



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**“PROCESAMIENTO DE COMPUESTOS ALMIDÓN  
TERMOPLÁSTICO-FIBRAS NATURALES POR LA TÉCNICA DE  
MOLDEO POR INYECCIÓN”**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

**PRESENTA**

**JOSÉ ALEJANDRO DELGADO RANGEL**

**DIRIGIDO POR**

**Dr. OMAR ACONELTZIN JIMÉNEZ AREVALO**

**SANTIAGO DE QUERÉTARO, QUERÉTARO, 2007.**

**Biblioteca Central**  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO

No. Adq. H 72909

No. Título [REDACTED]

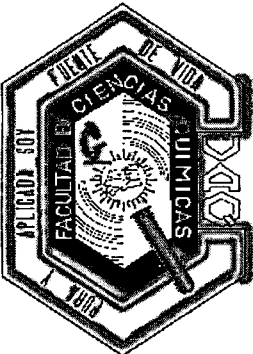
Clas. TS 664.2

D 352 p

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

*[Handwritten scribble]*



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE QUERÉTARO**

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**“PROCESAMIENTO DE COMPUESTOS ALMIDÓN  
TERMOPLÁSTICO-FIBRAS NATURALES POR LA TÉCNICA DE  
MOLDEO POR INYECCIÓN”**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

**PRESENTA**

**JOSÉ ALEJANDRO DELGADO RANGEL**

**DIRIGIDO POR**

**Dr. OMAR ACONELTZIN JIMÉNEZ AREVALO**

**SINODALES**

**Dr. OMAR ACONELTZIN JIMÉNEZ AREVALO**  
DIRECTOR

**M. en A. LUIS LÓPEZ JIMÉNEZ**  
SINODAL

**Dr. GERARDO TORRES CAMACHO**  
SINODAL

**Dr. ALEJANDRO MANZANO RAMÍREZ**  
SINODAL

A mis padres, les dedico éste y todos mis éxitos.  
Por el amor, comprensión y apoyo recibidos desde siempre.

## AGRADECIMIENTOS

Al Dr. Omar Aconeltzin Jiménez Arévalo, por su valioso apoyo, por mostrarme una perspectiva diferente, por el interés presentado, por su incomparable amistad.

Al Dr. Fernando Martínez Bustos, por abrirme las puertas del CINVESTAV-IPN, unidad Querétaro; por la amplia ayuda económica, académica y moral brindada a lo largo del trabajo.

A mis profesores, el M. en A. Luís López Jiménez, el Dr. Gerardo Torres y el Dr. Alejandro Manzano, por su aportación a este trabajo.

Al Centro de Tecnología Avanzada, CIATEQ, A.C., institución en la que orgullosamente se desarrolló la mayor parte del presente; a todo su personal, en especial al Dr. Agustín Escamilla y al Dr. Guillermo Muñoz por el apoyo y los recursos que tan amablemente fueron brindados.

Al Fondo Mixto CONACYT-Gobierno del Estado de Querétaro por el apoyo económico a través del proyecto QRO-2004-C01-35.

Al Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional, CINVESTAV-IPN Unidad Querétaro, por los medios y recursos prestados, al personal auxiliar del centro, Mundo, Marce y Juan; a los grandes amigos que allí conocí, Claudia, Ingrid, Bety, Pats, Tomás, entre ellos, por su apoyo, consejos y amistad.

Al Dr. Ernesto Aguilar Palazuelos, a la I. Q. Cynthia Esteffany Morín Alcazar, compañeros de proyecto, amigos para siempre.

A Jorge, Omar y Moisés; por estar siempre allí, dando lo mejor.

## INDICE GENERAL

Contenido	Página
INDICE GENERAL	i
INDICE DE CUADROS	iv
INDICE DE FIGURAS	v
RESUMEN.	—
I. INTRODUCCIÓN.	1
II. ANTECEDENTES	3
VI.1. Materiales poliméricos	3
VI.2. Materiales compuestos de matriz polimérica	4
VI.3. Polímeros naturales y materiales biodegradables	5
VI.4. Almidón	8
VI.4.1. Almidón termoplástico	9
VI.4.2. Investigaciones sobre polímeros basados en almidón (SBP's)	10
VI.5. Fibras	12
VI.5.1. Fuentes de fibras naturales	13
VI.5.2. Producción nacional de fibras naturales	14
VI.5.3. Fibra de caña	14
VI.6. Extrusión	17
VI.6.1. Flujo y resistencia	17
VI.6.2. Cizalla y mezcla	18
VI.6.3. Energía	18
VI.6.4. Conversión de energía mecánica	20
VI.6.5. Componentes del proceso de extrusión	20
VI.7. Inyección	20
VI.7.1. Etapas en el moldeo por inyección	24
VI.7.2. Puntos de inyección, y bebederos	29
VI.7.3. Temperatura del molde	30
VI.7.4. Principios fundamentales de la inyección	30

VI.7.5.	Parámetros de proceso y sus consecuencias	33
VI.7.6.	Regulación de la máquina	36
VI.7.7.	Compactación	37
III.	HIPÓTESIS.	39
IV.	OBJETIVOS.	40
IV.1.	General.	40
IV.2.	Específicos.	40
V.	METODOLOGÍA.	41
V.1.	Materiales.	41
V.1.1.	Materia prima	41
V.2.	Métodos.	41
V.2.1.	Preparación de la materia prima	41
V.2.2.	Inyección	42
V.2.3.	Temperaturas de proceso	42
V.2.4.	Proceso de optimización	43
V.2.5.	Prueba de tensión	43
VI.	RESULTADOS.	46
VI.1.	Temperaturas de proceso.	46
VI.2.	Optimización	46
VI.2.1.	Carga	46
VI.2.2.	Velocidad de carga	46
VI.2.3.	Velocidad de carga	47
VI.2.4.	Velocidad de inyección	48
VI.3.	Tensión	48
VI.3.1.	Peso contra porcentaje de elongación.	48
VI.3.2.	Peso contra módulo de elasticidad	49
VI.3.3.	Distancia de carga contra porcentaje de elongación.	50
VI.3.4.	Distancia de carga contra esfuerzo máximo de tensión	51
VI.3.5.	Velocidad de inyección contra porcentaje de elongación.	51
VI.3.6.	Velocidad de inyección contra esfuerzo máximo de tensión	52
VI.3.7.	Velocidad de inyección contra módulo de elasticidad	53

VI.3.8.	Velocidad de carga contra porcentaje de elongación.	53
VI.3.9.	Velocidad de carga contra esfuerzo máximo de tensión	54
VI.3.10.	Velocidad de carga contra módulo de elasticidad	55
VII.	DISCUSIÓN.	56
VII.1.	Temperatura	56
VII.2.	Temperatura de molde	57
VII.3.	Humedad	57
VII.4.	Distancia de carga	58
VII.5.	Velocidad de carga	59
VII.6.	Velocidad de inyección	59
VII.7.	Ventana de proceso	60
VIII.	CONCLUSIONES.	62
IX.	BIBLIOGRAFÍA.	63
X.	ANEXOS.	66
X.1.	Molde para la inyección de probetas halterio	66



## INDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Diseñadores de polímeros biodegradables	7
2	Caracterización química de las fibras de caña	15
3	Composición física promedio del bagazo	16
4	Composición morfológica del bagazo limpio	16

## INDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Componentes del almidón a) amilosa, b) amilopectina	9
2	Gelatinización de un gránulo de almidón	10
3	Proceso fundamental de extrusión	17
4	Cizallamiento	19
5	Esquema energético del proceso de extrusión	19
6	Partes típicas de un extrusor	21
7	Maquina de inyección y sus partes	23
8	Unidad de inyección con husillo plastificador	23
9	Molde de inyección	24
10	Etapas en el moldeo por inyección	25
11	Peso contra presión de mantenimiento	37
12	Dimensiones de la probeta halterio utilizada.	43
13	Distancia de carga contra peso	47
14	Velocidad de carga contra peso	48
15	Velocidad de inyección contra peso	49
16	Peso contra porcentaje de elongación	49
17	Peso contra módulo de elasticidad	50
18	Distancia de carga contra porcentaje de elongación	50
19	Distancia de carga contra esfuerzo máximo de tensión	51
20	Velocidad de inyección contra porcentaje de elongación	52
21	Velocidad de inyección contra esfuerzo máximo de tensión	52
22	Velocidad de inyección contra módulo de elasticidad	53

23	Velocidad de carga contra porcentaje de elongación	54
24	Velocidad de carga contra esfuerzo máximo de tensión	54
25	Velocidad de carga contra módulo de elasticidad	55
26	Ventana de proceso propuesta	61
27	Esquema de las tres placas del molde	66
28	Esquema de la placa central del molde	67
29	Dimensiones de las cavidades en la placa central	68

## RESUMEN.

La problemática actual sobre los residuos sólidos en nuestro país demanda la búsqueda de una solución pronta y bien sustentada. Debido a esto, ha surgido una tendencia común hacia los materiales reciclables y biodegradables, unos por su capacidad para reintegrarse a los procesos productivos, y los otros debido a su capacidad de ser asimilados por el ambiente. El almidón es un material de origen vegetal, el cual puede ser asimilado por el ambiente con ayuda de la humedad presente en el mismo, las fibras naturales en su mayoría están constituidas por celulosa, la cual agrega propiedades mecánicas al almidón, la celulosa es también una sustancia de origen vegetal, la cual está presente en todas las plantas y sus desechos no representan un peligro para el medio. El presente trabajo significa un avance en la investigación dentro del rubro de los materiales biodegradables de base almidón debido a que no existe mucha información acerca de la capacidad en dichos materiales para ser procesados por inyección. En este trabajo se describe un proceso de inyección para materiales constituidos por almidón termoplástico y fibra natural, en el que se varían los parámetros considerados importantes, con el fin de obtener piezas que cumplan con las características físicas comunes de una pieza moldeada por inyección.

## I. INTRODUCCIÓN.

En la actualidad existe una necesidad mundial de generar nuevos materiales amigables al medio ambiente, esto surge como resultado por un lado del estado actual de contaminación y por otro del emergente desarrollo de una cultura para la preservación de ecosistemas. Los tipos de materiales que cumplen con esta necesidad son los materiales biodegradables o los reciclables. Los materiales biodegradables son aquellos que se pueden transformar, con ayuda de agentes biológicos como microorganismos, en sustancias más simples y abundantes como son el bióxido de carbono, el agua y la materia orgánica. Se entiende como materiales reciclables aquellos que después de haber completado su vida útil son utilizados como materia prima para fabricar otros bienes con características similares o muy diferentes.

Por otra parte, la gran mayoría de los materiales de matriz polimérica utilizados hoy en día provienen de recursos naturales no renovables, principalmente del petróleo, esto hace que las materias primas estén sujetas a la problemática actual y futura de la industria petroquímica tanto en el ámbito económico como social y ambiental, para solucionar esto, es necesario el desarrollo de materiales que satisfagan los requerimientos de la industria y ayuden a disminuir los problemas relativos al petróleo.

El almidón es una materia prima de origen natural que se encuentra en gran cantidad de vegetales como el maíz, la papa y el trigo. Éste se encuentra formado principalmente por los compuestos orgánicos poliméricos amilosa y amilopectina, pudiendo ser degradado con ayuda de microorganismos en presencia de agua como humedad. De ésta manera, el almidón surge como una propuesta de material biodegradable de origen natural, que por sus cualidades es susceptible de ser moldeado por inyección termoplástica. Sin embargo, las propiedades mecánicas del almidón por si solo como polímero son bajas en relación con los polímeros de uso común, ya que es frágil y en todo momento susceptible a la humedad.

Las fibras son materiales de refuerzo para matrices frágiles, siendo entonces, los materiales compuestos reforzados con fibras, un tipo de material común cuando se necesita aumentar las propiedades mecánicas de la matriz. En el contexto de los materiales de origen natural, la caña provee fibras de celulosa, aptas para ser utilizadas como refuerzo en materiales de base almidón; la fibra de caña es un material con una alta disponibilidad y fácil de llevar al tamaño requerido.

La inyección termoplástica es un proceso de moldeo para materiales poliméricos ampliamente difundido, admite el reciclado de materia prima en un porcentaje relativamente alto y permite el diseño de un sin número de piezas.

## II. ANTECEDENTES

### VI.1. Materiales poliméricos

La palabra plástico, viene del griego "plastikos", que significa capaz de ser moldeado. Los primeros plásticos como tal no eran basados en petróleo. Eran hechos de fuentes animales, vegetales o minerales. Los productos elaborados con estos materiales incluyen cepillos de mano, botones, aislantes eléctricos, fonogramas y guantes médicos.

El primer plástico sintético fue inventado en 1869 por un albanés, impresor de Nueva York llamado John Hyatt. Él estaba investigando acerca de un sustituto de marfil para fabricar las bolas de billar (Crawford, 1998). Al combinar alcanfor con nitrato de celulosa, obtuvo un plástico que ahora nosotros conocemos como celuloide. Dicho plástico podía ser cortado, tallado y laminado. Como resultado, fue posible que muchos artículos que originalmente se fabricaban de marfil fueran producidos de celuloide, el cual es mucho menos costoso (Group, 2000).

En 1884, un químico francés inventó la primera fibra hecha por el hombre, llamada rayón. En 1919, un químico neoyorkino, intentando elaborar un nuevo y mejor barniz, tuvo éxito al controlar la reacción química y subsecuentemente producir un nuevo material ahora conocido como bakelita, que fue la primera resina completamente sintética. Éste material plástico llegó a ser ampliamente usado en la elaboración de teléfonos, asas para ollas y sartenes y gran número de aplicaciones, ya que puede ser moldeado en una variedad de formas y no es inflamable como el celuloide; su principal problema consiste en que es quebradizo y falla súbitamente. (Ram, 1997).

En el siglo XX, la industria petroquímica fue muy activa en el desarrollo y producción de materiales a base de petróleo. Muchos de éstos materiales fueron

descubiertos mucho antes, sin embargo, no pudieron ser producidos en masa debido a la falta de tecnologías. A mediados de los 40's la industria del plástico tuvo una expansión destacada, con lo que, al fin de la segunda guerra mundial, el mundo experimentó un gran cambio en el estilo de vida (Crawford, 1998).

La producción y el consumo en masa lograron que la industria de los plásticos creara nuevos negocios, productos, procesos, equipos y técnicas de mercado para vender productos alrededor del mundo. Cada vez más y más productos utilizados son fabricados de este material llamado plástico. Esto se debe a que los plásticos son una amplia variedad de compuestos que pueden ser moldeados, causando la aceptación de los consumidores debido a la variedad de colores y formas, de acuerdo a las exigencias estéticas, económicas y funcionales del mercado (Rosato y col., 2001).

## VI.2. Materiales compuestos de matriz polimérica

Las propiedades de los plásticos como tales son limitadas en diversos ámbitos; sus bajas propiedades mecánicas y sus puntos de fusión, entre otras características, los colocan en desventaja con respecto a los cerámicos y los metales. Debido a esto, se ha buscado la capacidad de sumar propiedades entre los tres principales grupos de materiales (metales, cerámicos y polímeros) dando lugar al grupo de los materiales compuestos.

La definición tradicional de materiales compuestos es la de un material con al menos dos fases, una continua y una dispersa. La fase continua es responsable del volumen ocupado y transfiere los esfuerzos a la fase dispersa. La fase dispersa es usualmente responsable de realzar una o más propiedades del compuesto. El objetivo de muchos materiales compuestos es un incremento de las propiedades mecánicas como resistencia a la tensión y dureza, sin embargo, otras propiedades pueden ser de interés, por ejemplo las propiedades de transporte (eléctrico o térmico) o densidad.



Los materiales de la matriz pueden ser metálicos, cerámicos, poliméricos o biológicos (Mano y col., 2004). En el caso de los polímeros, estos generalmente son usados como matriz, proporcionando una fase continua mecánicamente estable (Cheremisinoff, 1998) y fácilmente moldeable.

Existen dos tipos de agregados en forma de fase dispersa para los polímeros, éstos son refuerzos y cargas (Karger, 1991). Se consideran refuerzos a los materiales que se añaden a los plásticos para mejorar sus características mecánicas, como son las fibras de vidrio y carbono. Las cargas se emplean generalmente para aumentar la estabilidad dimensional, por ejemplo, micro-esferas de vidrio y talco (Mascia, 1974).

### VI.3. Polímeros naturales y materiales biodegradables

Los materiales plásticos convencionales de base petroquímica o polímeros sintéticos, no se degradan fácilmente en el medio ambiente debido a su alto peso molecular y a su carácter hidrófobo. Por consiguiente, la eliminación de estos plásticos se ha convertido en un gran problema para el medio ambiente, dando lugar a programas para reciclar, incinerar o convertir en composta estos residuos.

Los productos elaborados con los polímeros sintéticos convencionales son considerados inertes al ataque inmediato de microorganismos. Dicha propiedad hace que éstos materiales presenten un tiempo largo de vida media y, consecuentemente, provocan serios problemas ambientales, visto que, después de su desecho, demoran en promedio 100 años para que se descompongan parcialmente, aumentando así cada día, la cantidad de desecho plástico presente en el medio.

Los materiales biodegradables proveen una alternativa al problema de los productos basados en polímeros que se desechan al ambiente (Derval y col., 2005),

dichos materiales son aquellos que se pueden transformar, con ayuda de agentes biológicos como microorganismos, en sustancias mas simples y abundantes como son el bióxido de carbono, el agua y la materia orgánica. En el Cuadro 1 se muestran algunos de los diseñadores de polímeros biodegradables, así como sus productos, principal componente de la fórmula y algunos distribuidores comerciales.

Las resinas empleadas en la fabricación de plásticos biodegradables son de dos categorías: naturales y sintéticas. Las resinas naturales (o biopolímeros) tienen como base recursos renovables tales como el almidón, la celulosa, y los polihidroxicanoatos (PHA) producidos por microorganismos. Otros polímeros, como las proteínas y las pectinas, pueden también utilizarse, potencialmente, para desarrollar plásticos y polímeros biodegradables. Los polilactidos (PLA), es decir, poliésteres alifáticos formados por polimerización del ácido láctico, se incluyen generalmente en esta categoría, ya que el monómero puede producirse por fermentación (Stelson y col., 1999).

Los polímeros sintéticos se obtienen a partir del petróleo y de otros productos e incluyen polímeros de poliéster y polietileno. Un ejemplo de polímero sintético biodegradable es la policaprolactona, una resina de poliéster termoplástica. Recíprocamente, la modificación física o química de un biopolímero natural puede derivar en la pérdida o disminución de su biodegradabilidad (Mano y col., 2004).

En los últimos años se ha presentado un interesante crecimiento a nivel mundial, en relación a los polímeros biodegradables, principalmente, cuando se considera el desarrollo de nuevos productos que provoquen menor impacto ambiental. Mientras tanto, debido a su alto costo, comparado con los polímeros convencionales, para la mayoría de las empresas, la utilización de estos polímeros aún es inviable. Por ejemplo, se puede citar el polietileno de baja densidad (PEBD), utilizado en muchos productos de la vida cotidiana como en embalajes, entre otros artefactos, cuyo precio gira en torno de 1 dólar el kilo, en cambio, el kilo de un polímero biodegradable cuesta, en promedio, 5 a 8 dólares (Ecología, 2006).

Cuadro 1. Diseñadores de polímeros biodegradables

<i>Creador</i>	<i>Producto</i>	<i>Componentes</i>	<i>Distribuidor</i>
Bayer	BAK1095	Poliestaramida	-
BioPlastics	Envar	Almidón y policaprolactona	Grand River Technologies
Cargill Dow Polimers	EcoPLA®	Ácido poliláctico	Duro Bag Mfg. Co.
Chronopol	Heplon™	Polilactato	-
DuPont	Biomax®	Poliéster, copolimero	-
Eastman	Eastar Bio™ Copolyester 14766	Poliéster a base de diácidos y dioles convencionales	-
EPI	DCP™	Poliétileno con aditivos (no Masterbatch)	Technicoat; Symphony Environmental, Ltd.; Sera Trade
Indaco	Bio-Solo™	PE reciclado con activadores	Indaco Mfg. Ltd.
Monsanto	Biopol™	Copolimero de polihidroxibutirato/valerato	WalkiWisa (Europa)
Novamont	Mater-Bi™	Almidón de maíz con policaprolactona	Biocorp Inc. (N. América)
Novon Intl.	DegraNovon®	Polioléfina con aditivos	CES, Inc.; Petoskey Plastics; Compost 2000 (Canadá)
Planet Polymer Technologies	EnviroPlastic® C	Resinas a base de policaprolactona (sin almidón ni polietileno)	-
Showa Highpolymer	Bionolle®	Poliéster alifático	Showa Denko
Tecnicota	Tech-No-Bag™	Poliétileno con aditivos	Tecnicota Ltd.
Union Carbide	TONE® P-787	Policaprolactona	-
Willow Ridge	Polystarch®	Almidón con polietileno	-

(Riggle, 1998)

Como una solución para la cuestión del alto costo de esos materiales, surge la necesidad del desarrollo de mezclas poliméricas biodegradables que consistan en una combinación física de dos o más tipos de materiales poliméricos o copolímeros que no sean ligados por enlaces covalentes, ya que dichos enlaces se caracterizan principalmente por ser hidrófobos. Se ha encontrado que la afinidad al agua aumenta la biodegradabilidad.

El recurso de utilizar un aditivo natural degradable para las formulaciones de plásticos biodegradables no es nueva. Aditivos naturales tales como el almidón, la celulosa, la lignina, entre otros, son usados en formulaciones de plásticos convencionales (Mano y col., 2004).

#### VI.4. Almidón

El almidón es una materia prima abundante que permite el desarrollo de productos reciclables y cuando es biodegradado o incinerado libera CO<sub>2</sub> a la atmósfera. Estas características del almidón han despertado un interés acentuado en el mercado de polímeros convencionales a través de su incorporación en mezclas poliméricas (Álvarez y col., 2004) que de este modo han disminuido su impacto nocivo al ambiente.

El almidón es un carbohidrato de origen vegetal compuesto principalmente por dos polisacáridos, amilosa, molécula esencialmente lineal, y la amilopectina, que posee una estructura altamente ramificada, Figura 1, ambos formados por unidades repetitivas de  $\alpha$ -D-glucosa. Se presenta en forma de pequeños gránulos semicristalinos, que pueden ser aislados a partir de diversas fuentes, tales como maíz, papa, yuca, avena, frijol, arroz, entre otros (Tharanathan, 2005).

Cuando el almidón es sometido a procesos térmicos en presencia de agua, generalmente sufre un fenómeno llamado gelatinización, el cual consiste en el

hinchamiento ruptura y dispersión del gránulo, dicho fenómeno se caracteriza por los cambios de viscosidad descritos en la Figura 2, en ellos, se pueden caracterizar los cambios en la estructura del gránulo hasta la completa dispersión de las cadenas. Este fenómeno es importante debido a que luego de la gelatinización, las cadenas de amilosa y amilopectina se dispersan completamente.

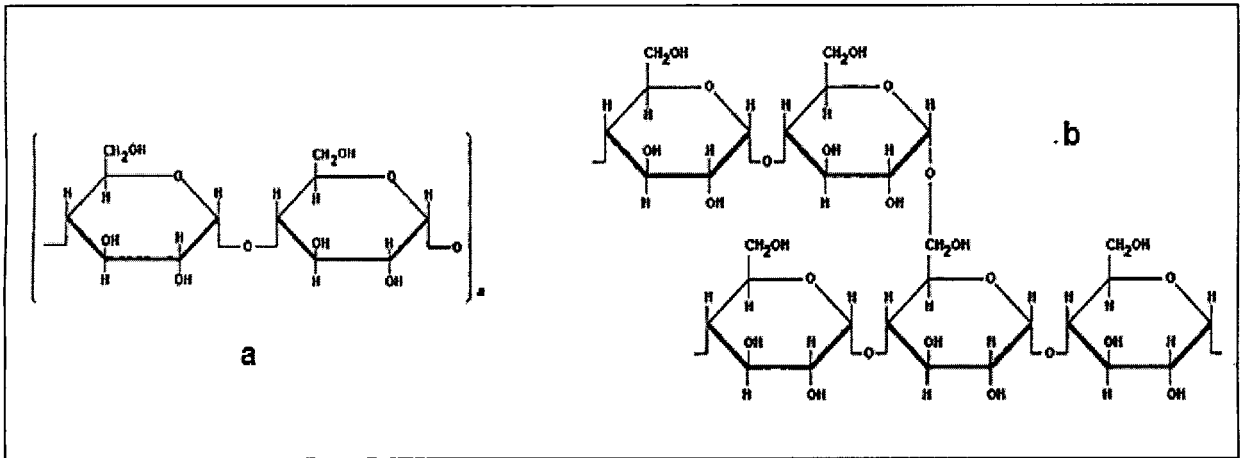


Figura 1. Componentes del almidón a) amilosa, b) amilopectina (Jiménez y col., 2006).

#### VI.4.1. Almidón termoplástico

Se llama almidón termoplástico (TPS por sus siglas en inglés) a un almidón granular que ha sido procesado térmica o mecánicamente a bajo contenido de humedad con ayuda de un plastificante, generalmente poli-alcoholes de cadena corta como lo puede ser el glicerol (Smits, 2001). La estructura de los almidones termoplásticos es la propia de un almidón gelatinizado, con las cadenas dispersas, sin embargo, debido al plastificante, la dispersión no es completa, sino que se forma una fase continua de propiedades comparables con los polímeros termoplásticos convencionales, sin cambiar su afinidad al agua y por tanto su biodegradabilidad no se ve severamente afectada.

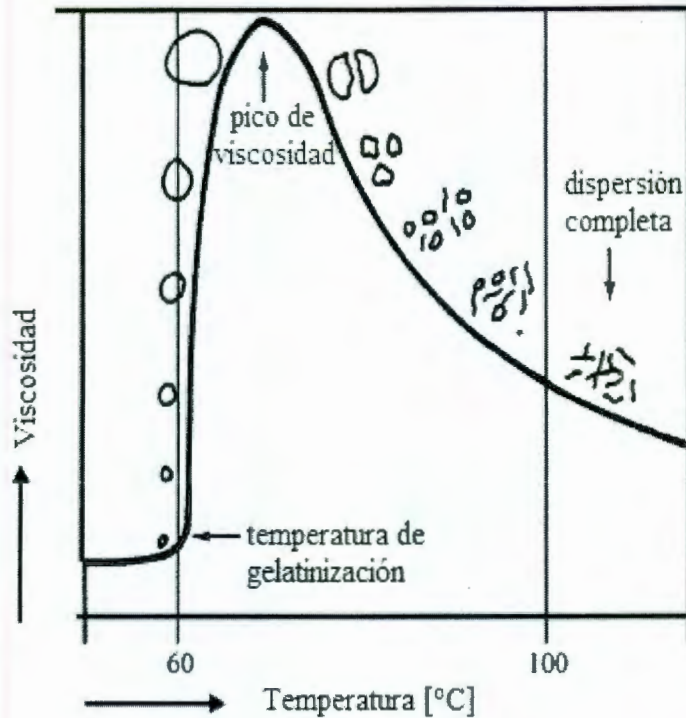


Figura 2. Gelatinización de un gránulo de almidón (Smits, 2001).

#### VI.4.2. Investigaciones sobre polímeros basados en almidón (SBP's)

El interés sobre éstos materiales surgió a mediados de la década de 1980, las mezclas de almidón y polietileno (PE) o almidón y polipropileno (PP) fueron llamadas biodegradables, para las mezclas de almidón con poli-olefinas mas pro-oxidantes se consideraba que al paso del tiempo se desintegrarían y desaparecerían. Estos falsos títulos llevan a una más severa definición de qué es un polímero biodegradable (Stelson y col., 1999).

La biodegradación de polímeros es un proceso que se lleva a cabo de manera natural por la acción de microorganismos (en un sistema biológico) que se adhieren a la cadena polimérica por actividad microbiana. El proceso se realiza en dos pasos:

- Depolimerización o descomposición de las cadenas en oligómeros

- Mineralización de los oligómeros a biomasa, agua, dióxido de carbono y metano (Stelson y col., 1999).

El 90% de mineralización, en composta, sucede en seis meses para un copolímero, polímero con diferentes unidades méricas, mientras que el 60% de mineralización en el mismo lapso para un homopolímero, polímero con una sola unidad mérica, en las mismas condiciones. Se ha encontrado que la mineralización completa puede ocurrir en doce meses dependiendo del clima en la región (Derval, 2001).

Sin embargo, se ha observado que la biodegradación de dichos materiales causa toxicidad y pasivación de los microorganismos usados (*Ceriodaphnia dubia* y *Pimephales promelas*) (Stelson y col., 1999).

Para la producción de los SBP's se injerta un Meta-acrilato (MA) en un poliéster de refuerzo usando peróxido en un extrusor, el porcentaje de MA usado es del 0.5% al 1.2% dependiendo de las condiciones del proceso, se mezcla almidón y poliéster en un extrusor, el almidón debe tener menos del 10% de humedad agregada, se adiciona una pequeña cantidad de estabilizador (mezcla MA/poliéster) durante el mezclado, la residencia en el extrusor debe ser de 2 a 3 minutos, luego se peletiza el perfil obtenido de extrusión. Finalmente los pellets son llevados a inyección en una máquina convencional (Stelson y col., 1999).

Los poliésteres comúnmente utilizados para producir SBP's son:

- Polibutilen-Succianato (PBS)
- Polibutilen-Succianato Adípico (PBSA)
- Policaprolactona (PCL)
- PHBV
- Poliéster Eastman (Etilen-Glicol, Ácido Tereftálico, Butano-Diol, y Ácido Adípico)

La empresa francesa Vegemat® presenta 3 diferentes grados de polímeros biodegradables basados en almidón, grado 1 (VEGEMAT® E4589) para la realización de piezas masivas con espesores mayores a 4 mm; grado 2 (VEGEMAT® E45114) para piezas de bajo requerimiento técnico con espesores entre 2 mm a 4 mm y; grado 3 (VEGEMAT® E45122) para piezas de uso técnico con espesores menores a 2 mm, sin la capacidad de realizar películas, debido a la rigidez de su producto, en su página de Internet, muestra las condiciones a las que se debe procesar su producto por inyección y un aproximado de las propiedades físicas que se obtienen para cada grado (Vegemat, 2007).

Los plásticos de almidón, además, presentan una seria limitación tecnológica, que proviene de su capacidad hidrofílica. El material absorbe agua fácilmente y se hincha, lo que puede resultar en la pérdida de sus propiedades mecánicas y de protección. Como los almidones termoplásticos son expuestos a diferentes humedades relativas durante su almacenamiento y su uso, se vuelve necesario el desarrollo de un almidón termoplástico menos sensible al agua. Una alternativa viable para controlar éste problema son los recubrimientos usando películas como capa protectora (Thiré y col., 2004).

#### VI.5. Fibras

Las fibras poseen estructuras unidimensionales, largas y delgadas. Se doblan con facilidad y su propósito principal es la creación de tejidos. Los polímeros útiles como fibras son los que tienen un alto grado de cristalización y fuerte interacción de cadenas adyacentes cuya orientación incrementa la resistencia a la tensión.

Las fibras poliméricas presentan una longitud muy superior a su diámetro, están orientadas a lo largo de un solo eje. Tienen gran cohesión molecular, lo que les hace ser más fuertes que los polímeros en forma de masa. Su temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ) y su punto de fusión ( $T_m$ ) son muy importantes, una  $T_g$  demasiado alta dificulta el estiramiento, y por lo tanto, la orientación de la fibra, y si



es demasiado baja, la orientación no se mantiene a temperatura ambiente. El punto de fusión debe estar por encima de los 200°C, ya que el polímero después va a orientarse. Las fibras pueden dividirse en tres clases: fibras naturales, fibras celulósicas elaboradas por el hombre y fibras no celulósicas, también elaboradas por el hombre.

La mayor parte de los componentes de las fibras naturales son polisacáridos vegetales: celulosa, hemicelulosas, pectinas, carrageninas, gomas, mucílagos y almidón resistente, aunque también existen algunos compuestos que no son polisacáridos como la lignina. En el caso de la fibra de trigo ésta se encuentra formada principalmente de cuatro componentes: celulosa, hemicelulosa, xilanos y taninos. La celulosa es el polímero de glucosa  $\beta$ -1 de enlace 4 ( $\alpha$ -glucanos) que comúnmente se encuentra en los tallos de las plantas y en cierta medida a todo lo largo de la semilla de trigo. La hemicelulosa es una compleja mezcla de polímeros de varios azúcares, enlazada a través de enlaces glicosídicos que no están hidrolizados con amilosa. Es el mayor componente en las paredes celulares y se encuentra tanto en el endospermo como en las capas de salvado. Los arabinoxilanos, también llamados pentosanos, presentan una columna de xilosa polimerizada con cadenas de azúcar adjuntas, principalmente arabinosa. Los taninos son compuestos polifenólicos que se encuentran principalmente en las capas del salvado.

#### VI.5.1. Fuentes de fibras naturales

Existe una diversidad de fuentes de fibra natural que actualmente son subprocesadas, tales como la cascarilla de trigo, fibra de caña de azúcar, yute, coco, kenaf, o henequén. En el caso de la caña de azúcar, en México solo en el periodo de enero a agosto del 2004 se produjeron poco mas de 45 millones de toneladas de caña de azúcar, aproximadamente entre el 12 y el 17% corresponde a

fibra de caña de azúcar, obteniendo una producción de aproximadamente 7 millones de toneladas de fibra solo de esta fuente vegetal.

En algunas plantas, las fibras son el producto principal como es el caso del henequén y en otros solamente son un residuo, como el bagazo de caña de azúcar. Dentro de los cultivos agrícolas, agroindustriales y de recolección en México, capaces de proveer fibras naturales se encuentran: el maíz, sorgo y trigo a través de sus residuos de cosecha; caña de azúcar a través de los residuos de la molienda; henequén, lechuguilla y palma como producto principal; agaves tequileros, mezcaleros y pulqueros, como subproductos después de la extracción del jugo; residuos forestales; coco y piña; y algunos pastos silvestres como el zacate Jonson.

#### VI.5.2. Producción nacional de fibras naturales

En México se estima una disponibilidad de 77 millones de toneladas de residuos agrícolas, de los cuales el 50% corresponde a maíz, seguido por trigo, sorgo y caña de azúcar. Dentro de la caña de azúcar, se dispone anualmente de 11 millones de toneladas, base seca, de bagazo de caña, fuente potencial de fibra natural.

La disponibilidad de residuos de fibras en aplicaciones industriales puede representar hasta el 10% del peso vivo de una planta.

#### VI.5.3. Fibra de caña

El bagazo es el residuo del proceso de fabricación de azúcar a partir de la caña, el remanente de los tallos después de ser extraído el jugo azucarado que ésta contiene. El uso tradicional y más difundido del bagazo es la producción de vapor mediante su combustión en las calderas del propio ingenio azucarero. Estudios realizados, acompañados de la experiencia industrial acumulada en los

años más recientes, han demostrado la viabilidad de satisfacer las demandas energéticas de los ingenios, con prácticamente la mitad de su bagazo, quedando un sobrante factible de ser empleado en más de cuarenta aplicaciones demostradas.

Cuadro 2. Caracterización química de las fibras de caña  
(Triana y col., 1990)

	$\bar{X}$	Desviación Estándar	Número de análisis
Celulosa %	44.9	1.5	22
Pentosanos %	26.1	1.1	22
Holocelulosa %	71.6	1.7	22
Lignina %	17.6	2.2	22
Solubilidad %			
Etanol, benceno	3.8	1.6	18
Agua caliente	6.2	2.6	20
Cenizas %	1.4	0.3	18
Si ppm	4172.6	-	18
Fe ppm	179.0	-	18

Las materias primas fibrosas deben de reunir determinados requisitos de índole técnica y económica para organizar a partir de ellos producciones complejas como las mencionadas.

Los criterios fundamentales utilizados en la selección de la caña de azúcar son:

- Altos rendimientos agrícolas en las diferentes cepas
- Alto contenido azucarero
- Contenido de fibra entre 12% y 14%
- Características adecuadas de la calidad del jugo

Entre los requisitos técnicos para el uso del bagazo de caña, los más importantes radican en la composición química del material (Cuadro 2), su reactividad frente a los agentes del pulpeo, y sus propiedades anatómico-morfológicas (Triana y col., 1990).

La parte designada por fibra en la terminología azucarera y que representa aproximadamente el 45% en peso del bagazo (Cuadro 3), está compuesta de toda la fracción sólida orgánica, insoluble en agua, presente originalmente en el tallo de la caña, y que se caracteriza por su marcada heterogeneidad desde el punto de vista morfológico. Esta fracción es la portadora de los elementos estructurales necesarios para la producción de celulosa.

Los sólidos no solubles del bagazo son llamados bagazo limpio (Cuadro 4), éste no contiene únicamente fibra utilizable, además contiene elementos que por su morfología no actúan como refuerzo dentro de los materiales compuestos.

Cuadro 3. Composición física promedio del bagazo  
(Triana y col., 1990)

Fibra o bagazo	45%
Sólidos no solubles	2%-3%
Sólidos solubles	2%-3%
Agua	51%-49%

Cuadro 4. Composición morfológica del bagazo limpio  
(Triana y col., 1990)

Fibras	50%
Parénquima	30%
Vasos	15%
Epidermis	5%

## VI.6. Extrusión

La comprensión del proceso de extrusión nos servirá para entender cuál es la naturaleza del material a procesar, ya que para los almidones, y en general para los polímeros, el grado de afectación en las cadenas es muy importante

La extrusión es capaz de efectuar un amplio número de operaciones, incluyendo cocción, formación, texturización y deshidratación de materiales, particularmente aquéllos que incluyen un contenido de almidón. Estas operaciones están conjugadas en un equipo de tipo compacto, el cual es eficiente y desperdicia poca energía necesitando únicamente una pequeña cantidad de espacio (Miller, 2005).

### VI.6.1. Flujo y resistencia

El proceso fundamental de extrusión (Figura 3) consiste en un aparato generador de presión, el cual causa que el producto se mueva como un líquido con un flujo laminar a través de un conducto que se opone al flujo, dándole una forma determinada (perfil) al salir de la máquina por una abertura llamada dado. Dos componentes, flujo y resistencia al flujo, determinan el proceso de extrusión y el tipo de producto que se elabora.

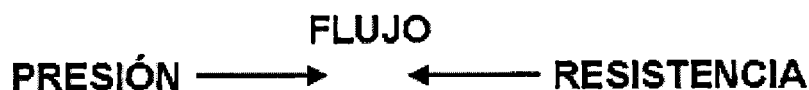


Figura 3. Proceso fundamental de extrusión  
(Miller, 2005)

La presión y el flujo pueden ser causados por un sinnúmero de mecanismos, incluyendo pistones y rodillos. Aunque éstos son utilizados en muchos casos, el uso de tornillos es más común. Los tornillos sinfín no sólo movilizan el producto

hacia adelante, generando presión, sino que también lo mezclan, ayudando a la generación de calor, su transferencia, la texturización del material y su homogeneización (Miller, 2005).

#### VI.6.2. Cizalla y mezcla

El producto contenido en el canal de un tornillo sinfín rotatorio es sometido a un proceso de cizallamiento, esto significa que se adhiere a dos superficies diferentes (tornillo y barril) que se mueven respecto a cada una, Figura 4.

La velocidad del producto en el canal varía de cero (en el barril) a un máximo en la superficie del tornillo. En este gradiente de velocidad, las capas del producto se deslizan unas sobre otras. A esto se le llama cizallamiento, un factor muy importante en extrusión de tornillo. La razón de cizalla es proporcional a la velocidad y diámetro del tornillo e inversamente proporcional a la profundidad del canal.

El corte hace que un producto se estire, acelera la gelatinización de almidones y otras reacciones, alinea moléculas de cadena larga y puede depolimerizarlas causando dextrinización (fragmentación por esfuerzo), fricción y por lo tanto, calor (Miller, 2005).

#### VI.6.3. Energía

Cuando se utilizan para cocción, los extrusores deben generar calor (energía) hacia el producto. Esto puede ser obtenido en varias formas: por conversión de energía mecánica (rotación del tornillo), aplicación de calor externo, y por inyección de vapor ya sea dentro o antes del extrusor, Figura 5.

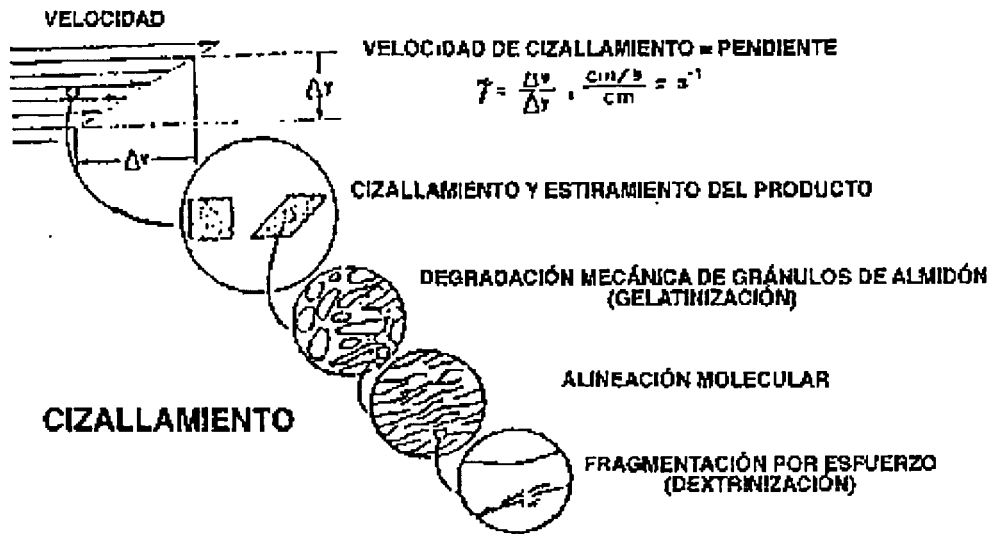


Figura 4. Cizallamiento  
(Miller, 2005)

La energía es consumida por reacciones endotérmicas como la gelatinización de los almidones o la desnaturalización de proteínas, y por aumento de temperatura del producto (acelerando esas reacciones la curva del tiempo-temperatura en un proceso determina el grado de cocimiento alcanzado) (Miller, 2005).

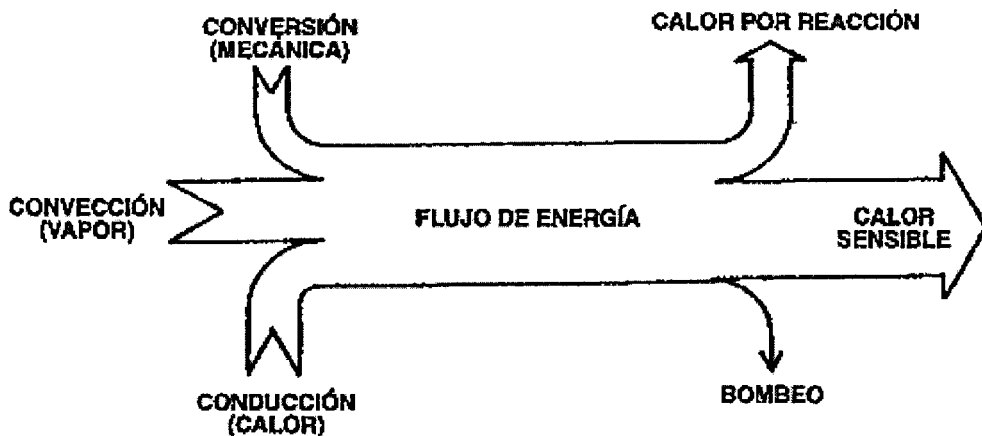


Figura 5. Esquema energético del proceso de extrusión  
(Miller, 2005)

#### VI.6.4. Conversión de energía mecánica

La energía mecánica (conversión) es generada por corte. Los productos orgánicos trabajados por extrusión son muy viscosos, ellos resisten el corte generando fuerzas de fricción entre las capas en movimiento del producto. Para sobrepasar estas fuerzas se requiere energía, la cual se convierte en calor dentro del producto. La energía resultante en el producto es proporcional a; la viscosidad del mismo, al cuadrado del diámetro del tornillo, al cuadrado de la velocidad del tornillo (RPM) y, al largo mojado del tornillo (la porción del tornillo lleno con material, algunas porciones de tornillos de extrusión, como aquéllas usadas en las zonas de alimentación, no están llenas y no cortan el producto). La generación de energía es inversamente proporcional a la profundidad relativa del canal (profundidad dividida por el diámetro del tornillo).

#### VI.6.5. Componentes del proceso de extrusión

El extrusor básico de tornillo (Figura 6), consiste en un tornillo o tornillos sinfín rotando en un barril al cual encajan casi exactos, siendo movilizadas por un motor a través de una transmisión para reducir o variar la velocidad. El producto emerge por un dado (resistencia) con uno o más orificios del tamaño adecuado para cada aplicación en particular. Al otro extremo del barril hay una chumacera principal que da soporte al tornillo y un orificio en el barril (cuello de alimentación) a través del cual el producto se alimenta al tornillo. El ensamble total se mantiene en una alineación rígida por medio de una base firme. El tornillo y el barril pueden estar segmentados, o ser unitarios.

#### VI.7. Inyección

La inyección es un proceso adecuado para piezas de alta producción, en la cual se pueden obtener piezas de variado peso y geometrías complicadas



(Figuroa, 2001). Las principales características de las piezas procesadas por inyección son que:

- La pieza se obtiene en una sola etapa.
- Normalmente no se necesita retrabajo sobre la pieza, entendiéndose como retrabajo un proceso posterior a la inyección en el cual la pieza sea modificada en sus dimensiones o apariencia, como pueden ser el corte y el texturizado.
- Existe una alta automatización del proceso.
- Se cuenta con reproducibilidad.
- Se producen piezas de alta calidad.

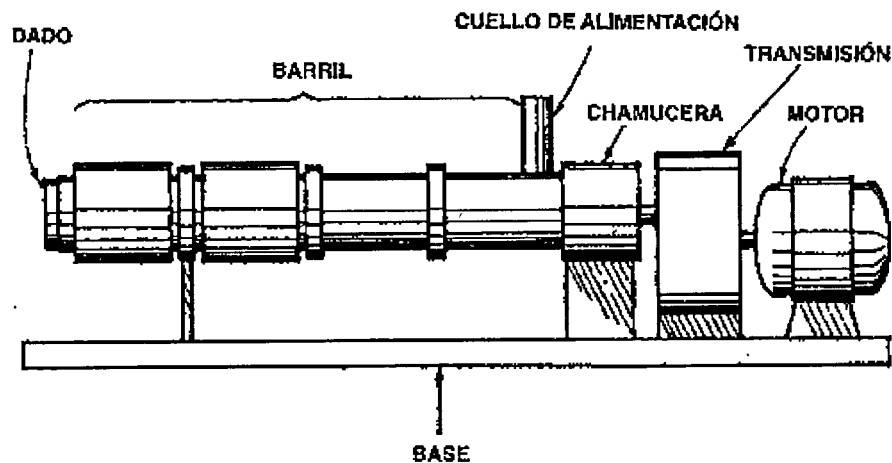


Figura 6. Partes típicas de un extrusor  
(Miller, 2005)

Los requerimientos de calidad comunes para las piezas inyectadas son generalmente:

- Dimensiones y geometría de la pieza, las cuales necesitan tener la mayor exactitud posible.
- Propiedades mecánicas, las propiedades mecánicas del polímero no deben ser afectadas, en medida de lo posible, por el proceso en si, sino que deben ser las mismas características del material para cualquier pieza.

- Peso de la pieza, se requiere un peso preciso para un material y dimensiones dadas.
- Tiempo de ciclo, el tiempo de ciclo debe ser mínimo, con el fin de obtener buena productividad.
- Consumo energético, económicamente se necesita un bajo consumo de energía, sin embargo, los altos consumos de energía pudieran afectar la calidad de la pieza terminada, por ejemplo en la degradación del material (quemado).

El proceso de inyección, típicamente consiste en hacer pasar a presión el material termoplástico ablandado, desde un cilindro caliente, a las mitades de un molde mantenidas juntas (Gordillo, 2000), Figura 7.

Después de un periodo adecuado de enfriamiento, las dos mitades del molde se separan y la pieza así formada puede ser retirada. La apertura y cierre de las dos mitades del molde se coordina con la inyección del material, para establecer una secuencia de operaciones que puedan repetirse continuamente (Mink, 1977).

En su forma más sencilla, la máquina de inyección comprende; un cilindro de caldeo con un pistón en un extremo y una boquilla en el otro, que se conecta por medio de canales a un molde. El extremo del pistón de la cámara de plastificación se mantiene a baja temperatura, y allí el granulado de material termoplástico es alimentado desde la tolva de la entrada. La carga granular es empujada hacia adelante y comprimida por el pistón que empuja el material hacia la cavidad del molde. Durante este proceso, el molde debe quedar cerrado por el mecanismo de cierre de la máquina (Gordillo, 2000), Figura 8.

La presión se mantiene sobre el material que ha llenado la cavidad (Figura 9) para asegurar la entrada de material adicional, a esto se le denomina presión de mantenimiento. Dicha presión es necesaria para compensar la contracción que acompaña al enfriamiento rápido del material en el molde, dando principalmente, estabilidad dimensional a la pieza. Generalmente se busca que el tiempo en el que

actúe la presión de mantenimiento sea lo mínimo necesario, debido al costo de energía y a que se desean cortos tiempos de ciclo.

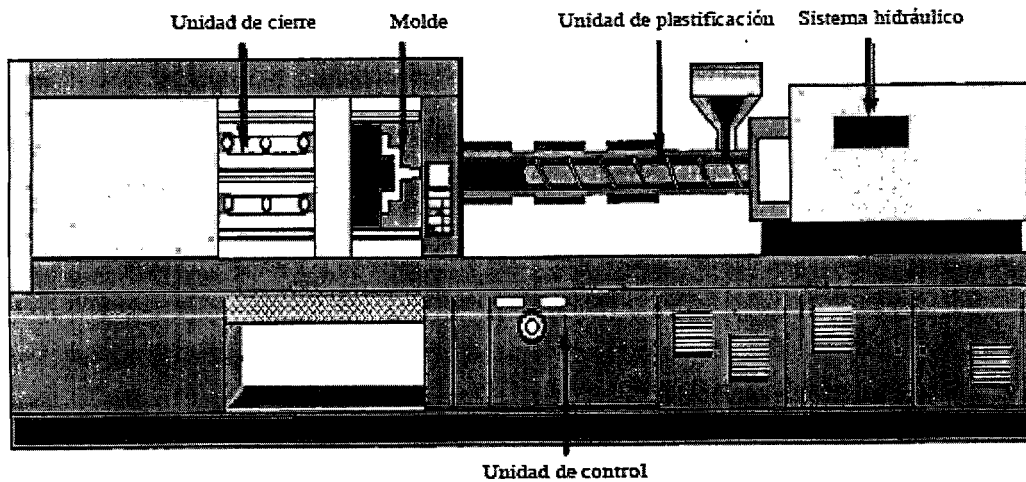


Figura 7. Máquina de inyección y sus partes (Gordillo, 2000).

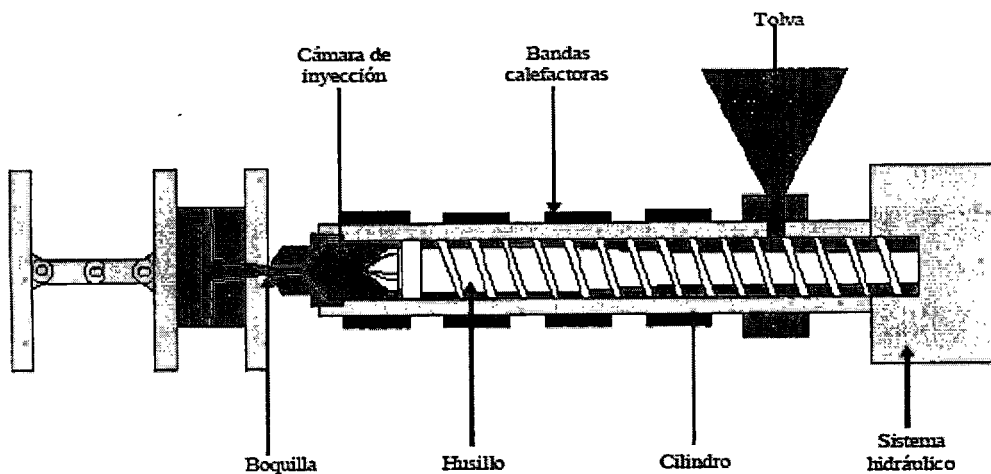


Figura 8. Unidad de inyección con husillo plastificador (Gordillo, 2000).

Después del retroceso del pistón de inyección se deja un tiempo adecuado el molde cerrado, para que la pieza enfríe a una temperatura tal que pueda salir

fácilmente. Las mitades del molde se abren, la pieza se expulsa, después de lo cual, la máquina está dispuesta para empezar otro ciclo de operaciones, con lo cual se tiene el ciclo de moldeo (Crawford, 1998).

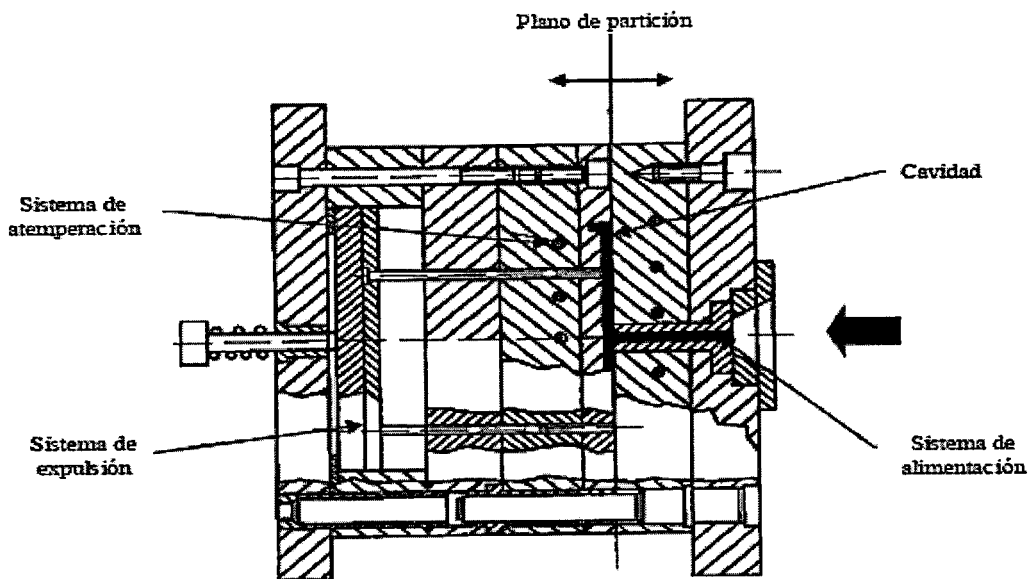


Figura 9. Molde de inyección (Gordillo, 2000).

#### VI.7.1. Etapas en el moldeo por inyección

En resumen de lo anterior, las etapas del moldeo por inyección siguen el orden que se muestra en la Figura 10, y son (Gordillo, 2000):

- a) Cierre del molde
- b) Inyección: b1) Fase de llenado y b2) Fase de mantenimiento
- c) Plastificación o dosificación
- d) Apertura del molde y expulsión de la pieza
- e) Enfriamiento de la pieza fuera del molde

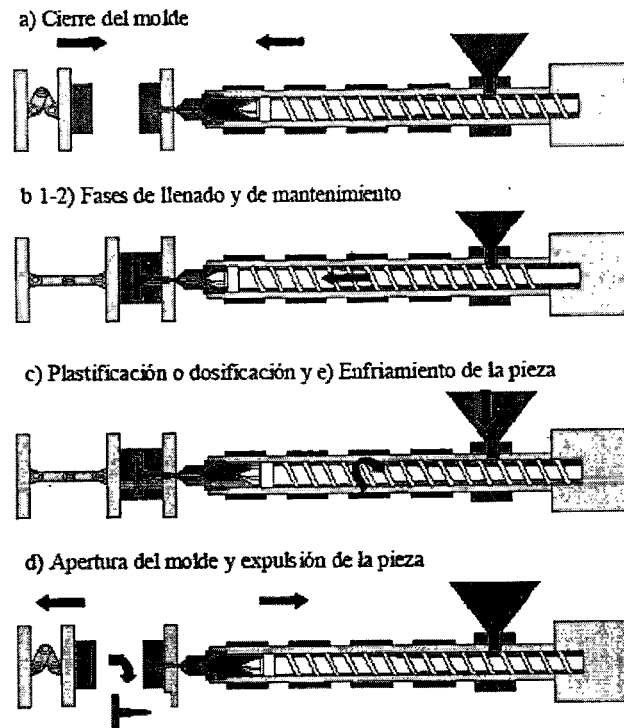


Figura 10. Etapas en el moldeo por inyección (Gordillo, 2000)

Las etapas anteriores incluyen las siguientes fases, llamadas fases de moldeo (Arazo, 1999):

- Almacenamiento

Es conveniente que los materiales se almacenen por partidas para evitar que se alteren y sean necesarios frecuentes retoques de las condiciones de trabajo, ya que los materiales basados en almidón termoplástico son altamente higroscópicos y su procesamiento varía sustancialmente respecto a la humedad.

Una diferencia notable de humedades relativas entre el almacén y el área de moldeo puede dar lugar a incrementos en la humedad superficial de los pellets, que si no se toma en cuenta, provocara una plastificación diferente a la deseada, o si la humedad es muy alta no se logrará inyectar pieza alguna. Conviene el transporte

en bolsas cerradas y frescas, de manera que se impida lo más posible un cambio en la humedad.

- Secado

El secado puede llegar a ser necesario en algunas ocasiones en que se sospeche que la humedad de los pellets ha sido modificada, la decisión de secar o no los pellets depende de la anterior cuantificación de la humedad presente en los mismos y del historial de almacenamiento para el material.

- Carga de la máquina

Debe vigilarse ampliamente la limpieza de las zonas en las que los sacos de pellets hayan estado abiertos, ya que son muy susceptibles a adquirir del aire partículas extrañas que pudieran llegar a afectar la apariencia de las piezas. Por lo anterior, se recomienda que la carga de la máquina sea mediante tolvas cerradas.

- Alimentación-dosificación

En máquinas muy pequeñas la forma y tamaño de los granos suele afectar a la alimentación y dosificación. En las máquinas de husillo la dosificación está fijada por el recorrido del mismo, por ello es afectada debido a los otros parámetros del moldeo; contrapresión de llenado, velocidad del husillo, temperatura en zona de entrada de material a la tolva, presión y velocidad de inyección. Conviene que la dosificación sea del 70% al 90% de la capacidad de la máquina. Dosificaciones menores pueden llevar a permanencias largas del material en el husillo, lo que para el material utilizado causaría degradación y posible taponamiento del sistema de alimentación al molde (colada, boquilla).

## - Plastificación

La plastificación depende en primer lugar de la temperatura. Esta, a su vez, es el resultado del calor aportado por la calefacción del cilindro y el propio calor de la masa en fricción que se presenta entre el husillo y el cilindro.

Debe, por tanto, vigilarse no sólo el programa de temperaturas sino el calentamiento por fricción. Dependerá en gran manera de la geometría del husillo y el material, así como de la contrapresión de llenado. Por otra parte la plastificación dependerá de la homogenización de la masa fundida y, además, de la composición del material, recuérdese que se trata de una premezcla de plastificantes, almidón y fibras, la cual pudiera variar ligeramente en proporciones debido a errores en la producción de la materia prima. Para corregir dichos errores, se puede aumentar o disminuir la humedad, dependiendo de las características de la pieza obtenida, si resultan piezas muy blandas (flexibles) se recomienda disminuir la humedad; de encontrarse problemas en el flujo del material (los pellets aparentan ser muy duros) se puede aumentar ligeramente la humedad de la materia prima.

## - Paso por la boquilla

La masa fundida, a su paso por la boquilla, puede sufrir recalentamientos en el caso de boquillas angostas o complicadas, especialmente en función de la velocidad de inyección.

Para describir el proceso de moldeo con más detalle, es conveniente considerar el paso del plástico a través de la máquina, y ver las variaciones de presión, temperatura y tiempo hasta que se forma la pieza moldeada.

Cuando la máquina funciona en régimen normal, la temperatura media del plástico en el extremo de la tobera se aproximará al valor de la temperatura en la

pared externa del cilindro, sin embargo nunca llega a alcanzar este valor debido al insuficiente tiempo de residencia del plástico en el cilindro.

- Velocidad de inyección

En principio cuanto mayor sea la velocidad de inyección más rápido será el ciclo y menor su costo. Altas velocidades pueden darnos sobrecalentamientos en el material y dificultades para eliminar aire de los moldes. Bajas velocidades pueden llevar a llenados incompletos o defectuosos con formación de estratos.

Generalmente las piezas pequeñas admiten velocidades más altas que las gruesas y grandes. Un aumento de la velocidad equivale a una cierta sobrepresión de inyección y consiguientemente afectará la dosificación. La velocidad de inyección puede afectar a combinaciones de flujos y cargas, por ello debe estudiarse la pieza obtenida y la posible influencia de la velocidad en sus características.

- Presión de inyección

Estará en función del plástico a inyectar y de las características de la pieza, con clara dependencia de temperaturas y velocidad de inyección. Una presión excesiva puede ocasionar tensiones internas, y una presión insuficiente puede dar piezas incompletas, rechupes, variaciones dimensionales (tolerancias), y otros problemas. La presión de inyección tiene repercusión directa sobre la presión de cierre.

- Presión posterior, presión de mantenimiento

El paso de la presión de inyección a la presión de mantenimiento debe ser sin variación para evitar fenómenos de rebote. La presión posterior debe iniciarse



luego del llenado de la cavidad y finaliza cuando el material en punto de inyección de la pieza ha solidificado (Gordillo, 2007).

La magnitud y, sobre todo, el tiempo presión posterior estarán en función de las temperaturas del material y el molde (especialmente en las coladas y bebederos) además del volumen de la pieza, pudiéndose controlar por el peso alcanzado, generalmente se recomienda que la presión de mantenimiento sea inicialmente el 70% de la presión de inyección, con el fin de evitar reflujo (Gordillo, 2007). Una presión posterior excesiva puede llevar a tensiones internas y defectos superficiales como rebabas. Una presión posterior insuficiente puede dar lugar a variaciones dimensionales, rechupes, vacuolas, y otros defectos (Arazo, 1999).

#### VI.7.2. Puntos de inyección, y bebederos

El paso del material a grandes velocidades puede suponer un sobrecalentamiento e incluso degradaciones, sin embargo el almidón es más fácilmente inyectado a altas velocidades, con relación a los polímeros comerciales. Por otro lado, para polímeros comerciales, canales finos favorecen un rápido enfriamiento de la masa; sin embargo para el material a base de almidón, la utilización de canales finos aumenta drásticamente la viscosidad, lo cual resulta en taponamientos, aunque la temperatura se mantenga.

Por ello conviene que los canales sean amplios y suficientes en número, preferentemente de sección cilíndrica, siendo menos recomendados los que presentan vértices (medio círculo, cuadrado) debido además a la alta afinidad del almidón para pegarse en el molde a causa de la humedad.

A lo largo del recorrido existe una pérdida de presión, por ello se deben evitar coladas largas y, en el caso de cavidades múltiples, que los recorridos sean diferentes.

Las entradas de inyección muy pequeñas limitan a un tiempo corto la duración de la postcompresión, ya que una vez solidificada la entrada de material, no accede más material a la cavidad (Gordillo, 2007)

### VI.7.3. Temperatura del molde

La temperatura del molde depende en primer lugar de la sección de las piezas a inyectar. El molde debe estar templado, no refrigerado, mediante un circuito debidamente estudiado y calculado. En los plásticos cristalinos el templado influirá muy sensiblemente sobre grado y forma de la cristalinidad, que a su vez afectará a las propiedades y características de la pieza y sus dimensiones. En los materiales usados para éste trabajo, el refrigerado pudiera causar condensación en la superficie del molde, lo cual aumenta la adherencia de la pieza y éste, por lo tanto, se recomienda una temperatura entre 20 °C y 40 °C.

Una temperatura excesivamente baja puede limitar el llenado del molde, la formación de estratos, tensiones internas, contracciones remanentes (postcontracción), entre otros problemas. Una temperatura excesiva puede alargar el ciclo a niveles antieconómicos, favorecer deformaciones en el desmolde y tensiones internas por largas postcompresiones.

En todo caso, el templado del molde será el parámetro fundamental que definirá el tiempo de permanencia para la pieza en el mismo, hasta que pueda extraerse con la solidez y estado correctos. Dado que es el porcentaje de tiempo mayor del ciclo de inyección, se comprende que afecta fundamentalmente al costo del molde, y por ello debe vigilarse que este paso sea lo más corto posible.

### VI.7.4. Principios fundamentales de la inyección

Una buena pieza inyectada sólo puede conseguirse mediante la correcta coordinación entre material, máquina y molde.

El mejor material no puede conseguir por si mismo una fabricación óptima, si:

- Es difícil de transformar.
- La máquina no puede adaptarse correctamente, debido a sus insuficientes posibilidades de mando y regulación.
- La máquina no ha sido graduada correctamente.
- El proyecto no ha tenido en cuenta la clase de material al diseñar el molde.

Una máquina de alto valor técnico y constructivo, de gran rendimiento y con múltiples posibilidades de mando y regulación, tampoco conseguirá una producción óptima, si:

- El molde es débil
- La temperatura del molde no se puede graduar con exactitud
- El material es difícil de transformar
- El material no se ha preparado correctamente (por ejemplo el secado)

Sin embargo un buen molde necesita también de una preparación como el material, en cuanto a:

- Tener en cuenta las contracciones (longitudinales y transversales respecto a la fluencia)
- Atemperación correcta (dispersión de la temperatura, disposición de los canales,)
- Adaptación a la máquina (tamaño de platos, espacio entre barras)
- Espesor máximo/mínimo de montaje, carrera de apertura, posibilidades de anclaje (rápido y seguro)
- Posibilidad de transmisión de señales con la máquina, por ejemplo el cambio a presión remanente en función de la presión reinante en el interior del molde.

Si las vías de flujo hacia el molde se dimensionan de forma que no se opongan a un llenado continuo con material fundido, la disgregación puede efectuarse a temperaturas mucho más altas. Una breve sobrecarga térmica del material provocaría una viscosidad de elaboración óptima y (como indica la experiencia) no tiene influencia negativa en sus propiedades ni en la resistencia del producto acabado.

La condición es, sin embargo, que la sobrecarga térmica se prolongue sólo hasta poco antes de la iniciación de la descomposición química, ha de quedar siempre por debajo de la línea crítica de temperatura en la que se inicia el proceso de descomposición, que varía para cada tipo de material, y ocurre aproximadamente a 220 °C para polímeros basados en almidón termoplástico,

Para la producción de piezas con paredes gruesas, el llenado compacto y uniforme del molde exige una velocidad de flujo absolutamente uniforme, sin embargo mucho menor que en la inyección normal, debido a las características de contacto de las fusiones termoplásticas con la superficie del molde.

Si el material caliente y con poca viscosidad entra muy rápidamente en el molde, impide un contacto uniforme con la pared mucho más fría, un fenómeno que puede conducir a la formación de superficies ásperas e irregulares y de burbujas interiores. La pieza tiende entonces a agrietarse, en todo caso tiene una resistencia insuficiente.

Sólo con un llenado uniforme y relativamente lento se sitúa la fusión caliente en la pared del molde, aislando así el eje de la corriente frente a un enfriamiento prematuro. El material fluye hasta el extremo de la cavidad por el sector central, con pérdidas mínimas de presión, alcanzando la pared atemperada y solidificando después.

Al terminar el llenado, el material del núcleo es aún suficientemente plástico para permitir compensar la contracción con la contrapresión. Aparece así en primer plano la necesidad de disponer de una compresión regulable ajustable a las exigencias de producción y calidad.

La presión de inyección necesaria es determinada en gran parte por la viscosidad del material; los termoplásticos muy viscosos exigen en general el máximo de potencial de presión para el llenado del molde. Sin embargo, para el material de base almidón termoplástico, una presión elevada causaría problemas dentro del barril, ya que sumada a la presión de inyección existe una presión de vapor de agua elevada, la cual podría ser tan grande que intentara separar la boquilla del barril dañando el sistema de apriete de la misma (tornillos de sujeción), o en casos extremos llegara a vencer ligeramente la fuerza de cierre del molde, lo cual atascaría el mecanismo.

También la velocidad de inyección queda influida por la viscosidad.

#### VI.7.5. Parámetros de proceso y sus consecuencias

Conocer cómo influyen las diferentes variables en el proceso de inyección son factores fundamentales para predecir la variación de la calidad de una pieza moldeada.

Las tres variables fundamentales son: presión, volumen y temperatura. Estas variables junto con las características de las materias primas adecuadas darán lugar a piezas de buena calidad.

Para controlar el proceso, el inyector ha de controlar las 6 variables siguientes:

- 1) Temperatura de ciclo de inyección
- 2) Presión aplicada al tornillo de inyección

- 3) Tiempo de tornillo avanzado para compactar
- 4) Tiempo de molde cerrado
- 5) Tiempo de molde abierto
- 6) Temperatura del molde

Con lo que será posible conocer:

- La Temperatura del polímero
- La presión del polímero que llena la cavidad, en función del tiempo.

Ninguno de estos factores son uniformes en el interior de las cavidades.

La temperatura media de la pieza, en función del tiempo, puede calcularse si se conoce:

- La geometría del molde
- La temperatura del polímero cuando entra en la cavidad

Para ello habría que aplicar la teoría de conducción de calor.

Al cerrarse la entrada a la cavidad, la presión interior va disminuyendo a medida que el polímero se enfría y, en consecuencia, se contrae. Esta variación de presión con relación a la temperatura del artículo moldeado sigue una cierta ecuación de estado, es decir, hay una relación entre la presión, el volumen y la temperatura del polímero.

No se debe perder de vista que un objetivo importante de la temperatura y de la presión consiste en llenar el molde con la cantidad de polímero fundido necesaria y suficiente para evitar defectos tales como líneas de soldadura, marcas superficiales, rechupes, y otros

Los cinco factores principales que afectan a la cantidad de material en una pieza moldeada son:

- 1- El tiempo para llenar las cavidades antes que se establezca la presión de inyección. Más rapidez, menos tiempo para enfriarse el polímero. El enfriamiento aumenta la viscosidad y la pérdida de presión.
- 2- La presión de inyección. Determina la cantidad inicial de material añadido al molde.
- 3- El tiempo de tornillo avanzado. Añade más material para compensar la contracción debida al enfriamiento. Empaquetamiento excesivo puede provocar tensiones residuales en la zona de la entrada, que se ponen de manifiesto muchas veces a lo largo del tiempo.
- 4- El tiempo de cierre de la entrada. Si se cierra demasiado pronto tendrá lugar una compactación incompleta.
- 5- La velocidad de llenado.

La contracción (dimensiones de la pieza), el alabeamiento, la orientación, la extracción de las piezas y los esfuerzos residuales (tensiones congeladas) son función de la cantidad de material en la cavidad.

En consecuencia, el modelador obtendrá grandes ventajas si es capaz de controlar todos estos parámetros.

La velocidad de llenado afecta a las piezas moldeadas de varias maneras:

- Tiempo de solidificación de la entrada. En modelos normales, la entrada no comienza a solidificarse hasta que la mayor parte del material no ha entrado en la cavidad. Esto afecta a la contracción.
- Alabeamiento. Velocidades de llenado diferentes compactarán zonas diferentes en la cavidad de manera distinta. Esto es especialmente verdad en piezas con espesores variables.

- Orientación. La velocidad de llenado afecta a la orientación influyendo en la resistencia mecánica y en las dimensiones de las piezas.
- Rebabas. Si el molde se llena demasiado rápido, el aire puede no salir www.hotsuficientemente rápido. Se expande por la superficie el molde, aumentando el área proyectada, con lo que se abre y crea rebabas (o se aumenta el espesor de la pieza).

Altas velocidades de llenado pueden provocar la deformación de inserciones debido a presiones no equilibradas.

La situación de las líneas de soldadura puede cambiar si cambia la velocidad de llenado.

#### Variación de la presión en la cavidad con respecto al tiempo

El ciclo de moldeo puede estudiarse muy adecuadamente midiendo la variación de la presión y la temperatura del plástico que llena la cavidad en el momento preciso en que se cierra la entrada, ya que estos dos factores determinan el valor de la contracción de las piezas, así como la posible formación de los defectos ya enumerados.

#### VI.7.6. Regulación de la máquina

Antes de graduar la máquina, hay que tener presentes los factores característicos del material y de la pieza a inyectar, y no basarse en valores orientativos rígidos (tablas).

La plastificación y el proceso de inyección son los pasos más críticos de ciclo en una máquina de inyección.



Por esta razón los parámetros de influencia deben ser controlados de forma precisa. Algunos de ellos (temperatura, velocidad y presión) son programables por el operador, mientras que otros, dependiendo de la aplicación, son el resultado de la configuración mecánica, así como de las características geométricas de la unidad de inyectar.

La inyección es un proceso que depende de múltiples factores. Por ello es importante que al graduar la máquina no se tomen los valores directamente de una tabla. Al programar cada valor hay que recapacitar si acaso no queda influido por otros factores (Arazo, 1999).

#### VI.7.7. Compactación

El peso de una pieza inyectada es directamente proporcional al grado de compactación en dicha pieza; depende principalmente de la presión de mantenimiento (Figura 11) y del tiempo en que actúa dicha presión (Figueroa, 2001).

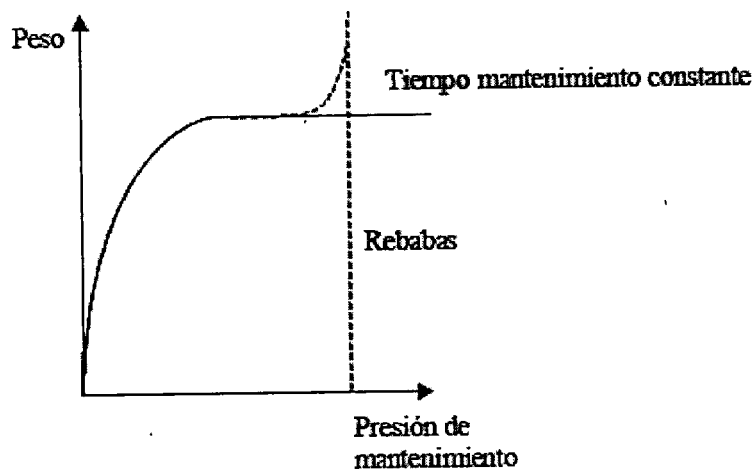


Figura 11. Peso contra presión de mantenimiento (Figueroa, 2001)

Las contracciones en una pieza inyectada dependen del grado de compactación, de manera que una pieza compacta, tiende a contraer menos. Si se disminuyen las contracciones, por consiguiente se ve aumentada la estabilidad dimensional de las piezas; sin embargo, una alta compactación también requiere alta presión o un gran tiempo de mantenimiento, lo que causa alargamiento del ciclo y mayor gasto de energía.

### III. HIPÓTESIS.

Es factible obtener propiedades mecánicas y apariencia adecuadas para embalajes, mediante el control de los parámetros de presión, temperatura y velocidad en el proceso de moldeo por inyección de una mezcla almidón termoplástico-fibra natural.

## IV. OBJETIVOS.

### IV.1. General.

Determinar los parámetros de proceso necesarios para obtener materiales de base almidón termoplástico-fibra natural moldeados por inyección.

### IV.2. Específicos.

- Encontrar un rango de temperatura de inyección en el cual el material presente buenas propiedades (físicas y de apariencia).
- Encontrar un rango en presiones de procesamiento (inyección y de mantenimiento) en el cual, el material presente las propiedades requeridas para el uso en embalajes.

## V. METODOLOGÍA.

### V.1. Materiales.

#### V.1.1. Materia prima

Se utilizaron pellets de una formulación diseñada en el trabajo doctoral del M. en C. Ernesto Aguilar Palazuelos, la cual consta de almidón de maíz, plastificante y fibra de bagazo de caña obtenida de residuos azucareros, se sabe que el proceso para la obtención de los pellets fue el siguiente:

Los materiales se mezclaron manualmente, la mezcla se hizo pasar por una malla con abertura de aproximadamente 595  $\mu\text{m}$ , para luego ser acondicionada a 25% de humedad y procesada por extrusión en un extrusor monohusillo (relación de compresión 1:1), de laboratorio, diseñado y construido por CINVESTAV (CINVESTAV-IPN, Unidad Querétaro), dando un perfil cilíndrico con diámetro de aproximadamente 5 mm, dicho perfil fue cortado (pelletizado) en secciones de aproximadamente 2 cm de longitud.

### V.2. Métodos.

#### V.2.1. Preparación de la materia prima

Los pellets extrudidos se acondicionaron a 14% de humedad y se mantuvieron en bolsas de polietileno cerradas y a temperatura ambiente, hasta que fueron procesadas por inyección.

La humedad de la materia prima se obtuvo tomando una muestra de 2 gramos, pesando la muestra, horneando dicha muestra a 120° durante 2 horas,

pesando la muestra seca, por diferencia de pesos se calculó la humedad evaporada.

### V.2.2. Inyección

La inyección de las muestras se llevó a cabo en una maquina de moldeado por inyección de plásticos marca Demag modelo Ergotech 50-270 manufacturada por Demag Plastics Group, utilizando un molde de probetas con forma de halterio ASTM para prueba de tensión con colada caliente; el diseño del molde fue diseñado especialmente para estas probetas y sus características se describen en el Anexo 1. Cada inyección se llevó a cabo mediante un proceso de optimización propuesto para encontrar los parámetros óptimos de procesamiento.

### V.2.3. Temperaturas de proceso

Para determinar el perfil de temperaturas en el barril, se probó, con la puntera separada del molde, un perfil a partir de la zona de alimentación hasta la boquilla  $60^{\circ}\text{C}$ - $80^{\circ}\text{C}$ - $100^{\circ}\text{C}$ , luego se comenzaron a incrementar las temperaturas, empezando por la boquilla, hacia la zona de alimentación; se observó el flujo de salida en la puntera y cuando éste resultó lo suficientemente fluido, sin oscurecer demasiado el material, se determinó el perfil definitivo. Para la colada caliente, se usó una temperatura entre  $10^{\circ}\text{C}$  y  $20^{\circ}\text{C}$  mayor a la temperatura de la boquilla.

Para encontrar la temperatura del molde, se probó primero con el molde a temperatura ambiente, y se observaron las características de la pieza, luego se comenzó a atemperar el molde incrementando la temperatura; cada  $5^{\circ}\text{C}$  de incremento se observó la apariencia de la pieza.

#### V.2.4. Proceso de optimización

Usando el perfil de temperaturas encontrado por el método anterior, sin presión de mantenimiento, a baja velocidad de inyección y baja velocidad de carga, relativas a la capacidad de la máquina, se comenzó a variar la distancia de carga, con el fin de llenar la cavidad, iniciando con un 70% de llenado, hasta llegar al 100%, luego, se agregó un 5% a un 10% de la distancia como cojín de carga. Se incrementó la presión de mantenimiento hasta que aparecieron rebabas, luego se disminuyó la presión hasta que estas no se presentaron. Cuando se observó rebabeo en la pieza aún sin presión de mantenimiento, se disminuyó el cojín de carga a la mitad del utilizado. Una vez se encontró la carga y presión de mantenimiento, se incrementó la velocidad de carga, registrando el peso, hasta encontrar un peso constante y sin rebabas en la pieza; cuando aparecieron rebabas en la pieza, se disminuyó el cojín de carga. Fue incrementada la velocidad de inyección hasta lograr un peso constante, al aparecer rebabas, fue disminuido el cojín de carga hasta que no se presentaron.

#### V.2.5. Prueba de tensión

Las pruebas de tensión han sido realizadas utilizando como referencia la norma ASTM D638-94B, las muestras fueron moldeadas en probetas, mediante inyección, utilizando un molde de diseño propio, el cual aparece en el Anexo 1, Figura 12:

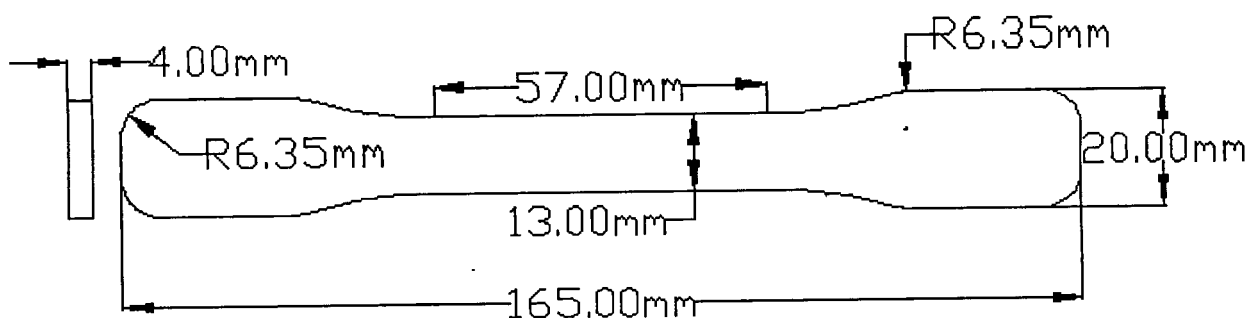


Figura 12. Dimensiones de la probeta halterio utilizada.

Las probetas fueron mantenidas a la intemperie por un periodo de 2 días en un ambiente fresco y seco, luego han sido colocadas en bolsas de polietileno cerradas, con el fin de no alterar su humedad y mantenidas por un periodo no mayor a 5 días dentro de las bolsas. Se han probado ocho especímenes de cada muestra. Fueron descartados los especímenes que presentaron ruptura en alguna grieta fortuita obvia, o que no se rompieron entre las mordazas. Fue utilizada una velocidad de prueba de 5 mm/min en el desplazamiento de las mordazas.

#### - Procedimiento

Se midió el ancho y espesor de los especímenes con un micrómetro en algunos puntos a lo largo de sus secciones delgadas.

Los especímenes fueron colocados dentro de las mordazas de la máquina de prueba, teniendo cuidado en alinear el eje largo del espécimen y las mordazas con una línea imaginaria uniendo los puntos de ataque en las mordazas a la máquina. Se apretaron las mordazas uniforme y firmemente al grado necesario para prevenir desprendimiento de los especímenes durante la prueba, sin llegar al punto en que el espécimen fuese aplastado.

Se sujetó el indicador de extensión. Mientras el módulo fue determinado, el indicador de extensión hubo de registrar continuamente la distancia a la cual el espécimen fue estirado dentro de la distancia de calibración como una función de la carga a través de la porción inicial (lineal) de la curva carga-elongación.

Se estableció la velocidad de prueba a una rapidez de deformación de 5 mm/min.

Se registró la curva carga-desplazamiento. Se registró además la carga y la extensión en el punto de cedencia, y en el punto de ruptura.



- Cálculos:

Esfuerzo máximo de tensión –Se calculó el esfuerzo de tensión dividiendo la carga de ruptura en newtons por el área mínima en el cruce seccional del espécimen en metros cuadrados. El resultado fue expresado en pascales y reportado por duplicado como esfuerzo de tensión en la ruptura

Porcentaje de elongación –Debido a que el espécimen ofreció una carga de cedencia menor que la carga de ruptura, se calculó el porcentaje de elongación en la ruptura. Esto se realizó por medio del desplazamiento al momento en que la carga máxima fue alcanzada. Se dividió dicha extensión por la distancia de calibración original y fue multiplicada por 100. Se reportó porcentaje de elongación en la ruptura por duplicado.

Módulo de elasticidad –Se calculó el módulo de elasticidad determinando la pendiente en la porción lineal (inicial) de la curva carga-desplazamiento. Todos los valores de módulo elástico fueron procesados usando el área transversal inicial media de los especímenes de prueba en los cálculos. El resultado ha sido expresado en pascales y reportado por duplicado.

Para cada una de las series de prueba, fue calculada la media aritmética de todos los valores obtenidos y reportada como la media para la propiedad particular en cuestión.

## VI. RESULTADOS.

### VI.1. Temperaturas de proceso.

El perfil de temperatura encontrado fue de 100°C-120°C-140°C-160°C a partir de la zona de alimentación a la boquilla

La temperatura para la colada caliente fue de 180°C., encontrándose que cerca de 250°C el material expande de manera fortuita, causando riesgos inherentes a la expansión súbita del material caliente.

Se encontró que entre 25°C y 35°C de temperatura en el molde, los problemas de llenado y pegado fueron mínimos, en éste rango de temperaturas no se observó condensación en las paredes del molde.

### VI.2. Optimización

#### VI.2.1. Carga

El peso de la pieza con respecto a la distancia de carga presentó un incremento como se muestra en la Figura 13. Aquí se puede notar una relación casi lineal para los primeros puntos de la distancia, luego se encuentra un cambio de pendiente a los 32 mm de carga aproximadamente, a partir de allí el material llenó la cavidad por completo, sin presión de mantenimiento.

#### VI.2.2. Velocidad de carga

La Figura 14 muestra la relación encontrada entre la velocidad de carga y el peso para 3 valores de velocidad, cada velocidad representa una muestra de 8 experimentos; la tendencia es a incrementar el peso, conforme incrementa la

velocidad de carga, aunque la tendencia no es muy marcada, se encuentra un punto de cambio aproximadamente a 400 revoluciones por minuto (RPM), esta es la velocidad de carga propuesta ya que aumenta la plastificación, aunque siempre se encuentra presente la degradación; de acuerdo a las características que presentó el material inyectado a 500 RPM el cual tuvo menores propiedades mecánicas como veremos posteriormente, principalmente en el módulo de elasticidad.

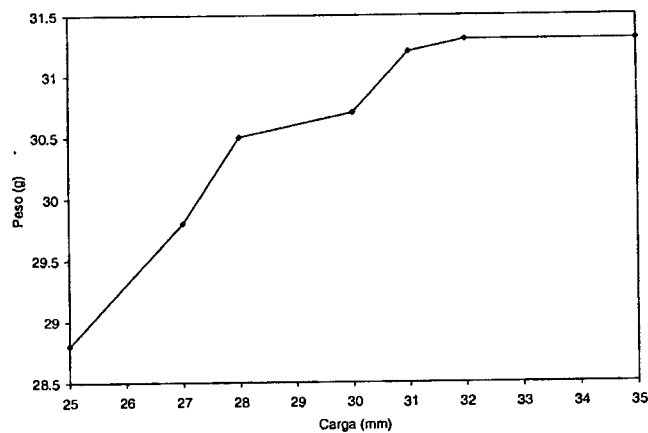


Figura 13. Distancia de carga contra peso

### VI.2.3. Velocidad de carga

La Figura 14 muestra la relación encontrada entre la velocidad de carga y el peso para 3 valores de velocidad, cada velocidad representa una muestra de 8 experimentos; la tendencia es a incrementar el peso, conforme incrementa la velocidad de carga, aunque la tendencia no es muy marcada, se encuentra un punto de cambio aproximadamente a 400 revoluciones por minuto (RPM), esta es la velocidad de carga propuesta ya que aumenta la plastificación, aunque siempre se encuentra presente la degradación; de acuerdo a las características que presentó el material inyectado a 500 RPM el cual tuvo menores propiedades mecánicas como veremos posteriormente, principalmente en el módulo de elasticidad.

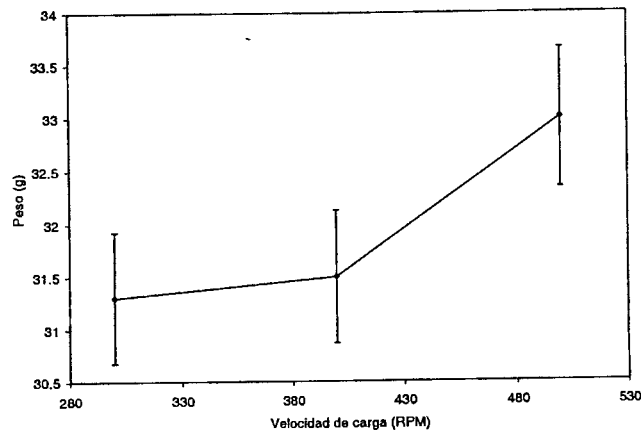


Figura 14. Velocidad de carga contra peso

#### VI.2.4. Velocidad de inyección

En la Figura 15 se presenta el comportamiento encontrado durante la optimización en velocidad de inyección, puede observarse una tendencia al aumento en el peso de la pieza con respecto a la velocidad de inyección y un punto de inflexión aproximadamente a 100 centímetros cúbicos por segundo, en este cambio de pendiente puede pensarse que se presenta un cambio en las características del flujo del material, tal vez debido a la degradación del material con la alta velocidad. Se debe tener en cuenta que la plastificación y degradación del material es favorecida en mayor parte al deslizamiento entre cadenas y no por la temperatura como sucede en los polímeros convencionales.

### VI.3. Tensión

#### VI.3.1. Peso contra porcentaje de elongación.

En la Figura 16 se muestra cómo el peso de la pieza afecta el porcentaje de elongación en la ruptura, en general, se presenta una disminución en la elongación presentada con respecto al incremento en peso lo cual pudiera deberse a la compactación del material, un material más compacto está

presentando menor elongación en la ruptura; además, se observa que la disminución del porcentaje de elongación tiende a ser menos marcada aproximadamente a los 30 gramos, presentando un punto de inflexión, debido tal vez a la compactación óptima de la pieza.

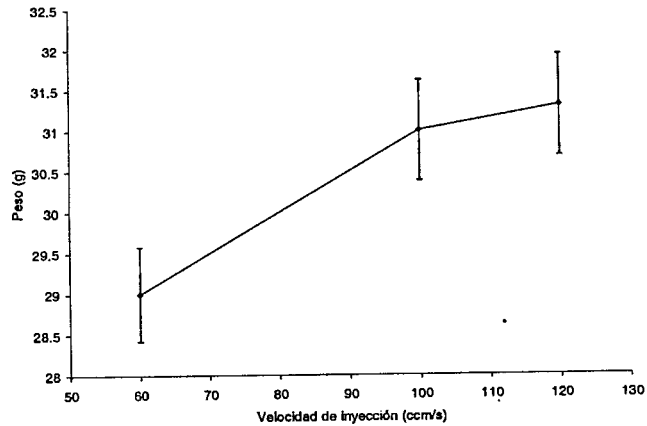


Figura 15. Velocidad de inyección contra peso

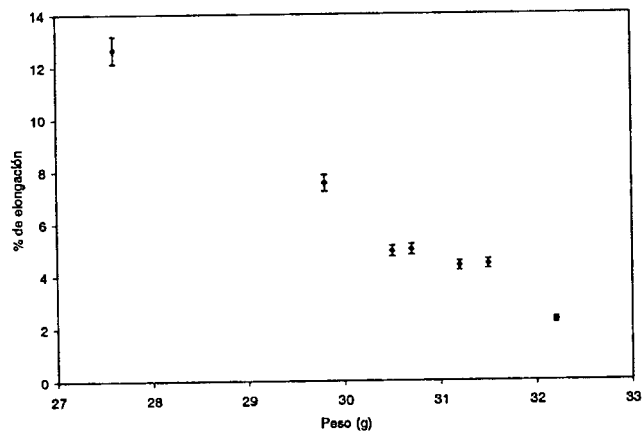


Figura 16. Peso contra porcentaje de elongación

### VI.3.2. Peso contra módulo de elasticidad

El incremento en el peso mostró un incremento en el módulo de elasticidad, sin embargo al llegar a 31.5 gramos aproximadamente, se encontró un punto máximo, luego comenzó a disminuir de manera ligera el módulo con respecto al

peso, como se muestra en la Figura 17. Este comportamiento posiblemente se debe a la compactación del material, que después de llegar al punto óptimo, pierde propiedades al sobrecompactarse.

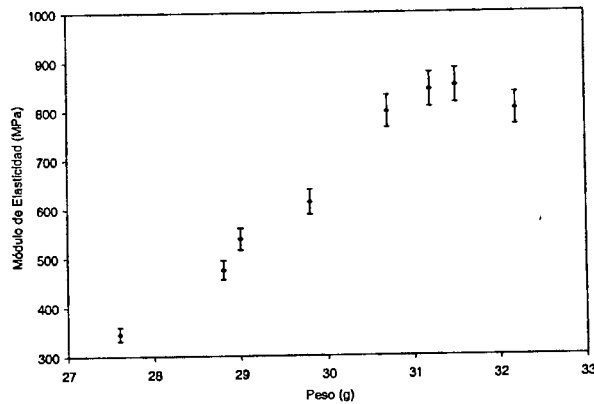


Figura 17. Peso contra módulo de elasticidad

### VI.3.3. Distancia de carga contra porcentaje de elongación.

La distancia de carga y el porcentaje de elongación en la ruptura se ven relacionados de manera que, al incrementar la distancia de carga el porcentaje de elongación disminuye, sin embargo se puede percibir un cambio de pendiente en aproximadamente 28 milímetros de carga, lo que sugiere que en éste punto se ha completado el llenado de la pieza y lo siguiente se aplica a compactación. Como se muestra en la Figura 18.

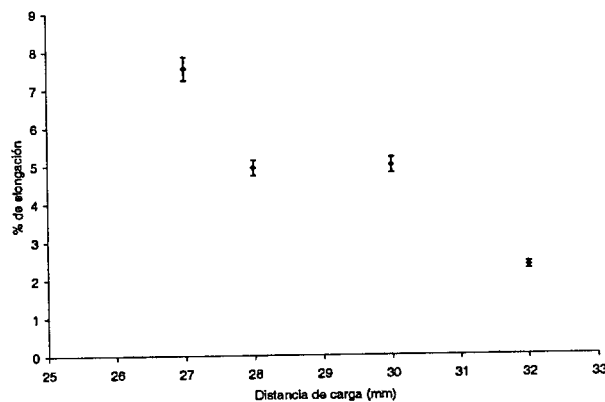


Figura 18. Distancia de carga contra porcentaje de elongación

#### VI.3.4. Distancia de carga contra esfuerzo máximo de tensión

En la Figura 19 se observa que el esfuerzo máximo se ve afectado por la distancia de carga. La tendencia que pudiera observarse es que conforme se incrementa la distancia de carga, el esfuerzo disminuye hasta que llega a un valor de 30 milímetros aproximadamente, donde se presenta un mínimo para el esfuerzo máximo, para después incrementar nuevamente, esto debido posiblemente a la compactación del material; como aproximadamente a 30 milímetros de carga se presenta el llenado completo, la compactación siguiente aumenta el esfuerzo máximo.

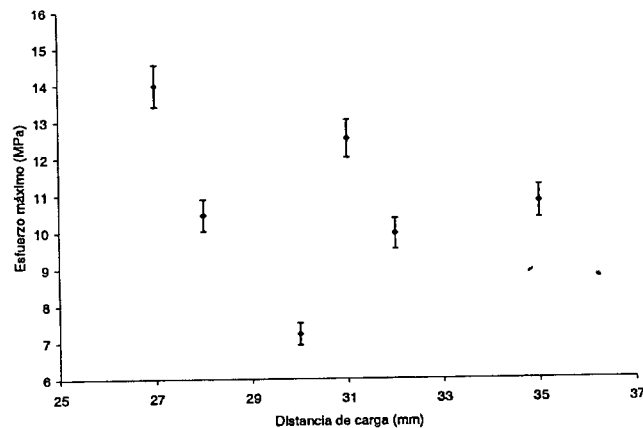


Figura 19. Distancia de carga contra esfuerzo máximo de tensión

#### VI.3.5. Velocidad de inyección contra porcentaje de elongación.

La Figura 20 muestra un comportamiento parabólico del porcentaje de elongación en la ruptura con respecto a la velocidad de inyección aplicada, se supone que esto se debe a la degradación del material, como se había estado prediciendo con los resultados de la optimización. El máximo se encuentra aproximadamente a 100 centímetros cuadrados por segundo y es de cerca del 9% de elongación, se pudiera decir que ésta es la elongación característica del material, aunque se pudiera encontrar una aproximación más fina aumentando los puntos de la gráfica.

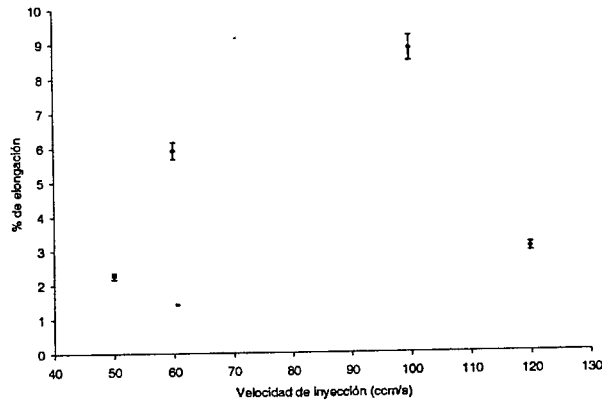


Figura 20. Velocidad de inyección contra porcentaje de elongación

### Vf.3.6. Velocidad de inyección contra esfuerzo máximo de tensión

Al variar solamente la velocidad de inyección, manteniendo constantes los demás parámetros, se encontró que el esfuerzo máximo tiende a aumentar cuando la velocidad de inyección aumenta, creando un máximo en aproximadamente 100 centímetros cúbicos por segundo, para luego disminuir ligeramente (Figura 21), esto puede interpretarse de tal manera que antes de los 100 ccm/s el deslizamiento entre cadenas aún puede aumentarse para favorecer la plastificación y el llenado sin presentar una importante degradación y pérdida de las propiedades mecánicas, por encima de 100 ccm/s se observa que la degradación comienza a ser tan grande que afecta el porcentaje de elongación.

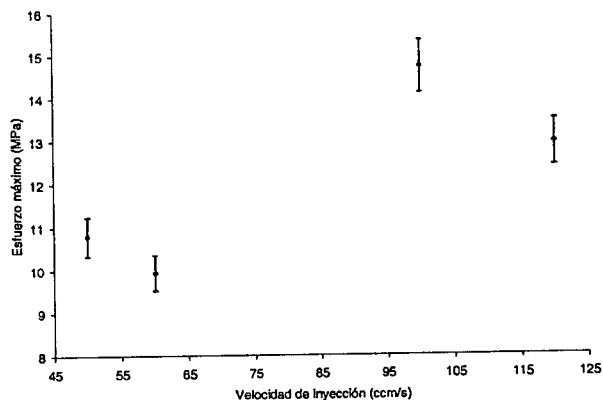


Figura 21. Velocidad de inyección contra esfuerzo máximo de tensión



### VI.3.7. Velocidad de inyección contra módulo de elasticidad

El módulo tiende a disminuir cuando se incrementa la velocidad de inyección, llegando a un comportamiento mínimo debido a las interacciones entre cadenas, para luego incrementar ligeramente (Figura 22) aquí se puede considerar que el deslizamiento entre cadenas favorece el llenado y rompe las mismas cadenas, sin embargo al llegar al mínimo, la degradación cambia el comportamiento del material volviéndolo tenaz y frágil al mismo tiempo, esto debido posiblemente a una orientación preferencial de las cadenas de la matriz y las fibras en forma paralela al flujo ocasionada por la velocidad del mismo.

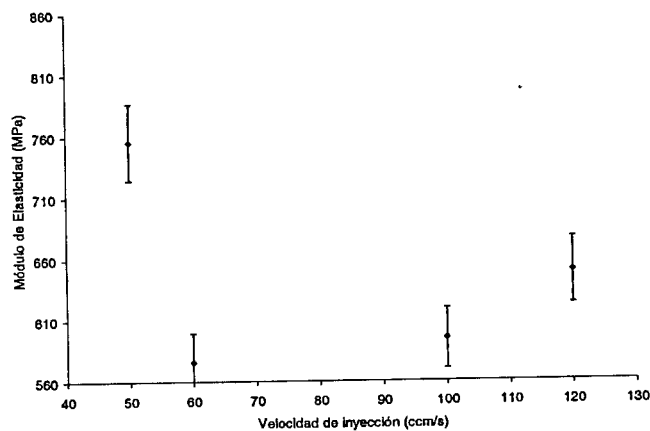


Figura 22. Velocidad de inyección contra módulo de elasticidad

### VI.3.8. Velocidad de carga contra porcentaje de elongación.

La velocidad de carga tiende a incrementar el valor de porcentaje de elongación (Figura 23), esto se debe a la mayor plastificación del material. Un material más plastificado presenta un porcentaje de elongación mayor debido a la orientación de las cadenas en la matriz y el mejor acomodo de las fibras a causa de la fluidez, además, las cadenas que se han vuelto más cortas sirven para que las largas se deslicen entre ellas.

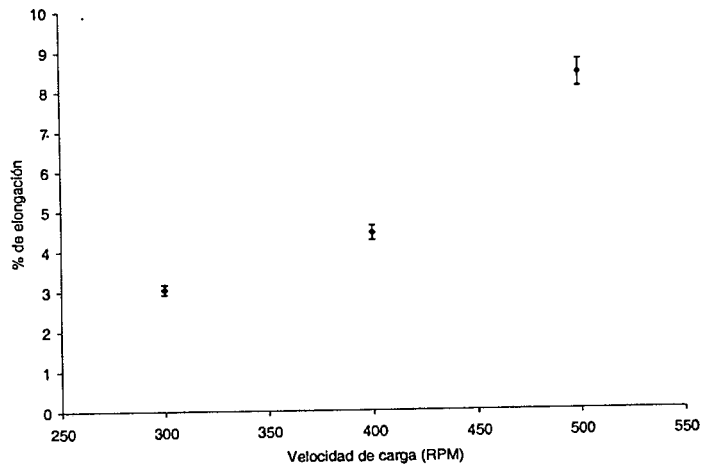


Figura 23. Velocidad de carga contra porcentaje de elongación

### VI.3.9. Velocidad de carga contra esfuerzo máximo de tensión

El incremento en la velocidad de carga tiende a disminuir el esfuerzo máximo de tensión como se muestra en la Figura 24. El aumento en la velocidad de giro del husillo durante la carga, provoca un incremento en la fricción entre cadenas y entre fibras, causando la degradación del material que siempre estará presente en todos los materiales procesados por inyección con husillo plastificador debido al rompimiento de cadenas y a la fragmentación de las fibras.

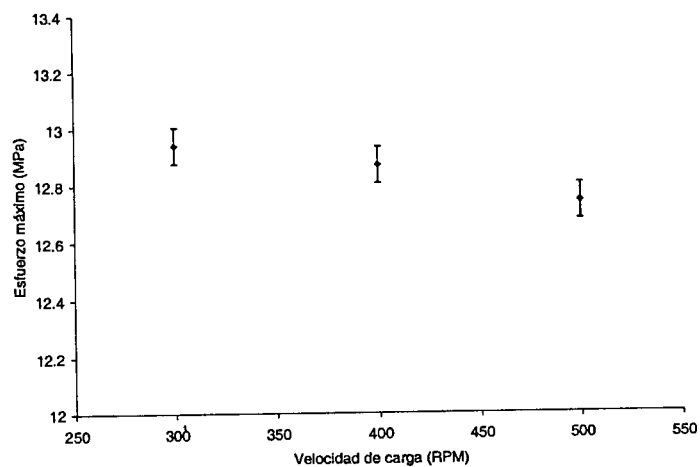


Figura 24. Velocidad de carga contra esfuerzo máximo de tensión

### VI.3.10. Velocidad de carga contra módulo de elasticidad

La Figura 25 muestra un comportamiento parabólico del módulo de elasticidad con respecto a la velocidad de carga, lo que sugiere que antes del máximo, el material aún está siendo plastificado, sin embargo luego de dicho máximo el material comienza a degradarse por la excesiva fricción entre cadenas lo cual provoca el rompimiento de las mismas disminuyendo el módulo de elasticidad. El máximo en 850 MPa de módulo de elasticidad puede tomarse como el módulo de elasticidad característico para el material.

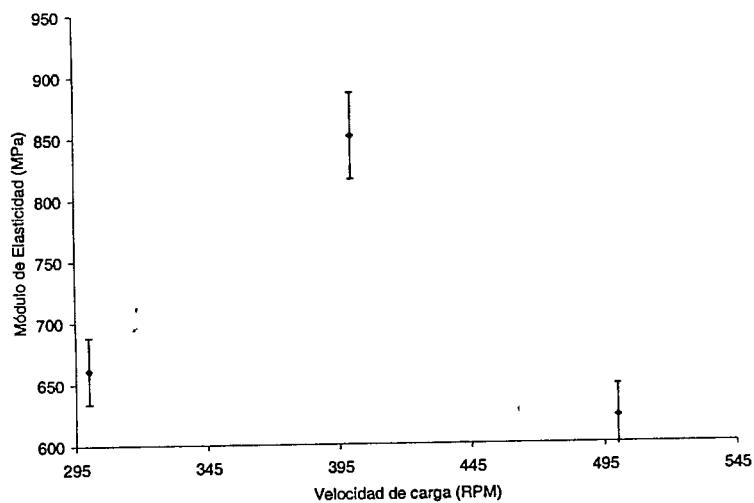


Figura 25. Velocidad de carga contra módulo de elasticidad

## VII. DISCUSIÓN.

### VII.1. Temperatura

Durante todo el trabajo, se usaron diferentes temperaturas de procesamiento, se sabe, gracias a la bibliografía, que la temperatura de transición vítrea del almidón se encuentra alrededor de los 60°C para almidón nativo de maíz, por lo que se comenzó a usar valores más bajos de temperatura en la zona de alimentación entre 30°C y 60°C en la boquilla, lo cual resultó en problemas de plastificación, como rechinido dentro del barril; por lo que se fue incrementando la temperatura en todas las zonas de acuerdo al método reportado hasta finalmente encontrar que el material es procesable entre 60°C (zona de alimentación) y 180°C (boquilla) y para disminuir la degradación, la temperatura para colada caliente recomendable, es siempre menor a 200°C. A partir de estas temperaturas de procesamiento, se propone usar un método similar para los compuestos de almidón termoplástico-fibras naturales mediante moldeo por inyección, dependiendo de la máquina y la zona de calentamiento, de acuerdo a la experiencia adquirida en éste trabajo, la mayor degradación del material y problemas se comienzan a presentar aproximadamente a 220°C.

Un error común es intentar plastificar el material en el husillo mediante el incremento de la temperatura, se encontró que esto además de no ayudar en mucho, causa mayores problemas debido a la degradación del material al acercarse a los 200°C. Los materiales compuestos basados en almidón, son generalmente plastificados por la fricción entre sus cadenas (cizalla) más que por efectos de la temperatura, por lo que, una mejor práctica para tratar de evitar atascos en el barril es el aumento de la velocidad de giro en el husillo, con las limitaciones descritas en los incisos sobre velocidad de carga, además de intentar disminuir el tiempo de residencia. Los tiempos de residencia altos a temperaturas

mayores de 100°C provocan pérdida excesiva de humedad, la cual es usada como plastificante.

## VII.2. Temperatura de molde

La atemperación en el molde debe cumplir un par de restricciones principales, la primera es que no debe causar condensación en el molde debido a las características hidrofílicas del material, y además no debe estar muy caliente, ya que esto causaría pegado del material debido a la falta de enfriamiento, con lo que la pieza tendría una apariencia gomosa que no mantiene la forma del molde.

Otro aspecto a considerar es que un molde a alta temperatura causa en el material el mismo efecto de una sartén caliente sin aceite con la comida, un pegado que debe ser retirado con ayuda de agua para no dañar el acabado del molde.

Por lo anterior, se encontró que el rango de temperaturas que presentó mejores resultados fue entre 25°C y 35°C.

Dentro de las posibles soluciones al problema de pegado, se encontró que la aplicación de aceite vegetal comestible de girasol en las paredes de la cavidad, disminuye de manera importante el pegado en la misma, aún mejor que lo observado con la aplicación de desmoldante de silicón.

## VII.3. Humedad

La humedad es un factor importante en el proceso de inyección de materiales compuestos de almidón y fibras naturales debido a las características hidrofílicas del almidón. Se encontró que una materia prima con humedad alta, arriba de 14%, es más difícil de procesar que una materia prima cuyos pellets se

encuentran entre 10% y 14% de humedad, la humedad menor a 10% presentó problemas de plastificación.

Se encontró que de acuerdo a la composición de la materia prima en cuanto a plastificante agregado y al tipo de plastificante, es posible disminuir la humedad de los pellets, inclusive debajo del 10%, con el fin de disminuir los problemas inherentes al agua, como pudieran ser los condensados en las paredes de la cavidad. Aunque es mejor definir la humedad necesaria para la materia prima en conjunto con el proveedor de la misma.

#### VII.4. Distancia de carga

El comportamiento de peso contra distancia de carga presenta una relación directa, sin embargo esta relación es asintótica, probablemente debido a la compactación que, siempre ha de presentar un máximo para cualquier material. El llenado excesivo provoca rebabas y no mayor compactación, las piezas con rebabas muy visibles deben ser descartadas para el experimento con fines de calidad. Al incrementar de 32 mm a 35 mm, con la misma presión, no se observó un cambio significativo en el peso de la muestra, esto se debe a que los 3 mm de diferencia quedaron como cojín de carga, y de hecho así fueron considerados con el fin de disminuir los efectos causados por la falta de llenado al variar los demás parámetros, debido a que si la compactación resulta modificada, pudieran presentarse piezas incompletas; o por el contrario, si el cojín fuera excesivo, se presentarían piezas con rebabas. Al parecer, la distancia de carga no presenta en si un comportamiento con respecto a las propiedades de tensión como esfuerzo máximo y módulo de elasticidad, sin embargo, se puede usar el porcentaje de elongación para encontrar el llenado completo, el cual se presentó aproximadamente en 31 mm. En campo, generalmente no se tiene la capacidad de realizar pruebas de tensión, por esto, simplemente el llenado completo se puede correlacionar además con el peso de la pieza.

## VII.5. Velocidad de carga

Se observó que el incremento la velocidad de carga aumentó el peso de la pieza debido a un incrementó en la fluidez del material debido a la plastificación del mismo, resultando probablemente en una mejor orientación de las cadenas y de las fibras, lo que beneficia la compactación del material debido a que la fricción entre cadenas causa una mejor plastificación llevando además al incremento del porcentaje de elongación en la ruptura, lo que nos sugiere que el material se vuelve menos viscoso al salir de la unidad de plastificación. La plastificación del material además de favorecer la orientación de las cadenas del polímero, también favorece la orientación de las fibras, que actuarán como refuerzo en el material, presentando así el mayor módulo de elasticidad. Sin embargo, ha de tenerse cuidado al aumentar la velocidad de carga, ya que las fricciones provocadas por el giro del husillo pueden romper las cadenas de polímero y las fibras de refuerzo ofreciendo los resultados observados en la Figura 24 para el esfuerzo máximo de tensión.

## VII.6. Velocidad de inyección

Al incrementar la velocidad de inyección también se observó un incremento en el peso de la pieza, esto es debido a que con una mayor velocidad de inyección se le da menos tiempo al material para volverse viscoso mientras entra material nuevo, favoreciendo el llenado, la orientación de las cadenas y la orientación de la fibra, compactando el material en la cavidad. Con respecto a las propiedades de tensión, el incremento en la velocidad de inyección tiende a incrementar los valores del porcentaje de elongación y del esfuerzo máximo de tensión hasta llegar a un punto máximo, a partir del cual las propiedades disminuyen a causa de la degradación en el material, que se presenta debido a la alta fricción de las cadenas entre sí, con la fibra y además, con las paredes de la cavidad.

Al incrementar la velocidad de inyección, disminuye del módulo de elasticidad debido a la degradación del material, lo cual sucede hasta que el grado de la orientación de las cadenas del material permite una recuperación parcial del módulo. Debido en parte a que la degradación en estos materiales produce piezas frágiles como consecuencia del tamaño en las cadenas y las fibras presentes.

#### VII.7. Ventana de proceso

La Figura 26 muestra la ventana de proceso propuesta en base a este trabajo, para 4 de las variables más importantes (velocidad de inyección, velocidad de carga, temperatura de molde y temperatura en la boquilla), se seleccionan estas variables debido a que se considera que son las que más afectan a la plastificación y degradación del material, dos factores cruciales en el moldeo por inyección de materiales compuestos de almidón termoplástico con fibra natural como refuerzo. La zona en blanco corresponde a la zona donde se obtuvieron los mejores resultados tanto en apariencia como en propiedades mecánicas; cuando se tuvieron velocidades mayores a las marcadas en el rango, tanto de inyección como de carga, se presentó mayor degradación y pérdida de las propiedades mecánicas como el módulo de tensión y el esfuerzo máximo de tensión, las velocidades menores al rango provocan bajo peso de la pieza, y bajas propiedades mecánicas, con relación a las encontradas dentro del rango; en cuanto a temperaturas, éstas afectan más la apariencia de la pieza y el llenado del molde que las propiedades mecánicas. Altas temperaturas en la boquilla resultan en oscurecimiento del material a causa de la degradación y, en el molde, las altas temperaturas causan pegado, provocando daños a la pieza durante el desmoldeado, las bajas temperaturas en la boquilla limitan el flujo del material, bajas temperaturas de molde llevan a un pegado de la pieza con las paredes de la cavidad a causa de la condensación de humedad en las paredes de la misma, dicha humedad no puede ser evacuada durante el llenado y disuelve el almidón que se encuentra en contacto con ella formando un producto viscoso y pegajoso



qué es responsable de la alta adherencia al molde. Estos valores pudieran no ser aplicables de manera estricta para un molde o máquina diferente, sin embargo se espera que sirvan como guía para el procesamiento de los materiales aquí utilizados.

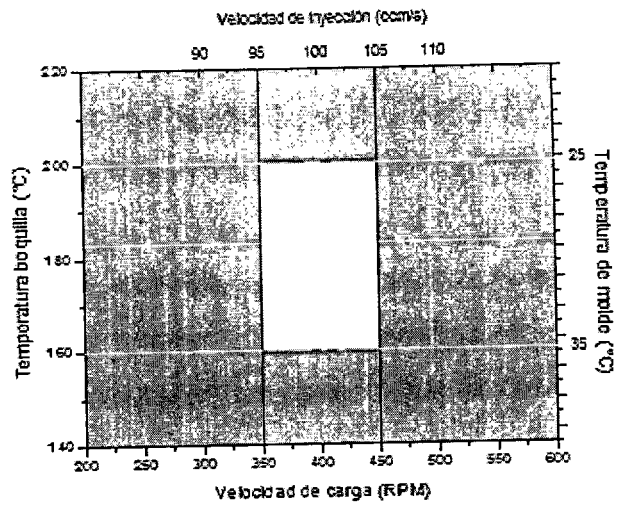


Figura 26. Ventana de proceso propuesta

## VIII. CONCLUSIONES.

Es factible procesar el material compuesto de almidón termoplástico con fibras naturales usado en el presente trabajo.

Es viable encontrar la ventana de proceso necesaria para llevar a cabo el moldeo por inyección del material, usando los métodos aquí descritos.

Para el material evaluado se encontró que; una velocidad de carga alrededor de 400 RPM  $\pm$ 50 RPM, una velocidad de inyección de 100  $\pm$  10 centímetros cúbicos por segundo, presión de inyección de 1200 bar  $\pm$ 100 bar, presión de mantenimiento de 900  $\pm$ 100 bar, con un molde temperado entre 25 °C y 35 °C, con temperaturas en barril mínima de 60 °C y máxima de 180 °C; es posible moldear piezas con geometrías sencillas como probetas de halterio y platos hondos, por inyección termoplástica, sin mayores modificaciones al proceso que las pertinentes para mantener la materia prima entre 10 % y 14 % de humedad.

Debido a que la humedad actúa como plastificante, se pueden lograr resultados de plastificación similares, variando el contenido de plastificante o sus propiedades, sin limitar la capacidad de procesamiento del material, siempre y cuando el material pueda ser pelletizado por extrusión.

La plastificación de los materiales compuestos de almidón y fibra natural es debida en su mayoría a la cizalla entre las partículas de almidón, debido a que el almidón no puede por efecto de la temperatura iniciar el movimiento de sus cadenas, sino que necesita el impulso de la cizalla siempre y cuando se encuentre por encima de su temperatura de transición vítrea.

## IX. BIBLIOGRAFÍA.

- Álvarez, V. A., Kenny, J. M. y Vázquez, A. 2004.** Creep Behavior of Biocomposites Based on Sisal Fiber Reinforced Cellulose Derivatives/Starch Blends. POLYMER COMPOSITES. 25:280-288
- Arazo, J. L. 1999.** Manual del inyector. -Inyección de Termoplásticos. Grupo Emitec, S.A. Barcelona. 197
- Crawford, R. J. 1998.** Plastics Engineering. Butterworth Heinemann. London, England. 505
- Cheremisinoff, N. P. 1998.** Advanced Polymer Processing Operations. Noyes Publications. Westwood, New Jersey. 287
- Derval, D. S. R. 2001.** Biodegradabilidade e Propriedades Mecânicas de Novas Misturas Poliméricas. polímeros: Ciência e Tecnologia. 11:82-88
- Derval, D. S. R., Guedes, C. G. y Casarin, F. 2005.** Mechanical Behavior and Biodegradation of Poly( $\epsilon$ -caprolactone)/Starch Blends with and without Expansor. Polymer Bulletin. 54:321-333
- Ecología, Instituto Nacional de. 2006.** TECNOLOGÍAS EN EL SECTOR DE ENVASE Y EMBALAJES. Gaceta:
- Figuroa, L. C. 2001.** Metodología para la optimización del proceso de inyección de plásticos a nivel industrial. Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya. 395
- Gordillo, A. 2000.** Influencia de la Inyección Sobre el Comportamiento Mecánico de Compuestos de Polipropileno. Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya.

**Gordillo, A. 2007.** Curso de Inyección. Querétaro, México. 12, 2:

**Group, T. T. 2000.** What is a mold? -An introduction to plastic molding and injection mold construction. Tech Group, Inc.

**Jiménez, O., Martínez, F., Aguilar, E. y Delgado, A. 2006.** Moldeado por Inyección de Materiales Poliméricos Termoplásticos Basados en Almidones. Congreso SOMIM XI. 7

**Karger, J. K. 1991.** Microstructural aspects of fracture and fatigue behavior in short fiber-reinforced, injection-molded PPS-, PEEK and PEN-composites. Polymer Bulletin. 27:109-116

**Mano, J. F., Sousa, R. A., Boesel, L. F., Neves, N. M. y Reis, R. L. 2004.** Bioinert, biodegradable and injectable polymeric matrix composites for hard tissue replacement: state of the art and recent developments. Composites Science and Technology. 64:789-817

**Mascia, L. 1974.** Efectos de los aditivos en los plásticos: cómo seleccionarlos, posibilidades y limitaciones. Madrid. 219

**Miller, R. C. 2005.** Características del producto terminado. Oficina Regional para México, Centroamérica y el Caribe.

**Miller, R. C. 2005.** Costo del proceso de extrusión: Inversión y operación. Oficina Regional para México, Centroamérica y el Caribe.

**Miller, R. C. 2005.** Operaciones unitarias en procesos de extrusión. Oficina Regional para México, Centroamérica y el Caribe.

**Miller, R. C. 2005.** Tecnología de extrusión de alimentos. Oficina Regional para México, Centroamérica y el Caribe.

- Mink, W. 1977.** Inyección de plásticos. Barcelona. 473
- Ram, A. 1997.** Fundamentals of Polymer Engineering. Plenum Press. Haifa, Israel. 237
- Riggle, D. 1998.** Moving Towards Consensus on Degradable Plastics. Biocycle.
- Rosato, D. V., Rosato, D. V. y Rosato, M. G. 2001.** Plastics Design Handbook. Kluwer Academic Publishers. Massachusetts. 669
- Smits, A. L. M. 2001.** The molecular organization in starch based products: The influence of polyols used as plasticisers. Utrecht, Países Bajos. Universidad de Utrecht. 132
- Stelson, K., Voller, V. y Bhattacharya, M. 1999.** Starch-based polymer research. University of Minnesota.
- Tharanathan, R. N. 2005.** Starch: Value Addition by Modification. Critical Reviews in Food Science and Nutrition. 45:371-384
- Thiré, R. M. S. M., Simão, R. A., Araújo, P. J. G. y Achete, C. A. 2004.** Reduction of Hydrophilicity of Biodegradable Starch-Based Films by Plasma Polymerization. Polímeros: Ciência e Tecnologia. 14:57-62
- Triana, O., Leonard, M., Saavedra, F., Fernández, N., Gálvez, G. y Peña, E. 1990.** ATLAS del bagazo de la caña de azúcar.
- Vegemat. 2007.** [www.vegemat.com](http://www.vegemat.com).

## X. ANEXOS.

### X.1. Molde para la inyección de probetas halterio

Para la inyección de las probetas de tracción se diseñó un molde conjuntamente con el CIATEQ, A.C. y el ITESM-Campus Qro. Se trata de un molde prototipo, para portamoldes, consta de tres placas en aluminio, como se muestra en la Figura 27.

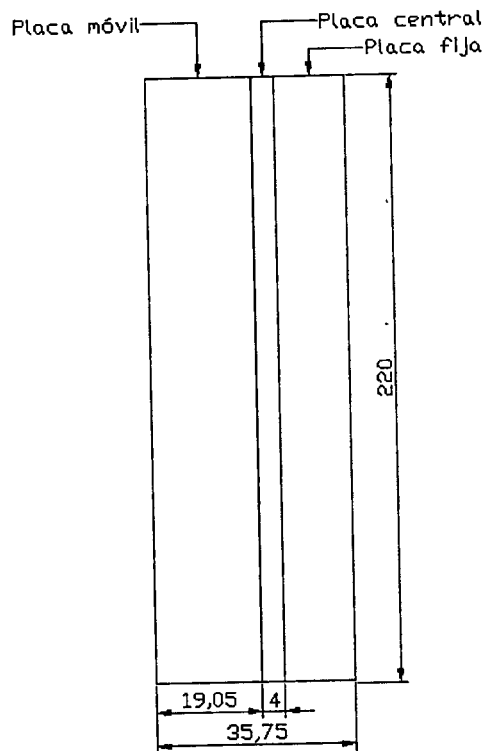


Figura 27. Esquema de las tres placas del molde.

Dimensiones en milímetros.

En la placa móvil (Figura 28) del molde se agregaron pernos guía para posicionar las otras placas al abrir y cerrar el molde, además de un barreno central a manera de pozo frío, el cual tiene además la intención de fijar más la pieza al lado

móvil del molde (placa central y placa móvil). En la placa fija se ha hecho un bebedero, el cual debe tener un diámetro aproximado de 6.35 mm y se le hizo un ángulo de desmoldeado

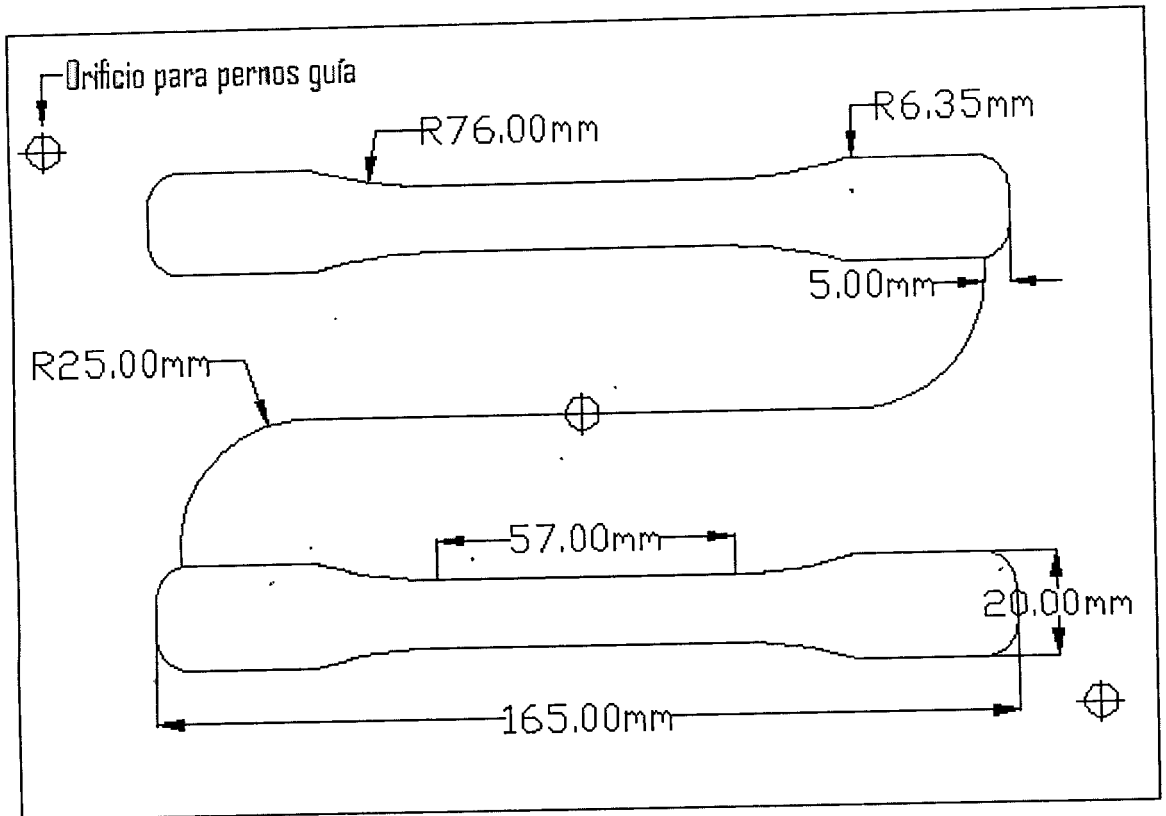


Figura 28. Esquema de la placa central del molde.

En la Figura 29 se encuentran redondeos significativos, mínimos de 6.35 mm, estos se realizan con el fin de disminuir los residuos del material en los recovecos de las aristas, esto no afecta el montaje en la máquina de pruebas, ya que el área de contacto entre la pieza y las mordazas no se ve significativamente disminuida y es suficiente para realizar las pruebas.

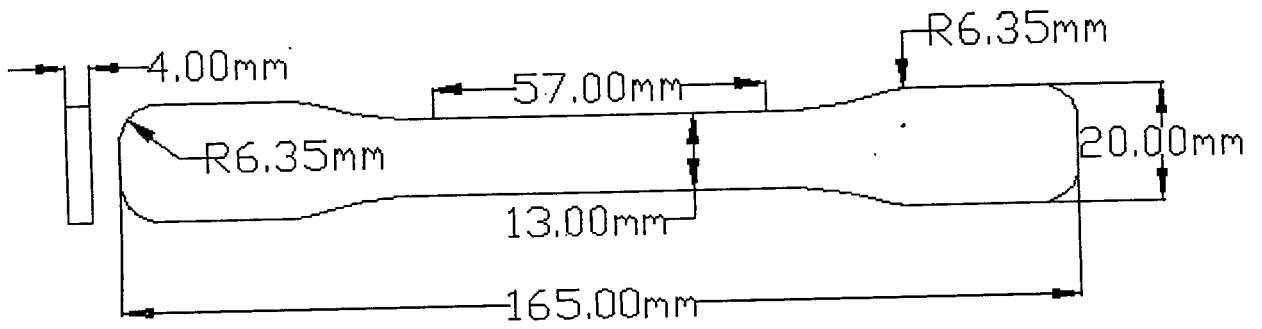


Figura 29. Dimensiones de las cavidades en la placa central.

Las dimensiones de la sección recta y el espesor se mantienen de acuerdo a las recomendaciones tanto para la norma ISO-527-1A como para la ASTM D638-94B