATIVA.
VELOCIDAD DE INYECCIÓN DE 60, 80 Y 110 m/s



Gráfica 6.5(b)

PROBETAS DE PARED DELGADA DE PP-30% FIBRA DE VIDRIO. RIGIDEZ RELATIVA.
VELOCIDAD DE INYECCIÓN DE 60, 80 Y 110 mm/s



Gráfica 6.5(c)

Gráfica 6.5 Comportamiento de la rigidez relativa de probetas de pared delgada de a) PP homopolímero natural, a velocidades de inyección de 60 y 110 mm/s, b) PP-30% Talco, a velocidades de inyección de 60, 80 y 110 mm/s y de c) PP-30% Fibra de vidrio, a velocidades de inyección de 60, 80 y 110 mm/s.

En las gráficas 6.4 se muestra el comportamiento de la rigidez relativa¹ del PP homopolímero natural, con carga de talco y reforzado con fibra de vidrio inyectado en un molde de pared gruesa, variando la presión de inyección y con las mismas condiciones de velocidad planteadas anteriormente. Resultaron valores máximos de rigidez relativa de 890 MPa, 1870 MPa y 2500 MPa, para tales polímeros. Hay que mencionar que se presentó una caída de presión de inyección significativa durante el proceso de inyección, lo que es un factor importante a considerar en los resultados obtenidos en presiones de inyección bajas. Sin embargo, en las probetas de pared delgada se alcanzaron valores mínimos por arriba de los presentados en las muestras de pared gruesa, gráficas 6.5; con máximos de 1350 MPa, 2600 MPa y 2500 MPa, para los mismos materiales. Como se puede observar, el PP reforzado presentó una tendencia a la baja a una mayor presión y velocidad de inyección, manteniendo un mismo rango de valores para rigidez relativa de 1800 MPa a 2500 MPa en ambos espesores de pared.

Con base en lo anterior, se establece un incremento de la rigidez relativa al utilizar al Talco como agente reforzador particulado planar, así como con el uso de la fibra de vidrio aunque se presentó una tendencia a la baja en el comportamiento de los valores de la rigidez, a presiones y velocidades de inyección altas en piezas de pared delgada. En contraparte, el PP homopolímero natural presentó una tendencia a la alta en la rigidez, a medida que se aumentó la presión y velocidad de inyección.

¹ Medida como la separación entre las mordazas de la Máquina universal durante el Ensayo de Tracción

Capítulo VII

A. CONCLUSIONES.

- El flujo en la cavidad puede variar según el espesor de pared en un molde de inyección. De este modo, su comportamiento se ve afectado según el parámetro de inyección a variar; observando esto en las propiedades mecánicas del polímero. Así, la influencia de la presión de inyección es mayor que la velocidad de inyección en piezas de pared delgada bajo condiciones de flujo radial, decrementando las propiedades mecánicas del Polipropileno reforzado con fibra de vidrio y con carga de Talco, a bajos porcentajes de agregado; sin embargo, aumentan en el PP como homopolímero natural.
- Se infiere tomando como base la resistencia mecánica a la tracción obtenida y la literatura, en piezas de pared delgada con la configuración y condiciones de flujo radial se promueve la interacción entre los refuerzos o cargas mismas utilizando al Polipropileno homopolímero como matriz, visto al aumentarse la presión de inyección, lo que puede crear menores fuerzas interfaciales (fuerzas de Van der Waals) entre el polímero y el agente reforzador. Esto debido a la posible existencia de un contacto mayor entre las mismas fibras o partículas, lo que ocasiona una menor resistencia mecánica a la tracción, por lo que el esfuerzo de la matriz discontinua será el determinante; además de inducirse a la formación de espacios que serán concentraciones de esfuerzos, favoreciendo la propagación interfacial de grietas. Sin embargo, esta resistencia mejora en el PP homopolímero natural sin cargas o refuerzos por la posible inferencia del deslizamiento y alineación de las cadenas moleculares por el esfuerzo cortante generado al aumentar la presión de inyección, marcando su comportamiento a mayores velocidades de inyección.
- Con base en literatura y la resistencia mecánica a la tracción obtenida aumentando la presión de inyección y la velocidad de inyección, en piezas de pared gruesa con la configuración y condiciones de flujo directo continuo hacia la cavidad puede mejorar la unión interfacial del Polipropileno como material compuesto y por ende infiere en una mejora de la movilidad de las cadenas moleculares del polímero, favoreciendo que éstas interactúen más con el refuerzo o carga; tendiendo la resistencia a la tracción del PP homopolímero con carga de Talco y refuerzo de fibra de vidrio a ser constante.
- La rigidez relativa obtenida en el Polipropileno homopolímero incrementa con el uso de agentes de refuerzo particulados planares y fibrados, Talco y fibra de vidrio respectivamente. Considerando que en piezas de pared delgada esta rigidez en el PP homopolímero natural presentó un comportamiento a la alza a presiones y velocidades de inyección altas, lo que no sucedió en el reforzado, ya que se obtuvo una tendencia a la baja; mientras que utilizando como carga al talco su comportamiento tiende a ser constante.

- En el proceso de inyección, la caída de presión dentro del molde es resultado, generalmente, del diseño del molde. La formación de turbulencia y la transmisión de calor ineficaz son relevantes en este hecho. Por lo que se propone evitar cambios bruscos del flujo, así como secciones que distribuyan y favorezcan un flujo continuo y un enfriamiento uniforme. De este modo, una sección circular para los canales de transmisión y un canal de estrangulamiento o entrada de ventilador cumplen con estas características. Hay que considerar que las condiciones físicas del molde también influyen en esta pérdida de presión.
- Este trabajo ha mostrado que no sólo las propiedades del material se ven influenciadas por su constitución química y las características del molde, sino también por los parámetros a controlar durante el proceso de transformación en uno de los polímeros con mayor uso a nivel mundial.
- A pesar de que PP tiene una composición química sencilla la presencia de fases y direcciones del flujo dentro de la cavidad implican la existencia de diversidad en las propiedades mecánicas de este polímero, a consecuencia de las condiciones del proceso.
- A pesar de que el manejo de una máquina de inyección es sencillo y que el llenado de cavidades es complejo, no cabe duda de que el control de las propiedades mecánicas del material es complicado por todas las razones expuestas en este trabajo.

B. APORTACIONES A FUTURO.

Con el fin de investigar con mayor profundidad el comportamiento mecánico del polipropileno en relación a su estructura polimérica, así como las implicaciones que tiene el peso del material en sus propiedades mecánicas, se propone:

- El estudio del ordenamiento de las cadenas moleculares en muestras de polipropileno homopolímero natural, reforzado con fibra de vidrio y con carga de talco obtenidas mediante el proceso de inyección, con el fin de sustentar lo expuesto anteriormente.
- El estudio de las propiedades mecánicas del polímero en función del punto donde la máquina cambia el desarrollo del proceso de inyección, es decir, donde conmuta de presión de inyección a presión de sostenimiento. Ya que mediante la localización de este punto se puede determinar el peso máximo de la pieza, mediante diferentes procedimientos, y con esto mejorar las propiedades del material.
- Cabe señalar, que el tomar con mayor énfasis la presión de sostenimiento, ésta sería la determinante para alcanzar las mejores propiedades del material.
- Se propone realizar el trabajo con otro proveedor de material a fin de encontrar las variaciones pertinentes en cuanto al llenado de las cavidades y su influencia sobre las propiedades del material.

GLOSARIO

- **Alabeo:** alargamiento no simétrico de una pieza.
- **ASTM:** Associate for Standards Testing of Materials.
- **Atáctico:** todos los grupos laterales de la cadena polimérica se presentan en grupos atómicos que se colocan al azar a ambos lados de la cadena durante la condensación polimérica, es decir, que se agrupan de forma desordenada en cualquier lado de las cadenas lineales.
- **Bancada:** parte de la máquina de inyección donde se mueve la unidad de inyección.
- **Bebedero:** parte del parte del molde en forma cónica por donde ingresa el material plástico, también conocida como mazarota ó canal de entrada al molde.
- **Biorientación:** orientación de la matriz polimérica en sentido axial y perpendicular a éste.
- **Blend:** mezcla entre distintos polímeros, está es una analogía a las aleaciones de metales.
- **Boquilla:** parte de la máquina de inyección que hace contacto directo con el molde y por donde fluye el material fundido del cilindro plastificador al molde.
- **Calor Específico:** cantidad de calor que se necesita para elevar un grado centígrado la temperatura de un material por unidad de peso.
- **Canal de Distribución:** constituye la parte del sistema de llenado que distribuye el material plástico, uniendo las cavidades del molde con el bebedero, también conocido con el nombre de araña ó repartidor de colada.
- **Canal de Estrangulamiento:** es la parte del sistema de llenado presente en el molde que une a la cavidad de la pieza con el canal de distribución.
- **Capa Cortante:** zona en donde se presentan los efectos del esfuerzo cortante orientando la dirección del flujo polimérico.
- **Capa Fría:** zona de la pieza donde el flujo plástico hace contacto primero con las paredes del molde , solidificándose primero.
- **Carcaza:** cubierta de diversos aparatos eléctricos, electrónicos y electrodomésticos.
- **Carga:** se denomina a todo tipo de partículas que se agregan a un material para mejorar sus propiedades a la flexión principalmente, ocupando espacio, procesando al material a bajos costos.
- **Carga Completa:** cantidad de material a inyectar dependiendo del tipo de pieza, de molde y de las condiciones de moldeo.

- **Catalizador Estéreo-específico:** producto que propicia que obtengan un polímero de estructura regular.
- **Caudalímetro:** parte del sistema de enfriamiento para distribuir al agua de refrigeración al molde.
- **Cavidad:** parte del molde que da forma a la pieza a inyectar, siendo la imagen en negativo de la pieza.
- **Chorro (Jetting):** condición de flujo que se forma en las paredes del molde en forma de zig-zag.
- **Cilindro de Plastificación:** parte fundamental de la unidad de plastificación de la máquina y donde se realiza la fundición del material.
- **Cojín de Masa:** cantidad de masa que permanece dentro de la zona de la boquilla después de un disparo de material hacia el molde, con el fin de evitar el retorno del material ya dentro del molde.
- **Contrapresión:** presión ejercida durante la dosificación para llenar el molde, evitando defectos en la pieza terminada. No todos los polímeros la necesitan durante su procesamiento.
- **Colada:** material plástico sólido formado a partir del sistema de llenado ó alimentación que dirige al material fundido a la cavidad.
- **Copolímero:** estructura polimérica compuesta de dos o más clases diferentes de monómeros.
- **Cristalinidad:** proporción de masa cristalina en un polímero con estructura semicristalina, con respecto a la masa total del polímero.
- **DAM:** guía simple y empírica para el llenado del molde, denominada Diagrama de Area del Molde.
- **Descompresión:** movimiento de retiro de la unidad de inyección una vez inyectado el material en el molde, evitando la acumulación de gases en algunos polímeros de ingeniería como el ABS.
- **Disgregación:** distribución uniforme del material plástico, el cual se encuentra en su estado más líquido en la zona de salida del cilindro plastificador.
- **Dosificación:** acción que realiza la máquina de inyección para volver a llenar el cilindro de inyección para el siguiente disparo.
- **Esferulita:** zona cristalina de crecimiento radial.
- **Esfuerzo Cortante (τ):** es el esfuerzo que deforma a los elementos del fluido plástico durante su procesamiento, además de que depende de la velocidad de corte y de la viscosidad del fluido.
- **Estereorregularidad:** ordenamiento regular de la estructura molecular de las cadenas de un polímero.

- **Fase α :** fase donde se presentan en su mayoría zonas cristalinas.
- **Fase β :** fase donde se presentan en su mayoría zonas amorfas.
- **Fase de empacamiento:** fase donde se compacta la masa para asegurar el correcto llenado de las cavidades del molde.
- **Fase de Inyección:** fase donde solo se realiza el llenado del molde, generando presiones menores a las presentes en la fase de empacamiento.
- **Fluido no Newtoniano:** característica que tienen algunos fluidos a no presentar un estado homogéneo y comportamiento no lineal en su esfuerzo.
- **Flujo Fuente:** parte frontal del flujo, el cual presenta un perfil por efecto del esfuerzo cortante, por el deslizamiento contra las paredes del molde.
- **Flujo Laminar:** se presenta cuando un flujo tiene un comportamiento lineal por un conducto.
- **Fuerzas de Cohesión (intermoleculares):** fuerzas presentes en los polímeros que mantienen unidas a las moléculas.
- **Grado de Cristalización:** está directamente relacionado con el grado de nucleación y con la velocidad de crecimiento de los núcleos.
- **Grado de Nucleación:** cantidad de zonas cristalinas presentes en un polímero.
- **Grado de Polimerización:** cantidad de monómero en un polímero.
- **Homopolímero:** estructura polimérica compuesta de una sola clase de monómero.
- **Husillo:** tornillo sin fin alijado en el cilindro plastificador que tiene un movimiento giratorio y un desplazamiento axial, los cuales mueven al material desde la zona de alimentación hasta la boquilla y facilita la plastificación.
- **Índice de Fluidéz:** resistencia del polímero fundido para fluir, siendo una medida de la viscosidad del flujo fundido.
- **Interdifusión:** entrelazamiento de las cadenas moleculares del polímero, que mejoran la unión de éstas aumentando las propiedades a la tracción del mismo.
- **Interfacial:** zona donde hacen contacto dos cuerpos.
- **Isotáctico:** todos los grupos laterales de la cadena polimérica toman una posición estereoquímica durante la condensación polimérica, es decir que se agrupan de un solo lado de las cadenas lineales.

- **Líneas de Unión:** cuando se encuentran dos frentes de flujo en una cavidad se forman estas líneas.
- **Molécula Ramificada:** molécula formada a partir de una cadena de moléculas lineal y la cual tiene otras unidas a sus lados.
- **Película Biorientada:** formación de película en dos direcciones diferentes, en dirección axial y transversal principalmente.
- **Película Cast:** hoja o película de material plástico, obtenida por medio de un dado plano, enfriado con un rodillo frío o con agua.
- **Peso Molecular:** unidad estructural que constituye a un polímero, determinado por el número de monómeros en el polímero o grado de polimerización
- **Polímero:** estructura compuesta de muchos meros.
- **Polimerización:** proceso mediante el cual una cadena larga o red de moléculas se crea a partir de otras relativamente pequeñas, es decir, es la unión de muchos monómeros mediante una reacción química.
- **Polipropileno Random Clarificado:** polipropileno Copolímero con una estructura de grupos laterales CH_3 al azar, con la característica de tener mayor transparencia.
- **Presión de Inyección:** presión con la cual se empuja al material fundido hacia el molde.
- **Presión de Sostenimiento:** presión que se ejerce inmediatamente después de alcanzar la inyección para evitar que el flujo del material plástico regrese del molde y para evitar defectos superficiales en la pieza.
- **Propileno:** monómero base para la polimerización del Polipropileno.
- **Pseudoplástico:** comportamiento que presentan algunos fluidos no newtonianos al presentarse un adelgazamiento (fundición) del fluido por aumento de temperatura.
- **Punto de Bloqueo:** momento cuando el tiempo de sostenimiento se vuelve innecesario.
- **Punto de Corte:** instante donde la presión máxima de inyección pasa a la presión de sostenimiento.
- **Rafia:** son filamentos o cintas monorientadas con la dirección que proporciona la máquina de proceso..
- **Rebaba:** sobrante de material que sobresale de la pieza terminada en forma de una hoja delgada de material formada entre la unión de las dos placas del molde.

- **Refuerzo:** se denomina a toda partícula agregada en forma de fibras, en general sin fibras naturales o de otros polímeros.
- **RTF:** guía simple y empírica para el llenado del molde, denominada Razón de la Trayectoria del Flujo.
- **Sindiotáctico:** todos los grupos laterales de la cadena polimérica se colocan en posiciones regularmente alternas durante la condensación polimérica.
- **Tacticidad:** se determina por el ordenamiento de los grupos laterales y el catalizador empleado.
- **Temperatura de Degradación:** temperatura a la cual se quema o descompone un polímero.
- **Temperatura del Cilindro:** temperatura a la cual se encuentra el cilindro plastificador.
- **Temperatura de la Masa:** temperatura a la cual se encuentra el material plástico.
- **Temperatura de Transición Vítre:** temperatura por debajo de la cual el polímero amorfo adopta una estructura vítrea rígida.
- **Termoplásticos:** materiales plásticos que pueden fundirse una vez procesados con anterioridad.
- **Tiempo de Sostenimiento:** tiempo durante el cual se aplica la presión de sostenimiento, la cual compensa la contracción volumétrica causada por el enfriamiento del material en la cavidad.
- **Tolva:** contenedor sobre la inyección por donde se suministra el material hacia el cilindro plastificador.
- **Transcristalización:** formación de núcleos o zonas cristalinas alrededor de las fibras de los termoplásticos reforzados con fibras o de cadenas moleculares lineales ya establecidas.
- **Revoluciones del Husillo:** velocidad a la que gira el tornillo sin fin.
- **Vacuolas:** burbujas de aire atrapadas dentro de un pieza provocada por la contracción del plástico durante la solidificación.
- **Válvula Antirretorno:** parte del cilindro de inyección que permite el paso de material y controla el flujo plástico de manera uniforme, sin dejarlo regresar, además de que permite que exista el cojín de masa.
- **Fuerzas de Van der Waals:** son fuerzas de cohesión que actúan entre las cadenas poliméricas y son relativamente débiles.
- **Velocidad de Inyección:** velocidad con la cual se empuja al material fundido hacia la cavidad con la presión de inyección.

- **Velocidad de Corte:** es cuando el material plástico se mueve a una velocidad constante en las paredes del molde para obtener un objeto que se quiera elaborar, además esta relacionada con la velocidad de deformación de los elementos del fluido plástico.
- **Velocidad de crecimiento de los núcleos:** velocidad a la que empiezan a formar las zonas cristalinas cuando se alcanza la temperatura de cristalización.
- **Venteos:** hendiduras de dimensiones reducidas, según el material a inyectar, localizadas al final de la cavidad del molde, con el objetivo de evitar aire atrapado.

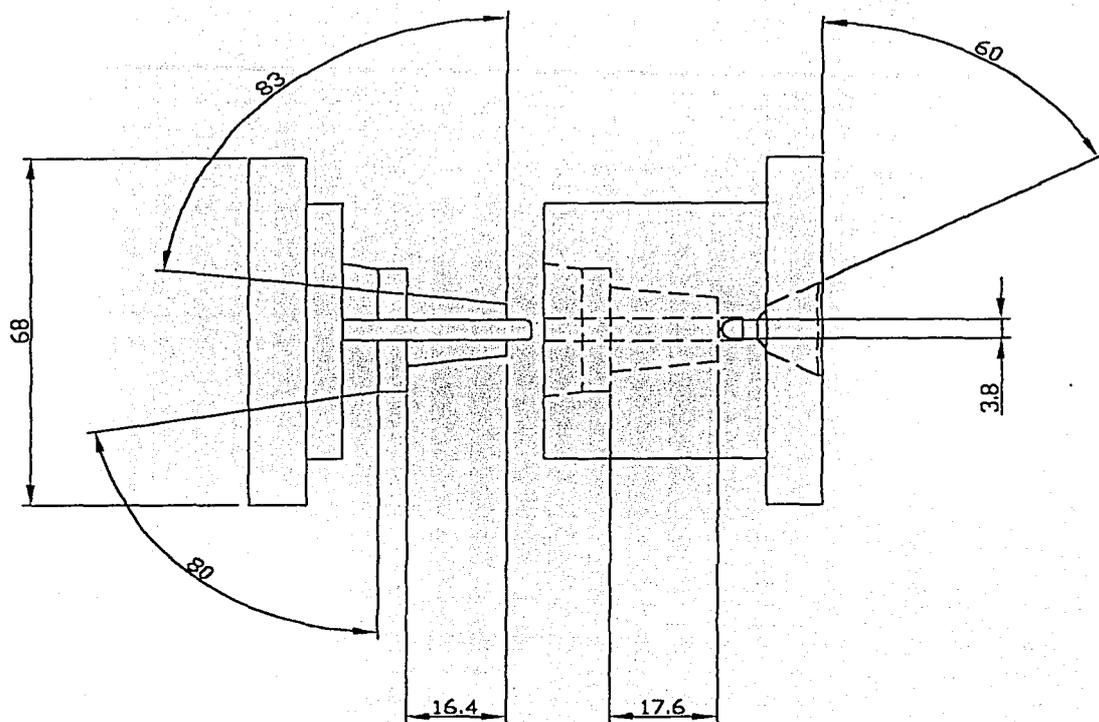
REFERENCIAS

1. Budinski Kenneth G; **Engineering Materials, Properties and Selection**; Prentice Hall; 5ª Edición; Estados Unidos de America 1996.
2. Instituto Mexicano del Plástico Industrial (IMPI); **Enciclopedia del Plástico 2000**; Centro Empresarial del Plástico S.A. de C.V.; Tomo 1; 2ª edición; México 1999-2000.
3. Menges G., Moren G.; **Moldes para Inyección de Plásticos**; Editorial Gustavo Gili S.A.; España 1975.
4. Rubin Irvun I.; **Materiales Plásticos, Propiedades y Aplicaciones**; Limusa-Noriega Editores; 1ª Edición; México 1999.
5. Morton-Jones D.H.; **Procesamiento de Plásticos**; Limusa-Noriega Editores; 2ª Edición; México 1999.
6. Ramos de Valle Luis Francisco; **Extrusión de Plásticos, Principios Básicos**; Editorial Limusa; 1ª Edición; México 1993.
7. Spe Mink Walter; **Inyección de Plásticos**; Editorial Gustavo Gili S.A; Barcelona 1971.
8. Savgorodny V.K.; **Transformación de Plásticos**; Editorial Gustavo Gili S.A.; Barcelona 1973.
9. Birley Artur W., Haworth Barry, Batchelor Jim; **Physics of Plastics, Processing, Properties and Materials Engineering**; Editorial Hanser; Alemania 1992.
10. Wilkinson Arthur N., Ryan-Anthony J.; **Polymer Processing and Structure Development**; Kluwer Academic Publishers; 1ª Edición; Gran Bretaña 1998.
11. Driver Walter E.; **Química y Tecnología de los Plásticos**; Compañía Editorial Continental S.A. de C.V.; 3ª Edición; México 1991.
12. Dym Joseph B.; **Injection Mold and Molding**; Van Nostrand Reinhold Company; 1ª Edición; USA 1979.
13. Malloy Robert A.; **Plastic Part Design for Injection Molding**; Hanser Publishers; 1ª Edición; USA 1994.
14. ASTM D 647-88a; **Standard Practice for Desing of Molds for Test Specimens of Plastic Molding Materials**; Annual Book of ASTM Standards 1993 ; section 8; **Plastics II**; Vol. 08.02, USA 1993.
15. ASTM D 638-99; **Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics**; Annual Book of ASTM Standards 2000 ; section 8 ; **Plastics II**; Vol. 08.02, USA 2000.

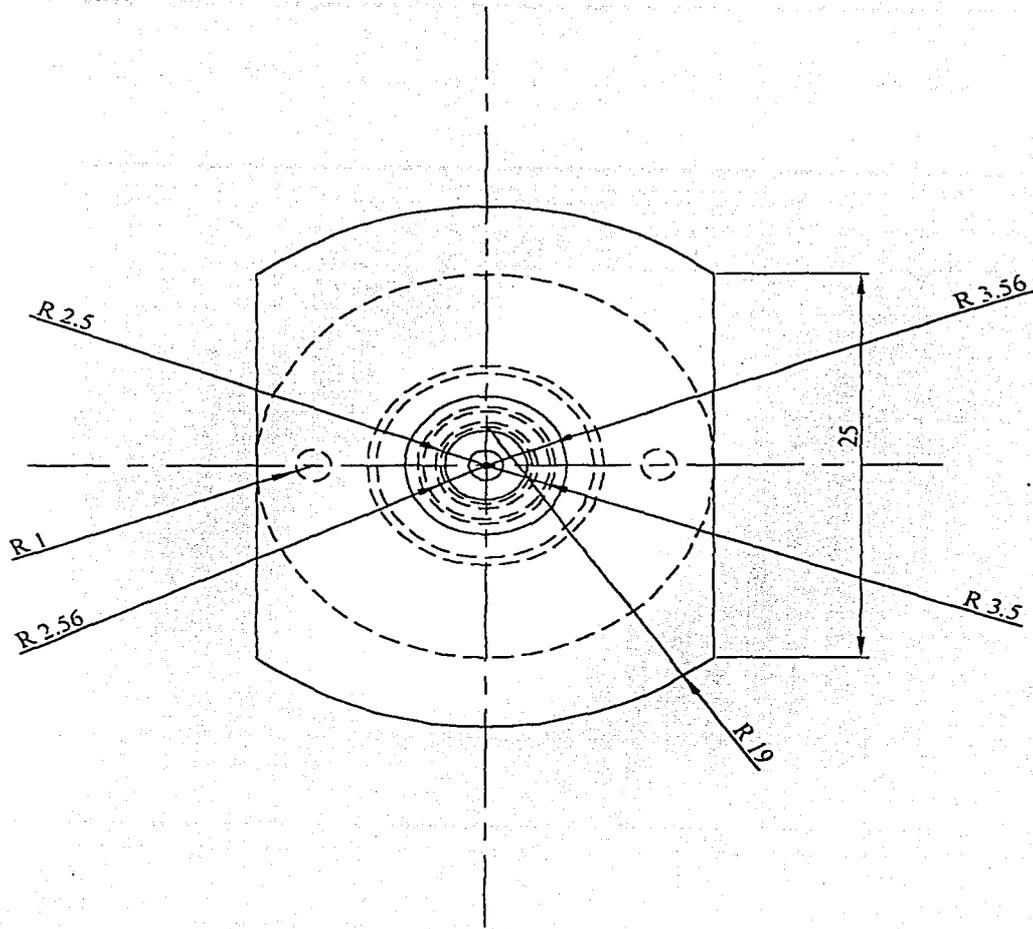
16. ASTM D882-97; **Standard Test Method for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting**; Standard Annual Book of ASTM Standards 1998; section 8 ; **Plastics II**; Vol. 08.03, USA 2000.
17. Centro Empresarial del Plástico S.A. de C.V. (I M P I); **Enciclopedia del Plástico 2000**; Tomo 1; 2ª Edición; México 1999/2000.
18. Mannesmann Demag Kunststofftechnik; **La Inyección en Forma Breve y Suscinta**; Manual de Proceso; Avance Industrial S.A.
19. Mannesmann Demag Kunststofftechnik; **Instrucciones de Servicio ERGOtech pro con Terminal de Visualización**; Manual de Operación; Avance Industrial S.A.
20. Karger - Kocsis J.; **Polypropylene, Structure, Blends and Composites**; Composites; Vol. 3; Champ & Hall Publishers; 1ª Edición; Gran Bretaña 1995.
21. P. Martinez de los Mariers; **Química y Física de los Altos Polímeros**; Alambra; Madrid; 1972.
22. Raymond B. Saymour; **Introducción a la Química de los Polímeros**; Reverté; Barcelona; 1995.
23. Ramón Anguita Delgado; **Moldeo por inyección**; Blume; España; 1975.
24. Donald J. Jambro; **Manufacturing Proceses: Plastics**; Prentice Hall; USA; 1976.
25. Ernesto Ureta Barrón; **Polímeros: Estructura, propiedades y aplicaciones**; Limusa; México; 1996.
26. Miguel Uribe Velasco, Pierre Y. Meherenberger; **Los Polímeros: Síntesis y caracterización**; Limusa Noriega; México; 1990.
27. J. M. G. Cowie; **Polymers Chemistry and Physics of Modern Materials**; Blackie; Londres; 1991.

PAGINAS DE INTERNET.

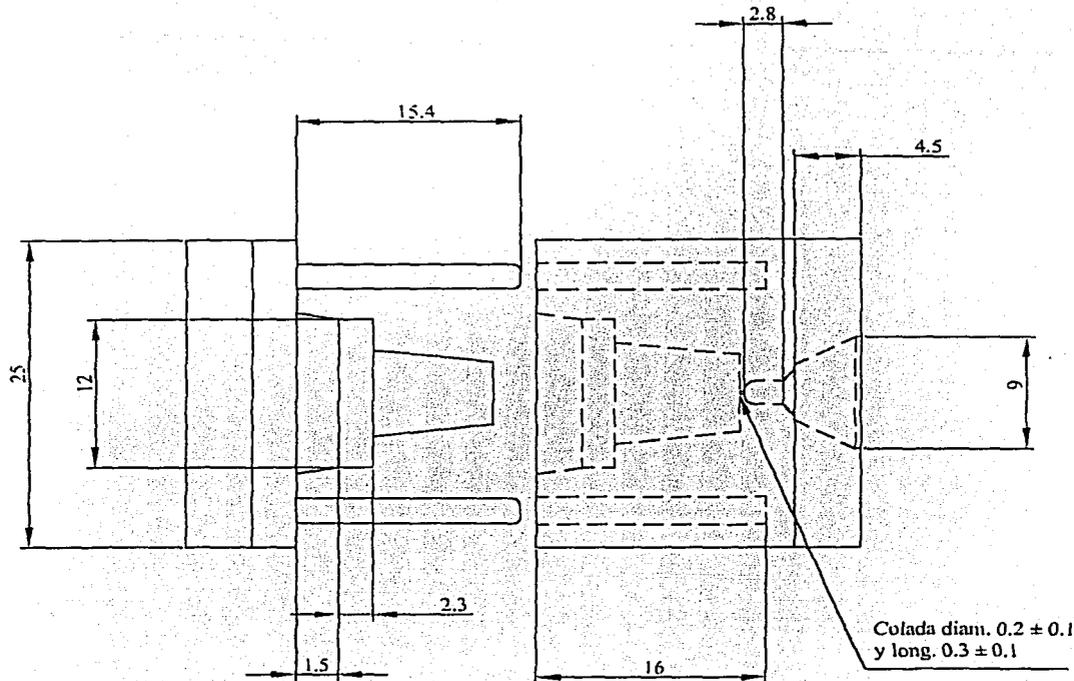
- <http://www.plastivida.com.ar/plasticos/usos/5.htm>
- http://www.geocities.com/capacitacio_en_plasticos/mpi.htm
- <http://sut2.sut.ac.th/engineering/Polymer/links/2.htm>
- <http://www.tecnologiadelplastico.com.mx/>



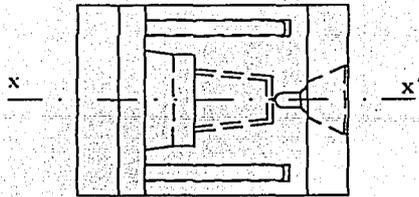
| | | | | | |
|-----------------------------|----------------------------|-------------|---|---------------------|----------------|
| Ref.: | Designación: VISTA FRONTAL | | | ANEXO 2 | |
| Acotación: cm | Revisado: M.T.B. | Cantidad: 1 | Archivo: vaso1.dwg | Fecha: 28/Oct/02 | Escala: S/E |
| Dibujó: Alan Tapia Velez | | | Título: MOLDE PARA VASOS DE 200mL DE UNA CAVIDAD | | |
| | | | No. de dibujo: 1/4 | UNAM | |



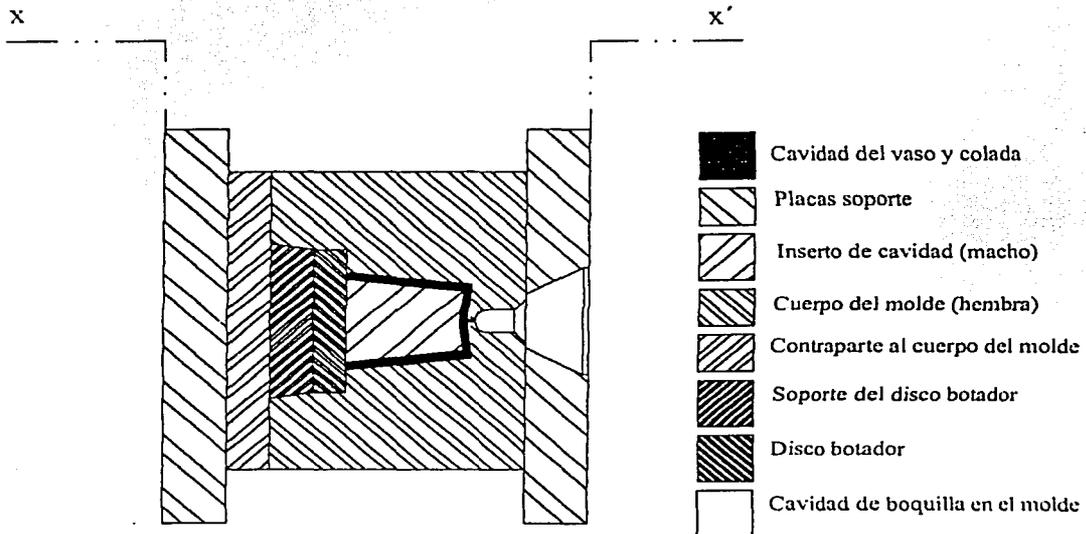
| | | | | | |
|-----------------------------|----------------------------|-------------|---|---------------------|----------------|
| Ref.: | Designación: VISTA LATERAL | | | ANEXO 2 | |
| Acotación: cm | Revisado: M.T.B. | Cantidad: 1 | Archivo: vaso2.dwg | Fecha: 28/Oct/02 | Escala: S/E |
| Dibujó: Alan Tapia Velez | | | Título: MOLDE PARA VASOS DE 200mL DE UNA CAVIDAD | | |
| | | | No. de dibujo: 2/4 | UNAM | |



| | | | | | |
|-----------------------------|-----------------------------|-------------|---|---------------------|----------------|
| Ref.: | Designación: VISTA SUPERIOR | | | ANEXO 2 | |
| Acotación: cm | Revisado: M.T.B. | Cantidad: 1 | Archivo: vaso3.dwg | Fecha: 28/Oct/02 | Escala: S/E |
| Dibujó: Alan Tapia Velez | | | Título: MOLDE PARA VASOS DE 200ml DE UNA CAVIDAD | | |
| | | | No. de dibujo: 3/4 | UNAM | |



Corte del molde de una cavidad para vasos de 200 ml, en vista superior



Corte de la vista frontal, mostrando la distribución del flujo en la cavidad y colada

| | | | | | |
|-----------------------------|-----------------------------|-------------|---|---------------------|----------------|
| Ref.: | Designación: PLANO DE CORTE | | ANEXO 2 | | |
| Acotación: cm | Revisado: M.T.B. | Cantidad: 1 | Archivo: vaso4.dwg | Fecha: 28/Oct/02 | Escala: S/E |
| Dibujó: Alan Tapia Velez | | | Título: MOLDE PARA VASOS DE 200ML DE UNA CAVIDAD | | |
| No. de dibujo: 4/4 | | | UNAM | | |

CONDICIONES DE INYECCION TIPICAS

Condiciones de Secado:

No requiere secado

Temperatura del Molde:

Cargado 30 - 80°C

Reforzado 40 - 90°C

Temperatura de Fusión:

Cargado 165 - 170°C

Reforzado 165 - 170°C

Velocidad del Husillo:

40 - 80 r.p.m.

Contrapresión:

0 - 50 psi

Presion de Inyección:

12,000 - 25,000 psi

Perfil Típico de Temperaturas:

| | Cargado | Reforzado |
|---------------|-------------|-------------|
| Alimentación: | 180 - 215°C | 190 - 225°C |
| Compresión: | 190 - 220°C | 200 - 230°C |
| Dosificación: | 190 - 220°C | 200 - 230°C |
| Boquilla: | 185 - 215°C | 195 - 225°C |

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN