



UNIVERSIDAD PANAMERICANA

CON ESTUDIOS INCORPORADOS A LA
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

DISEÑO DE UN SIMULADOR DEL PROCESO
DE EXTRUSION PARA RECICLAJE DE PLASTICOS

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
AREA: INGENIERIA MECANICA

P R E S E N T A N :
JUAN RAMON CORO BRACCHINI
ENRIQUE MAJOS RAMIREZ

DIRECTOR: ING. RODOLFO BRAVO DE LA PARÑA

MEXICO, D F

MARZO 1994

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

DEDICO ESTA TESIS A ...

... **MI MAMÁ:** gracias a tu cariño, esfuerzo, dedicación y sacrificio he logrado llegar a mis metas; todo te lo debo a ti.

...**MI PAPÁ:** (Q.E.P.D.) estoy seguro que nos sigues cuidando y procurando.

... mi familia: **LAU, ALE, MANOLO** y **KRIMI**, por su apoyo y cariño incondicional.

... mis amigos, porque no sólo han creído en mis sueños, sino que los han hecho compartidos: **JIMMY (B.U.), LUIS, BETO, KENYI, CECI, MEMO, JERRY**, a todos aquellos que me han brindado su valiosa amistad y muy especialmente a **ENRIQUE** que sin su ayuda este trabajo no sería una realidad.

... **VERO:** gracias porque sólo una persona especial no sólo aplaude los aciertos, sino alienta a seguir adelante (msdc).

... todos aquellos que han pasado por mi vida dejando una huella en mi mente.

Juan Ramón.

DEDICO ESTA TESIS A ...

... **MIS PADRES**, por el incondicional amor y apoyo que siempre me brindaron, y por la formación que de ellos recibí. Gracias por ser parte de este éxito.

... **MI ABUELO DONATO** y **MI ABU** por su constante apoyo para mi formación profesional y por el cariño que siempre recibí de ellos. Gracias a ambos.

... a todos aquellos **MAESTROS** que, desde mi educación básica, han dejado huella en mi formación tanto profesional como personal.

Enrique.

AGRADECIMIENTOS

Al **Ing. Jorge Izquierdo**, porque sin su experiencia no hubiera sido posible el éxito de este trabajo; así como por su apoyo, dedicación, ánimo y optimismo que en todo momento nos transmitió, y por la amistad que siempre nos brindó.

Al **Ing. Rodolfo Bravo** por su amistad, apoyo y asesoría.

A **Roberto Carlos Riba**, por su incondicional aportación en la realización de este trabajo, pero sobretodo por todas las muestras de su invaluable amistad.

Al **Ing. Joaquín Ramos Rodríguez**, a **Fernando Ramos Aguilar** y al personal de **MACODISA**: al **Ing. Eduardo Pérez**, al **Ing. Andrés Vega**, y al **Mtro. José González**, por el apoyo y asesoría brindados.

Al **Lic. Jaime Bacelis Ugalde** por su apoyo y facilidades en la realización de este trabajo.

Al Lic. Noé Vega, director del CETIS No. 36, y a todo el personal de laboratorios, en especial a Vicente, por el invaluable apoyo tanto con sus conocimientos como con sus instalaciones, en las que realizamos gran parte del trabajo práctico de esta tesis.

A la UNIVERSIDAD PANAMERICANA: al Ing. Pedro Creuheras, al Ing. Sergio Martínez, al Fis. Mariano Romero, al Ing. Oscar Cervantes, al Ing. Javier Cervantes, al Ing. Alejandro González y a Armando Maqueda, por las facilidades ofrecidas para el uso de sus instalaciones.

A Martha Gómez y a Lourdes de la Mora de CELANESE MEXICANA, por el apoyo, asesoría y facilidades brindadas.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN.	1
CAPÍTULO 1 LA BASURA EN MÉXICO.	4
1.1 EL PROBLEMA DE LOS DESECHOS.	4
1.2 EL PROBLEMA DEL RECICLAJE.	8
CAPÍTULO 2 EL PROCESO DE EXTRUSIÓN.	11
2.1 PRINCIPIOS BÁSICOS.	11
2.2 TIPOS DE EXTRUSORAS.	12
2.2.1 Extrusoras de Desplazamiento Positivo.	13
2.2.1.1 Extrusoras de Pistón Sencillo.	14
2.2.1.2 Extrusoras de Pistón Múltiple.	14
2.2.1.3 Bombas de Extrusión.	14
2.2.2 Extrusoras de Fricción Viscosa.	14
2.2.2.1 Extrusoras de Rodillos.	14
2.2.2.2 Extrusoras de Tambor Rotatorio.	15
2.2.2.3 Extrusoras de Tornillo.	15
2.2.3 Configuraciones Especiales.	15
2.2.3.1 Extrusora Elastodinámica.	15

2.2.3.2	Extrusora Hidrodinámica.	16
CAPÍTULO 3	LA EXTRUSORA DE TORNILLO.	17
3.1	PRINCIPALES ELEMENTOS DE UNA EXTRUSORA DE TORNILLO.	17
3.2	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.	18
3.3	TEORÍA DE TORNILLOS.	18
3.3.1	Tipos de flujo a lo largo del canal del tornillo.	20
3.3.2	Análisis de velocidades dentro del canal.	21
3.4	VARIABLES CRÍTICAS.	23
3.4.1	Velocidad angular del tornillo.	23
3.4.2	Ángulo de hélice del tornillo.	23
3.4.3	Compresión.	23
3.4.4	Presión de arrastre.	24
3.4.5	Calor suministrado.	25
3.4.6	Tiempo de residencia del material.	25
CAPÍTULO 4	DISEÑO DE UN SIMULADOR DE UNA EXTRUSORA DE TORNILLO.	27
4.1	JUSTIFICACIÓN DEL MODELO, RECONOCIMIENTO DE UNA NECESIDAD.	27
4.2	PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS Y REQUISITOS DEL DISEÑO.	29
4.3	DISEÑO PRELIMINAR DEL SIMULADOR.	30
4.3.1	Diseño del canal.	30
4.3.2	La velocidad a lo largo del canal.	33
4.3.3	Dimensiones del canal.	36

4.3.4	Suministro de calor.	38
4.3.5	Sistema de transmisión.	39
4.4	DISEÑO DETALLADO.	39
4.4.1	Selección de elementos, materiales y sus propiedades.	39
4.4.2	Definición de piezas fundamentales para el diseño.	42
4.4.3	Análisis cinemático.	43
4.4.4	Análisis de esfuerzos en condiciones de operación.	44
4.4.5	Análisis de esfuerzos en condiciones críticas.	47
4.4.6	Masas y cálculo de momentos de inercia.	49
4.4.7	Selección de rodamientos.	50
4.4.8	Ajustes, tolerancias y acabados.	52
4.4.8.1	Flecha - rodamientos.	52
4.4.8.2	Rodamientos - caja de rodamientos.	53
4.4.8.3	Flecha - cubo.	53
4.4.8.4	Flecha del chicote - rueda dentada pequeña.	53
4.4.8.5	Acabados.	54
4.4.9	Tornillos de sujeción.	54
4.4.10	Soldaduras.	56
4.4.11	Elementos para base estructural.	57
4.4.12	Esfuerzos térmicos.	58
4.5	PLANOS CONSTRUCTIVOS.	59
CAPÍTULO 5	EL SIMULADOR DE LA EXTRUSORA DE TORNILLO, Y SUS RESULTADOS.	74
5.1	PRUEBAS CON EL MODELO FUNCIONAL.	75

5.1.1 Condiciones de operación y alimentación del simulador.	75
5.1.1.1 Ajustes de transmisión.	75
5.1.1.2 Estabilización de temperatura.	75
5.1.1.3 Alimentación.	76
5.1.2 Resultados.	76
5.2 PROPUESTAS DE MAQUINADO Y OTRAS MEJORAS.	78
5.2.1 Maquinado de la placa y canales.	78
5.2.2 Maquinado del plato.	80
5.2.3 Sistema de calefacción.	80
5.2.4 Sistema de transmisión.	80
5.3 PROGRAMA DE PRUEBAS PROPUESTO.	83
CONCLUSIONES.	90
BIBLIOGRAFÍA.	94

INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el hablar de ecología y de reciclaje se ha convertido en una práctica muy común debido a la gran preocupación que existe por no contaminar aún más el medio ambiente. Sin embargo, en muchas ocasiones esta preocupación no llega a ocuparnos en solucionar el problema, y el uso de los vocablos *reciclar* y *ecología* se convierte, cada día más, en palabras que únicamente parecen estar de moda.

Desde hace ya algunos años se habla de reciclaje en muchos campos de la industria. El campo de materiales plásticos no es la excepción, siendo incluso éste uno de los más necesitados de la práctica del reciclaje. Esto resulta lógico pues existen infinidad de aplicaciones que estos materiales pueden tener, además de que ofrecen buenas propiedades llegando incluso a superar la funcionalidad de otros materiales de gran tradición como pudieran ser los aceros. Sin embargo, este desplazamiento de materiales, protagonizado por la gran familia de hidrocarburos y otros materiales no degradables, está generando cantidades alarmantes de desechos que, por su naturaleza, su procesamiento posterior es complicado.

Es entonces cuando surge el interés por aprovechar estos desechos mediante su reutilización, ya sea en aplicaciones similares a las que originalmente estaban destinados, u otras que por sus características no exijan el uso de plástico virgen. Sin embargo, reciclar estos desechos presenta un problema fundamental: debido al bajo costo del material virgen, resulta mucho más económico hacer uso de éste que absorber los costos de recolección, clasificación, trituración y limpieza de desechos para su posterior reciclaje.

Proponemos entonces una solución que si bien no es la única, puede ser un buen principio para emprender el camino hacia el aprovechamiento de todos los desechos plásticos. Una de las etapas en el reciclaje de desechos es la recolección y clasificación de los mismos, y pensamos que si logramos simplificar esta etapa mediante el reciclaje de dos o más tipos de desechos juntos, lograríamos un substancial ahorro en costos.

Al igual que en muchos otros campos de la industria, la investigación debe ser una actividad prioritaria para descubrir las múltiples aplicaciones que este reciclaje compuesto pudiera tener. Por ejemplo: las botellas de plástico transparente usadas en la industria para almacenar alimentos y algunas sustancias para la limpieza, están hechas de PET o PVC; una recolección de alguno de estos dos tipos de botellas puede resultar muy complicada por su aparente similitud. Pero si logramos encontrar alguna aplicación para una mezcla PET-PVC, el proceso de recolección y clasificación queda substancialmente simplificado.

El objetivo de este trabajo es presentar el diseño de una máquina, cuyos costos de inversión y operación sean considerablemente inferiores a los incurridos en una extrusora de tornillo para procesar plástico, y la cual nos ofrezca la flexibilidad necesaria para poder variar las principales condiciones de operación del proceso de extrusión, en una fiel simulación de éste. Con el uso de este simulador, se podrán realizar las pruebas de laboratorio necesarias para proponer mezclas de polímeros utilizando material de desecho, sin la necesidad de hacer uso de una gran extrusora industrial cuya función, por sus características físicas, capacidad y alto costo, es la de generar utilidades para la empresa a través de su producción.

CAPÍTULO 1 LA BASURA EN MÉXICO

1.1 EL PROBLEMA DE LOS DESECHOS

La basura empieza a ser un problema desde que el hombre se vuelve sedentario. En la Edad Media, el problema era resuelto por cada persona hasta que a finales del siglo XVIII, se organizan las primeras empresas estatales y particulares para resolver este problema cada vez más grave.

A raíz de la revolución industrial se complica la situación de los desechos ya que éstos dejan de ser principalmente orgánicos, y pasan a ser inorgánicos en su gran mayoría. Esta es una gran realidad en la actualidad.

Países como Estados Unidos y Japón, debido a su gran desarrollo industrial, son algunos de los mayores generadores de desechos *per cápita*, lo cual ratifica lo anteriormente expuesto. Para darnos una idea de la magnitud del problema, Estados Unidos, Japón y México producen 200, 93, y 13 millones de toneladas de basura al año

respectivamente, dentro de las cuales se producen 12, 5.8, y 0.8 millones de toneladas de desechos plásticos al año respectivamente.

Lo más alarmante de este problema es que, a pesar del gran impacto negativo en contra de los sistemas ecológicos, de la salud, y muchos otros, las estadísticas respecto a la generación de basura señalan un crecimiento anual del 30%, por lo cual se estima que para el año 2,000 produciremos 36.3 millones de toneladas al año. Actualmente los principales generadores de basura en nuestro país son: D.F., Estado de México, y Jalisco, con 11,600, 10,000 y 3,500 toneladas al día respectivamente.

Las causas de la desmedida generación de basura se pueden atribuir a varios factores, tales como: la falta de cultura en la población, la mala organización gubernamental y la irresponsabilidad en los sectores sociales entre otras.

Los subproductos predominantes en los depósitos finales de la ciudad de México son: 45% alimentos, 11% papel, 8% vidrio, 7% jardinería, 4% plásticos, 4% cartón, 3% metal y 29% de otros. Cabe mencionar que aunque el plástico representa tan sólo el 4% en el peso de la basura, debido a su baja densidad, esto representa del 30% al 40% del volumen.

En las últimas décadas, el consumo de productos con un alto porcentaje de plástico en su composición se ha incrementado en demasía, y esto se le puede atribuir a la gran disponibilidad de materia prima de bajo costo de obtención y procesamiento, a su gran funcionalidad, a sus propiedades, y a la posibilidad real de sustituir, en muchas

aplicaciones, materiales convencionales como metal, vidrio, madera, fibras naturales y muchos otros.

Algunas otras ventajas de los plásticos son: bajo peso específico, alta resistencia a la corrosión, bajo coeficiente de fricción, muy bajo desperdicio durante el procesamiento, y que en el proceso de su elaboración se consume 50% menos energía que en la elaboración de otros materiales como vidrio y metales.

Como un ejemplo de esto, podemos mencionar a la industria automotriz, que ha incrementado el consumo de materiales plásticos estimando que para 1990 los plásticos representaron aproximadamente el 11% del peso total del vehículo, con el cual se logra una disminución en su peso total de hasta el 35% de lo que sería su peso usando otros materiales, lo cual redundaría en una mayor eficiencia en el consumo de combustible, y consecuentemente una reducción en la emisión de contaminantes.

Una de las situaciones más preocupantes de esto es la corta vida de los productos de plástico utilizados cotidianamente, dentro de las cuales podríamos mencionar a los empaques, con una vida promedio menor a 1 año; muebles y utensilios de hogar con menos de 10 años; electrónica y eléctrica, con una vida menor a 10 años y otros como la construcción con vida máxima de hasta 50 años. Esto significa que, la vida útil de este material revolucionario es demasiado corta, por lo cual su ciclo de utilización es mínimo.

Los desechos plásticos se pueden clasificar desde varios puntos de vista: tipo de productos (películas, envases, y otros), tipo de polímero (PE, PP, PVC y otros), o bien de las fuentes de las que provienen (familia, industria y comercio).

Dentro de los desechos plásticos las variedades más abundantes son los termoplásticos, como el polietileno de baja y alta densidad (PE), polipropileno, poliestireno, policloruro de vinilo (PVC), y otras resinas vinílicas que representan del 90 al 95% de los plásticos empleados en envases y embalajes. El resto lo forman termofijos como el butadieno estireno (ABS), polietilentereftalato (PET), nylon, espumas de poliuretano, acrílicos y resinas fenólicas, epóxicas y de poliéster.

Podemos mencionar que aproximadamente el 70% de los desechos plásticos proviene del consumidor final (familias), el 20% de la industria, y el 10 % del comercio.

El reciclaje se puede definir como: "Cualquier tipo de proceso en el que los materiales se recuperan y se tratan con el fin de obtener algún beneficio o producto adicional" (Miguel Arroyo). Basándonos en esto podemos mencionar cuatro tipos principales de reciclaje:

- *Reciclaje Primario:* donde se aprovechan los residuos de la misma línea de producción y con la misma aplicación a la que estaban inicialmente destinados. Esto significa reutilizar recortes, rebabas, mazarotas, y otros desperdicios comunes en la industria.
 - *Reciclaje Secundario:* es reprocesar el material en productos con menores exigencias en cuanto a sus propiedades.
-

- *Reciclaje para obtención de productos de bajo peso molecular:* significa reconvertir los residuos en compuestos químicos más simples con procesos como la pirólisis, para obtener subproductos como ceras, aceites, monómeros, etc.
- *Reciclaje para la obtención de energía:* es el empleo de los residuos plásticos para el aprovechamiento de su energía calorífica al combustionarlos.

1.2 EL PROBLEMA DEL RECICLAJE

Definitivamente, el gran problema del reciclaje radica en los altos costos de algunas de sus etapas, donde sobresalen la separación de los plásticos según sus tipos y el lavado de estos.

Al analizar los residuos plásticos, nos damos cuenta de que según las estadísticas, en la próxima década aproximadamente el 25% del total de los residuos plásticos que formarán parte de la basura, se podrán recuperar mediante procesos que exigen la separación de estos. Es importante considerar que por el momento, cuando los desechos provienen de residuos urbanos, su separación se vuelve difícil y costosa, dando paso a la incineración y la pirólisis como las técnicas más adecuadas para su reciclaje.

El gran reto que presenta en la actualidad el reciclaje es fundamentalmente tecnológico, ya que existe poca experiencia comercial y baja competitividad debida al bajo precio de los polímeros vírgenes.

Creemos que es de extrema importancia encontrar usos adecuados y muy específicos para los plásticos reciclados, ya que a pesar de que sus propiedades no serán las mismas que en el caso de los plásticos vírgenes, pueden resultar muy útiles y de muy bajo costo.

Actualmente existen mercados muy definidos como el reciclado de botellas de PET, residuos de equipos telefónicos, residuos procedentes de automóviles y de consumidores de embalajes.

En el reciclaje a nivel internacional podemos mencionar algunas de las empresas más importantes:

SORAIN, existente desde hace 14 años en Roma, y se dedica a separar la basura por medio de un principio de lavado y flotación para después mandar los subproductos (orgánicos, metales, vidrio, papel y plásticos) a plantas de reciclaje más pequeñas.

La MITSUBISHI PETROCHEMICALS, que creó la máquina Reverzer, la cual permite manejar bloques de plástico con alto grado de contaminación, para hacer pequeñas bolas de plástico para su reprocesamiento y rollos de cable. Sin embargo, su problema fue que el proceso resultaba incosteable.

RHEOS, cuyo proceso belga permite trabajar con una mezcla de plásticos relativamente limpios para lograr un extruido de baja calidad.

El proceso alemán RECYCLOPLAST, cuyo proceso separa los residuos blandos y duros de plástico para su extrusión y moldeo a altas presiones. Solo funciona adecuadamente con composiciones bien conocidas y controladas.

LANKHORST, su proceso logra perfiles de buenas propiedades químicas por medio de presión en la alimentación. Este proceso se basa en los procesos Reverzer y Klobbie. El prototipo más moderno que maneja este proceso ha sido llamado ET-1, el cual maneja cualquier mezcla de plásticos incluyendo PVC y PET con una contaminación de hasta el 40%.

Analizando lo anteriormente expuesto, y bajo el contexto que actualmente se encuentra nuestro país, podemos mencionar como principales factores en contra del reciclaje en México los siguientes:

- No contamos con la tecnología necesaria para separar los plásticos ni para su reciclaje, surgiendo así una imperiosa necesidad de investigación.
 - Importar tecnología hace que el reciclaje resulte más incosteable de lo que ya es, debido al bajo precio de los polímeros vírgenes.
 - Los residuos plásticos en México se encuentran altamente contaminados debido a la falta de educación en su manejo.
-

CAPÍTULO 2

EL PROCESO DE EXTRUSIÓN

2.1 PRINCIPIOS BÁSICOS

La palabra extrusión tiene su raíz en los vocablos latinos *ex* que significa fuerza, y *trudere* que quiere decir empujar. Podemos entonces definir a la extrusión como el proceso de obtención de perfiles de longitud ilimitada mediante la aplicación de presiones y temperaturas controladas.

El proceso comprende dos aspectos fundamentales: el transporte del material por la máquina extrusora, y el conformado al paso del material a través de la boquilla. Dentro del transporte del material se identifican tres fases principales: la zona de alimentación, la zona de compresión, y la zona de dosificación

La industria del plástico es la que ha desarrollado más ampliamente el proceso de extrusión, sin embargo también se extruyen otros materiales como caucho y metales blandos.

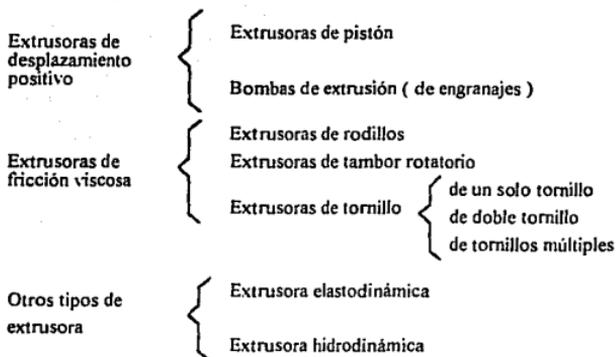
Las máquinas de extrusión se dividen principalmente en tres grupos que son: las de desplazamiento positivo, de fricción viscosa y configuraciones especiales.

Existen principalmente tres métodos de extrusión, que son:

- Extrusión húmeda, que consiste en emplear disolventes o plastificantes líquidos que permiten extruir los materiales en forma de pasta y solución y usan principalmente extrusoras de pistón.
- Extrusión seca, la cual es la más usada en la actualidad, valiéndose del calor y el trabajo mecánico para plastificar o ablandar el material sin disolventes. Este método se explicará con mayor detalle más adelante, puesto que es en base al cual estaremos trabajando.
- Extrusión de hilaturas, que consiste en pasar el polímero fundido a través de finos orificios denominados *hileras*. Este proceso es por medio del cual se obtienen las fibras de rayón, acetatos, fibras de nylon, polietileno y muchos otros materiales.

2.2 TIPOS DE EXTRUSORAS

Podemos dividir a las máquinas de extrusión como sigue:



Es importante hacer notar que dentro de las extrusoras de desplazamiento positivo también podemos considerar a las de doble tornillo acoplado o las de tornillos múltiples, sin embargo, por razones didácticas, se clasifican junto con las extrusoras de tornillo simple.

2.2.1 Extrusoras de Desplazamiento Positivo

El principio de funcionamiento de este tipo de extrusoras es a partir del desplazamiento de algún elemento de la propia máquina, con el fin de hacer avanzar el material a través de ésta. En estas extrusoras, la eficacia de transporte del polímero y la presión que éste recibe, no está muy afectado por la reología del polímero utilizado; estos fenómenos toman mayor importancia hasta la zona de la boquilla.

2.2.1.1 Extrusoras de Pistón Sencillo

El principio de funcionamiento de este tipo de extrusoras se puede describir como sigue:

El material es alimentado por una tolva que lo deposita dentro de un cilindro recubierto por un sistema de calefacción, y mediante un pistón accionado por presión hidráulica o mecánica el polímero es arrastrado y obligado a pasar a través de la boquilla.

2.2.1.2 Extrusoras de Pistón Múltiple

Tiene el mismo principio que las extrusoras de pistón sencillo pero con la gran ventaja de convertirlo en un proceso continuo debido al trabajo simultáneo de varios pistones, eliminando la desventaja de una producción discontinua.

2.2.1.3 Bombas de Extrusión

Simplemente son bombas de engranajes a través de las cuales se hace pasar el polímero fundido con el fin de lograr fibras mono filamento.

2.2.2 Extrusoras de Fricción Viscosa.

La transportación del polímero se consigue mediante la fricción de éste contra las paredes metálicas de los elementos de la máquina utilizando las propiedades físicas del propio polímero, lo cual nos ofrece un incremento en la temperatura mediante trabajo mecánico por esfuerzos de cizalla.

2.2.2.1 Extrusoras de Rodillos

Constituidas por dos rodillos con temperatura controlada acoplados dentro de una caja, los cuales obligan a pasar al material a través de una boquilla para lograr la extrusión.

2.2.2.2 Extrusoras de Tambor Rotatorio

Se trata de un tambor o disco rotatorio, el cual tiene alrededor un cuerpo fijo donde se controla la temperatura. Entre el tambor y la carcasa queda una pequeña holgura radial, por donde pasa el polímero hasta llegar a la boquilla.

2.2.2.3 Extrusoras de Tornillo

Son las más utilizadas dentro de la industria por su alta eficiencia y capacidad de producción, existiendo de tornillo cilíndrico o cónico, y de uno, dos o más tornillos. Ya que son estas extrusoras la base de nuestro trabajo de investigación, dedicaremos un capítulo para explicar ampliamente sus características y funcionamiento.

2.2.3 Configuraciones Especiales

Existen extrusoras con principios diferentes a los expuestos anteriormente. A continuación mencionamos algunas:

2.2.3.1 Extrusoras Elastodinámicas

Aprovecha las propiedades visco elásticas de los polímeros fundidos, particularmente el fenómeno conocido como *efecto perpendicular*, que se presenta cuando un polímero es cizallado por un plano móvil y uno estacionario.

El efecto perpendicular consiste en que el líquido es arrastrado hacia el centro, entre el disco giratorio y el recipiente. La fuerza que obliga a subir al disco giratorio venciendo su propio peso, es perpendicular al esfuerzo de cizalla, lo que da nombre a este fenómeno. Si el rotor o disco giratorio no puede subir, el polímero, al buscar una salida

de presión, será extruido por la boquilla que se encuentra en el punto medio del disco fijo.

2.2.3.2 Extrusora Hidrodinámica

En esta extrusora, se aprovechan las propiedades viscosas del polímero, en vez de sus propiedades elásticas. Su principio es sustentado por la ley de Raleigh, la cual explica que cuando tenemos un fluido de alta viscosidad, al someterlo a un esfuerzo de cizalla entre dos planos paralelos donde uno de los planos es móvil y además tiene ciertos escalones o planos inclinados con referencia al plano inmóvil, genera una presión en el fluido, la cual es aprovechada en su punto máximo para lograr la extrusión.

CAPÍTULO 3

LA EXTRUSORA DE TORNILLO

3.1 PRINCIPALES ELEMENTOS DE UNA EXTRUSORA DE TORNILLO

Una máquina extrusora se constituye principalmente de los siguientes elementos:

1. *Tornillo*, cuya función es la de transportar el material;
2. *Cilindro o Cuerpo* de la máquina que envuelve al tornillo, por medio del cual se suministra calor y trabajo de fricción al polímero;
3. *Mecanismo Motor* que da el movimiento de rotación al tornillo;
4. *Tolva de Alimentación* de material en un extremo de la extrusora;
5. *Boquilla o Matriz*, que da forma al perfil y que se encuentra en el extremo opuesto a la tolva.

3.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

En una extrusora de tornillo, el material es alimentado por la tolva y en condiciones de humedad y temperatura controladas, con el fin de que el proceso sea estable. El material es inducido dentro del canal del tornillo y es transportado hasta la zona de compresión, donde recibe calor a través de la camisa, calentamiento por fricción y presión, para lograr llegar a un estado fluidizado de alta viscosidad. Posteriormente pasa a la zona de dosificación, donde el tornillo tiene la función de empujar al polímero con la presión necesaria para que, al pasar a través de la boquilla, obtengamos un perfil homogéneo.

3.3 TEORÍA DE TORNILLOS

Los tornillos de las máquinas de extrusión pueden tener diámetros que oscilan desde 18 mm a 20 cm., siendo los más pequeños para usos de laboratorio y los más grandes para extrusión de perfiles y recubrimiento de cables. Existen además tornillos hasta de 60 cm., para la preparación de compuestos. La relación longitud a diámetro, generalmente representada como L/D , se refiere a la longitud efectiva del tornillo dividida entre su diámetro nominal y varía de acuerdo con el uso que se destina al tornillo. Comúnmente la relación L/D toma valores de 20:1, 24:1 e incluso 30:1.

Los tornillos actuales operan a velocidades de entre 20 y 200 r.p.m., y según su tamaño pueden llegar a proporcionar hasta 1,800 kg./h., de material plastificado, siendo la homogeneidad del extrudado el principal factor que limita la producción.

Habíamos identificado tres zonas a lo largo de un tornillo. Hagamos ahora una descripción de cada una de las zonas en cuanto a su función:

		FUNCIÓN	VELOCIDAD
Zona 1	Alimentación	Transporte de sólidos	v1
Zona 2	Compresión	Fusión o plastificación	v2
Zona 3	Dosificación	Zona de bombeo	v3

Es preciso que el tornillo funcione de la siguiente manera:

$$v1 > v2 > v3$$

de lo contrario el tornillo estaría mal alimentado y su funcionamiento sería *en vacío*.

El estudio de la zona 1 se realiza por medio de teorías de transporte de sólidos. En la zona 3, el estudio es por medio de teorías bien conocidas de dinámica de fluidos. Sin embargo la zona 2 es la más difícil de ser analizada debido a que, en ese momento, el material no es ni completamente líquido, ni completamente sólido, y por esa razón no se puede contar con un modelo matemático eficiente.

La siguiente figura describe el comportamiento del polímero dentro de la zona de plastificación, y en un corte transversal al canal del tornillo.

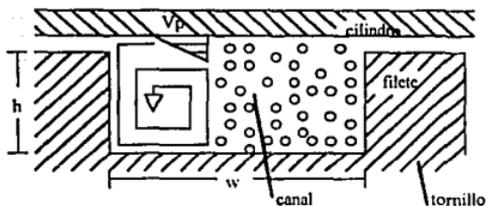


Fig. 3.1 CORTE TRANSVERSAL DEL TORNILLO

El polímero fundido resulta a partir de los esfuerzos de cizalla generados en la parte superior del canal contra la camisa o cilindro, y se va acumulando en la parte posterior, formando un pozo que al crecer, va empujando al material sólido hacia adelante y contra el cilindro en movimiento.

Esta turbulencia es muy conveniente para el procesamiento del material, ya que nos ayuda a que éste se mantenga en constante movimiento dentro del canal por lo cual la transmisión de calor es más homogénea a todo el material evitando su degradación.

3.3.1 Tipos de Flujo a lo largo del canal del tornillo

Podemos considerar fundamentalmente tres tipos de flujo presentes durante el desplazamiento del material dentro del canal del tornillo:

- a. *Flujo de fricción o rozamiento*: es aquél originado por la fricción del material contra el tornillo y cilindro. Este es el principal responsable del movimiento hacia la boquilla de la extrusora.
- b. *Flujo de retroceso*: debido a la presión que se ejerce en la cabeza del tornillo y la boquilla, y que se opone al movimiento del material.

- c. *Flujo de pérdida*: la pérdida de presión originada por las fugas en las tolerancias entre tornillo y camisa, es la principal razón por la cual se presenta este fenómeno. Sin embargo, debido a que la magnitud de este flujo es muy pequeña, se puede considerar despreciable.

Así tenemos que el flujo total queda como sigue:

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{fricción}} - Q_{\text{retroceso}} - Q_{\text{escape}}$$

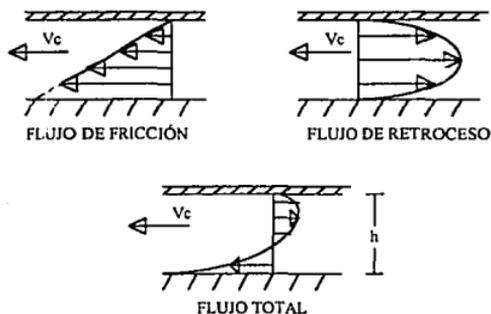


Fig. 3.2 TIPOS DE FLUJO

3.3.2 Análisis de velocidades dentro del canal

Partiendo de la base de que, para efectos de análisis, sería lo mismo considerar al tornillo en movimiento que considerar al cilindro moviéndose en la dirección opuesta, nosotros haremos nuestro análisis asumiendo el segundo caso, es decir, en donde el que se encuentra en movimiento es nuestro cilindro.

Definamos ahora una velocidad V_t , que es la velocidad tangencial con la que se mueve el cilindro sobre nuestro tornillo. Esta velocidad puede ser descompuesta en dos principales direcciones: la primera es la dirección que sigue nuestro canal (V_c), y la segunda es aquella en la que el fluido incide perpendicularmente sobre las paredes de nuestro canal (V_p).

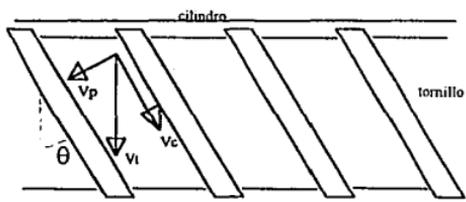


Fig. 3.3 VECTORES DE VELOCIDAD EN UN TORNILLO DE EXTRUSION

$$V_c = V_t D \cdot N \cdot \cos \theta$$

$$V_p = V_t D \cdot N \cdot \sen \theta$$

donde θ es el ángulo de la hélice del tornillo,
 D es el diámetro interno del cilindro,
 N son las r.p.m., con las que gira el cilindro.

Así podemos decir que V_c es la velocidad responsable del movimiento del fluido a lo largo de nuestro canal, mientras que V_p es la responsable del movimiento descrito anteriormente en donde veíamos un corte transversal al canal.

3.4 VARIABLES CRÍTICAS

Son muchas las variables que intervienen en el proceso de extrusión de polímeros, sin embargo podemos definir solamente a algunas como las más críticas, y asumir que, hasta cierto punto, las demás estarán en función de éstas. Sin embargo, con frecuencia encontraremos que las mismas variables críticas están muy relacionadas entre sí.

3.4.1 Velocidad angular del tornillo

Las velocidades con que generalmente opera un tornillo de extrusión son de entre 20 y 200 r.p.m., sin embargo algunas veces llegan a operar a velocidades de hasta 1,000 o 2,000 r.p.m., para casos muy específicos.

Se recomienda tener motores de velocidad variable o transmisiones que permitan operar con cierta flexibilidad.

3.4.2 Ángulo de la hélice del tornillo

Del ángulo de la hélice dependen, tanto el grado de turbulencia del material dentro del canal, como la fuerza de presión a la que el polímero es extruido y por lo tanto la velocidad y cantidad (gasto) en la producción de la máquina.

Del ángulo de la hélice, depende directamente el paso del tornillo. Los valores más recomendables para este ángulo van de 25° a 30°, sin embargo valores tan bajos como 10° son utilizados en algunos casos.

3.4.3 Compresión

La compresión se refiere al decremento efectivo en el volumen de control en los distintos puntos a lo largo del proceso, y está definido por las dimensiones de canal o la

velocidad tangencial en las paredes del cilindro. Esto se puede lograr ya sea, variando la altura (h) de nuestro canal, o reduciendo el ancho del canal (w) mediante la variación en el paso del tornillo.

En la mayoría de los tornillos usados actualmente, podemos ver que la relación de ancho y alto del canal es:

$$w / h > 10$$

3.4.4 Presión de arrastre

La presión de arrastre se refiere a aquella que empuja al polímero hacia la boquilla de la extrusora y está directamente relacionada con los tipos de flujo del material descritos anteriormente, y depende principalmente de la longitud y velocidad del tornillo, de la boquilla y demás obstáculos a la salida de la extrusora, así como del ángulo de la hélice del tornillo. Esta presión generalmente toma valores cercanos a 50kg/cm^2 .

Como ya habíamos mencionado, la relación longitud a diámetro (L/D), comúnmente toma valores de 20:1, 24:1 y hasta 30:1.

Por otro lado podemos ver que cuanto más profundo sea el canal del tornillo (h), la variación en la ΔP será menor, pero la Q será mayor.

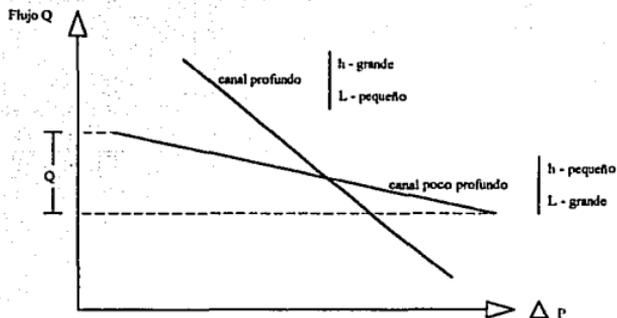


Fig. 3.4 GRÁFICA dP - Q

3.4.5 Calor suministrado

Otra variable de suma importancia es la energía suministrada a través de la camisa a lo largo del tornillo. El calor facilita la plastificación del polímero y puede ser regulado en los diferentes puntos del cilindro.

La temperatura que el sistema de calefacción requiere depende directamente de los puntos de fusión y de degradación de material procesado.

3.4.6 Tiempo de residencia del material

El tiempo de residencia se refiere al tiempo efectivo que una partícula de material tarda en el proceso desde que es alimentada hasta que sale como parte del producto. Para que la producción sea más rentable, se debe procurar reducir esta variable al mínimo; sin embargo, el tiempo debe ser suficiente para lograr un producto homogéneo y de la mejor calidad posible.

Esta variable puede ser regulada de muchas maneras, por ejemplo mediante la variación en el paso del tornillo o regulando la velocidad del tornillo. Por otro lado hay que

tomar en cuenta que al mismo tiempo se podrían estar modificando otras variables críticas.

CAPÍTULO 4

DISEÑO DE UN SIMULADOR DE UNA EXTRUSORA DE TORNILLO

4.1 JUSTIFICACIÓN DEL MODELO, RECONOCIMIENTO DE UNA NECESIDAD

Como se mencionó en el primer capítulo, reconocemos la ventaja de reciclar plástico de diversos tipos (PET, PVC, polietileno, etc.), bajo un mismo proceso y a un mismo tiempo. Al reciclar de esta forma, estaremos evitando costos en los que se incurre al tener la necesidad de separar los desechos plásticos en sus diferentes tipos que después serán aprovecharlos en las aplicaciones tradicionalmente conocidas. Se logrará entonces prescindir de la necesidad de separar dos o más tipos de desechos plásticos, y reciclarlos juntos con el fin de obtener algún producto final para alguna aplicación adecuada a sus características.

Sin embargo, depende de las características moleculares de cada polímero y de su reología el que se logre obtener una mezcla de producto, si bien no homogéneo en algunos casos, probablemente con las características físicas o mecánicas requeridas

para una aplicación específica. La composición molecular de cada polímero por lo general está bien definida, pero sus características dependen, en gran medida, de las condiciones de presión y temperatura a las que sea procesado, y por lo tanto se vuelve muy difícil el determinar teóricamente la calidad y características del producto a obtener.

Ahora bien, estas condiciones de presión y temperatura quedan determinadas por las que hemos denominado *variables críticas del proceso*, y éstas últimas son controladas mediante las características de diseño de los elementos de la máquina extrusora, principalmente el tornillo.

Sin embargo, a nivel laboratorio, no sería práctico ni costeable el maquinado de diferentes tornillos, cada uno con características distintas, con el fin de realizar las pruebas necesarias para determinar estas condiciones críticas del proceso. Es por eso que se pensó en el diseño de una máquina que, sin ser difícil de fabricar, tuviera la versatilidad necesaria para poder variar las condiciones críticas del proceso a un costo significativamente bajo.

La función específica de este diseño será la obtención de probetas de diferentes combinaciones o mezclas de polímeros, procesados bajo distintas condiciones de temperatura, velocidad, presión, ángulo de hélice, y dimensiones de canal. Estas probetas podrán después ser sometidas a distintas pruebas de tensión, torsión, dureza, corrosión, y demás propiedades, para entonces determinar las aplicaciones que se le podría dar a determinada mezcla de desechos reciclados.

Al haber determinado la mezcla adecuada de polímeros, y las condiciones a las que deberá ser reciclado, se podrá proceder a la producción a nivel industrial en una extrusora de tornillo.

4.2 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS Y REQUISITOS DEL DISEÑO

Después de haber hecho una breve descripción del proceso de extrusión de polímeros, podemos sintetizar algunas características y requisitos principales de nuestro diseño. La importancia de definir los puntos que a continuación se enlistan, radica en que a partir de ellos se logrará la optimización de nuestro modelo.

Podemos mencionar como características y requisitos de primer orden, los relacionados directamente con el proceso de extrusión, y son los siguientes:

1. Versatilidad en las condiciones de **temperatura** para cada una de las pruebas a realizar, y en cada uno de los distintos puntos del proceso.
2. Fácil variación en la **velocidad del tornillo o elemento análogo** propuesto.
3. Versatilidad en el **ángulo de hélice del tornillo o elemento análogo** propuesto.
4. Versatilidad en las **dimensiones del canal**.

Por otro lado, mencionamos otros requisitos y características que, si bien no están directamente relacionadas con el proceso de extrusión, los consideramos de suma importancia para la viabilidad de cualquier diseño a proponer:

5. **Bajo costo de los elementos y materiales utilizados.**
 6. **Facilidad de maquinado**, la cual repercute directamente en el costo de mano de obra.
 7. **Precisión dimensional.**
-

8. Tamaño razonablemente práctico para su operación en un laboratorio.
9. Fuentes de energía económicas y a las cuales se tenga acceso fácilmente.

4.3 DISEÑO PRELIMINAR DEL SIMULADOR

En primer lugar encontramos que desarrollar pruebas para diferentes tipos y mezclas de plásticos, en diferentes condiciones de temperatura, velocidad, presión y demás variables, resultaba poco práctico y muy costoso si pretendemos hacerlas en una extrusora industrial. Esto se muestra evidente cuando consideramos la poca versatilidad que estas máquinas pueden tener para este propósito. Por ejemplo, una variación en el ángulo de hélice del tornillo implicaría desmontar un tornillo, montar el otro, y ajustarlo para iniciar su operación. Además, maquinar un tornillo para cada ángulo de hélice con el que se desee experimentar resultaría sumamente costoso.

Nuestro diseño debería entonces buscar la versatilidad de todas estas condiciones de operación que en el capítulo anterior hemos definido como variables críticas.

4.3.1 Diseño del canal

El primer paso consistía en tratar de "desenrollar" el canal de un tornillo, y colocarlo en una superficie plana. Sin embargo, teníamos que lograr transmitir al fluido en proceso, la energía por fricción y por resistencias eléctricas que se le transmite por medio de la camisa del tornillo en una extrusora. Para lograr esta fricción constante y siempre en el mismo sentido, se pensó en un plato giratorio, el cual podía ser calentado para que también cumpliera la función de suministrar calor.

El problema ahora radicaba en cómo colocar el canal de forma que el movimiento del plato giratorio hiciera incidir al fluido sobre sus paredes con un ángulo θ constante (ángulo de hélice). Tomando en cuenta que el movimiento angular de un plato giratorio hace que la dirección del vector tangencial cambie para cada vector radial que trazamos, podemos decir que la dirección de este vector tangencial es función del ángulo del vector radial. Si hacemos girar al plato en sentido horario, los vectores se pueden definir como sigue:

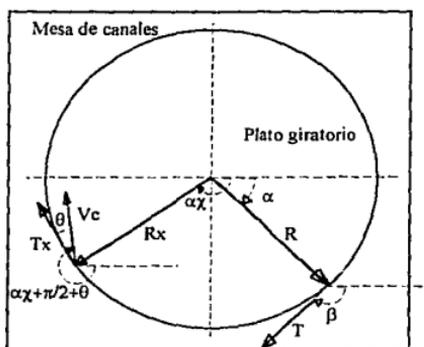


Fig. 4.1 VECTORES DE VELOCIDAD EN EL BORDE DEL PLATO

Tenemos un vector con origen en el centro del plato, y que por lo tanto siempre tendrá una orientación radial. Este vector, de magnitud R y dirección α , queda definido de la siguiente manera:

Vector radial:
$$\mathbf{R} = |R| \cdot \hat{\alpha}$$

Así mismo, definimos un vector tangencial al plato, cuyo origen se ubicará siempre a continuación del vector radial. Este vector queda como sigue:

Vector tangencial: $T = |T| \cdot L\beta$

donde, como se puede observar claramente en la figura: $\beta = \alpha + \pi/2$

Sustituyendo el valor de β , tenemos al vector tangencial en función del ángulo α :

$$T = |T| \cdot L(\alpha + \pi/2)$$

Este vector tangencial resulta de suma importancia para nuestro modelo, debido a que es este el que dará la dirección de la velocidad transmitida por fricción expresada como V_t en la teoría de tornillos del capítulo anterior (sección 3.3.2).

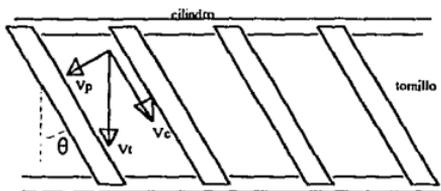


Fig. 4.2 VECTORES DE VELOCIDAD EN UN TORNILLO

En función de este vector, debemos definir el ángulo de inclinación que tendrán las paredes de nuestro canal. Volviendo a hacer la analogía con el tornillo de la sección 3.3.2, vemos que la dirección de la pared de nuestro canal (V_c) debe estar desplazada un ángulo θ (ángulo de hélice) con respecto a nuestro vector tangencial. Resulta entonces sencillo identificar en la figura que el vector V_c está dado por la siguiente ecuación:

$$V_c = |V_c| \cdot L(\alpha_x + \pi/2 + \theta)$$

donde α_x tomará un valor diferente para cada punto de la trayectoria del canal.

Auxiliados por la computadora, haciendo uso del paquete AutoCad, discretizamos la trayectoria que debía seguir nuestro canal. Si definimos a R_x como los valores que

nuestro vector R va tomando desde el radio externo del plato hasta cero, en intervalos de 5mm, y lo ubicamos direccionándolo en el final del segmento anterior trazado por el vector V_c , obtenemos el valor de α , que a su vez nos define el siguiente segmento de V_c . El vector V_c tiene como origen cualquier punto del perímetro del plato para su primer segmento, y el final del segmento anterior para el resto de los segmentos; por el otro lado, este vector está limitado por el punto en el que cruza la siguiente circunferencia de radio R_x de nuestra discretización. De esta forma, tal como se muestra en la siguiente figura, vamos obteniendo un canal que describe una espiral cuyo centro coincide con el eje de rotación del plato.

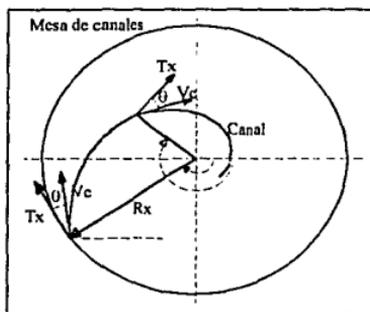


Fig. 4.3 VECTORES DE VELOCIDAD A LO LARGO DEL CANAL

4.3.2 La velocidad a lo largo del canal

Como se mencionó anteriormente, el ángulo de hélice del tornillo representa una variable crítica durante el proceso de extrusión, y determina en gran medida las características del flujo en proceso. Es por eso que se necesita hacer incidir al flujo en la paredes del canal con el mismo ángulo con el que lo hace en el canal del tornillo.

Hagamos ahora la analogía de velocidades, y recordemos que habíamos definido a V_t como la velocidad que la superficie móvil (la camisa del tornillo) transmite directamente al fluido; esta velocidad es, en nuestro caso, la velocidad tangencial del plato, ya que es éste el que transmite la fricción requerida para el desplazamiento del fluido. Por otro lado vemos que, usando la misma nomenclatura para las componentes de velocidad V_c (componente en la dirección del canal) y V_p (componente perpendicular a las paredes del canal) en un tornillo, nuestro modelo resulta como sigue:

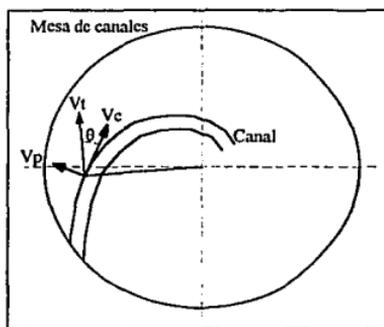


Fig. 4.4 VECTORES DE VELOCIDAD EN UN PUNTO DEL CANAL

Se observa claramente que la velocidad que nuestro plato giratorio le transmite al fluido representada por el vector tangencial, es análoga a la velocidad tangencial que se le transmite en un tornillo al friccionar con la camisa, y las componentes V_c y V_p resultan ser también iguales.

Ahora bien, el valor de esta velocidad no será el mismo a lo largo del canal. A diferencia de un tornillo, nuestro plato da a nuestro fluido mayor velocidad mientras el

valor de R_x sea mayor. Esto resulta favorable pues de esta forma logramos una mejor compresión del material al final de su recorrido por el canal. Sin embargo se debe lograr que el valor promedio de esta velocidad sea el mismo que el de un tornillo para poder simular el proceso con la mayor fidelidad posible.

En el capítulo 3 mencionábamos que la velocidad a la que opera un tornillo de extrusión, varía entre las 20 y 200 r.p.m. Además, a partir de las dimensiones establecidas para el plato giratorio (50cm. de diámetro), podemos definir que la alimentación del canal estará ubicado en $R_{x1} = .25$ m; y tomando en cuenta el espacio necesario para colocar el sistema de transmisión que dará movimiento al plato, definimos la ubicación del orificio de descarga del canal en $R_{x2} = 0.078$ m., (la determinación de estas distancias se hizo con base en el diseño desarrollado en un sistema CAD).

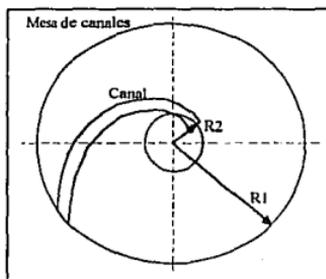


Fig. 4.5 RADIOS INICIAL Y FINAL DE LA TRAYECTORIA DEL CANAL.

Podemos ahora obtener la velocidad a la que el plato debe girar de la siguiente forma:

1. En un tornillo con camisa de 3" de diámetro interno y 20 r.p.m.:

$V_t = \pi \cdot D \cdot N$ donde: D es el diámetro interno de la camisa y
N son las r.p.m.'s a las que gira el tornillo.

así, $V_t = \pi \cdot (3 \cdot 0.0254) \cdot 20 = 4.78778 \text{ m/min.}$

ahora bien, en nuestro modelo:

$\int V_t dR_x = (2 \cdot \pi \cdot N) \int R_x \cdot dR_x$ definida desde R_{x1} hasta R_{x2}

así $\int V_t dR_x = (\pi \cdot N) \cdot (R_{x2}^2 - R_{x1}^2)$

el valor promedio sería:

$V_{t.prom} = (\int V_t dR_x) / (R_{x2} - R_{x1}) = (\pi \cdot N) \cdot (R_{x2} + R_{x1})$

despejando N obtenemos: $N = V_{t.prom} / (\pi \cdot (R_{x2} + R_{x1}))$

$$N = 4.78778 / (\pi \cdot (0.078 + 0.25)) = 4.6463 \text{ r.p.m.}$$

2. En un tornillo con camisa de 3" de diámetro interno y 200 r.p.m.:

$V_t = \pi \cdot (3 \cdot 0.0254) \cdot 200 = 47.8778 \text{ m/min}$

en nuestro modelo:

$N = V_{t.prom} / (\pi \cdot (R_{x2} + R_{x1}))$

$$N = 47.8778 / (\pi \cdot (0.078 + 0.25)) = 46.463 \text{ r.p.m.}$$

Después de obtener estos resultados, podemos definir que requerimos manejar un rango de entre aproximadamente 4 y 50 r.p.m., en nuestro modelo.

4.3.3 Dimensiones del canal

Como se mencionó anteriormente, existen algunas relaciones básicas en el diseño de un tornillo de extrusión. A continuación las enlistamos y proponemos, a partir de ellas, las dimensiones del canal de nuestro simulador.

D diámetro del tornillo

w ancho del canal

θ	ángulo de hélice	L_c	longitud del canal
h	altura del canal	L_t	longitud del tornillo

Los valores de las siguientes relaciones han sido establecidos a partir de las dimensiones más comunes en tornillos de extrusión, y son considerados valores estándar en la "teoría de tornillos".

$$\frac{L_t}{D} \approx 20; \quad L_c = L_c \cdot \text{sen}(\theta); \quad \frac{D}{h} \approx 10; \quad \frac{w}{h} \approx 10$$

Si partimos de que la longitud de nuestro canal sea aproximadamente 0.8m, y suponemos un tornillo cuyo ángulo de hélice sea de 25°, tendremos un tornillo de longitud:

$$L_c = 0.8 \cdot \text{sen}(25^\circ) = 0.33809m,$$

por lo tanto, el diámetro del tornillo será: $D = \frac{L_t}{20} = \frac{0.33809}{20} = 0.0169m,$

y tendremos entonces que $h = \frac{0.0169}{10} = 0.00169m = 1.69mm.$

también $w = 10 \cdot h = 16.9mm$

Vemos entonces que, de acuerdo a las relaciones anteriores y para un canal de longitud 0.8m., la altura de dicho canal deberá ser de 1.69 mm., y el ancho del canal será de aproximadamente 17mm.

En nuestro caso, la velocidad tangencial que el plato giratorio transmite al fluido a lo largo del canal no es constante, sino que es mayor a la alimentación del canal, y menor a la salida (sección 4.3.2). Esto trae como consecuencia que el polímero esté siendo comprimido dentro del canal, pues es mayor la fuerza que lo arrastra al principio de su recorrido. De esta forma se cumple la siguiente ecuación descrita en la sección 3.3:

$$v_1 > v_2 > v_3$$

donde v_1 es la velocidad en la zona de alimentación, v_2 la velocidad en la zona de compresión, y v_3 la velocidad en la zona de dosificación o descarga del material fundido.

Para un primer prototipo de nuestro simulador, pensamos que no será necesario manejar dimensiones tan pequeñas (siempre y cuando se guarden las principales relaciones antes mencionadas) para poder obtener algún resultado que pruebe la funcionalidad del mismo. De esta forma el maquinado de este primer prototipo puede ser mucho más sencillo, sin afectar por ello los resultados esperados. Es por esto que pensamos en fijar la altura del canal en $1/8''$ por ser una medida estándar no muy lejana a la previamente calculada. De esta forma, guardando las relaciones básicas, tenemos que $h=3mm$ y el ancho del canal (w) tendrá que ser de aproximadamente $30 mm$.

4.3.4 Suministro de calor

Sugerimos el uso de resistencias eléctricas, ya sea planas o tubulares, para el calentamiento de la cara superior del plato. Este es un método mediante el cual se puede lograr una gran precisión en la regulación de temperatura, además de ser más práctico y seguro. El control de la temperatura se haría por medio de un sencillo termostato con capacidad de alrededor de $300^{\circ}C$.

Sin embargo, por resultar mucho más económico, el suministro de calor se hará por medio de tres quemadores de gas circulares y concéntricos que inciden directamente sobre la parte superior del plato giratorio. Al igual que en un tornillo de extrusión se varía la temperatura a lo largo de la camisa para hacer más eficiente el proceso, en nuestro modelo podemos regular independientemente cada uno de los tres quemadores. Esto, con el fin de poder obtener temperaturas distintas en cada zona del proceso.

4.3.5 Sistema de transmisión

Para hacer más práctico y económico el uso del simulador, consideramos muy ventajoso poder acoplar el sistema de transmisión a cualquier máquina herramienta a la cual pudiéramos tener fácil acceso dentro del mismo laboratorio y que, por supuesto, nos ofreciera la potencia requerida (un torno, una fresadora, un taladro de banco, etc.). Sin embargo, generalmente la velocidad menor que nos ofrecen estas máquinas es de 60 r.p.m., por lo que se hacía necesario el uso de un reductor de velocidad. Por otro lado, la transmisión del movimiento del torno al simulador tendría que hacerse mediante algún sistema de acoplamiento que no resultara muy costoso o complicado. Estos problemas se resolverían con un sistema de transmisión por cadena y catarinas dentro del mismo simulador, el cual haría las veces de reductor; y con un chicote de transmisión de potencia, cuya flexibilidad haría sencillo el acoplamiento de la máquina herramienta al simulador.

4.4 DISEÑO DETALLADO

4.4.1 Selección de elementos, materiales, y sus propiedades

De acuerdo al diseño propuesto (ver planos al final de este capítulo), a continuación se presenta una lista con las principales piezas requeridas:

- a) **Plato o disco giratorio:** Cuya función será la de transmitir la energía tanto por convección como por fricción, al polímero.
 - b) **Cubo para el plato:** Se encuentra soldado al plato, y lo fija a la flecha de transmisión por medio de un cufero.
-

- c) **Mesa de canales:** Compuesta por una placa cuadrada de 590 x 590 mm., con un orificio al centro de 96 mm de diámetro por el cual atravesará la flecha de transmisión, las paredes de los canales de 3 mm., de alto, y las tolvas de alimentación.
 - d) **Flecha:** Es el eje de transmisión del movimiento angular al plato del simulador.
 - e) **Anillo nivelador:** Nos permite ajustar la distancia entre el plato giratorio y la mesa de canales para lograr la holgura requerida por el proceso.
 - f) **Brida del anillo nivelador:** En ella descansa el anillo y permite que el diámetro de este sea mayor, esto con el fin de lograr una mayor estabilidad en el plato giratorio. Esta base descansa sobre un ensanchamiento de la flecha.
 - g) **Baleros axiales:** Su función es permitir el libre movimiento rotacional a la flecha.
 - h) **Camisa de la flecha:** En ella quedará sujeta la flecha por medio de rodamientos. Por lo tanto hará también la función de caja de baleros.
 - i) **Brida:** De 200 mm de diámetro exterior, 73 mm., de diámetro interior, y cuya función es la de sujetar el sistema de transmisión a la mesa de canales por medio de cuatro tornillos de sujeción de 1/4".
 - j) **Base estructural:** Soporta a todas las piezas del simulador incluyendo al sistema de transmisión, y le da rigidez.
 - k) **Catrinas y cadena de transmisión:** Tienen una doble función, en primer lugar transmiten el movimiento al la flecha del plato giratorio, y en segundo lugar nos dan la reducción adecuada para poder operar en condiciones adecuadas con el uso de cualquier máquina herramienta que nos ofrezca 60 r.p.m., y la potencia requerida.
 - l) **Chicote de transmisión:** Su uso es de gran utilidad. pues nos permite auxiliarnos de una máquina herramienta para el funcionamiento del simulador, sin la necesidad de
-

adquirir un motor especial con el problema adicional que representaría sujetarlo en la dirección adecuada para acoplarlo al sistema de transmisión.

- m) **Quemador de gas:** Encontramos en el quemador de gas, una manera sencilla y económica de proporcionarle al simulador la energía calorífica requerida a través del plato giratorio.

Para la fabricación de las principales piezas que tendrán que ser maquinadas, se seleccionó el acero al bajo carbón (1020), por ser un acero cuya facilidad de maquinado es buena, por ser económico, y por encontrarse comercialmente con facilidad. A continuación se enuncian las principales propiedades de este material:

Resistencia a la tensión (S_{ut}) = 448.2 MPa

Resistencia a la cedencia (S_y) = 330.9 MPa

Dureza Brincl = 143 b

Dureza RC = 62

Módulo de Young = 207 GPa

Densidad (ρ) = 7,700 kg/m³

El coeficiente de fricción para los materiales a emplear son como sigue:

MATERIAL	ESTÁTICO		DINÁMICO	
	SECO	LUBRICADO	SECO	LUBRICADO
acero - acero	0.78	0.11	0.42	0.029
acero - plástico laminado	-	-	0.35	0.05

Tabla 4.1 COEFICIENTES DE FRICCIÓN

4.4.2 Definición de piezas fundamentales para el diseño

Después de analizar el modelo propuesto nos damos cuenta de que, cuanto más grande sea el plato giratorio, más largo resultará nuestro canal y de esta forma lograremos una simulación más fiel. Sin embargo, las dimensiones de nuestro plato están limitadas por la facilidad de maquinado que debemos procurar, y por el tamaño y peso finales de nuestro simulador, cuyos valores no pueden ser muy grandes pues podría complicar el manejo y uso de la máquina.

El espesor del plato debe de ser tal, que permita de manera rápida y eficiente la transferencia de calor. Sin embargo, no podemos permitir que el calor suministrado a través de él, produzca deformaciones considerables.

Otro elemento de primordial importancia, es la mesa de canales. Esta debe ser espesor aún mayor, pues será sometida a altas temperaturas y muy concentradas en el momento de soldar el canal, e igual que en el caso del elemento anterior, cualquier deformación le puede quitar precisión a las dimensiones finales del simulador.

A partir de estos criterios, se determinan las dimensiones del plato y se calculan las masas correspondientes:

Plato o disco giratorio:

Diámetro = 0.5 m

Espesor = 1/2"

$$Vol = \frac{1}{4} \pi \cdot D^2 \cdot e = \frac{1}{4} \pi \cdot 0.5^2 \cdot 0.0127 = 0.00249 \text{ m}^3$$

$$m = Vol \cdot \rho = 0.0049 \cdot 7700 = 19.2 \text{ kg}$$

y el momento de inercia para esta masa sería:

$$I = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2 = \frac{1}{2} \cdot 19.2 \cdot 0.25^2 = 0.6 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

4.4.3 Análisis cinemático

Sabemos que nuestro simulador trabajará a aproximadamente 50 r.p.m., como máximo, lo que se traduce en $\omega = 5.236 \text{ rad/s}$. Y si $\omega = \omega_0 + \alpha t$, y $\omega_0 = 0$:

$$\alpha = \frac{\omega}{t} = \frac{5.236}{1} = 5.236 \text{ rad/s}^2 \quad \text{considerando que la máquina acelera en 1 segundo.}$$

La transmisión se hace mediante una cadena y sus respectivas ruedas dentadas. Las razones por las cuales se escogieron estos elementos son principalmente dos: en primer lugar la versatilidad que pueden darnos al poder escoger distintas máquinas herramientas para darle movimiento al simulador, pues tenemos un total de 10 relaciones de velocidad diferentes; y en segundo lugar, encontramos que este sistema de transmisión es fácil de adaptar, y eficiente.

Para obtener los radios de paso para las ruedas dentadas, usamos la siguiente fórmula:

$$r = \frac{N_f \cdot P}{2 \cdot \pi} \quad \text{en donde } N_f = \text{número de dientes de la rueda}$$

$$P = \text{paso de los dientes} = 13 \text{ mm}$$

De esta forma, obtenemos los siguientes resultados:

Estrella grande		Estrella chica	
N_f	radio en mm	N_f	radio en mm
52	107.59	28	57.93
42	86.89	24	49.66
		20	41.38
		17	35.17
		14	28.97

Tabla 4.2 RADIOS DE LAS CATARINAS

Suponemos ahora que deseamos obtener una velocidad angular máxima en nuestro plato de 50 r.p.m., y hacemos uso de la relación de radios más extrema, es decir, 52 dientes en nuestra estrella grande, y 14 en la pequeña. De esta forma:

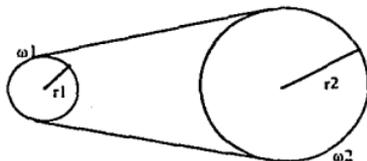


Fig. 4.6 RELACIÓN DE TRANSMISIÓN

$$\frac{r1}{r2} = \frac{\omega2}{\omega1}$$

$$\omega2 = \frac{50 \cdot (107.59)}{28.966} = 185.7177 \text{rpm} = 19.45 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

Esta sería la velocidad requerida en nuestra máquina herramienta motriz, para obtener una velocidad de 50 r.p.m., en nuestro simulador.

4.4.4 Análisis de esfuerzos en condiciones de operación

Ahora bien, la fuerza de inercia será:

$$F_i = \frac{I\alpha}{r} = \frac{0.6 \cdot 5.236}{0.25} = 12.567 \text{N}$$

La fuerza de fricción queda como sigue, si consideramos como coeficiente de fricción estático (μ) el de acero-acero, por ser el valor más alto que pudiéramos tener. Así:

$$F_f = \mu \cdot N \quad \text{donde } \mu = 0.78$$

y N es la fuerza normal al plato

$$N_p = m_{\text{plato}} \cdot g = (19.2) \cdot (9.81) = 188.352 \text{N}$$

Sin embargo, considerando que el plato estará sufriendo una presión por parte del polímero, consideramos que esta fuerza normal puede llegar a ser hasta 4 veces el peso del plato. De esta forma tenemos que:

$$N = 4 \cdot N_p = 753.4 N$$

$$F_f = \mu \cdot N = 0.78 \cdot (753.4) = 587.64 N$$

Así tenemos que la fuerza en la flecha será:

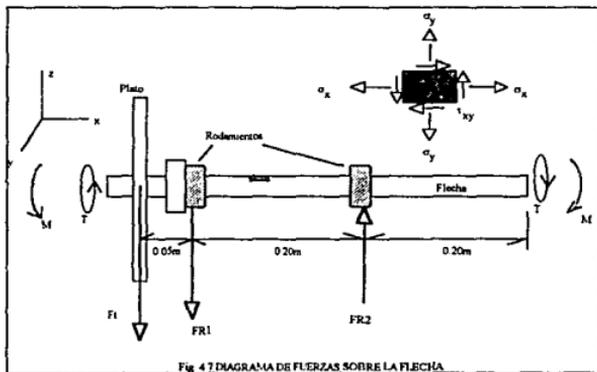
$$F_t = F_i + F_f = 12.567 + 587.64 = 600.207 N$$

y el torque generado sobre la flecha por esta fuerza (ubicada en el perímetro del plato, $r=0.25m.$) es:

$$T = F_t \cdot r = 600.207 \cdot (0.25) = 150.051 Nm$$

$$y \quad Pot = T \cdot \omega = 150.051 \cdot 5.236 = 785.67 Watts \approx 1HP$$

Ahora bien, considerando el tamaño más adecuado del simulador para soportar el plato y que al mismo tiempo sea práctico, podemos partir del diseño de una flecha con las siguientes dimensiones, y que estará apoyada en un par de rodamientos montados sobre la camisa:



Haciendo la suma de momentos con respecto a la fuerza F_{R1} , obtenemos el siguiente resultado:

$$F_{R2} \cdot (0.2) - F_1 \cdot (0.05) = 0$$

$$F_{R2} + F_1 = F_{R1}$$

y resolviendo el sistema de ecuaciones llegamos a que: $F_{R1} = 750.25 \text{ N}$

$$F_{R2} = 150.051 \text{ N}$$

Tomando como punto de apoyo el rodamiento correspondiente a la fuerza F_{R1} , el momento flexionante será: $M = F_1 \cdot (0.05) = 600.207 \cdot (0.05) = 30.01 \text{ Nm}$

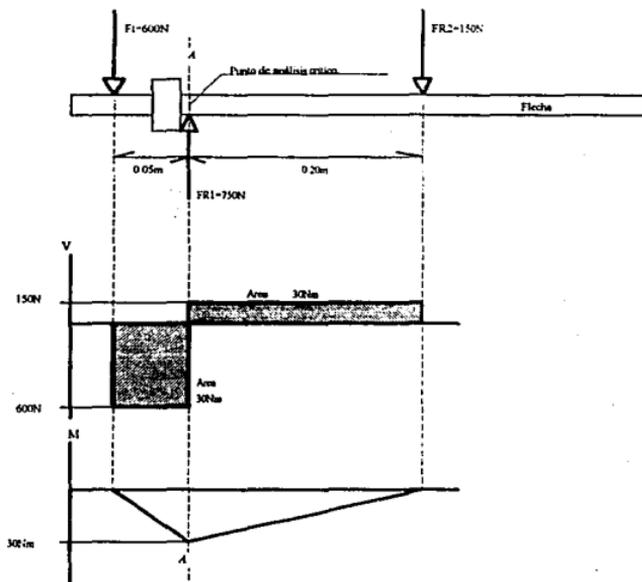


Fig. 4.8 DIAGRAMAS DE FUERZAS Y MOMENTOS

Aplicando la teoría de esfuerzo cortante máximo en el punto de análisis crítico (eje de corte A), obtenemos lo siguiente:

$$S_y = 330.9 \text{ MPa}$$

$$\tau_{\max} = \frac{S_y}{2 \cdot (F.S.)} = \frac{330.9 E6}{2 \cdot (1)} = 165.45 \text{ MPa}$$

si el momento polar de inercia se define como $J = \frac{\pi \cdot D^4}{32}$

$$\tau_{xy} = \frac{T \cdot D}{2 \cdot J} = \frac{150.051 \cdot (16)}{\pi \cdot D^3} = \frac{764.2}{D^3}$$

$$\sigma_x = \frac{32 \cdot M}{\pi \cdot D^3} = \frac{305.67}{D^3}; \quad \sigma_y = 0$$

$$\tau_{\max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} = \frac{1}{D^3} \sqrt{\left(\frac{305.67}{2}\right)^2 + 764.2^2} = \frac{779.337}{D^3}$$

$$\sigma_1 = \frac{932.16}{D^3}; \quad \sigma_2 = \frac{-626.49}{D^3}$$

$$\tau_{\max} = \frac{779.337}{D^3} = 165.45 E6 \quad \text{finalmente} \quad D = 0.01676 \text{ m}$$

4.4.5 Análisis de esfuerzos en condiciones críticas

Hasta ahora hemos visto que con un motor de 1 H.P., y en condiciones normales de operación, bastará una flecha de 16.7 mm., de diámetro para soportar los esfuerzos máximos a los que podríamos someter a nuestro simulador.

Sin embargo, es importante tomar en cuenta que en un laboratorio podemos contar con máquinas herramientas con potencias que van desde el 1/2 H.P. hasta los 5 1/2 H.P. Es por esto que consideramos importante calcular los esfuerzos a los que podríamos someter a la flecha, en el caso extremo de que, con un motor de 5 1/2 H.P. (4.10135 kW), la flecha quedará atorada.

A 50 r.p.m., el torque que sufrirá la flecha será:

$$T_2 = \frac{P}{\omega_2} = \frac{4,101.35}{5.236} = 783.3 Nm$$

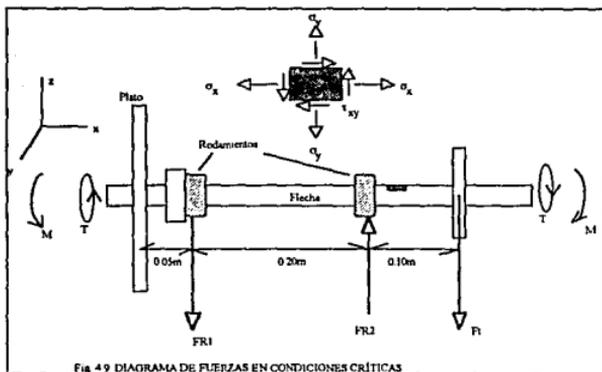
De manera análoga, el chicote tendrá un torque T_1 :

$$T_1 = \frac{P}{\omega_1} = \frac{4,101.35}{19.45} = 210.88 Nm$$

y en este caso, la fuerza con la que jala la cadena será:

$$T = F \cdot r$$

$$F_t = \frac{T_1}{r_1} = \frac{210.88}{0.02897} = 7,279.25 N$$



Haciendo la suma de momentos con respecto a la fuerza FR_2 , obtenemos el siguiente

resultado:

$$F_t \cdot (0.1) + F_{R1} \cdot (0.2) = 0$$

$$FR_1 + F_t = FR_2$$

y resolviendo el sistema de ecuaciones: $FR_1 = 3,639.63 N$ $FR_2 = 10,918.53 N$

el momento flexionante será: $M = F_t \cdot (0.1) = 7,278.9 \cdot (0.1) = 727.89 Nm$

$S_y = 330.9 MPa$, y factor de seguridad unitario.

$$\tau_{\max} = \frac{S_y}{2 \cdot (F.S.)} = \frac{330.9E6}{2 \cdot (1)} = 165.45MPa$$

si el momento polar de inercia se define como $J = \frac{\pi \cdot D^4}{32}$

$$r_{xy} = \frac{T \cdot D}{2 \cdot J} = \frac{783.14 \cdot (16)}{\pi \cdot D^3} = \frac{3988.5}{D^3}$$

$$\sigma_x = \frac{32 \cdot M}{\pi \cdot D^3} = \frac{7414.23}{D^3}; \quad \sigma_y = 0$$

$$\tau_{\max} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x + \sigma_y}{2}\right)^2 + r_{xy}^2} = \frac{1}{D^3} \sqrt{\left(\frac{7414.23}{2}\right)^2 + 3988.5^2} = \frac{5445.2579}{D^3}$$

$$\sigma_1 = \frac{9152.37}{D^3}; \quad \sigma_2 = \frac{-1738.14}{D^3}$$

$$\tau_{\max} = \frac{5445.256}{D^3} = 165.45E6 \quad \text{finalmente} \quad D = 0.03205m$$

Per lo tanto, nuestra flecha podrá ser de 32mm., o el valor superior más cercano que encontremos para los rodamientos a emplear. Tentativamente podemos seleccionar el rodamiento de rodillos cónicos SKF 30207, cuyas dimensiones y características parecen ser adecuadas; sin embargo, posteriormente se harán los cálculos para confirmar su empleo.

A partir de las dimensiones obtenidas para la flecha y rodamientos, y de las dimensiones del plato giratorio, la mesa de canales, y los mismos canales, se procede al diseño de los demás elementos del simulador. Estas dimensiones quedan detalladas en los planos que a continuación se presentan.

4.4.6 Masas y cálculo de momentos de inercia

A continuación, y después de haber detallado las dimensiones de cada una de las piezas de la máquina, procedemos a calcular las masas y momentos de inercia de cada una de ellas, siguiendo el mismo procedimiento que en el caso del plato giratorio detallado anteriormente.

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos:

Pieza o elemento	Volumen (E-3 m ³)	Masa (kg)	Momento de inercia (kg·m ²)
Mesa	6.49	50	estática
Canales	0.0577	0.444	estáticos
total mesa y canales	6.5477	50.444	
Plato*	2.3446	18.053	0.5641
Cubo	0.052	0.4	0.125E-3
Flecha	0.3855	2.968	0.45E-3
Brida del anillo nivelador	0.02289	0.1763	0.1555E-3
Anillo nivelador	0.02938	0.226	0.189E-3
Tuercas (2)	0.06233	0.48	-
total sobre el rodamiento	2.86732	22.3033	
Camisa de la flecha	0.80525	6.2	estática
Brida	0.4352	3.3548	estática
Base estructural	1.784	13.7435	estática

* la diferencia con el cálculo anterior se debe al barrenado del plato, el cual no había sido considerado.

Tabla 4.3 RELACIÓN DE PIEZAS

4.4.7 Selección de rodamientos

Como siguiente paso, debemos de seleccionar los rodamientos adecuados para las condiciones de trabajo de nuestra máquina. Podemos ver de antemano que, debido a que las revoluciones a las que vamos a trabajar son sumamente bajas, las características requeridas en nuestros rodamientos se podrán cumplir fácilmente; sin embargo será conveniente revisar estos datos.

Analizando el uso que les daremos, podemos decir que requerimos rodamientos para máquinas en servicio intermitente, cuya duración es de $L_{10} = 8,000$ a $12,000$ horas.

Ahora bien, llamemos L a la vida nominal expresada en revoluciones:

$$L = L_H \cdot (\text{R.P.M.}) \cdot 60 = 12000 \cdot (50) \cdot 60 = 36E6 \text{ rev.}$$

$$L = 10^6 \cdot \left(\frac{C}{P}\right)^b \quad \text{donde} \quad b = 10/3 \text{ para rodamientos de rodillos}$$

C = valor nominal de carga máxima

P = carga a la que se va a someter

En condiciones normales de operación, la fuerza radial a la que van a ser sometidos es:

$$F_t = F_i + F_f = 12.567 + 146.91 = 159.48 \text{ N}$$

y su distribución en cada uno de ellos es: $F_{R1} = 199.35 \text{ N}$ $F_{R2} = 39.87 \text{ N}$

y nuestra fuerza radial será el mayor de estos valores, es decir: $F_r = 199.35 \text{ N}$

Analicemos ahora la influencia de la carga axial sobre los rodamientos. Vemos que la carga axial puede calcularse sumando el peso de todas las piezas que van a ser soportadas por el rodamiento (ver tabla anterior). Así:

$$F_a = m \cdot g = 22.3033 \cdot (9.81) = 218.79 \text{ N}$$

Para encontrar el valor de los coeficientes radial y axial de rodamiento (X y Y respectivamente), es necesario calcular la siguiente relación:

$$\frac{F_a}{F_r} = \frac{218.79}{199.35} = 1.09754 \approx e$$

Las principales características para rodamientos de rodillos cónicos SKF 30207, son las siguientes:

Diámetro interno (d) : 35 mm

Coefficiente radial X: 0.4

Diámetro externo (D): 72 mm

Coefficiente axial Y: 1.6

Capacidad estática de base: 2650 kg

e : 0.37

Capacidad dinámica de base: 3250 kg

Velocidad máxima permitida: 6000 rpm

Por tener carga combinada, el valor de nuestra carga equivalente P está dada por $P = X \cdot F_r + Y \cdot F_a$, sin embargo, la carga radial en rodamientos de rodillos cónicos, origina una fuerza axial, la cual debe tomarse en cuenta en este cálculo cuando se cumple la condición $F_a / F_r > e$. Esta componente adicional de la carga axial, está dada por la relación:

$$F_a' = \frac{0.5 \cdot (F_r)}{Y} = \frac{0.5 \cdot (199.85)}{1.6} = 62.453N \quad \text{y ahora, por lo tanto:}$$

$$F_A = F_a' + F_a = 62.453 + 218.79 = 281.128N$$

$$P = X \cdot F_r + Y \cdot F_A = 0.4 \cdot (199.35) + 1.6 \cdot (281.248) = 529.737N$$

Entonces nuestro valor de capacidad dinámica será:

$$C = P \left(\frac{L}{10^6} \right)^{1/b} = 529.73 \left(\frac{36E6}{10^6} \right)^{3/10} = 1552.21N, \quad \text{y en kg} \quad C = 158.22 \text{ kg}$$

4.4.8 Ajustes, tolerancias y acabados

A continuación se desarrolla el cálculo de los ajustes y tolerancias requeridas en la flecha-rodamientos, rodamientos-cajas, flecha-cubo y flecha del chicote-rueda de dientes pequeña. Así mismo especificamos los acabados que requieren cada una de estas piezas.

4.4.8.1 Flecha - Rodamientos:

Consideramos que, en este caso, el ajuste adecuado será un K6, por tratarse de un rodamiento axial de rodillos con carga combinada y diámetro menor a 200mm.

$$\varnothing_{nom} = 35\text{mm} = 1.37''$$

$$\text{En la flecha: } \varnothing_{max} = 35 + 0.018 = 35.018 \text{ mm}$$

$$\varnothing_{min} = 35 + 0.002 = 35.002 \text{ mm}$$

$$\text{Tolerancia: } T = 0.018 - 0.002 = 0.016 \text{ mm} = 0.63 \text{ milésimas de plg.}$$

$$\text{Discrepancia } D = 35.018 - 35 = 0.018 \text{ mm (interferencia)}$$

4.4.8.2 Rodamientos - caja de rodamientos:

En este caso el ajuste será K7, para rodamiento axial con carga rotativa y sobre aro apoyado en soporte o caja.

$$\varnothing_{nom} = 72\text{mm} = 2.83''$$

$$\text{En la caja: } \varnothing_{max} = 72+0.007 = 72.007 \text{ mm}$$

$$\varnothing_{min} = 72-0.018 = 71.982 \text{ mm}$$

$$\text{Tolerancia: } T = 0.018-0.007 = 0.025 \text{ mm} = 0.984 \text{ milésimas de plg.}$$

$$\text{Discrepancia } D = 72-71.982 = 0.018 \text{ mm (interferencia)}$$

4.4.8.3 Flecha - cubo:

Ajuste RC4, para maquinaria de precisión, con velocidades y presiones de carga moderada, y en donde se requiere juego mínimo y ubicación exacta.

$$\varnothing_{nom} = 35\text{mm} = 1.378''$$

$$\text{En la flecha: } \varnothing_{max} = 1.378-0.001 = 1.377'' = 34.9758 \text{ mm}$$

$$\varnothing_{min} = 1.378-0.002 = 1.376'' = 34.9504 \text{ mm}$$

$$\text{Tolerancia: } T = 34.9758-34.9504 = 0.0254 \text{ mm} = 1 \text{ milésima de plg.}$$

$$\text{En el cubo: } \varnothing_{max} = 1.378-0.0016 = 1.3796'' = 35.04184 \text{ mm}$$

$$\varnothing_{min} = 1.378-0.0 = 1.378'' = 35 \text{ mm}$$

$$\text{Tolerancia: } T = 0.04184 \text{ mm} = 1.64 \text{ milésimas de plg.}$$

$$\text{Discrepancia } D = 35.04184-34.9504 = 0.09144 \text{ mm}$$

4.4.8.4 Flecha del chicote - rueda dentada pequeña:

Ajuste RC7, puesto que en este acoplamiento la exactitud no es esencial.

$$\varnothing_{nom} = 12.7\text{mm} = 0.5''$$

En la flecha: $\varnothing_{max} = 0.5 - 0.002 = 0.498'' = 12.6492 \text{ mm}$

$\varnothing_{min} = 0.5 - 0.003 = 0.497'' = 12.6238 \text{ mm}$

Tolerancia: $T = 0.0254 \text{ mm} = 1 \text{ milésima de plg.}$

En la rueda: $\varnothing_{max} = 0.5 + 0.0016 = 0.5016'' = 12.74064 \text{ mm}$

$\varnothing_{min} = 0.5 + 0.0 = 0.5'' = 12.7 \text{ mm}$

Tolerancia: $T = 0.04064 \text{ mm} = 1.6 \text{ milésimas de plg.}$

Discrepancia $D = 0.5016 - 0.497 = 0.1168 \text{ mm} = 4.6 \text{ milésimas de plg.}$

4.4.8.5 Acabados

A partir de las tolerancias obtenidas, procedemos a definir los acabados para el maquinado, de acuerdo al grado correspondiente:

	Grado	Acabado
Flecha en rodamientos	6	Torneado
Caja de rodamientos	6	Rimado
Flecha en cubo	7	Torneado
Cubo	8	Taladreado
Flecha chicote	8	Taladreado
Rueda pequeña	9	Taladreado

Tabla 4.4 ACABADOS

4.4.9 Tornillos de sujeción

Tanto el plato, como la flecha y todos los elementos sujetos a ella, además de la camisa de la flecha, se fijan a la mesa de canales por medio de cuatro tornillos de sujeción y una brida soldada a la parte superior de la camisa, como se muestra en los planos.

El peso total que deben resistir los cuatro tornillos se puede obtener a partir del peso de todos los elementos mencionados anteriormente, más la fuerza de ajuste de los tornillos.

La fuerza inicial de ajuste está dada por: $F_i = K_i \cdot A_i \cdot S_p$

en donde K_i es una constante cuyo valor para aplicaciones ordinarias es de 0.9, A_i será el área del tornillo, y S_p el "esfuerzo de prueba" del material. Así:

$$\frac{F_i}{A_i} = K_i \cdot S_p = 0.9 \cdot (225E6) = 202.5 \text{ MPa}$$

Ahora bien, nuestra fuerza sobre los cuatro tornillos es:

$m_f =$ (masa sobre el rodamiento)

+ (masa de la camisa)

+ (masa de la brida) = 31.8581 kg

$$F_T = 31.8581 \cdot (9.81) = 312.5279 \text{ N}$$

y para cada uno de los tornillos: $F_i = \frac{312.5279}{4} = 78.13199 \text{ N}$

$$\frac{F_i \cdot FS}{A} = S_p \quad \text{con } FS=3;$$

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \frac{F_i \cdot FS}{S_p} = \frac{78.13199 \cdot 3}{202.5E6} = 1.157E-6$$

de esta forma sabemos que el diámetro permisible es: $D = 1.21399 \text{ mm}$

De acuerdo a los espesores de la placa y la brida, y los resultados obtenidos anteriormente, un tornillo de cabeza cónica allen de 3/8" x 2" podrá ser suficiente.

Las características de este tipo de tornillo son las siguientes:

Tipo de rosca:	estándar	Ø ext. menor de rosca (d_p):	0.2983"
Ø básico mayor:	0.375"	Ø int. menor de rosca (d):	0.3073"
hilos por plg.:	16	Ángulo de avance diam. básico:	30°
Ø paso básico:	0.3344"	Área del esfuerzo de tensión:	0.077 plg ²

Obtenemos el paso $p = 1.5875 \text{ mm} = 0.0625''$,

y la altura de la tuerca es $h = 8.5 \text{ mm}$.

Los esfuerzos de la cuerda en la tuerca y el tornillo son los siguientes:

$$\sigma_{\text{tuerca}} = \frac{F}{\pi \cdot d \cdot \frac{h}{2}} = \frac{78.13199}{\pi \cdot 0.0078 \cdot \frac{0.0085}{2}} = 750.231 \text{ kPa}$$

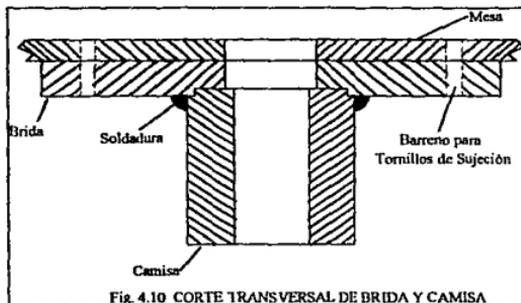
$$\sigma_{\text{tornillo}} = \frac{F}{\pi \cdot d_t \cdot \frac{h}{2}} = \frac{78.13199}{\pi \cdot 0.00757 \cdot \frac{0.0085}{2}} = 773.026 \text{ kPa}$$

Y por último, el esfuerzo de aplastamiento queda definido por:

$$\sigma_b = \frac{F}{\frac{\pi}{4} \cdot (d^2 - d_t^2) \cdot \frac{h}{p}} = \frac{78.13199}{\frac{\pi}{4} \cdot (0.0078^2 - 0.00757^2) \cdot \frac{0.0085}{0.00158}} = 5.230 \text{ MPa}$$

4.4.10 Soldaduras

Para la soldadura que unirá la brida con la camisa, tenemos una longitud de cordón de $L = 0.3016 \text{ m}$, además $S_{sy} = 0.58 \cdot S_y = 345 \text{ E6} = 200.1 \text{ MPa}$ para un electrodo AWS E60 ($S_{UT} = 413.68 \text{ MPa}$, $S_y = 345 \text{ MPa}$).



La fuerza a la cual vamos a someter al cordón es simplemente de tensión, y la obtenemos a partir del peso que soporta, el cual está dado por:

$$m = (\text{masa sobre el rodamiento}) + (\text{masa de la camisa}) = 28.5033 \text{ kg}$$

$$\text{y la fuerza es: } F_T = 28.5033 \cdot (9.81) = 279.6174 \text{ N}$$

4.4.11 Elementos para base estructural

En primer lugar, y al igual que en la mayoría de los cálculos anteriores, requerimos obtener el peso total que deberá resistir la estructura (ver planos). De esta forma:

$$\begin{aligned} m = & (\text{masa de la mesa y canales}) \\ & + (\text{masa sobre el rodamiento}) \\ & + (\text{masa de la camisa y brida}) = 82.3021 \text{ kg} \end{aligned}$$

$$F_T = 82.3021 \cdot (9.81) = 807.38 \text{ N}$$

por lo que podemos saber que cada pata o elemento principal soportará $F_f = 807.38/4 = 201.85 \text{ N}$

en kilogramos vemos que la fuerza de cada elemento será de $F = 20.575 \text{ kg}$.

Consultando la tabla de esfuerzos admisibles para miembros en compresión de Aceros Monterrey, vemos que el máximo esfuerzo para miembros principales es de 713 kg/cm^2 , y la relación de esbeltez correspondiente a este valor es 121.

La relación de esbeltez está dada por $\frac{l}{r_n} = 121$, en donde r_n es el radio mínimo y l es la longitud del elemento. De esta forma obtenemos $r_n = \frac{0.5}{121} = 0.0041322 \text{ m}$. Ahora bien, de la tabla de propiedades de ángulos, vemos que para $r_n = 0.46 \text{ cm}$ podríamos emplear un ángulo de $7/8" \times 3/16"$, con un área de 1.90 cm^2 .

Calculando el esfuerzo que resiste cada elemento cuando está cargado con la fuerza obtenida anteriormente, tenemos que:

$$\sigma = \frac{F}{A} = \frac{20.91}{1.90} = 11.005 \text{ kg/cm}^2 \ll 713 \text{ kg/cm}^2$$

Podemos observar que el ángulo seleccionado resulta adecuado, sin embargo con el fin de lograr mayor robustez, usaremos ángulo de $1\ 1/4'' \times 1/8''$.

4.4.12 Esfuerzos térmicos

Es importante también considerar los esfuerzos térmicos generados por el calentamiento del plato.

La deformación libre está dada por $\epsilon_f = \alpha \cdot T$, y el cambio de dimensión queda en función de esta deformación y se expresa $\Delta_f = \epsilon_f \cdot L$, en donde L será el radio del plato.

Si para el acero $\alpha = 1.3E-6(1/^\circ\text{C})$, y suponemos una temperatura máxima $T = 300^\circ\text{C}$, las dos expresiones anteriores se resuelven,

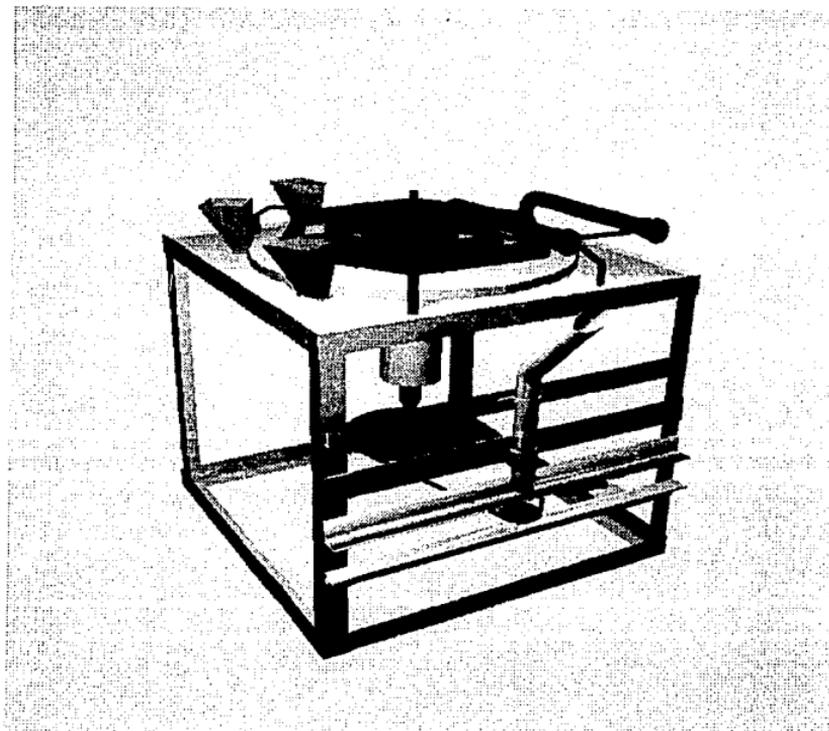
$$\epsilon_f = (1.3E-6) \cdot (300) = 3.9E-4 \qquad \Delta_f = (3.9E-4) \cdot (0.25) = 97.5\ \mu\text{m}$$

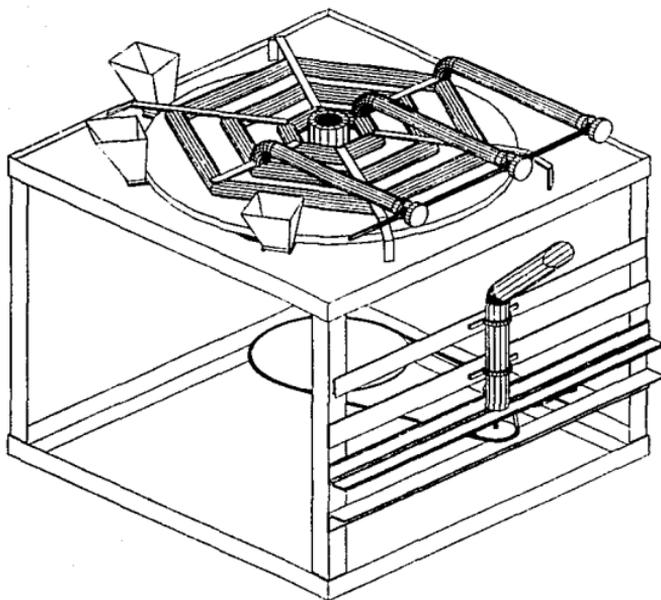
Ahora bien, el esfuerzo térmico cuando el cuerpo se encuentra idealmente restringido por los elementos a los que está acoplado, está dado por la siguiente expresión:

$$\sigma_T = -E \cdot \alpha \cdot T = -E \cdot \epsilon_f = -(207E9) \cdot (3.9E-4) = 80.73\ \text{MPa},$$

y tomando en cuenta la resistencia de nuestros materiales, este esfuerzo no representa ningún problema.

4.5 PLANOS CONSTRUCTIVOS





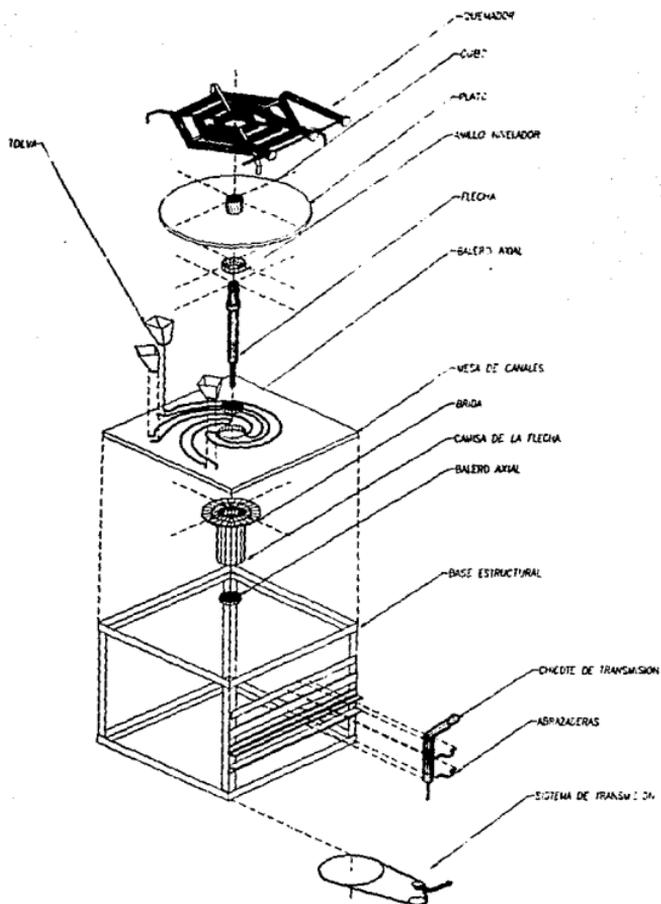
isométrico

sin escala

cotas mm



plano 1



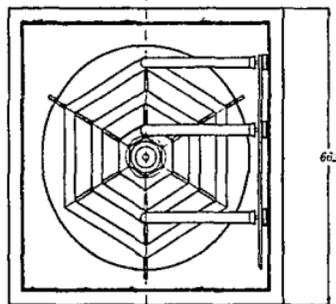
despiece isométrico

sin escala

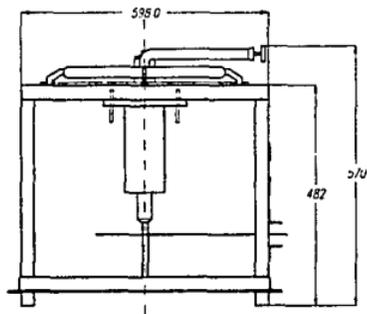
cotas mm



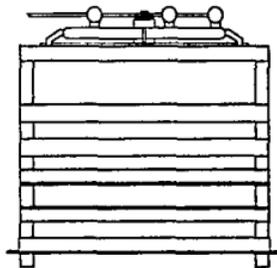
plano 2



v superior



v frontal



v lateral

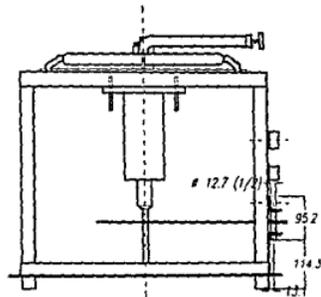
vistas generales

esc 1 : 10

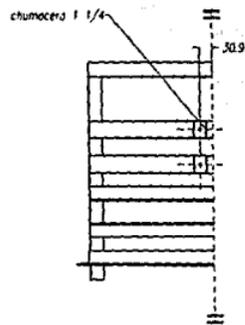
colas mm



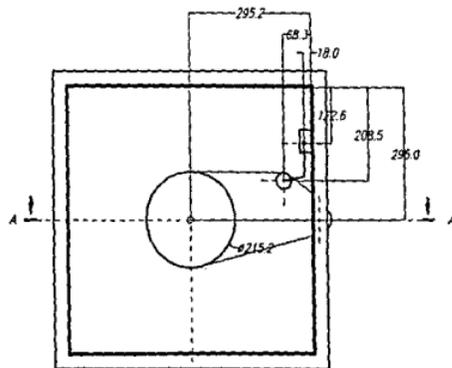
plano 3



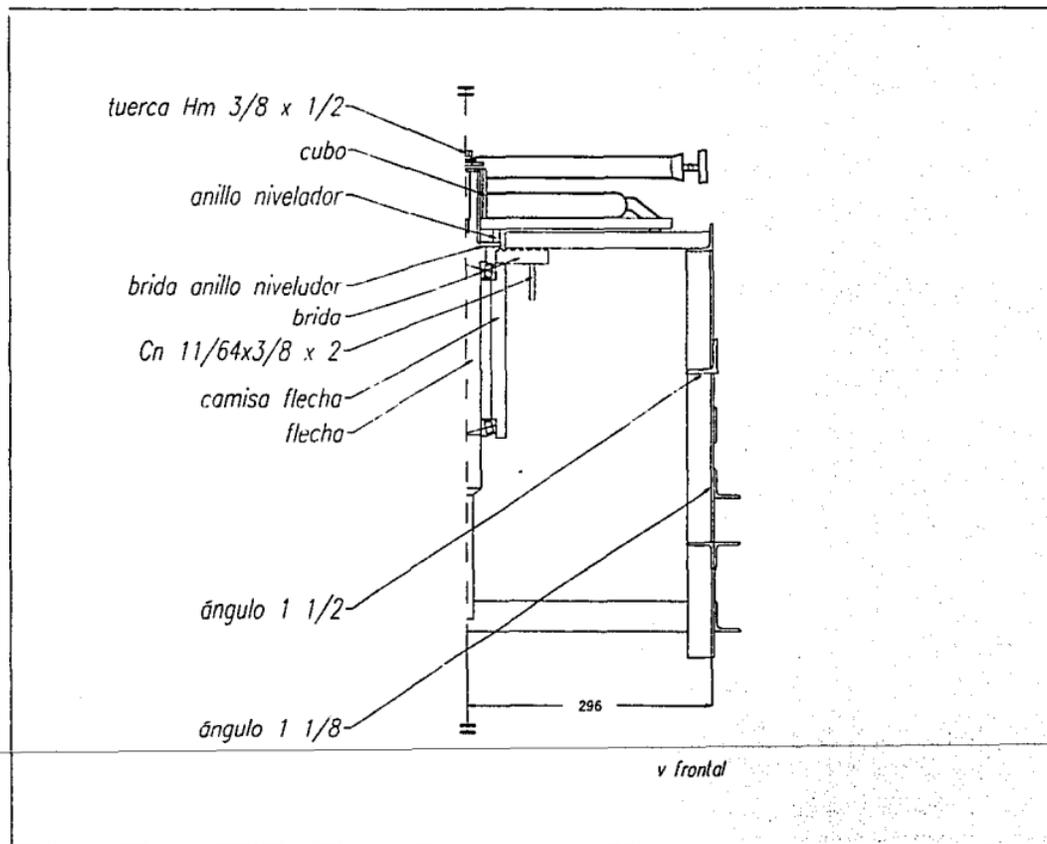
v frontal



v lateral



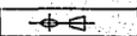
v inferior



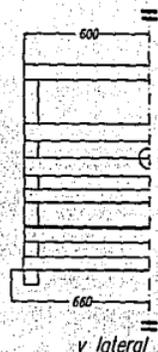
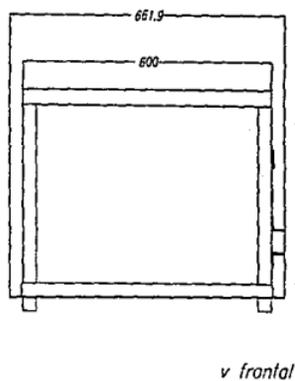
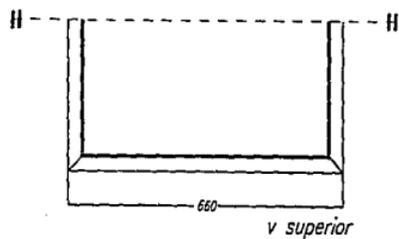
carle AA

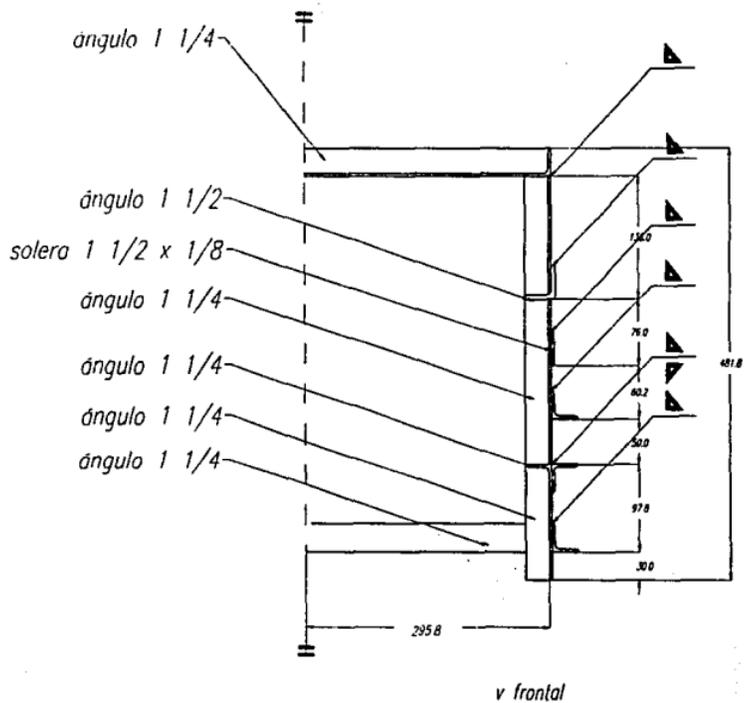
esc 1 : 5

colas mm



plano 5





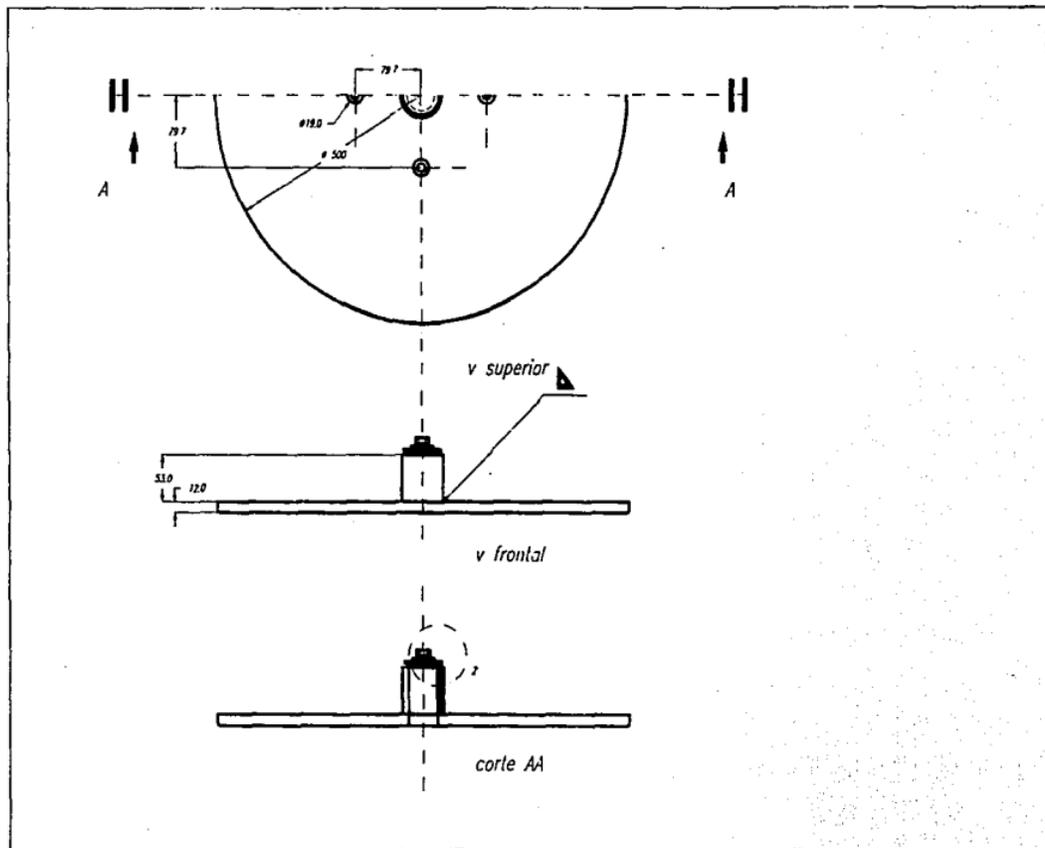
estrutura / corte AA

esc 1 : 5

cotas mm



plano 7



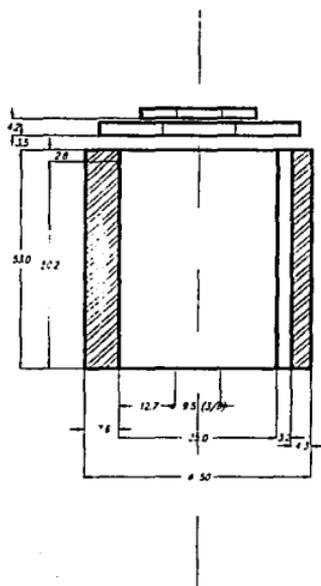
plato / vistas y corte

esc 1 : 5

colas mm



plano 8



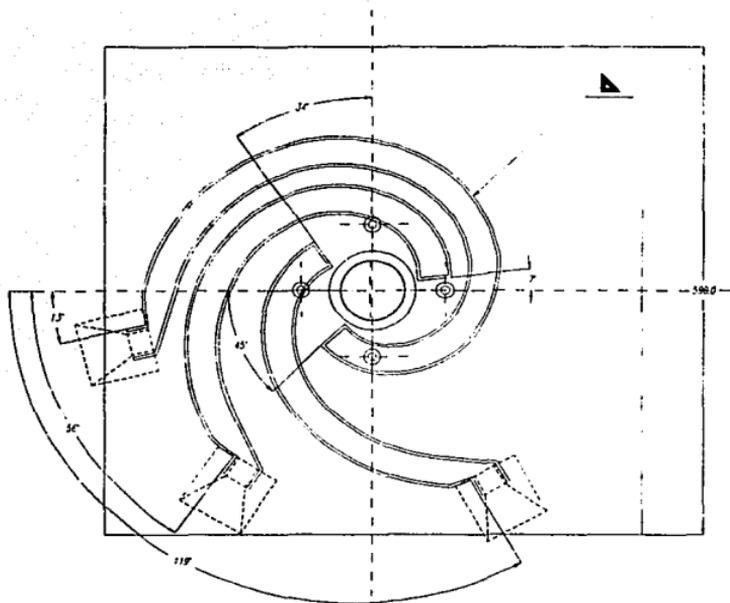
detalle Z

esc 1 : 1

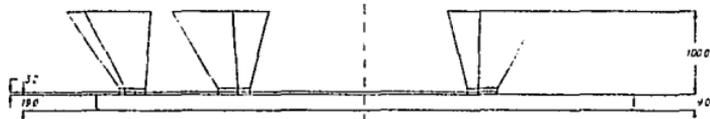
cotas mm



plano 9



v superior



v frontal

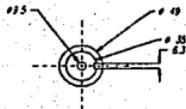
mesa de canales / tolvas

esc 1 : 5

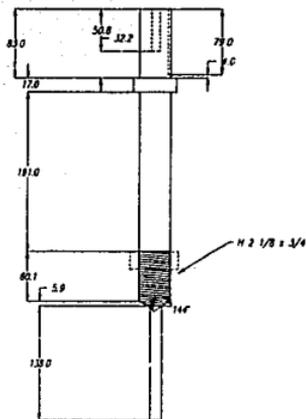
colas mm



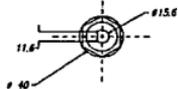
plano 10



v superior



v frontal



v inferior

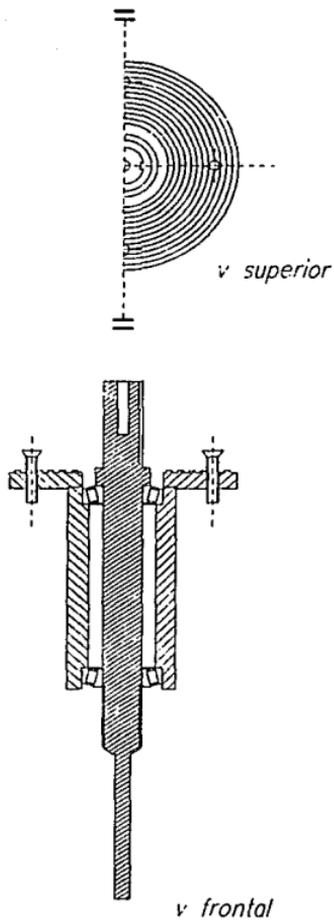
flecha

esc 1 : 5

cotas mm



plano 11



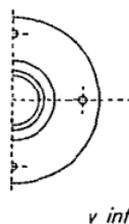
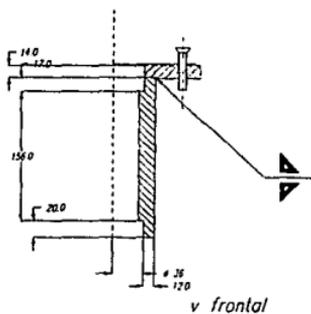
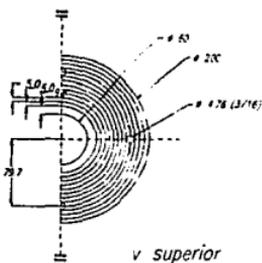
flecha, camisa y brida / corte esquemático

esc 1 : 4

cotas mm



plano 12



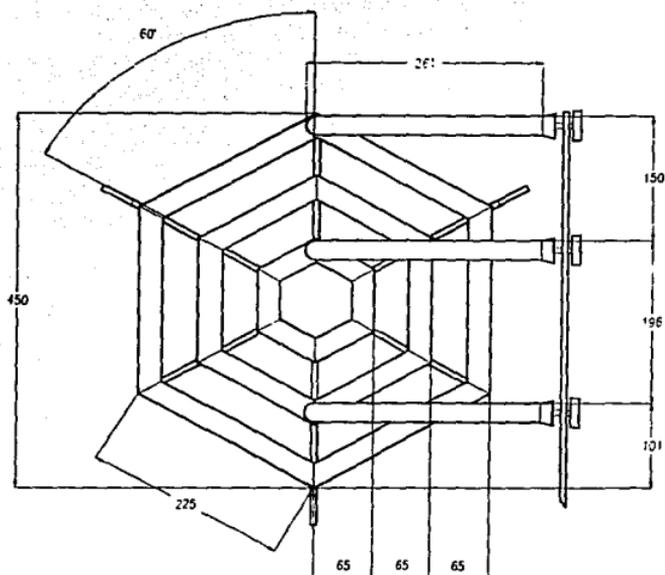
camisa de la flecha / brida

esc 1 : 5

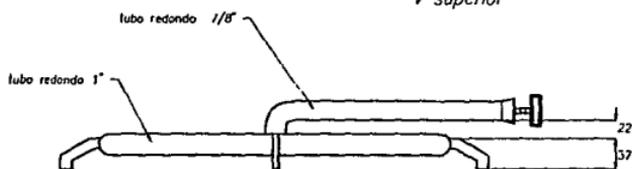
cotas mm



plano 13



v superior



v frontal

quemador / vistas generales

esc 1 : 5

cotas mm



plano 14

CAPÍTULO 5

EL SIMULADOR DE LA EXTRUSORA DE TORNILLO Y SUS RESULTADOS

En este capítulo se exponen los resultados después de haber construido el modelo funcional del simulador, así como algunos de los problemas que se enfrentaron en el maquinado y la realización de las pruebas de banco. También proponemos algunas mejoras que pueden hacerse tanto en el maquinado como en el diseño. Por último proponemos un programa y sistema de evaluación que puede resultar útil para la obtención de las probetas cuyas propiedades podrán ser sometidas a las diferentes pruebas.

Cabe destacar que nuestro modelo funcional cuenta con tres canales sobre una misma placa, que simulan tres diferentes ángulos de hélice: 20° , 25° , y 30° . Dependiendo del valor de los ángulos seleccionados, se podrá colocar un mayor o menor número de canales sobre una misma placa.

5.1 PRUEBAS CON EL MODELO FUNCIONAL

5.1.1 Condiciones de operación y alimentación del simulador

5.1.1.1 Ajustes de transmisión

Para las primeras pruebas realizadas, el simulador fue acoplado a un torno de 1.5 H.P. a través del sistema de transmisión flexible propuesto. El chicote se hizo girar a una velocidad de 60 r.p.m. y, tal como se detalló en el capítulo anterior, éste fue acoplado en su otro extremo a la catarina menor del sistema de transmisión por cadena. Haciendo uso de la catarina menor ($N_f = 14$), se transmitió a la catarina mayor acoplada a la flecha ($N_f = 52$). Así, de la ecuación de relación de velocidades obtenemos la velocidad angular del plato:

$$\frac{N_{f1}}{N_{f2}} = \frac{\omega_2}{\omega_1} \quad ; \quad \omega_2 = \frac{60 \cdot (52)}{14} = 222.85714rpm = 23.3375 \frac{rad}{s}$$

La cadena de transmisión fue ajustada mediante un tensor sujeto a la estructura del simulador (tal como se detalla en los planos), y fue nivelada por medio del sistema deslizante de fijación de la estrella mayor. En el momento en el que se logró proporcionar al simuladora mediante estos ajustes un movimiento constante, se procedió a calentar el plato con los tres quemadores concéntricos.

5.1.1.2 Estabilización de temperatura

Se encendieron los tres quemadores, procurando una flama más potente en el centro y una más tenue en el quemador exterior; esto con el fin de que al igual que en una

extrusora, proporcionar calor gradualmente al polímero. Se quiso calentar el plato al tiempo que seguía girando para lograr un calentamiento más uniforme.

La medición de temperatura se llevó a cabo por medio de un termopar *tipo J*, el cual se introdujo entre el plato y la placa y hasta la sección más cercana al centro del plato con el fin de obtener la temperatura más alta de la superficie inferior del plato (que sería la que estaría en contacto directo con el polímero). Esta operación se realizaba cada 15 minutos, y era necesario detener el plato mientras se realizaba la medición.

Se decidió hacer la primera prueba con resina PET, por lo que se calentó el plato hasta 150 °C., en aproximadamente 1 hora y 20 minutos. El siguiente paso fue lograr estabilizar esta temperatura mediante la graduación de la flama en los quemadores.

5.1.1.3 Alimentación

Después de haber logrado estabilizar el simulador tanto en lo que se refiere a velocidad, como en temperatura, se procedió a la alimentación por medio de las tolvas de entrada. Las pequeñas bolas de polímero fueron arrastradas de forma constante y uniforme por el plato, por lo que la alimentación se logró sin problemas.

Se alimentaron los canales por un periodo de 8 minutos antes de observar el producto a través de la boquilla de salida. Después de este tiempo se continuó alimentando los canales hasta el minuto 15, con el fin de examinar el estado interior del polímero a lo largo de los canales.

5.1.2 Resultados

En nuestra primera prueba, al retirar el plato y observar el producto dentro de la máquina, nos pudimos dar cuenta de lo siguiente:

- Se podían apreciar con claridad las diferentes zonas a lo largo del canal en las que el material había sido total o parcialmente fundido.
- El polímero no mostraba señales de haberse quemado en ningún punto de su trayectoria.
- Así mismo, en ningún momento se percibió algún olor que pudiera definirse como desagradable, el cual sería indicio de degradación del polímero.
- A través de las boquillas se obtuvieron probetas perfectamente bien formadas y de material completamente fundido, y su apariencia era tan homogénea como la de cualquier producto de resina PET.
- Al retirar el plato se formaron finos filamentos de polímero fundido, lo cual indica que en la superficie del plato se tenía material con un excelente grado de fluidización.

Sin embargo, a pesar de los excelentes resultados enlistados anteriormente, también nos encontramos con resultados no esperados:

A pesar de que los trozos de plástico obtenidos del interior de la máquina describían con bastante claridad la trayectoria de los canales, el polímero fundido había escurrido fuera de los éstos y teníamos fluido sobre gran parte de la mesa. Fue entonces cuando corroboramos que la precisión que habíamos logrado con nuestro maquinado no era suficiente. Requeríamos de una menor distancia entre los bordes de las paredes de los canales y el plato para evitar este derramamiento, y así los resultados que podríamos obtener serían aún mejores.

Sin embargo resulta muy claro lo siguiente: **los resultados obtenidos fueron lo suficientemente buenos como para demostrar la funcionalidad de nuestro prototipo, y con ellos dejamos clara la conveniencia de construir un simulador haciendo uso de procesos de manufactura más precisos, aunque puedan resultar más costosos.**

En el diseño de cualquier máquina cuyo principio de funcionamiento sea bueno y tenga aplicación práctica, se sigue siempre un proceso mediante el cual la inversión destinada a ésta y el éxito obtenido en los resultados, van creciendo proporcional y gradualmente. Esto se hace empezando por un modelo de construcción sencilla que permita demostrar la funcionalidad del diseño, para después realizar el maquinado de modelos más complejos que nos arrojarán resultados más cercanos a los esperados.

En nuestro caso hemos logrado concluir una primera etapa en la cual justificamos la inversión realizada, demostrando la aplicación práctica y funcionalidad de un diseño innovador. Consideramos ahora que es el momento de pasar a una segunda etapa en la cual, con la certeza de que el simulador efectivamente procesa polímero de forma muy similar a la de un tornillo de extrusión, se destine una inversión mayor a la construcción de un segundo modelo con características de maquinado mucho más precisas. Los resultados seguramente serán aún mejores, pero lo que consideramos realmente importante es que ahora podemos estar convencidos de que el diseño del simulador del proceso de extrusión logrará los objetivos para los que fue creado.

Es preciso, sin embargo, proponer ahora algunas opciones para mejorar el maquinado y funcionamiento en general. Además, proponemos un sistema o programa de pruebas con el fin de facilitar la evaluación de las probetas obtenidas a través del simulador.

5.2 PROPUESTAS DE MAQUINADO Y OTRAS MEJORAS

5.2.1 Maquinado de la placa y canales

Para el maquinado preciso de la placa y los canales proponemos los siguientes métodos:

En primer lugar se puede hacer por electroformado. Este método nos permite lograr tolerancias del orden de $25\ \mu\text{m}$ (0.001 in), con acabados superficiales de 50 a 200 nm. El molde para el electroformado se podría maquinar en una fresa de control numérico, y éste sería el negativo de la mesa con las paredes de los canales de aproximadamente 10mm. de ancho en relieve. Este molde también nos podría permitir formar canales cuya cavidad de alimentación y boquilla de salida tuvieran cierta inclinación que ayudara a conducir mejor al material, e incluso podríamos variar la altura de canal a todo su largo. Sin embargo el hacer un molde para electroformado implica que tendremos una producción relativamente grande, de lo contrario no se justificaría la inversión. El material a electroformar podría ser una placa de acero al alto carbón obtenida por fundición, y posterior al electroformado siempre será necesario hacer un rectificado para lograr un acabado adecuado.

Como segunda opción proponemos hacer la placa directamente en una fresa de control numérico, y posteriormente darle un rectificado a la parte superior de las paredes. Este método puede resultar práctico en el caso de requerir un número reducido de piezas. Al igual que en el caso anterior, podemos proponer como material una placa fundida de acero al alto carbón, con el fin de lograr una vida útil mayor en nuestro modelo. Sin embargo, habrá que evaluar la conveniencia de sacrificar esta larga vida útil, con el fin de lograr una mayor facilidad de maquinado mediante el uso de algún material más blando. Esta última opción puede ser buena si consideramos que el simulador no estará sometido a un desgaste muy acelerado por ser una máquina de pruebas de laboratorio y, por lo tanto, no estar expuesta a una operación muy constante y prolongada.

5.2.2 Maquinado del plato

La otra pieza que consideramos de suma importancia en cuanto a sus dimensiones y acabado es el plato. Sin embargo, si cuidamos que tanto la flecha como su barreno central lo mantengan paralelo a la placa, únicamente tendremos que darle un perfecto acabado a su superficie inferior por medio de un proceso de rectificado.

5.2.3 Sistema de calefacción

Como se expuso en la sección 4.3.4, un sistema de calefacción más preciso y sobre el cual podríamos tener mejor control lo podríamos lograr mediante el uso de tres resistencias planas, circulares y concéntricas al plato. De esta forma podríamos lograr una temperatura adecuada para cada zona del plato y tener un buen control sobre ella mediante el uso de un termostato para cada una de las resistencias. Mediante el estudio de la transferencia de calor en el material del plato y/o pruebas directas sobre el modelo, podríamos precisar la temperatura requerida en las resistencias para lograr la temperatura deseada en la superficie inferior del plato.

Además podemos instalar un termopar en el flujo del canal, introduciéndolo a través de un barreno que atraviese la mesa del simulador por la parte inferior.

5.2.4 Sistema de transmisión

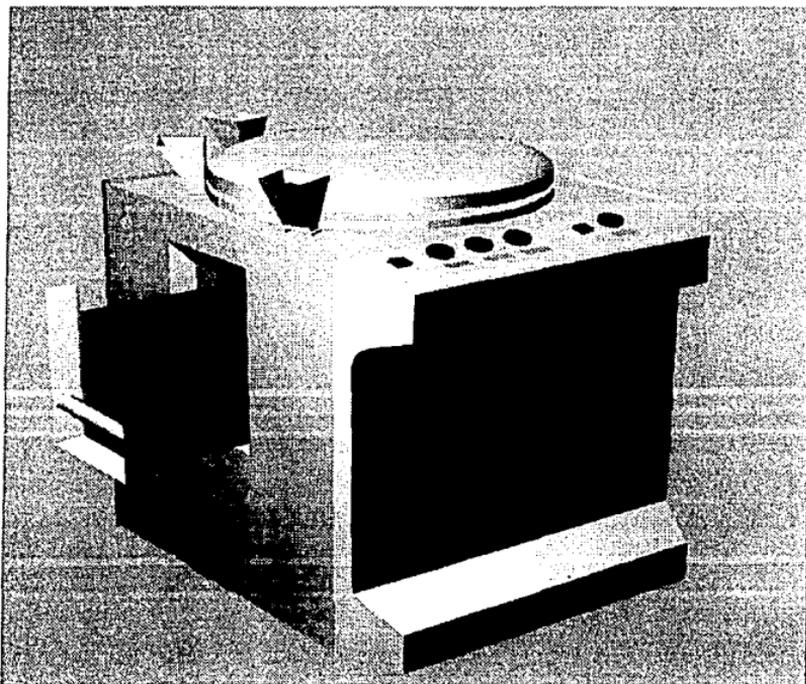
También la transmisión podría ser mejorada mediante el acoplamiento directo a la flecha de un motovariador que nos ofrezca velocidades en el rango requerido (20 a 200 r.p.m.). Este nos permitiría regular la velocidad de operación deseada, además de que nos evitaría todo el proceso de ajuste de la transmisión por cadena. Hay que tomar en cuenta que, para el acoplamiento de un sistema de este tipo, es probable que tengamos que modificar un poco la estructura y dimensiones del modelo original. Sin embargo,

estas son modificaciones de poca importancia y que no afectarán el funcionamiento básico y principales piezas del modelo.

A continuación presentamos la versión comercial de nuestro simulador con base en las modificaciones propuestas. Este modelo ofrece al investigador una máquina cuyas características de funcionalidad y diseño la hacen atractiva y acorde con un ambiente de trabajo agradable.

Fig. 5.1 SIMULADOR DEL PROCESO DE EXTRUSIÓN

VERSIÓN COMERCIAL



5.3 PROGRAMA DE PRUEBAS PROPUESTO

Esta sección tiene por objeto proponer un programa de pruebas para lograr un estudio más ordenado de los resultados obtenidos.

Se debe empezar por definir las diferentes combinaciones de temperatura, velocidad y ángulos de hélice con los que se deseará experimentar. Supongamos que deseamos investigar los efectos de procesar la mezcla a las temperaturas T_{a1} (temperatura en la zona de alimentación), T_{f1} (Temperatura en la zona de fundido), T_{s1} (Temperatura en la zona de salida), como una primera combinación; T_{a2} , T_{f2} , T_{s2} como una segunda opción; y por último en condiciones T_{a3} , T_{f3} y T_{s3} . Por otro lado nos interesa conocer los resultados al operar a velocidades V_1 , V_2 y V_3 ; y por último requerimos y disponemos de una placa con ángulos de hélice θ_1 , θ_2 , θ_3 .

De esta forma podemos observar que tendremos 27 probetas, las cuales podrán ser obtenidas mediante la práctica de 9 pruebas. Para ver con mayor claridad lo anterior, presentamos el siguiente esquema:

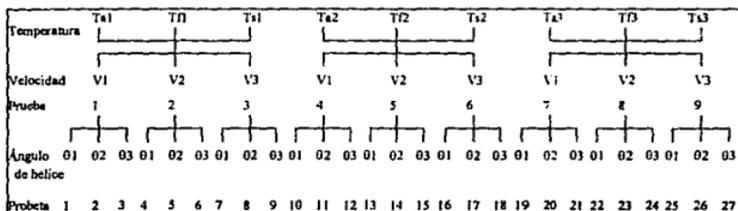


Fig. 5.2 ESQUEMA DEL PROGRAMA DE PRUEBAS

Después de haber obtenido el total de probetas, el primer punto para la evaluación de las mismas será la calidad de la mezcla. Para ello hemos definido esta calidad de la siguiente forma:

- **Calidad A:** Mezcla completamente homogénea en la cual no se distingue un material de otro. Casi no presentan porosidad y la compatibilidad de los dos componentes de la mezcla se puede considerar buena.
- **Calidad B:** Mezcla homogénea, aunque en ocasiones se alcanza a diferenciar un componente de otro. Esta mezcla se distingue por presentar regiones distorsionadas o dislocaciones a lo largo de la probeta.
- **Calidad C:** Mezcla que presenta los llamados macrodefectos. Entre los macrodefectos más comunes podemos mencionar las cavidades, fisuras y porosidades, los cuales delimitan un componente de la mezcla del otro.
- **Calidad D:** Mezcla que presenta grumos y/o fibras, los cuales se forman porque alguno de los componentes no alcanzó plenamente su punto de fusión. Sin embargo el otro componente logró hacer la función de aglutinante y la unión entre ambos es buena.
- **Calidad E:** Mezcla en la cual, independientemente de que ambos componentes lograron ser fundidos completamente o que alguno no llegó a su punto de fusión, no se logró una unión suficientemente firme. En este caso, un pequeño esfuerzo de flexión o torsión aplicado a la probeta provocará su ruptura.

Posteriormente se procederá a realizar la evaluación de las principales propiedades mecánicas de las probetas. Proponemos las siguientes:

PROPIEDAD O CARACTERÍSTICA	DEFINICIÓN
Deformación	Deformación fraccionaria ($\Delta L/L$).
Módulo Elástico	Esfuerzo / Deformación.
Resistencia a la Cedencia	Límite de deformación plástica.
Resistencia a la Tensión	Límite de ruptura (resistencia máxima).
Ductilidad	Deformación permanente antes de la fractura.
Tenacidad	Energía de ruptura por fractura.
Dureza	Resistencia a la penetración plástica.

Tabla 5.1 PROPIEDADES MECÁNICAS PROPUESTAS

Para la captura de los resultados obtenidos proponemos el formato de resultados que a continuación se presenta, el cual nos permitirá llevar todos los datos con orden para así lograr un mejor análisis de los mismos.

FORMATO DE ANÁLISIS DE RESULTADOS**I. Generales:**

Nombre de la Mezcla: _____ Registro #: _____

Fecha de realización de las pruebas: ___ / ___ / ___

	Compuesto	Temp. fusión	Temp. degradación
1			
2			

II. Definición de las condiciones de operación: T_{a1} = _____ T_{a2} = _____ T_{a3} = _____ V_1 = _____ θ_1 = _____ T_{f1} = _____ T_{f2} = _____ T_{f3} = _____ V_2 = _____ θ_2 = _____ T_{s1} = _____ T_{s2} = _____ T_{s3} = _____ V_3 = _____ θ_3 = _____

Por último, pensamos que resultaría sumamente útil almacenar toda la información anterior en una base de datos, creando un registro por cada mezcla investigada. De esta forma se podría consultar el archivo en el momento de estar en busca de alguna propiedad específica para la satisfacción de cualquier necesidad que pudiera ser cubierta con material que alguna vez se pensó no tendría mejor función que la de formar parte de los desechos no degradables. Por otro lado, para cualquier investigación resulta de gran relevancia el realizar un análisis estadístico de los resultados, el cual puede obtenerse fácilmente a partir de la base de datos generada. Este análisis se hace con el fin de agrupar las pruebas ya realizadas, y saber qué se puede esperar de investigaciones posteriores.

CONCLUSIONES

La reutilización de desechos plásticos emana, en la actualidad, como una necesidad prioritaria para el cuidado y conservación de nuestro medio ambiente. Sin embargo la preocupación por invertir en el reciclaje de estos desechos es insuficiente, debido a los altos costos en el proceso de recolección, clasificación, trituración y limpieza. Es, por lo tanto, necesario hallar la forma de reducir estos costos, y aunque sabemos que será difícil llegar al punto en el que resulte más económico la reutilización de desechos que el uso de plástico virgen, pensamos que debe ser ineludible la responsabilidad de invertir en la conservación de nuestro medio ambiente.

Una forma de empezar a reducir estos costos podría ser lo que hemos llamado *reciclaje compuesto* de desechos plásticos, que consiste en el procesamiento conjunto de dos o más tipos de polímeros para la obtención de algún producto con aplicaciones muy específicas y que satisfagan eficientemente alguna necesidad. Sin embargo, para encontrar los posibles productos y asignarlos a las distintas aplicaciones posibles, es necesario, al igual que en todos los campos de la industria, invertir en investigación.

Bajo el contexto anteriormente expuesto, y después de la realización de este trabajo, podemos concluir lo siguiente:

- Nuestro diseño, efectivamente procesa polímeros en condiciones muy similares a las de un tornillo de extrusión, operando bajo condiciones físicas muy semejantes y guardando las mismas relaciones entre las variables críticas que intervienen en dicho proceso.
 - El producto final obtenido con nuestro simulador reúne las características adecuadas de homogeneidad y estructura que nos permiten compararlo con el producto obtenido mediante el proceso original de extrusión por tornillo.
 - Aunado a lo anterior, vimos que los diferentes estados del polímero a través del canal eran comparables al estado en que se encuentra en las distintas etapas de un tornillo de extrusión. Esto nos habla de lo cercana que se encuentra nuestra simulación al proceso de extrusión por tornillo.
 - La operación del simulador fue muy estable durante las pruebas, lo cual demuestra una excelente interacción acoplamiento de todos sus elementos.
 - Basados también en las pruebas realizadas, podemos decir que en general el diseño goza de buena robustez tanto en su sistema de transmisión, como el los demás elementos dinámicos y estáticos.
-

- El método de investigación propuesto a través de este trabajo, nos ofrece ventajas importantes en la versatilidad para la manipulación de la principales variables que intervienen en el proceso de extrusión de plásticos.
 - Por otro lado, el manejo del simulador en cualquier laboratorio de investigación, resulta sumamente práctico debido al reducido espacio que ocupa en comparación a una extrusora industrial y a lo sencillo de su operación.
 - Los bajos costos de inversión y de operación, representan otra ventaja importante que induce al uso de nuestro simulador en el campo de la investigación.
 - Los resultados obtenidos fueron lo suficientemente buenos como para demostrar la funcionalidad y conveniencia de nuestro diseño. Este representa un primer prototipo que nos conduce a la necesidad de continuar invirtiendo en él, con la certeza cada vez mayor de lograr los objetivos para los que fue creado.
 - Es por esto que, con base en estos resultados, estamos convencidos de la factibilidad de construir un segundo simulador haciendo uso de procesos de manufactura más precisos.
 - Proponemos el uso de un sistema o programa de pruebas de banco, para la obtención de las probetas y el análisis de sus características y posibles aplicaciones. Sugerimos por último la creación de una base de datos conteniendo los resultados obtenidos para la optimización en el manejo y la consulta de los mismos, y para la realización de un análisis estadístico.
-

Es importante considerar que, a pesar de que el costo del reciclaje aún se considera alto, dejará de serlo cuando tengamos una mayor conciencia del problema que representan los desechos plásticos y nos demos cuenta de que el reciclar es una inversión a futuro, ya que tarde o temprano, tendremos que hacernos directamente responsables de los residuos que cada uno de nosotros generemos.

BIBLIOGRAFÍA

- ANGUITA Ramón, Extrusión de Plásticos - teoría y equipos, España. Ed. H. Blume Ediciones, 1977, Parte I
- ASKELAND Donald R., La Ciencia e Ingeniería de los Materiales. México, Ed. Grupo Editorial Iberoamericana, 1987
- AVALLONE Eugene A., et. al., Marks's Standard Handbook for Mechanical Engineers, Singapore, Ed. Mc. Graw Hill, 1987, (9 ed.)
- AVNER Sydney H., Introducción a la Metalurgia Física. México. Ed. Mc. Graw Hill, 1992, (2 ed.)
- BEER Ferdinand P., et. al., Mecánica vectorial para ingenieros. México, Ed. Mc. Graw Hill, 1988, (4 ed.), Dinámica
- BEER Ferdinand P., et. al., Mecánica vectorial para ingenieros, México, Ed. Mc. Graw Hill, 1988, (4 ed.), Estática

- BOWDEN, et. al., The Friction and Lubrication of Solids, Estados Unidos, Clarendon Press, 1950, Vol. I
 - COOK Robert D., et. al., Concepts and Applications of Finite Element Analysis, Estados Unidos, Ed. Wiley, 1989, (3 ed.)
 - DEUTSCHMAN Aaron D., et. al., Diseño de Máquinas, México, Ed. CECSA, 1991
 - DOYLE Lawrence E., et. al., Materiales y Procesos de Manufactura para Ingenieros, México, Ed. Prentice Hall, 1992, (3 ed.)
 - GARCÍA SPARZA Tonatiuh G. y LÓPEZ Sergio A., Tesis: Diseño de un proceso para la recuperación y reciclaje de botellas de PVC, Asesor M.en C. Amando Padilla Ramírez, México, 1991, U.N.A.M.
 - JUVINAL Robert C., Fundamentals of Machine Component Design, Singapore, Ed. Wiley, 1983
 - KARLEKAR B.V., et. al., Transferencia de Calor, México, Ed. Interamericana, 1985, (2 ed.)
 - OBERG Erik, et. al., Machinery's Handbook, Estados Unidos, Industrial Press, 1979, (21 ed.)
-

- SHIGLEY Joseph E., et. al., Diseño en Ingeniería Mecánica, México, Ed. Mc. Graw Hill, 1992, (5 ed.)
 - STREETER Victor L., et. al., Mecánica de los Fluidos, México, Ed. Mc. Graw Hill, 1987, (8 ed.)
 - TADMOR Zchev, et. al., Principles of Polymer Processing, Estados Unidos, Ed. Wiley, 1979
 - VAN VLACK Laurence H., Materiales para ingeniería, México, Ed. CECSA, 1985, (6 ed.)
-