

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBA DE UN MODELO A ESCALA PARA SIMULAR LA FABRICACIÓN DE PIEZAS DE PLÁSTICO POR INYECCIÓN.

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
por los Brs. Ordóñez. M., Héctor A.
Saade C., Lizbethe. A.
para optar por el título de
Ingeniero Mecánico

CARACAS, 2003

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBA DE UN MODELO A ESCALA PARA SIMULAR LA FABRICACIÓN DE PIEZAS DE PLÁSTICO POR INYECCIÓN.

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Guillermo Flores

Presentado ante la ilustre
Universidad Central de Venezuela
por los Brs. Ordóñez. M., Héctor A.
Saade C., Lizbethe. A.
para optar por el título de
Ingeniero Mecánico

CARACAS, 2003

DEDICATORIA

A mi Dios.

A María y Héctor, mis padres

A Dennis, Jhonn y Gabriel, mis hermanos

A mi tía Orietta quien me tomó como su hijo.

A Ninibeth, mi hermosa novia.

Héctor Argenis

A Dios.

A mis padres, Abraham y La Nena.

A mis abuelos, Perucho y Alicia.

A mis tíos, Tatato, Pancho y Clemencia.

A mis primos, Pedrito y Patricia.

Lizbethe Alejandra

AGRADECIMIENTOS

Gracias a mi Dios que hace todo posible, quien me enseña cada día a ser un hombre de principios, de rectitud y de valor, quien además me dio la oportunidad de cumplir mi sueño de diseñar, crear y enseñar.

A mis padres Héctor y María que, con sus virtudes y defectos, se esmeraron en inculcarme los principios de rectitud, verdad y excelencia, por criarme, alimentarme, vestirme y amarme. A mis hermanos, Dennis, Jhonn y Gabriel, con quienes he compartido, discutido, reído y llorado.

A mi hermosa novia, Ninibeth, quien me ha tenido tanta paciencia, por estar a mi lado en los días de lluvia y de sol, por animarme y no dejar de creer que cada día puedo ser mejor.

A mi compañera de tesis, Lizbethe, quien me dio el privilegio de ser su compañero de trabajo durante la carrera confiando en mi para ello.

A Carlos Rojas, mi gran amigo, por llevarme casi siempre la contraria y de esa manera ayudarme a ver las cosas desde otro punto de vista. A Valeska Piccari, mi amiga, por escucharme, animarme y enseñarme.

Héctor Argenis

A Dios, por estar presente en mi mente y en mi corazón en cada momento.

A mis padres, Abraham y La Nena, por haberme dado la vida y por su inmenso apoyo y comprensión a lo largo de toda mi vida. Gracias por haberme ayudado en la formación profesional y humana que hasta hoy poseo; espero seguir contando con ustedes en el resto del camino que aún me falta por recorrer.

A la familia. Gonzáles Quintero por sus detalles y atenciones para con mi familia y conmigo.

A mi gran amigo y confidente, Marcos por estar conmigo en todo momento, a pesar de la distancia geográfica que hoy nos separa.

Al Ing. Luis A. Luna S. por su grandes y novedosas criticas constructivas.

A mis grandes amigas de la infancia: Harianne, Nilla, Mariana por estar siempre conmigo en las buenas y en las malas.

A mi compañero de Tesis, Héctor, por haber depositado en mi su confianza a lo largo de todo este tiempo.

Lizbethe

A nuestros padres, por su valiosa colaboración en todo lo que requeríamos, sin ellos hubiera sido imposible la culminación de esta carrera.

Al Prof. Ing. Manuel Martínez por haber contribuido al hallazgo de este trabajo de grado. A nuestro tutor, Prof. Ing. Guillermo Flores, por confiar en nosotros y ser más que un tutor, por ayudarnos, animarnos y retornos. Al profesor Ing. Edgar Toro por ayudarnos en la verificación de normas de los planos. A Severiano González, Director Gerente de REPOLCA, quien nos donó el material de prueba de la máquina. A Darwin Rojas, por su asesoramiento y su buena disposición al brindarnos sus conocimientos y reflexiones. A Salvatore Severo, por mecanizar todas las piezas y hacer lo que muchos talleres decían era imposible, hacer el tornillo y el barril. Prof.(a) Rosa María Morales de la Universidad Simón Bolívar, por su valiosa contribución de conocimientos, los cuales fueron importantes en la realización de este trabajo.

A nuestros grandes amigos: Betssy e Ibra por su gran apoyo en estos momentos y a lo largo de la carrera.

Héctor y Lizbethe

TABLA DE CONTENIDO

Dedicatoria	iii
Agradecimientos	iv
Tabla de Contenido	vi
Índice de Tablas	x
Índice de Figuras	xi
Abreviaturas	xiii
Resumen	xiv
Capítulo 1 - Introducción	1
1.1 Objetivo General	2
1.2 Objetivos Específicos	2
1.3 Alcances	2
1.4 Sumario	3
Capítulo 2 - Diseño y Cálculos	5
2.1 Bases del diseño	5
2.1.1 Bases de diseño constructivas	6
2.1.1.1 Generales	6
2.1.1.2 Tornillo	7
2.1.1.3 Barril	8
2.1.1.4 Molde	9
2.1.2 Bases de diseño termofísicas	9
2.1.2.1 Generales	9
2.1.2.2 Tornillo y barril	10
2.1.2.3 Molde	11
2.1.3 Modelos matemáticos.	11
2.1.3.1 Tornillo	11
2.2 Cálculos	14
2.2.1 Tabla de Datos	14

2.2.2 Procedimiento	16
2.2.2.1 Mecánica de fluidos y resistencia de materiales	16
2.2.2.2 Transferencia de Calor	19
2.2.3 Cálculos al detalle	20
Capítulo 3 - Planos y detalles.....	24
Capítulo 4 - Pruebas del equipo	57
4.1 Materiales y Equipos.....	57
4.2 Procedimiento	57
4.3 Resultados	58
Capítulo 5 - Polímeros	62
5.1 El plástico y sus inicios.....	62
5.2 Definición de Plástico y su Clasificación.....	64
5.3 Propiedades típicas de los materiales plásticos.....	65
5.3.1 Propiedades tensiles	65
5.3.2 Temperatura vítrea en los polímeros.....	66
5.3.3 Conductividad Térmica.....	68
5.4 Polietileno (PE).....	69
Capítulo 6 - La máquina de inyección	77
6.1 Breve Historia	77
6.2 Ventajas y Desventajas del Moldeo Por Inyección.....	80
6.2.1 Ventajas.....	80
6.2.2 Desventajas	81
6.3 Tipos de Máquinas	81
6.3.1 Disposición constructiva de las máquinas	82
6.3.1.1 Inyección y Cierre Horizontal.....	83
6.3.1.2 Inyección Horizontal y Cierre Vertical.....	83
6.3.1.3 Inyección y Cierre vertical.....	84
6.3.1.4 Inyección vertical y Cierre Horizontal.....	85
6.4 La Unidad de Inyección	85
6.4.1 Tornillo de plastificación	86

6.4.1.1 Sección de alimentación (SA).....	86
6.4.1.2 Sección de plastificación (SP).....	87
6.4.1.3 Sección de medición (SM).....	88
Capítulo 7 - Mecánica de Fluidos y Transferencia de Calor.....	89
7.1 Propiedades Fundamentales.....	89
7.1.1 Viscosidad.....	89
7.2 Fluidos No Newtonianos.....	91
7.2.1 Fluidos No-Newtonianos independientes del tiempo.....	91
7.2.1.1 Fluidos con esfuerzo de cedencia τ_y	91
7.2.2 Flujo laminar de fluidos no newtonianos.....	93
7.2.2.1 Flujo Laminar en tubos cilíndricos.....	94
7.2.2.2 Flujo anular.....	97
7.2.3 Flujo turbulento de fluidos No-Newtonianos.....	103
7.2.3.1 Relación Teórica Para la Resistencia al Flujo Turbulento en Tubos Lisos.....	104
7.2.3.2 Secciones anulares.....	106
7.3 Transferencia de Calor.....	107
7.3.1 Transferencia de Calor en la fundición de sólidos a líquidos no newtonianos.....	112
Capítulo 8 - Resistencia De Materiales y Elementos De Máquinas.....	115
8.1 Cilindro de Pared Gruesa.....	115
8.2 Cinemática del Tornillo de Plastificación.....	121
8.2.1 Relaciones Geométricas.....	122
8.2.2 Tasa de inyección.....	123
8.2.3 Velocidad del fluido en el tornillo.....	124
8.2.4 Tornillos de potencia.....	125
Capítulo 9 - Conclusiones y Recomendaciones.....	127
Capítulo 10 - Glosario.....	130
Capítulo 11 - Bibliografía.....	133
Capítulo 12 - Apéndices.....	135

12.1 Manual de Operación y Mantenimiento.....	136
12.1.1 Operación del equipo	136
12.1.2 Mantenimiento	137
12.1.2.1 General	137
12.1.2.2 Montaje	137
12.1.2.3 Intercambio de partes	138
12.2 Hoja de datos de seguridad del Polietileno	140

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 01.	Constantes	14
Tabla 02.	Propiedades físicas	14
Tabla 03.	Datos del Tornillo	15
Tabla 04.	Datos del Barril	15
Tabla 05.	Datos del Molde	16
Tabla 06.	Tabla de planos.	24
Tabla 07.	Resultados de los cálculos.....	58
Tabla 08.	Tiempos en alcanzar las temperaturas de operación.....	59
Tabla 09.	Temperatura de los componentes durante el proceso.....	59
Tabla 10.	Especificaciones de la máquina de inyección.	59
Tabla 11.	Desarrollo Histórico de los principales plásticos y productos elaborados. Descubrimientos, patentes y explotación comercial.....	63
Tabla 12.	Conductividad (k) térmica de algunos plásticos, metales y vidrio.....	68
Tabla 13.	Propiedades térmicas de los polímeros	69
Tabla 14.	Efecto sobre las propiedades del polietileno con el incremento de la densidad.....	70
Tabla 15.	Clasificación de los polietilenos de acuerdo al peso molecular	71
Tabla 16.	Efectos del aumento de peso molecular en el Polietileno	71
Tabla 17.	Características, propiedades y aplicaciones de los Polietilenos.....	74
Tabla 18.	Ficha técnica del polietileno de baja densidad (PEBD).....	75
Tabla 19.	Ficha técnica del polietileno de alta densidad (PEAD).....	76
Tabla 20.	Modelos que Relacionan τ_{xy} con d_u/d_y para fluidos con esfuerzo de cedencia.....	93
Tabla 21.	Relaciones geométricas del tornillo de inyección.....	122
Tabla 22.	Tasa de compresión para algunos plásticos.	122

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 01. Diagrama de cuerpo de la hélice en la sección de plastificación y medición.....	12
Figura 02. Diagrama de fuerzas en la primera Hélice del tornillo.....	18
Figura 03. Tornillo de inyección	46
Figura 04. Detalle de acoplamiento del Tornillo (izquierda). Tornillo visto a través del ducto de alimentación (centro) visto desde la punta del barril (derecha).....	46
Figura 05. Acople	46
Figura 06. Barril	47
Figura 07. Detalle del agujero para el alivio de presión y escape de gases.....	47
Figura 08. Detalles de rosca del barril.....	47
Figura 09. Resistencias	48
Figura 10. Molde	48
Figura 11. Detalles del molde.....	49
Figura 12. Extrusor (izquierda). Detalle del agujero para el pasador (derecha).....	49
Figura 13. Izquierda: detalle de la salida del molde. Derecha Molde acoplado al anillo.....	49
Figura 14. Base del barril	50
Figura 15. Detalle de la base del barril.....	50
Figura 16. Base del barril ensamblada.....	50
Figura 17. Tubo roscado de unión entre la “Y” y la base del barril	51
Figura 18. Ducto de alimentación.....	51
Figura 19. Anillo (izquierda) Y (derecha).....	51
Figura 20. Base superior (izquierda) e inferior (derecha).....	52
Figura 21. Detalle de de los agujeros del la base inferior.....	52
Figura 22. Barras	52
Figura 23. Detalle de ranura para anillo de retención.....	53

Figura 24. Rolineras SKF	53
Figura 25. Gráfica de la potencia del motor a distintas rpm.....	60
Figura 26. Curva tensión – deformación. Plásticos con características dúctiles.	65
Figura 27. Curva Tensión – Deformación. Plásticos con características frágiles	66
Figura 28. Volumen en función de la temperatura en los polímeros.....	67
Figura 29. Cadena del polietileno.....	72
Figura 30. Cadena molecular de los distintos Polietilenos.....	72
Figura 31. Valores típicos de contracción lineal y temperatura en el barril.....	76
Figura 32. Viscosidad en función de la temperatura de algunos polímeros.....	90
Figura 33. Esfuerzo de corte τ_{xy} vs tasa de corte d_u/d_y	92
Figura 34. Cortante actuando en un elemento cilíndrico con fluido de radio R.....	95
Figura 35. Flujo en estado laminar de fluidos plásticos en secciones anulares.....	97
Figura 36. Zonas de flujo en flujo turbulento.....	105
Figura 37. $\Upsilon(1/n, \bar{K})$ vs \bar{K}	107
Figura 38. Transferencia de calor hacia un fluido en estado laminar a través de un tubo de sección circular.....	107
Figura 39. Relación entre n' y β	109
Figura 40. Temperatura promedio reducida para transferencia de calor de flujo laminar con $q_G'=0,0$	110
Figura 41. Temperatura promedio reducida para transferencia de calor de flujo laminar con $q_G'=1,0$	110
Figura 42. Bloque sólido fundiéndose en una superficie plana caliente inclinada.....	112
Figura 43. Ampliación de la sección se la película fundida de la Figura 41.....	112
Figura 44. Diagrama de esfuerzos en cilindro de pared gruesa.....	115
Figura 45. Movimiento del fluido en el tornillo.....	124
Figura 46. Parte de un tornillo de transmisión de fuerza o impulso.....	126

ABREVIATURAS

Base del Barril	BB
Base del Motor	BM
Base Inferior	BI
Base Superior	BS
Ducto de alimentación	DA
Polietileno de Alta Densidad Alta Peso Molecular	PED-APM
Polietileno de Alta Densidad. (en inglés)	PEAD ó PEHD
Polietileno de Baja Densidad	PEBD ó LDPE
Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular	UHMWPE
Polietileno Lineal de Baja Densidad.	PELBD ó LLDPE
Sección de alimentación del tornillo	SA
Sección de medición del tornillo	SM
Sección de plastificación del tornillo	SP
Unidad Elemental de Inyección de Plásticos primera versión	UEI-HL V1

Ordóñez M. Héctor A. y Saade C. Lizbethe A.

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBA DE UN MODELO A
ESCALA PARA SIMULAR LA FABRICACIÓN DE PIEZAS DE
PLÁSTICO POR INYECCIÓN.**

**Tutor académico: Ing. Prof. Guillermo Flores. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad
de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2003, n° pág. 143**

Inyección, Polímeros, Polietileno, Diseño, Fluido No Newtoniano

RESUMEN

El trabajo especial de grado realizado pretende ser un aporte a la Escuela de Ingeniería Mecánica para incrementar las investigaciones relacionadas con este campo, permitiendo disponer de un equipo elemental llamada UEI-HL V1 donde se puedan realizar ensayos con diferentes plásticos reciclados nacionales, pastas y otros materiales susceptibles a se plastificados y medir algunas de las variables involucradas en el proceso de transformación de la materia prima al producto final. Dicho trabajo tiene como eje fundamental el diseño de la unidad de inyección, para ello se hace énfasis en los aspectos de cálculos, modelos matemáticos y en el proceso que se utilizó en el diseño y que en su fabricación se maximizó la utilización de partes y/o piezas existentes en el parque metal-mecánico nacional. Fue necesario realizar cálculos y las mejores aproximaciones a los sucesos que realmente ocurren en el proceso de fundición e inyección de plásticos cuya publicación se encuentra dispersa y a veces no se encuentran publicados. Por tal razón se incluye parte de la investigación bibliográfica y se exponen las suposiciones para poder modelarlos y obtener los valores de diseño tales como torque y potencia. También se presentan una serie de resultados medidos de manera experimental al poner en marcha la unidad como son temperaturas de trabajo y caudal de inyección.

CAPÍTULO 1 - INTRODUCCIÓN

La elaboración de productos a partir de materias termoplásticas de comportamiento viscoelástico, ofrece amplias posibilidades de producción económica de una vasta gama de productos de consumo masivo.

Las principales ventajas de estos procesos radican en el ahorro de material, planta física y tiempo de producción; a pesar de los costos de instalaciones, moldes y producción, el proceso ofrece considerables ventajas económicas.

Este trabajo pretende ser un aporte a la Escuela de Ingeniería Mecánica para incrementar las investigaciones relacionadas en este campo, permitiendo disponer de un equipo elemental donde se puedan realizar pruebas con plásticos reciclados nacionales, pastas y materiales susceptibles a ser plastificados y medir algunas de las variables involucradas en el proceso de transformación de la materia prima al producto final.

En la actualidad existe una gran diversidad de máquinas de inyección para la fabricación de piezas de plástico a gran escala, pero estas máquinas son de uso industrial y son muy costosas. Por tal motivo se planteó la construcción de una unidad elemental para elaborar pequeñas piezas de plástico reciclado en el país para que en un futuro se puedan plantear nuevas propuestas de trabajos de investigación en el área.

El trabajo que se presenta a continuación tiene como eje fundamental el diseño de la unidad de inyección, para ello se hace énfasis en los aspectos de cálculos, modelos matemáticos y el procedimiento del diseño. Se agregó una extensa investigación bibliográfica (Capítulo 2 - al Capítulo 8 -) que permiten obtener la mínima información necesaria para sustentar todo el diseño, construcción y prueba de dicho modelo en esta su primera versión.

Dicho equipo es capaz de producir un cilindro hueco de plástico de pequeña longitud, a partir de la utilización de material granulado proveniente de los distribuidores de plásticos reciclados.

La fabricación se trató en lo posible maximizar la utilización de partes y/o piezas existentes en el parque metal-mecánico nacional.

1.1 Objetivo General

Diseño, construcción y puesta en marcha de una unidad elemental de dosificación, plastificación, inyección y extrusión de materiales termoplásticos.

1.2 Objetivos Específicos

- A. Diseño y construcción unidad inyectora (tolva, cilindro de plastificación, inyector).
- B. Diseñar el sistema de control.
- C. Seleccionar el motor de acuerdo con su eficiencia, dimensiones, peso, potencia.
- D. Diseño y construcción del sistema de transmisión de potencia, desde el motor a los distintos elementos.
- E. Realizar un estudio ergonómico.
- F. Realizar los planos de la unidad.
- G. Diseñar el manual de higiene, operación y mantenimiento de la unidad.
- H. Construir y probar la máquina.

1.3 Alcances

- a. Diseño y construcción del dispositivo de aportación y dosificación de material.

- b. Diseño y construcción de los elementos mecánicos para la plastificación del material.
- c. Diseño y construcción del inyector.
- d. Cálculo de transferencia de calor requerido en la fase de precalentamiento, plastificación y enfriamiento.
- e. Selección de los calentadores.
- f. Búsqueda por catálogo para la selección de los motores existentes en el mercado.
- g. Conceptualización de la transmisión de potencia y control.
- h. Diseño y construcción de la estructura de soporte.
- i. Realizar planos del conjunto.
- j. Realizar planos al detalle de cada uno de los elementos de la máquina.
- k. Diseño y construcción de la boquilla de prueba.
- l. Elaboración del instructivo de operación y mantenimiento.

1.4 Sumario

Capítulo 2 - Diseño y Cálculos: En este capítulo se presentan la metodología para realizar los cálculos necesarios, así como también las suposiciones necesarias para su simplificación y solucionar, hasta cierto punto, el problema de la falta de publicaciones presentadas al público que expliquen detalladamente los resultados en cuanto a estudio de los polímeros.

Capítulo 3 - Planos y detalles: En este capítulo se describe las dimensiones y las relaciones entre una pieza y otra. Se encontrarán los planos detallados de toda la unidad así como algunas fotos para su mejor visualización.

Capítulo 4 - Pruebas del equipo: en este capítulo se hace una breve descripción de las pruebas que se le hicieron al equipo para comprobar su funcionamiento y los cálculos teóricos.

Capítulo 5 - Polímeros: En este capítulo se hace una breve descripción de los plásticos, principalmente el polietileno que fue el polímero de trabajo para las pruebas.

Capítulo 6 - La máquina de inyección: aquí se hace una breve descripción de la máquina de inyección, su historia, las unidades que la conforman, sus disposiciones constructivas más comunes, se hará mención de los aspectos que hay que tomar en cuenta para el diseño de este tipo de máquinas para de esta manera poder entender el funcionamiento y papel que desempeña esta y las unidades que la conforman.

Capítulo 7 - Mecánica de Fluidos y Transferencia de Calor: El presente capítulo trata de explicar las relaciones aplicadas a la ingeniería del flujo por geometrías “normales”. Se tratará a fluidos independientes del tiempo con un esfuerzo cortante conocido, transferencia de calor en ductos de sección circular y anular, haciéndose referencia a las ecuaciones necesarias para ser aplicadas en los cálculos.

Capítulo 8 - Resistencia De Materiales y Elementos De Máquinas: En este capítulo de establecen las bases teóricas para el cálculo de resistencia de los materiales a utilizar en el diseño de las partes mecánicas, ya sea para corroborar espesores, o seleccionar elementos como rodamientos, motor, etc.

Capítulo 9 - Conclusiones y Recomendaciones: en este capítulo incluye un listado de puntos de mucho interés para próximos estudios relacionados con este tema.

Capítulo 10 - Glosario: definiciones de los términos más importantes.

Capítulo 11 - Bibliografía: ficha de cada publicación utilizada en este trabajo.

Capítulo 12 - Apéndices: en este capítulo están la hoja de seguridad del polietileno y el manual de operación y mantenimiento del equipo.

CAPÍTULO 2 - DISEÑO Y CÁLCULOS

La información necesaria para realizar cálculos y las mejores aproximaciones a los sucesos que realmente ocurren en el proceso de fundición e inyección de plásticos no se encuentran publicados lo que hace más difícil la obtención de información sobre métodos de cálculos que simulen con gran exactitud estos procesos, para ello se realizaron una serie de suposiciones para poder modelarlos y obtener los valores de diseño tales como torque y potencia.

En este capítulo se presentarán la metodología para realizar los cálculos necesarios, así como también las suposiciones necesarias para simplificar los cálculos y solucionar, hasta cierto punto, el problema de la falta de publicaciones que expliquen detalladamente los resultados en cuanto a estudio de los polímeros.

2.1 Bases del diseño

El corazón de esta máquina es el tornillo, de este depende el funcionamiento y rendimiento de esta, así como también depende el tipo de polímero que se puede procesar. El siguiente es el barril, el cual ha de resistir la presión de trabajo de la máquina, la cual en máquinas industriales va de 9 toneladas hasta 300 toneladas de fuerza de cierre del molde, además de transferir el calor necesario desde las resistencias a su alrededor para fundir la mezcla. Por último en este trabajo se planteará las ecuaciones para un molde de prueba que al igual que el tornillo y el barril debe ser resistente a la abrasión y a la corrosión.

Debido a que la potencia y presión que manejará esta máquina son bastante bajas no será necesario un cálculo detallado de uniones atornilladas, espesores de placas o barras. Y a que las revoluciones del tornillo son bastante bajas no se requirió de un estudio de vibraciones de la máquina.

Algunos de los parámetros escogidos para el diseño están fundamentado en el marco teórico contenidos en los capítulos Capítulo 5 - al Capítulo 8 - de este trabajo. Otros fueron tomados para simplificar construcción, minimizar costos y maximizar la factibilidad de construcción de las partes.

2.1.1 Bases de diseño constructivas

2.1.1.1 Generales

- 1) La potencia del motor estará alrededor de $\frac{1}{2}$ HP (372W) y no llegará a $\frac{5}{8}$ HP (466W)
- 2) Por motivos de mantenimiento y reemplazo la unidad fue diseñada para ser construida de manera tal que las piezas que sufren mayor desgaste puedan ser reemplazadas fácilmente, por lo que forman parte separada de las demás piezas.
- 3) Se utilizaron el mayor número posible de partes estándares para minimizar el costo de fabricación y facilitar el reemplazo de piezas sin necesidad de pedidos especiales o maquinados.
- 4) Se utilizaron el menor número de uniones permanentes, como soldaduras o remaches, para facilitar el montaje, desmontaje y mantenimiento de la unidad.
- 5) La base esta formada por cuatro placas: la placa donde ha de montarse el motor la cual puede ser cambiada fácilmente en caso de utilizar un motor diferente al escogido, dos placas, base superior e inferior del tornillo, donde estarán los cojinetes de apoyo del tornillo, y la base donde estará sujeto el barril. Cada una de estas se puede desmontar independiente de la otra. Las cuatro están unidas por cuatro barras para darle estabilidad y resistencia.
- 6) La base del barril estará atornillada a la base inferior del tornillo con un aislante entre ellas para minimizar la conducción térmica y eléctrica desde el barril.
- 7) La disposición de la máquina será vertical, aunque eventualmente puede trabajar horizontalmente sin ningún problema.
- 8) El factor de seguridad para la selección de la potencia será de 1,5.

- 9) El suministro de energía para el equipo es de la línea eléctrica residencial de 120V y 25A para de esta manera evitar el uso de líneas de tensión especiales como es el caso de la mayoría de máquinas industriales.

2.1.1.2 Tornillo

- 10) El material del cual debe estar construido el tornillo ha de ser de un acero resistente al desgaste abrasivo y la corrosión, por ello se fabricó con acero Níquel Cromo (AISI 4143).
- 11) El paso del tornillo será igual al diámetro, para poder obtener el ángulo de hélice recomendado.¹
- 12) La profundidad de hélice en la sección de alimentación (SA) se tomará de 6mm para que pueda entrar la materia prima. No se tomará más profundo debido a que el núcleo sería muy esbelto y podría fallar por torsión.
- 13) La profundidad de hélice en la sección de medición (SM) será de 3mm para así conservar la relación de compresión recomendada para el PEBD.²
- 14) La holgura radial se tomará de 0,5mm por razones constructivas y de precisión en la fabricación.
- 15) La relación L/D se tomará de 16, la cual representa un valor bajo para las máquinas actuales. Este valor se considera aceptable ya que las presiones que manejará la máquina no son muy elevadas.
- 16) No será necesario utilizar una válvula anti-retorno en la punta para evitar el regreso de material ya que las presiones de trabajo son muy bajas. En lugar de esto el tornillo terminará en un cono de 30° que es el ángulo común para este tipo de tornillos.
- 17) El giro del tornillo se realiza en sentido contrario a las roscas de sujeción del barril para evitar que este gire y se salga.

¹ Tabla 21 Pág. 122

² Tabla 22 Pág. 122

- 18) La sección de plastificación (SP) será de sección cónica que es la recomendada para el polímero de trabajo que utilizamos, polietileno, y además la gran mayoría de los polímeros pueden ser muy bien trabajados con esta geometría.

2.1.1.3 Barril

- 19) El barril se fabricará en varias partes para facilitar el intercambio de piezas que más sufren desgaste.
- 20) Las dimensiones del barril se tomarán en base a tuberías SCH 40 de 1" y de aproximadamente 30cm de longitud.
- 21) Para su fabricación se maquinó un tubo mecánico (AISI 1020) hasta llevarlo a las dimensiones de una tubería de 1". No se utilizó tubería comercial SCH 40 ya que estas no se deforman uniformemente por cambios de temperatura y podría ocasionar problemas de choque con el tornillo y ser rayados por este.
- 22) El suministro del material al barril se realiza por medio de una unión "Y" para tuberías de 1".
- 23) La unión entre el barril y la "Y" será por medio de rosca. La unión entre la "Y" y la placa base del barril se realiza mediante un tubo roscado que se enrosca en la "Y" y en la placa y para evitar que esta gire debido a que no se produce un apriete rígido se dispuso de un punto de soldadura para evitar el giro de la unión roscada.
- 24) En la sección de alimentación se supondrá resistencia del plástico a pasar por la "Y" por lo que el tornillo lo "cortará" a lo largo de la entrada.
- 25) Al final de SP se dispuso de una abertura que permitirá el escape de vapores y aire a presión que se produce en esta sección al fundir el polímero y que no puedan salir hacia arriba.
- 26) El barril será calentado por tres resistencias de banda en lugar de cuatro, ya que las dos bandas de la SP manejan la misma temperatura y para minimizar los costos de construcción se sustituyeron por una de longitud igual a la suma de las anteriores.

- 27) En caso extremo se presentará roce entre el barril y el tornillo en la última hélice de este debido a alguna desalineación producto de la reacción del tornillo al empuje del fluido hacia delante.
- 28) El barril tendrá un recubrimiento de aislante térmico por razones de seguridad.
- 29) En el aislante se realizaron cuatro perforaciones para poder introducir instrumentos de medición de temperatura.

2.1.1.4 Molde

- 30) La caída de presión a la entrada del extrusor se estimará como un 10% de la caída de presión en el cuerpo del extrusor, debido a que no conseguimos datos analíticos ni experimentales que modelen el comportamiento de un fluido al pasar de una sección circular a una anular.
- 31) La unión entre el molde y el barril se hizo mediante un anillo roscado para tuberías SCH 40 de 1".

2.1.2 Bases de diseño termofísicas

Se tomaron en cuenta las siguientes suposiciones:

2.1.2.1 Generales

- 32) La máquina será capaz de producir por lo menos un tubo de 100mm de largo, diámetro 17mm y un espesor de 2mm en un tiempo de 15 segundos desde que el polímero empieza a salir por el molde.
- 33) Se trabajará el plástico en estado fundido como plástico de Bingham, con un $\tau_y=0$, y así poderlo aproximar a un fluido de comportamiento Newtoniano.³
- 34) Como la viscosidad del fluido plástico no es lineal con respecto a la temperatura sino semi-logarítmica, se tomará como temperatura de trabajo para la viscosidad $T=120^\circ\text{C}^4$ ya que la temperatura de fusión del PE es de 110°C^5 .

³ Pág. 93

- 35) La temperatura del fluido es constante en la sección de entrada de cada sección.⁸
- 36) Conducción térmica axial despreciable.⁸
- 37) Proceso isotérmico.⁸
- 38) A falta de datos se tomará los siguientes valores: índice de consistencia del fluido $K=\eta^6$, factor de flujo de arrastre (F_d) y el factor de flujo de empuje (F_p) como la unidad (1)
- 39) El tapón presentado en el flujo es tan pequeño que se desprecia.

2.1.2.2 Tornillo y barril

- 40) Se tomará los siguientes estados del plástico en las secciones del tornillo: sólido en la alimentación, 50% sólido y 50% líquido con aire en la plastificación, líquido libre de aire y ligeramente comprimido en la sección de medición.
- 41) Se despreciará el efecto del aire y de los vapores producto de la fusión del plástico para los efectos de los cálculos de transferencia de calor
- 42) Sólo se tomará en cuenta el aire para el aumento de presión por efecto de la disminución de volumen y aumento de temperatura, no se tomará en cuenta el efecto de los vapores debido a que no se encontraron datos acerca de estos, en cuanto a composición química y volumen.
- 43) Las fuerzas producidas por la fricción seca son despreciables respecto a las fuerzas producidas por la fricción viscosa entre el plástico y el metal para el caso de la SP.
- 44) El régimen en las secciones de plastificación y medición se tomará como turbulento debido al movimiento inducido por las hélices del tornillo.⁷
- 45) Flujo anular en el barril en las secciones de Plastificación y Medición.

⁴ Figura 34 - Viscosidad en función de la temperatura de algunos polímeros Pág. 90

⁵ Tabla 17 Pág. 74

⁶ Debido a suposición 32)

⁷ Figura 47 Pág. 124

- 46) Transferencia de calor según el modelo de conducción – convección en todas las secciones.
- 47) La fuente de generación de calor, se mantiene a una temperatura relativamente constante de $150\pm 5^{\circ}\text{C}$ en la sección de Alimentación, $180\pm 5^{\circ}\text{C}$ en la sección de Plastificación, y $170\pm 5^{\circ}\text{C}$ en la sección de Medición.
- 48) La temperatura de pared del tubo es constante a lo largo del tubo.⁸
- 49) Calor producido por fricción viscosa despreciable, generación de calor interna $g_G'=0$.⁸
- 50) El espesor de fundición se tomó como el espesor de canal ($H=w$)

2.1.2.3 Molde

- 51) Perfil de velocidad laminar totalmente desarrollado en el extrusor.⁸
- 52) Flujo anular laminar en el extrusor.⁸

2.1.3 Modelos matemáticos.

2.1.3.1 Tornillo

Los modelos aquí presentados desde el punto de vista constructivo del tornillo han sido adaptaciones de algunas teorías aplicadas en diseño de tornillos de potencia.

Para nuestro caso en donde el tornillo empuja o bombea al fluido de viscosidad η , se tiene el siguiente diagrama de cuerpo libre similar al de un tornillo de potencia que sube una carga:

⁸ Capítulo 7 - sección 7.3 Transferencia de Calor página 108

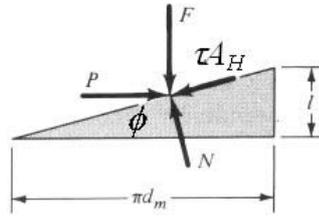


Figura 01. Diagrama de cuerpo de la hélice en la sección de plastificación y medición

Donde τA_H es la fuerza sobre el tornillo en la sección debido al esfuerzo cortante producido por el fluido. El equilibrio de fuerzas queda:

$$\begin{aligned} \Sigma F_H &= P - N \sin(\phi) - \tau A_H \cos(\phi) = 0 \\ \Sigma F_V &= F + \tau A_H \sin(\phi) - N \cos(\phi) = 0 \end{aligned} \tag{Ec 01}$$

Despejando igualando ambas ecuaciones y despejando P se tiene:

$$P = \frac{1 \sin(2\phi)}{2 \cos(\phi)} \tau A_H + F \tan(\phi) \tag{Ec 02}$$

Para hacer girar el tornillo:

$$P = \tau A_L \tag{Ec 03}$$

La fuerza total será:

$$P = \frac{1 \sin(2\phi)}{2 \cos(\phi)} \tau A_H + F \tan(\phi) + \tau A_H \tag{Ec 04}$$

Donde A_L es el área del tornillo en la sección que no está bombeando al fluido pero que está en contacto con éste.

Por otro lado se sabe que:

$$T = P \frac{d_M}{2}; F = \Delta p_{od} A_H; Pot = T \omega_1; A_H = n_{hilos} \pi d_M h \tag{Ec 05}$$

Donde L_S es la longitud de la sección y h es la altura de la hélice.

El cortante producido entre dos cilindros concéntricos donde el exterior es fijo y el interior gira a ω_1 es:

$$\tau = \frac{2\eta D^2 \omega_1}{D^2 + D_s^2} \quad (\text{Ec 06})$$

Combinando (Ec 05), (Ec 06) y (Ec 06) nos queda para la sección de medición:

$$Pot = 2\pi d_M^2 \omega \left[\frac{\eta D^2 \omega}{D^2 - D_s^2} \left(n_{hilos} h \frac{\sin(2\phi)}{\cos(\phi)} + \frac{L}{2} + \frac{1}{4} \sqrt{d_M^2 + \left(\frac{d_M}{0,5359} \right)^2} \right) + \Delta p n_{hilos} h \tan(\phi) \right] \quad (\text{Ec 07})$$

El término dentro de la raíz es debido a la fricción en el cono del tornillo. Para la sección de plastificación:

$$Pot = 2\pi d_M^2 \omega \left[\frac{\eta D^2 \omega}{D^2 - D_s^2} \left(n_{hilos} h \frac{\sin(2\phi)}{\cos(\phi)} + \frac{L}{2} \right) + \Delta p n_{hilos} h \tan(\phi) \right] \quad (\text{Ec 08})$$

Ahora bien se necesitan los datos de viscosidad a la temperatura de fusión esta se obtiene sabiendo que al enfriarse el polímero sufre una contracción del 3% por lo tanto:

$$\rho_{120^\circ\text{C}} = \frac{\rho}{0,97} \quad (\text{Ec 09})$$

Para el cálculo de Δp se utilizó el modelo de flujo anular turbulento tomando como R_1 al radio del núcleo del tornillo en cada sección por separado y como R_2 al radio interno del barril.

2.2 Cálculos

2.2.1 Tabla de Datos

Tabla 01. Constantes

Parámetro	Símbolo	Magnitud	
Gravedad	g	9,81 m/s ²	
Presión atmosférica	p_0	1 atm	101.325 Pa
Temperatura atmosférica	T_0	25°C	298,15 K

Tabla 02. Propiedades físicas

Parámetro	Símbolo	Magnitud	
Coefficiente de fricción acero - plástico	μ	0,9	
Resistencia del acero	S_u	15.000 psi	103.421.355 Pa
Esfuerzo de corte para PEBD ⁹	S_{uPE}	16 N/mm ²	1,6x10 ⁷ N/m ²
Densidad del plástico ¹⁰	ρ_{PE}	920 Kg/m ³	
Expansión del plástico al fundirse	ΔV_{PE}	3%	
Índice de fluidez del PEBD	n	0,9	
Conductividad Térmica del Acero al carbono ¹¹	K	36 W/m°C	
Acero Cromo Niquel ¹¹		17 W/m°C	
PE ¹²		6x10 ⁻⁴ cal/cm.s°C	0,2512W/m°C
Calor Específico del PE ¹⁰	C_{pPE}	2,30 KJ/Kg°C	
Calor latente de fusión del PE ¹⁰	λ	209 KJ/Kg	
Calor total para el proceso de fundición del PE ¹⁰	q_T	720 KJ/Kg	
Temperatura del fusión del PE ¹⁰	T_F	110°C	383,15 K

⁹ Tabla 18 Pág. 75

¹⁰ Tabla 13 Pág. 69

¹¹ Holman (02). Transferencia de Calor. Tabla A.2 Pág.438

¹² Tabla 12 Pág. 68

Tabla 03. Datos del Tornillo

Material: Acero 4140

Parámetro	Símbolo	Magnitud	
Paso del tornillo	p	25,4 mm	0,0254 m
Ancho de Hélice	S	4 mm	0,004 m
Profundidad de hélice en SA	h_F	6 mm	0,006 m
Profundidad de hélice en SM	h_M	3 mm	0,003 m
Longitud de SA	L_{SA}	146,70 mm	0,1467 m
Longitud de SP	L_{SP}	166,26 mm	0,16626 m
Longitud de SM	L_{SM}	90 mm	0,09 m
Temperatura en SA ¹³	T_{SA}	150 °C	393,15 K
Temperatura en SP ¹³	T_{SP}	180 °C	453,15 K
Temperatura en SM ¹³	T_{SM}	170 °C	393,15 K
Holgura radial	δ	0,5 mm	0.0005 m
Giro del tornillo	N	25 rpm	0,42 rps
Ángulo de Hélice	ϕ	17,8	
Número de hélices paralelas	n_H	1	
Factor de flujo de arrastre	F_d	1	
Factor de flujo a presión	F_p	1	

Tabla 04. Datos del Barril

Material: Acero 1020

Parámetro	Símbolo	Magnitud	
Diámetro Externo	D_{ext}	33,55 mm	0,03355 m
Diámetro interno	D	26 mm	0,026 mm
Longitud	L_B	350 mm	0,35 m

¹³ Figura 33 Pág. 76

Tabla 05. Datos del Molde

Material: Acero 4140

Parámetro	Símbolo		Magnitud
Diámetro externo	D_{ext}	33,55 mm	0,03355 m
Diámetro interno	D_{int}	17 mm	0,017 mm
Diámetro del extrusor	D_{ex}	13 mm	0,013 m
Longitud del extrusor	L_{ex}	100 mm	0,1 m

2.2.2 Procedimiento

a.) Primero se estimó el caudal de diseño (Base de diseño #32)) para ello se calculó el caudal como sigue:

$$Q = \frac{\pi}{4} \frac{(D_{int}^2 - D_{ex}^2) 0,1}{10s} \quad (\text{Ec } 10)$$

b.) Con este flujo se estimó mediante la ecuación (Ec 51) la caída de presión en la sección de medición.

c.) Con Q y Δp se estimó por medio de la ecuación (Ec 96), las rpm necesarias del tornillo para manejar el caudal inicial de diseño.

d.) Se observó que las rpm eran muy bajas y se decidió por un valor más aceptable, 25 rpm

2.2.2.1 Mecánica de fluidos y resistencia de materiales

Se calcula la potencia requerida para realizar el trabajo mecánico en cada sección por separado.

e.) La potencia en la sección de alimentación corresponde a la de un tornillo de potencia que sube una carga debido a que las fuerzas que se presentan van en contra del movimiento.

f.) La fuerza que debe vencer el tornillo corresponden a los esfuerzo de corte del plástico al pasar por la entrada. (Base de diseño #41))

g.) En la sección de plastificación se presentan dos fluidos:

g.a. Aire: el aire se comprime según la relación de compresión, lo que produce un aumento de presión que se traduce en una fuerza que se opone al movimiento del material por acción del tornillo. Este aumento de presión se calcula por la ley universal de gases.

$$\frac{P_1}{P_0} = \frac{T_1 V_0}{T_0 V_1} \quad (\text{Ec 11})$$

g.b. Sustituyendo la tasa de compresión (Tabla 21) en la ecuación anterior queda:

$$P_1 = \frac{T_1 h_F}{T_0 h_M} P_0 \quad (\text{Ec 12})$$

g.c. Respecto al plástico, debido a 43), se tomarán en cuenta sólo las fuerzas viscosas, obteniendo la potencia según la ecuación (Ec 08). Los datos para esta ecuación se calculan según las siguientes fórmulas:

$$\varphi = \arctan\left(\frac{p}{\pi d_m}\right) \quad (\text{ver Figura 01}) \quad (\text{Ec 13})$$

$$d_m = \frac{D_s}{D_s - h_M} \quad (\text{Ec 14})$$

$$D_s = D - 2\delta \quad (\text{Ec 15})$$

$$n_{\text{hilos}} = \frac{L_{SP}}{p} \quad (\text{Ec 16})$$

g.d. La caída de presión se estimó según la ecuación (Ec 59) y los datos necesarios para resolver esta ecuación fueron tomados de las ecuaciones (Ec 102), (Ec 58), (Ec 57) y (Ec 56), el valor de Υ se obtiene de la Figura 39.

- g.e. Para obtener la densidad se calculará según la expansión del plástico al fundirse.
- g.f. Con esta presión más la presión producida por el aire se obtiene la fuerza que se opone al empuje del tornillo calculando así la potencia para la sección de plastificación.
- h.) En la sección de medición se debe vencer la caída de presión en esta sección más la presión que se requiere para empujar el fluido por el molde. El valor de caída de presión de esta sección se obtuvo repitiendo los pasos g.d y g.e para esta sección.
- i.) Para calcular la caída de presión en el molde se requiere saber el caudal que envía el tornillo hacia él, este se estima según la ecuación (Ec 96). Los valores de α y β se obtienen respectivamente de las ecuaciones (Ec 97) y (Ec 98).
- j.) La caída de presión que presenta el fluido al pasar por el cuerpo del extrusor se estimó según la ecuación (Ec 51) utilizando el caudal obtenido en i.).
 - j.a. La caída de presión a la entrada del extrusor se estimó según la suposición 30).
- k.) La potencia requerida por esta sección se estimó según la ecuación (Ec 07)
- l.) Las fuerzas debido a la suposición 27) se estiman de la siguiente manera:
 - l.a. La fuerza que empuja al tornillo es la componente Horizontal de la neta sobre la hélice:

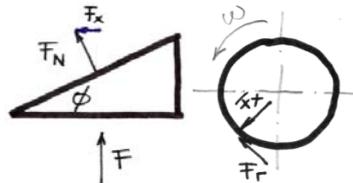


Figura 02. Diagrama de fuerzas en la primera Hélice del tornillo

- l.b. La fuerza es la presión de empuje del fluido para hacerlo pasar por el molde por el área de flujo:

$$F = p \frac{\pi}{4} (D_s^2 - D_N^2) \tag{Ec 17}$$

$$F_x = \tan(\phi)F \tag{Ec 18}$$

$$F_r = \mu F_x \quad (\text{Ec 19})$$

l.c. La potencia será:

$$Pot = F_r \frac{D_s}{2} \omega \quad (\text{Ec 20})$$

m.) La potencia total será la suma de todas estas potencias multiplicado por el factor de seguridad de 1,5.

n.) Se comprobó si el barril resistía la presión mediante la ecuación (Ec 91) utilizando la presión máxima dentro del barril.

2.2.2.2 Transferencia de Calor

o.) Se calculo la temperatura de pared promedio:

$$T_w = \frac{T_{SA} + T_{SP} + T_{SM}}{3} \quad (\text{Ec 21})$$

p.) Se estimo el espesor de fundición:

$$H = \frac{L_{SA} h_F + L_{SP} \left(\frac{h_F + h_M}{2} \right) + L_{SM} h_M}{L_{SA} + L_{SP} + L_{SM}} \quad (\text{Ec 22})$$

q.) El calor total transferido para efectos del cálculo se tomó como el calor total para el proceso menos el calor necesario para llevar el plástico desde la temperatura ambiente a la temperatura de fundición:

$$q_{Hw} = q_T - C_p (T_m - T_0) \quad (\text{Ec 23})$$

r.) De la ecuación (Ec 69) se obtuvo \bar{T}_L .

s.) De la ecuación (Ec 71) se obtuvo ΔT_{log} .

t.) Con estos dos valores se estimó el coeficiente de transferencia de calor medio con la ecuación (Ec 70).

u.) Con estos datos se calculó el flujo másico de la ecuación (Ec 74).

v.) Se comparó este valor con el valor de caudal inyectado del paso i.) y para igualarlos se aumentó las rpm para obtener la máxima rpm para obtener este caudal y la máxima que no sobrepase la potencia del motor seleccionado.

2.2.3 Cálculos al detalle

Concepto	Simb	Ecuación	Resultado	Nº
1 Caudal inicial de diseño	Q	$Q = \frac{\pi (D_{int}^2 - D_{ex}^2) 0,1}{10s}$	$6,28 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{s}$	(Ec 10)
2 Caída de presión en SM	Δp_{SM}	$\Delta p = \frac{Q 8 \mu L}{\pi \left[(R_2^4 - R_1^4) - \frac{(R_2^2 - R_1^2)^2}{\ln R_2 / R_1} \right]}$	0,64 Pa	(Ec 51)
3 Factor de geometría α	α	$\alpha = \frac{\pi}{2} n D_s b h_M \cos^2(\phi) F_d$	$3,804 \times 10^{-6}$	(Ec 97)
4 Factor de geometría β	β	$\beta = \frac{b h_M^3 \sin \phi \cos \phi}{12 L_{SM}} F_P$	$7,2518 \times 10^{-10}$	(Ec 98)
5 rpm para caudal inicial de diseño	n	$n = \frac{Q}{\alpha} + \frac{\beta \Delta p}{\alpha \eta}$	15 rpm	(Ec 96)
6 Fuerza a vencer en SA	F	$S_{uPE} \cdot A$	16 N	
7 Potencia en SA	Pot_{SA}	$Pot = \omega_1 \frac{F \cdot d_m}{2} \left(\frac{\pi \cdot \mu \cdot d_m + l}{\pi \cdot d_m - \mu \cdot l} \right)$	2,30 W	(Ec 104)
8 Aumento de presión del aire en SP	P_1	$P_1 = \frac{T_1 h_F}{T_0 h_M} P_0$	514679,34 Pa	(Ec 12)

	Concepto	Simb	Ecuación	Resultado	Nº
9	Ángulo de Hélice	φ	$\varphi = \arctan\left(\frac{p}{\pi d_m}\right)$	17,92° (0,3128 rad)	(Ec 13)
10	Diámetro del tornillo	D_s	$D_s = D - 2\delta$	0,025 m	(Ec 15)
11	Diámetro medio en SP	D_{mSP}	$d_m = \frac{D_s}{D_s - h_M}$	0,019 m	(Ec 14)
12	Número de hilos en SP	n_{hilosP}	$n_{hilos} = \frac{L_{SP}}{p}$	7	(Ec 16)
13	Velocidad resultante	V	$V = \sqrt{(\pi D \omega)^2 + (p \omega)^2}$	0,009842 m/s	(Ec 102)
14	Flujo Másico adimensional	Ω_p	$\Omega_p = \frac{n \Upsilon (1 - \bar{K})^{(2n+1)/n}}{2n + 1}$	0,002126	(Ec 58)
15	Relación de radios	\bar{K}	R_1/R_2	0,6	
16	Reynolds	$Re_{n,K}$	$Re_{(n,\bar{K})} = \frac{(2R_2)^n V^{2-n} \rho (1 + \bar{K})}{K 2^{-n-3} (1 - \bar{K}^2)^{n-1}} \Omega_p^n$	4,969x10 ⁻⁵	(Ec 57)
17	Factor de fricción	f	$f = \frac{0,0791}{Re_{(n,K)}^{0,25}}$	0,9421429	(Ec 56)
18	Caída de presión en SP	Δp_{SP}	$\Delta p = \frac{f L (1 + \bar{K}) \rho V^2}{R_2 (1 - \bar{K}^2)}$	2,88 Pa	(Ec 59)
19	Potencia en SP	Pot_{SP}	$Pot = 2\pi d_M^2 \omega \left[\frac{\eta D^2 \omega}{D^2 - D_s^2} \left(\frac{n_{hilos} h \frac{\sin(2\phi)}{\cos(\phi)}}{+ \frac{L}{2}} \right) + \Delta p n_{hilos} h \tan(\phi) \right]$	5,86 W	(Ec 08)
20	Caudal real	Q	$Q = \alpha N - \frac{\beta \Delta p}{\eta}$	1,585x10 ⁻⁶ m ³ /s	(Ec 96)
21	Caída de presión en SM	Δp_{SM}	$\Delta p = \frac{Q 8 \mu L}{\pi \left[(R_2^4 - R_1^4) - \frac{(R_2^2 - R_1^2)^2}{\ln R_2 / R_1} \right]}$	1,56 Pa	(Ec 51)

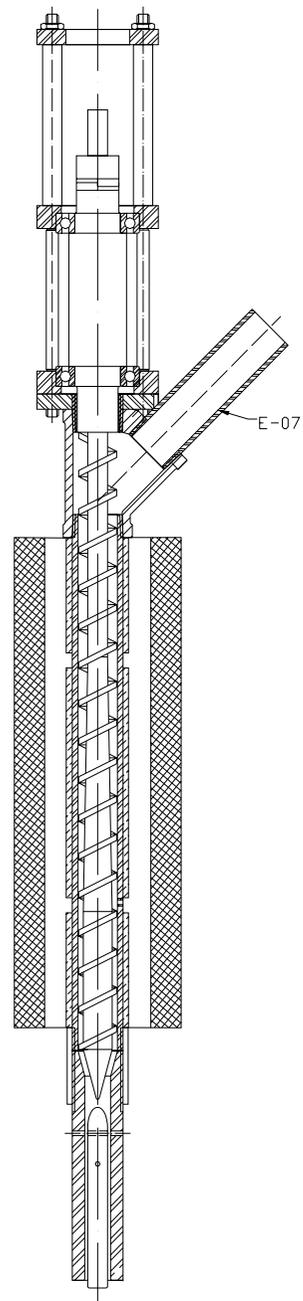
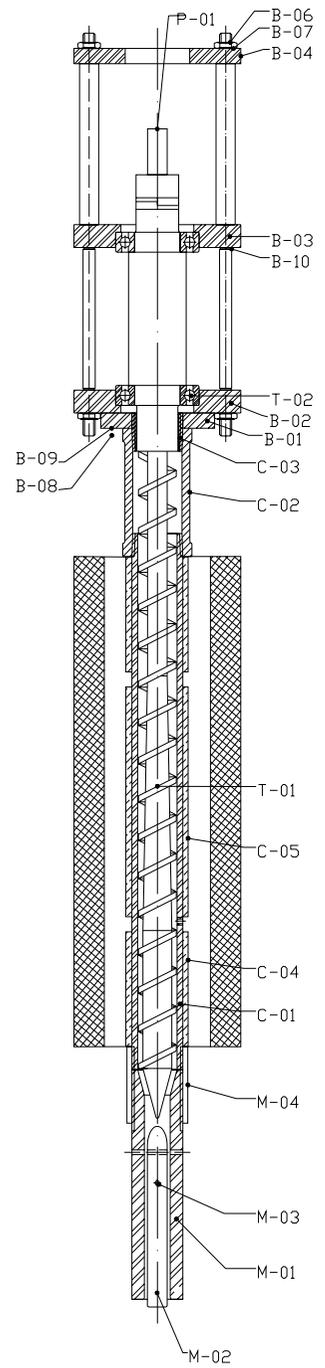
Concepto	Simb	Ecuación	Resultado	Nº
2 2 2	Caída de presión en el molde	$\Delta p = \frac{Q8\mu L}{\pi \left[(R_2^4 - R_1^4) - \frac{(R_2^2 - R_1^2)^2}{\ln R_2 / R_1} \right]}$	611492,59 Pa	(Ec 51)
2 3	Número de hilos en SM	$n_{hilos} = \frac{L_{SM}}{p}$	4	(Ec 16)
2 4	Potencia en SM	$Pot_{SP} = 2\pi d_M^2 \omega \left[\frac{\eta D^2 \omega}{D^2 - D_s^2} \frac{L}{2} + \left(n_{hilos} h \frac{\sin(2\phi)}{\cos(\phi)} + \frac{1}{4} \sqrt{d_M^2 + \left(\frac{d_M}{0,5359} \right)^2} \right) + \Delta p n_{hilos} h \tan(\phi) \right]$	2,52 W	(Ec 07)
2 5	Fuerza de empuje	$F = p \frac{\pi}{4} (D_s^2 - D_N^2)$	126,79 N	(Ec 17)
2 6	Fuerza radial	$F_x = \tan(\phi) F$	41 N	(Ec 18)
2 7	Fuerza de roce Tornillo Barril	$F_r = \mu F_x$	24,6 N	(Ec 19)
2 8	Potencia para vencer el roce	$Pot = F_r \frac{D_s}{2} \omega$	0,13 W	(Ec 20)
2 9	Potencia total	$(Pot_{Roce} + Pot_{SA} + Pot_{SP} + Pot_{SM}) \times 1,5$	23,17 W	
3 0	Esfuerzo tangencial en el barril	$\sigma_t = -\frac{p_o b^2}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{a^2}{b^2} \right)$	1.126.176,3 pa (163psi)	(Ec 91)
3 1	Temperatura promedio de pared	$T_w = \frac{T_{SA} + T_{SP} + T_{SM}}{3}$	439,82 K	(Ec 21)

Concepto	Simb	Ecuación	Resultado	Nº
3 2	Espesor de fundición H	$H = \frac{L_{SA}h_F + L_{SP}\left(\frac{h_F + h_M}{2}\right) + L_{SM}h_M}{L_{SA} + L_{SP} + L_{SM}}$	0,0055 m	(Ec 22)
3 3	Calor de fundición q_{Hw}	$q_{Hw} = q_T - C_p(T_m - T_0)$	130,33 W	(Ec 23)
3 4	Temperatura promedio a lo largo de L \bar{T}_L	$\bar{T}_L = \frac{q_{Hw}}{\pi R^2 V \rho C_p} + T_i$	303,93 K	(Ec 69)
3 5	Diferencia logarítmica de temperatura ΔT_{log}	$\Delta T_{log} = \frac{(T_w - T_i) - (T_w - \bar{T}_L)}{\ln \frac{T_w - T_i}{T_w - \bar{T}_L}}$	138,76 K	(Ec 71)
3 6	Coefficiente de transferencia medio $h_{m,log}$	$h_{m,log} = \frac{q_{Hw}}{2\pi RL\Delta T_{log}}$	0,1222 kJ/kg	(Ec 70)
3 7	Flujo másico máximo de material derretido W_L	$W_L = \frac{h_m w L (T_w - T_m)}{C_{ps}(T_m - T_s) + \lambda + \frac{1}{2} C_{pL}(T_w - T_m)}$	$2,8214 \times 10^{-5}$ m ³ /s	(Ec 74)

CAPÍTULO 3 - PLANOS Y DETALLES

Tabla 06. Tabla de planos.

Plano	Nombre	Designación de las piezas
01	Conjunto UEI-HL V1	–
02	Conjunto Estante Unidad	–
03	Base barril	B-01
04	Base inferior	B-02
05	Base superior	B-03
06	Base motor	B-04
07	Barras	B-05
08	Barril	C-01
09	Soporte y ducto	C-03 / E-01
10	Resistencias	C-04 / C-05
11	Tornillo	T-01
12	Molde	M-01 / M-02 / M-03
13	Acople	P-01
14	Estándares de tubería	M-04 / C-02
15	Estándares	B-06 / B-11 / B-12 / B-13 / T-02
16	Detalles de la unidad	–
17	Tramo N°1	A-01
18	Tramos N°2 y N°3	A-02 / A-03
19	Vigas y platinas	A-04 / A-05
20	Detalles unión estante - base	–
21	Planos Eléctricos	–

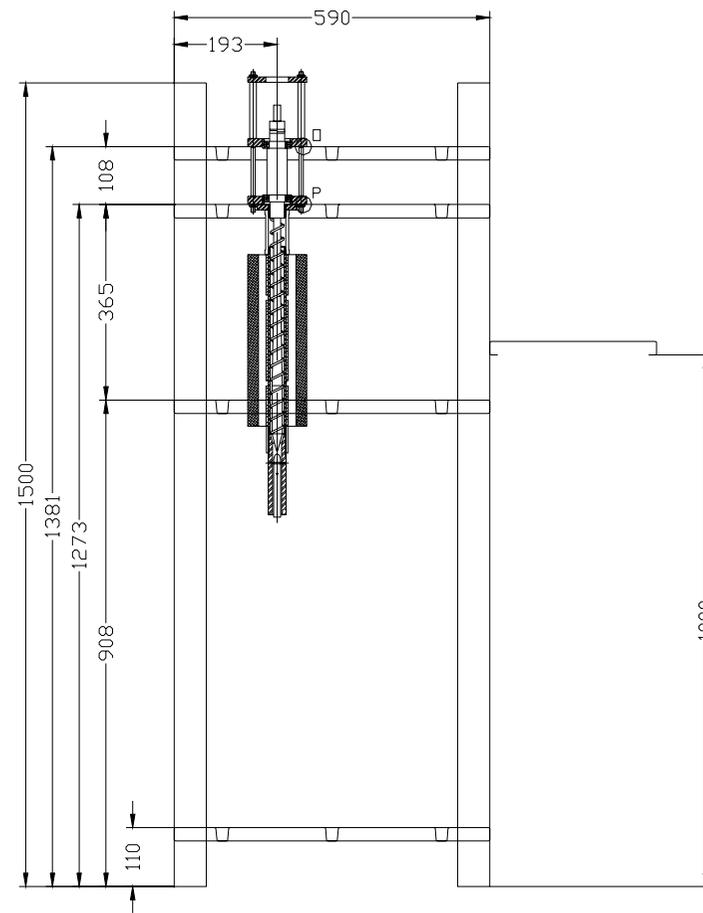
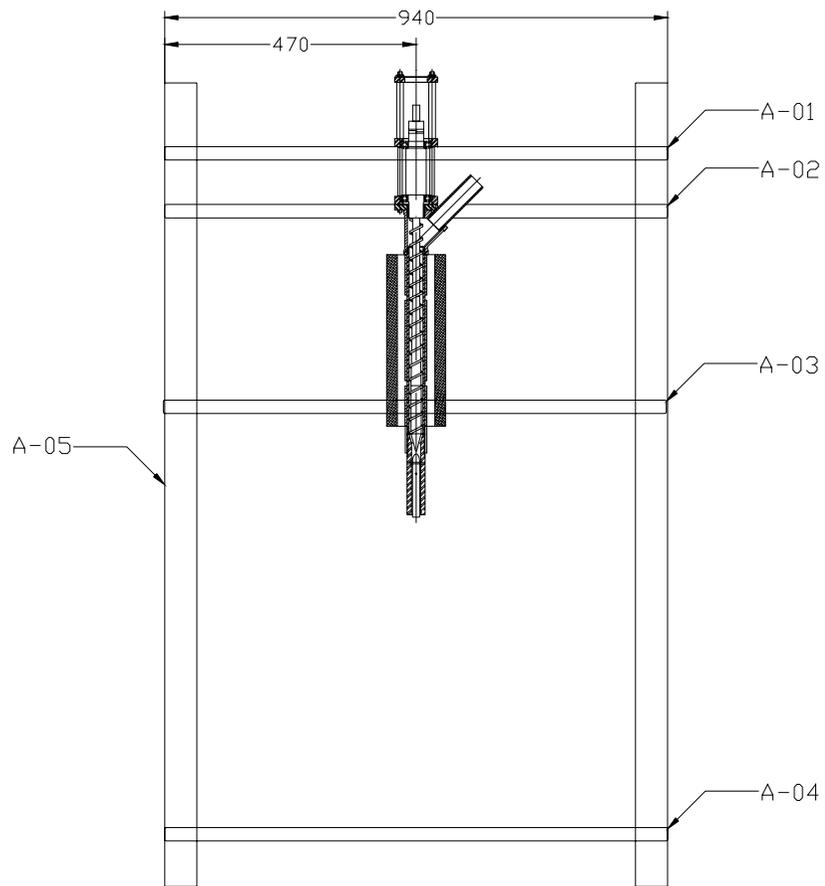


REF.	CANT.	DESCRIPCIÓN	MATERIAL	OBSERVACIONES
T-02	02	COJINETES	ACERO	Ø30 BOLA SKF-6006
T-01	01	TORNILLO	AISI 4140	
P-01	01	ACOPLE	AISI 1020	
M-04	01	ANILLO	ACERO COMERCIAL	SCH 40 1"
M-03	02	PASADOR	ACERO	Ø3x35
M-02	01	MATRIZ DE EXTRUSIÓN	AISI 4140	
M-01	01	BASE DE MOLDE	AISI 4140	
E-02	01	TOLVA	LATÓN	
E-01	01	DUCTO DE ALIMENTACIÓN	ACERO COMERCIAL	SCH 40 1"
C-05	01	RESISTENCIA	ALUMINIO	Ø33x140 120V 150W
C-04	02	RESISTENCIA	ALUMINIO	Ø33x75 120V 150W
C-03	01	SOPORTE	ACERO COMERCIAL	SCH 40 1"
C-02	01	UNIÓN 'Y'	ACERO COMERCIAL	SCH 40 1"
C-01	01	BARRIL	AISI 1020	TUBO MECÁNICO
B-14	01	AISLANTE	FIBRA DE VIDRIO	
B-13	16	ARANDELAS CALIBRADAS	ACERO	Ø5
B-12	08	TUERCAS	ACERO	M5
B-11	08	TORNILLOS	ACERO	HEXAGONAL M5x25
B-10	08	ANILLO DE RETENCIÓN	ACERO	Ø7
B-09	04	ARANDELAS CALIBRADAS	ACERO	M6
B-08	04	TORNILLO CABEZA REDONDA	ACERO	M6
B-07	08	ARANDELAS	ACERO	M8
B-06	08	TUERCAS	ACERO	M8
B-05	04	BARRAS	AISI 1045	
B-04	01	BASE DEL MOTOR	AISI 1045	
B-03	01	BASE SUPERIOR	AISI 1045	
B-02	01	BASE INFERIOR	AISI 1045	
B-01	01	BASE DEL BARRIL	AISI 1045	
A-07	32	TUERCAS	ACERO	TUERCAS P ESTANTES
A-07	32	TORNILLOS	ACERO	TORNILLOS P ESTANTES
A-06	04	PLATINAS	LATÓN	
A-05	04	VIGAS	LATÓN	
A-04	01	TRAMO #4	LATÓN	
A-03	01	TRAMO #3	LATÓN	
A-02	01	TRAMO #2	LATÓN	
A-01	01	TRAMO #1	LATÓN	

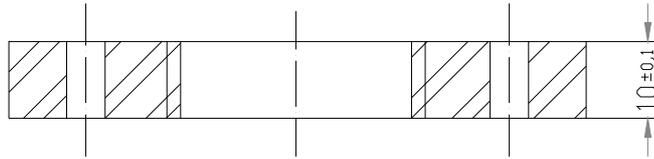
FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA	Br. Héctor A. Orozñez M.
Dibujado 21Sep03	Hector D.	FACULTAD DE INGENIERIA	Br. Lizbeth A. Saade C.
Comprab 19Nov03	Ing. Flores	ESCUELA DE MECÁNICA	Tutor: Ing. Guillermo Flores
Nórm. 29Nov03	Ing. E. TORO		

ESC 1:2,5	UNIDAD ELEMENTAL DE INYECCIÓN DE PLÁSTICO	PLANO N°01 CONJUNTO UEI-HL V1
-----------	---	-------------------------------

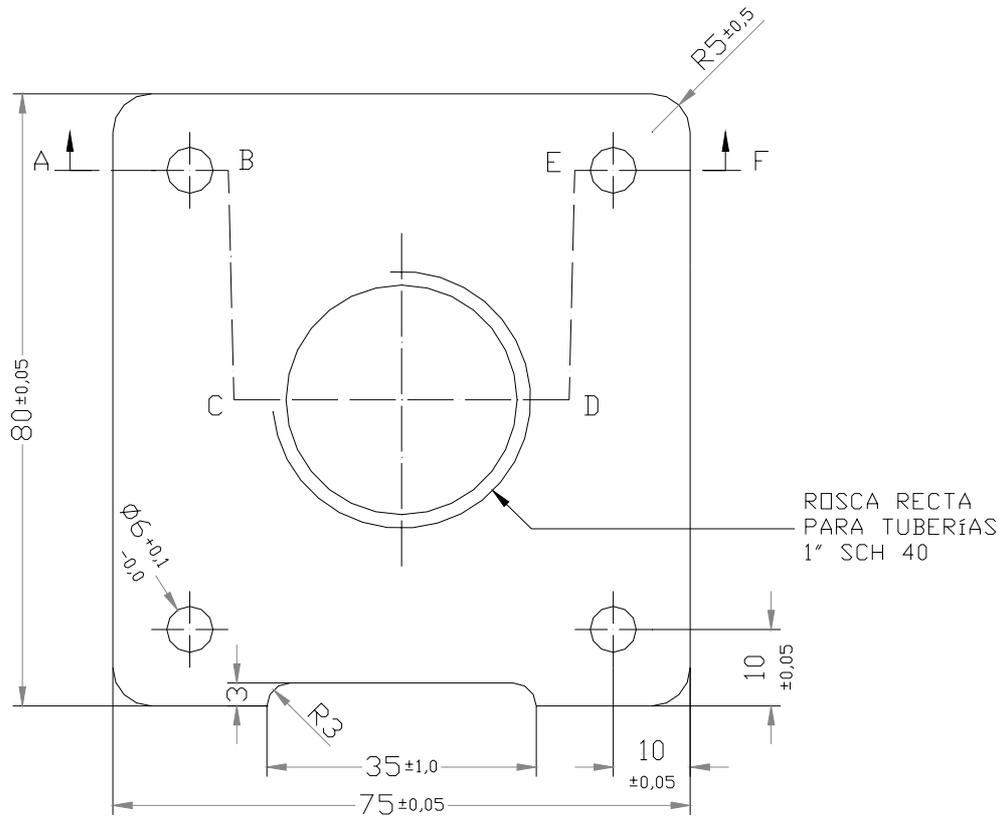
Medidas en indicación de tolerancias según DIN 7188 F100



FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA	
Dibujado: 18NOV03	Hector D.	FACULTAD DE INGENIERÍA	
Comprob.: 19NOV03	Ing. Flores	ESCUELA DE MECÁNICA	
Normas: 25NOV03	Ing. E. TORO	Tutor: Ing. Guillermo Flores	
ESC 1:10	UNIDAD ELEMENTAL DE INYECCIÓN DE PLÁSTICO		PLANO N°02
Medidas sin indicación de tolerancias según DIN 7168 FINO			CONJUNTO ESTANTE UNIDAD DE INYECCIÓN



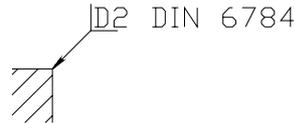
SECCIÓN ABCDEF



ROSCA RECTA
PARA TUBERÍAS
1" SCH 40



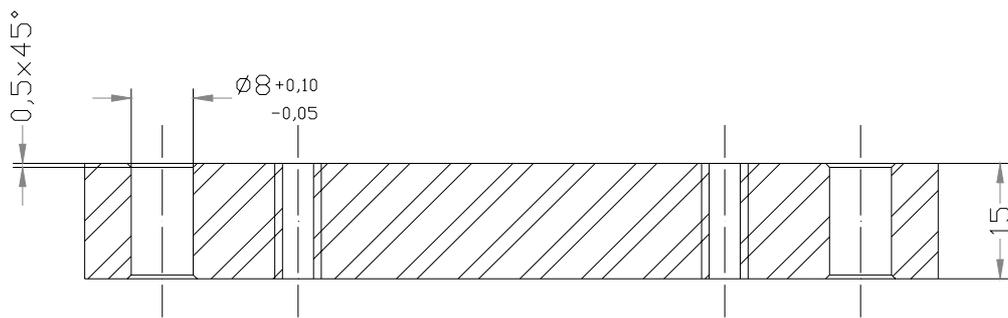
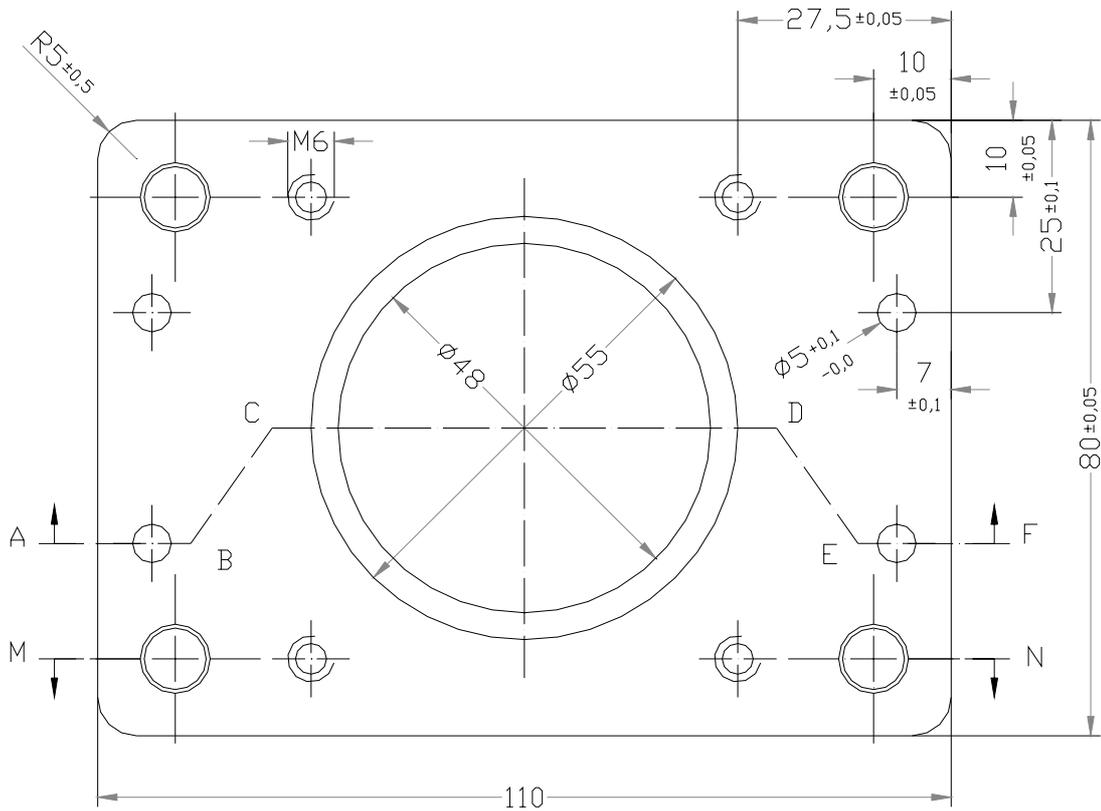
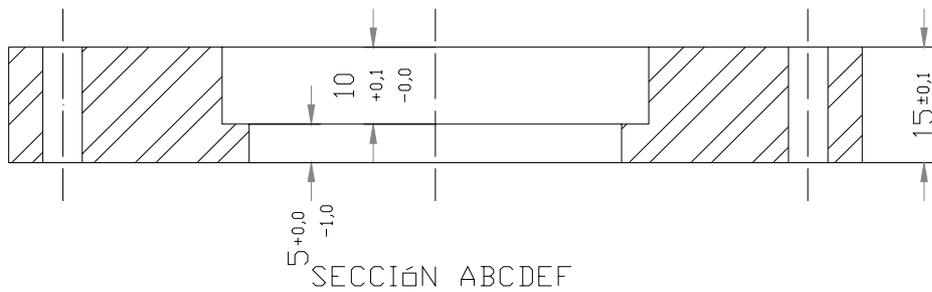
D1 DIN 6784



D2 DIN 6784

B-01

	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE MECÁNICA	Br. Héctor A. Ordóñez M. Br. Lizbethe A. Saade C.		
Dibujado	22Sep03	Hector O.				
Comprob.	19Nov03	Ing. Flores		Tutor: Ing. Guillermo Flores		
Normas	11Nov03	Ing. E. TORO				
ESC 1:1	UNIDAD ELEMENTAL DE INYECCIÓN DE PLÁSTICO			PLANO N°03 BASE DEL BARRIL		
Medidas sin indicación de tolerancias según: DIN 7168 FINO						
	CANT	MATERIAL	DESCRIPCIÓN			
	1	AISI 1045	-			

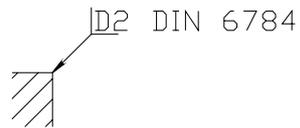
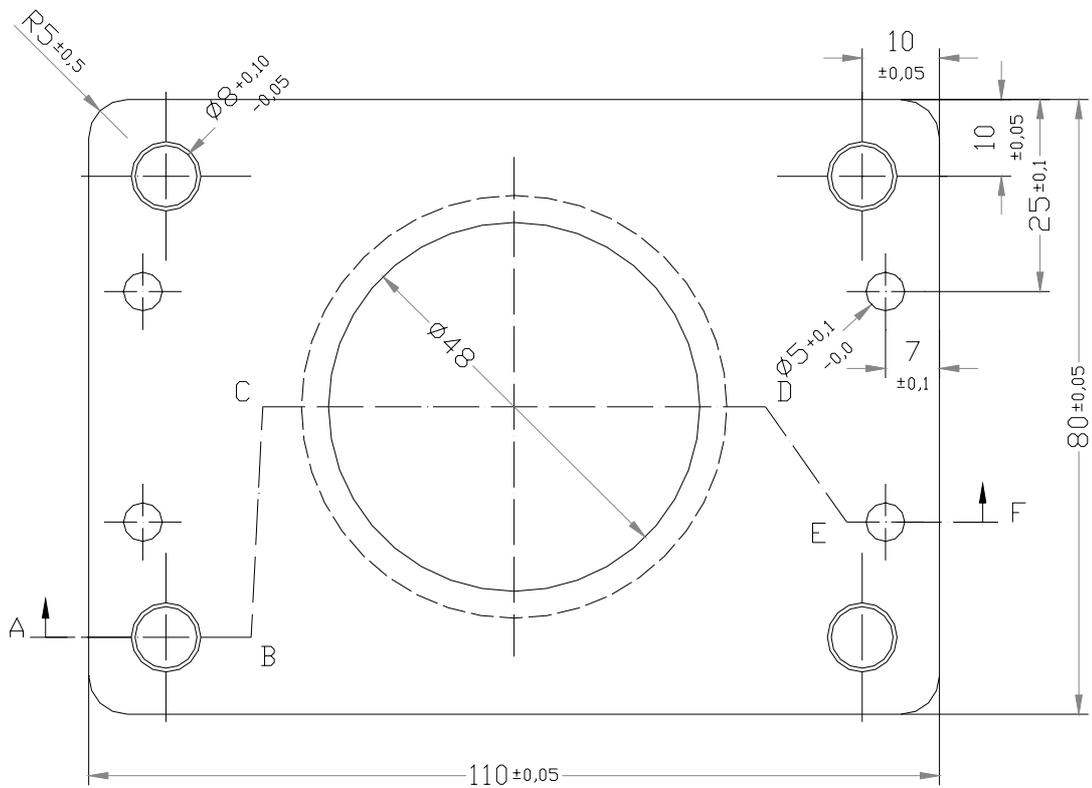
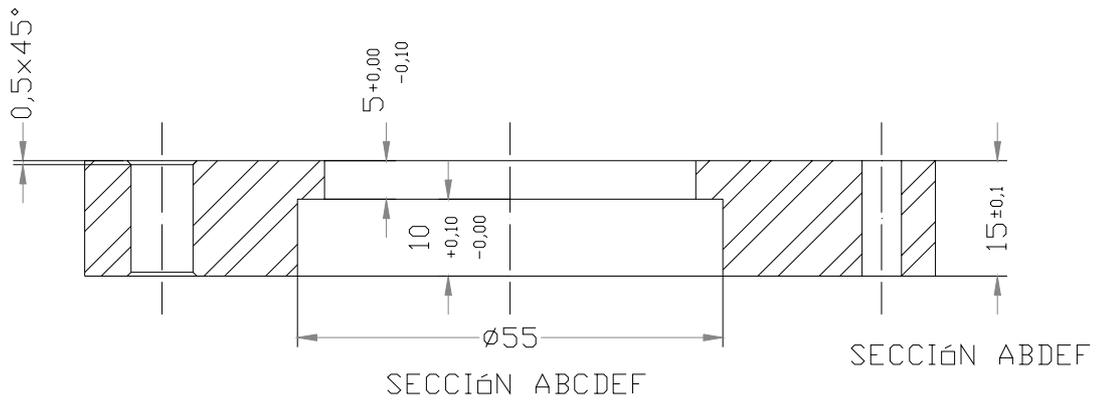


SECCIÓN MN

B-02

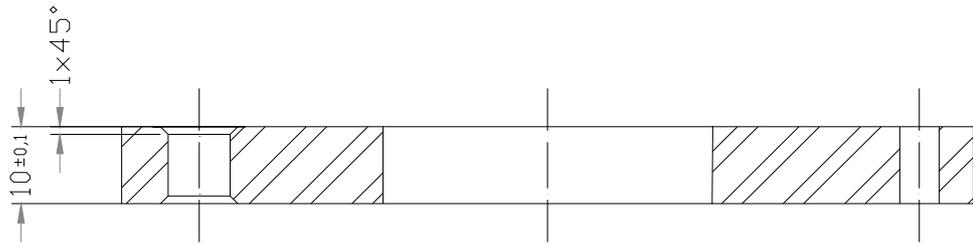


	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE MECÁNICA	Br. Héctor A. Ordóñez M. Br. Lizbethe A. Saade C.	
Dibujado	21Sep03	Hector D.		Tutor: Ing. Guillermo Flores	
Comprob.	19Nov03	Ing. Flores			
Normas	11Nov03	Ing. E. TORO			
ESC 1:1	UNIDAD ELEMENTAL DE INYECCIÓN DE PLÁSTICO			PLANO N°04 BASE INFERIOR	
Medidas sin indicación de tolerancias según: DIN 7168 FINO				CANT	MATERIAL
			1	AISI 1045	-

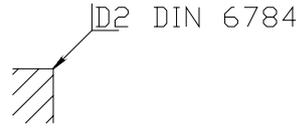
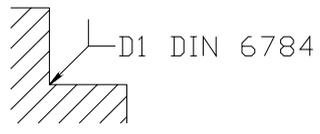
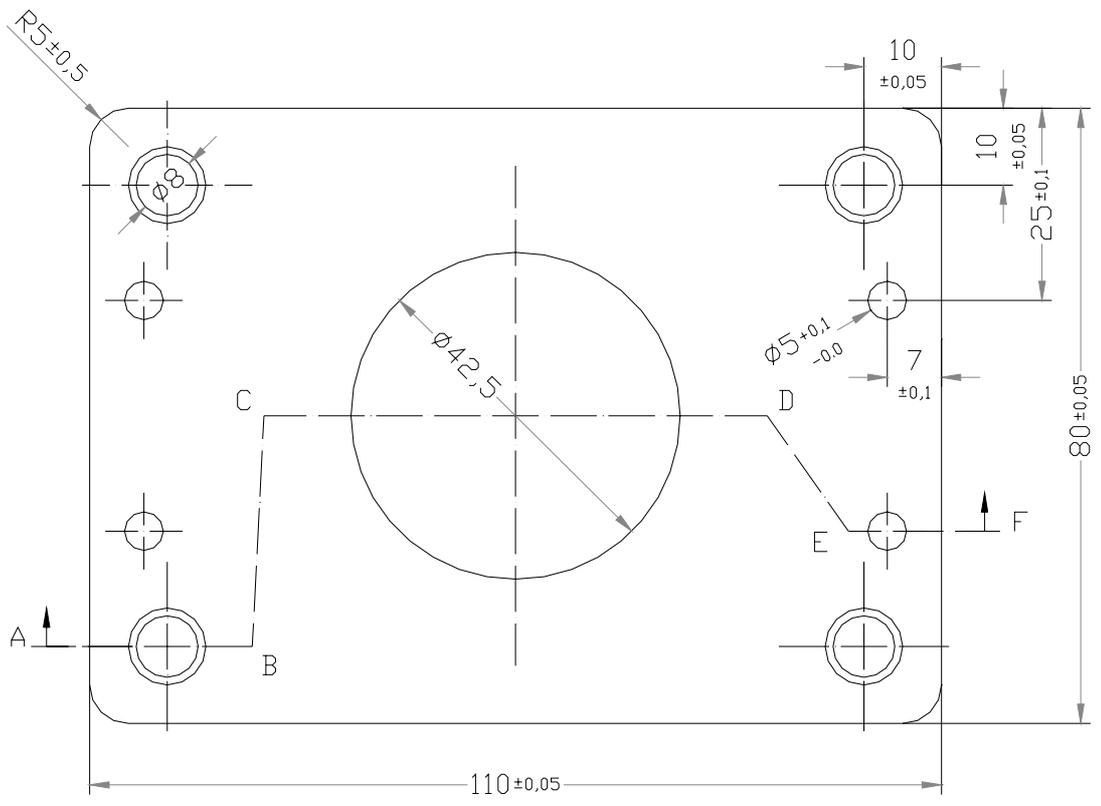


B-03

	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE MECÁNICA	Br. Héctor A. Ordóñez M. Br. Lizbethe A. Saade C.		
Dibujado	21Sep03	Hector O.		Tutor: Ing. Guillermo Flores		
Comprob.	19Nov03	Ing. Flores				
Normas	11Nov03	Ing. E. TORO				
ESC 1:1	UNIDAD ELEMENTAL DE INYECCIÓN DE PLÁSTICO			PLANO N°05 BASE SUPERIOR		
Medidas sin indicación de tolerancias según: DIN 7168 FINO				CANT	MATERIAL	DESCRIPCIÓN
	1	AI SI 1045	-			

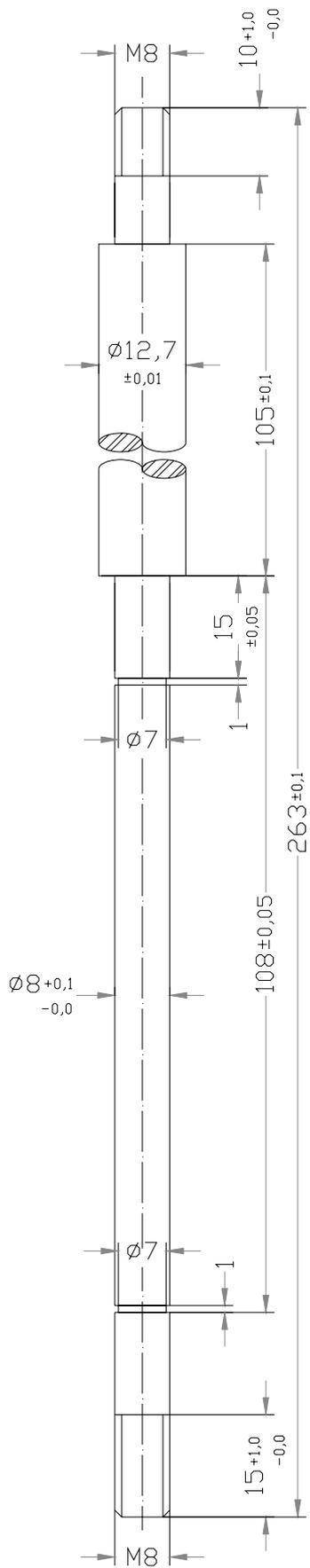


SECCIÓN ABCDEF

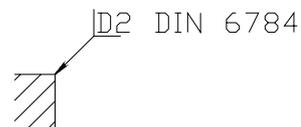


B-04

	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE MECÁNICA	Br. Héctor A. Ordóñez M. Br. Lizbethe A. Saade C.		
Dibujado	22Sep03	Hector D.				
Comprob.	19Nov03	Ing. Flores		Tutor: Ing. Guillermo Flores		
Normas	11Nov03	Ing. E. TORO				
ESC 1:1	UNIDAD ELEMENTAL DE INYECCIÓN DE PLÁSTICO			PLANO N°06 BASE MOTOR		
Medidas sin indicación de tolerancias según: DIN 7168 FINO						
	CANT	MATERIAL	DESCRIPCIÓN			
	1	AISI 1045	-			



B-05

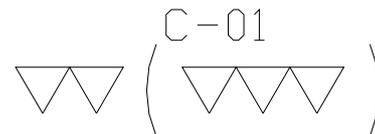
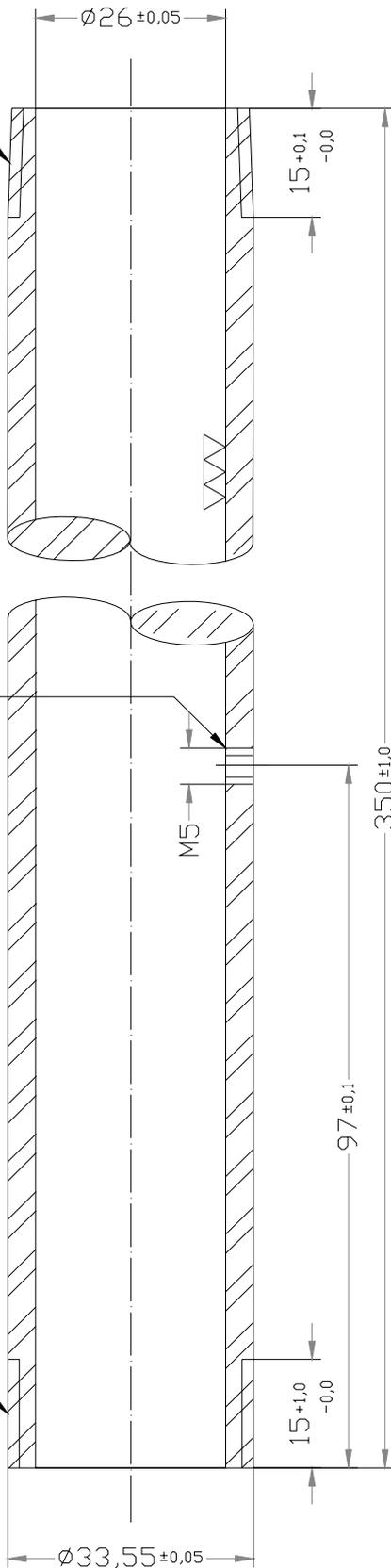


	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE MECÁNICA	Br. Héctor A. Ordóñez M. Br. Lizbethe A. Saade C.		
Dibujado	27Oct03	Hector O.		Tutor: Ing. Guillermo Flores		
Comprob.	19Nov03	Ing. Flores				
Normas	11Nov03	Ing. E. TORO				
ESC 1:1	UNIDAD ELEMENTAL DE INYECCIÓN DE PLÁSTICO			PLANO N°07 BARRAS		
Medidas sin indicación de tolerancias según: DIN 7168 FINO						
	CANT	MATERIAL	DESCRIPCIÓN			
	4	AISI 1045	-			

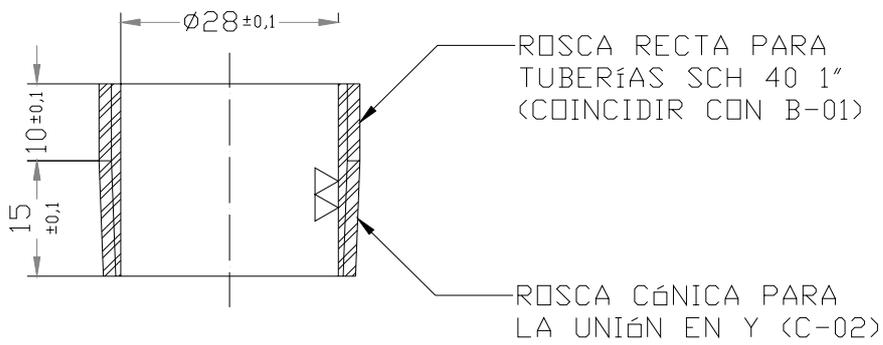
ROSCA CÓNICA PARA
TUBERÍAS SCH 40 1"

VALVULA

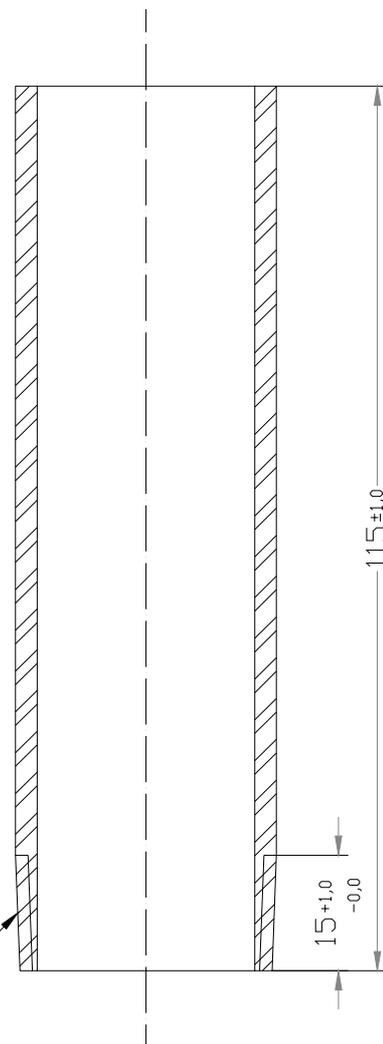
ROSCA RECTA PARA
EL ANILLO (M-04)



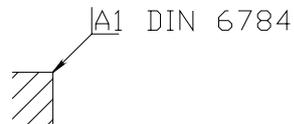
	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE MECÁNICA	Br. Héctor A. Ordóñez M. Br. Lizbethe A. Saade C.		
Dibujado	27Oct03	Hector D.		Tutor: Ing. Guillermo Flores		
Comprob.	19Nov03	Ing. Flores		PLANO N°08 BARRIL		
Normas	11Nov03	Ing. E. TORO				
ESC 1:1	UNIDAD ELEMENTAL DE INYECCIÓN DE PLÁSTICO			CANT	MATERIAL	DESCRIPCIÓN
Medidas sin indicación de tolerancias según: DIN 7168 FINO				1	AISI 1025	TUBO MECÁNICO



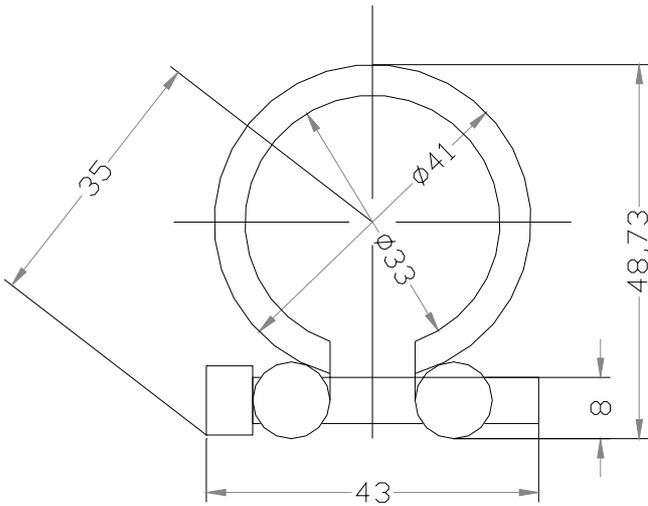
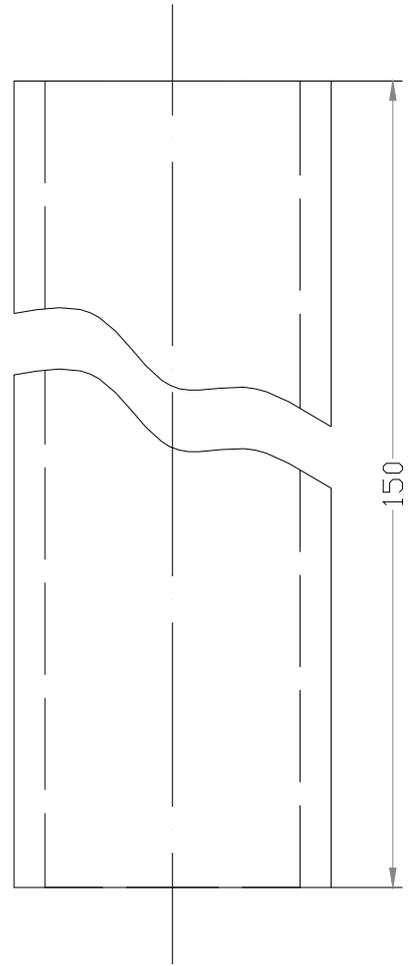
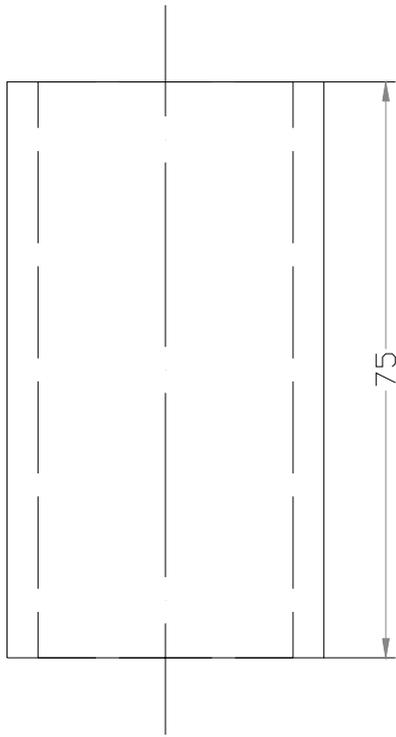
C-03



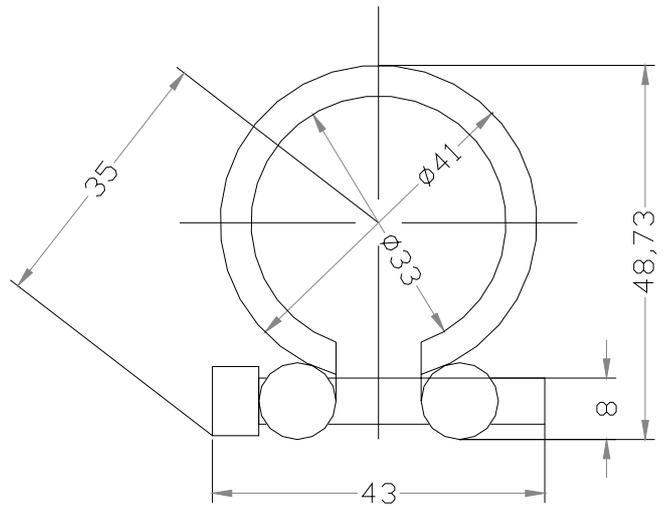
E-01



REGLON	CANT	DESCRIPCIÓN	MATERIAL	OBSERVACIONES
E-01	01	DUCTO DE ALIMENTACIÓN	ACERO COMERCIAL	SCH 40 1"
C-03	01	SOPORTE	ACERO COMERCIAL	SCH 40 1"
	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE MECÁNICA Br. Héctor A. Ordóñez M. Br. Lizbethe A. Saade C. Tutor: Ing. Guillermo Flores	
Dibujado	22Sep03	Hector D.		
Comprob.	19Nov03	Ing. Flores		
Normas	11Nov03	Ing. E. TORO		
ESC 1:1	UNIDAD ELEMENTAL DE INYECCIÓN DE PLÁSTICO			PLANO N°09 SOPORTE Y DUCTO
Medidas sin indicación de tolerancias según: DIN 7168 F100				

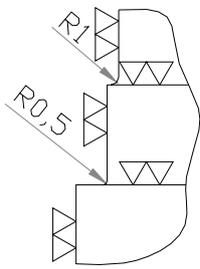


C-04

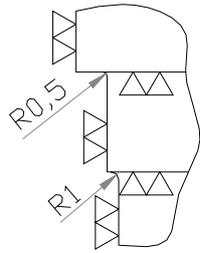


C-05

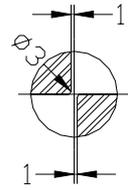
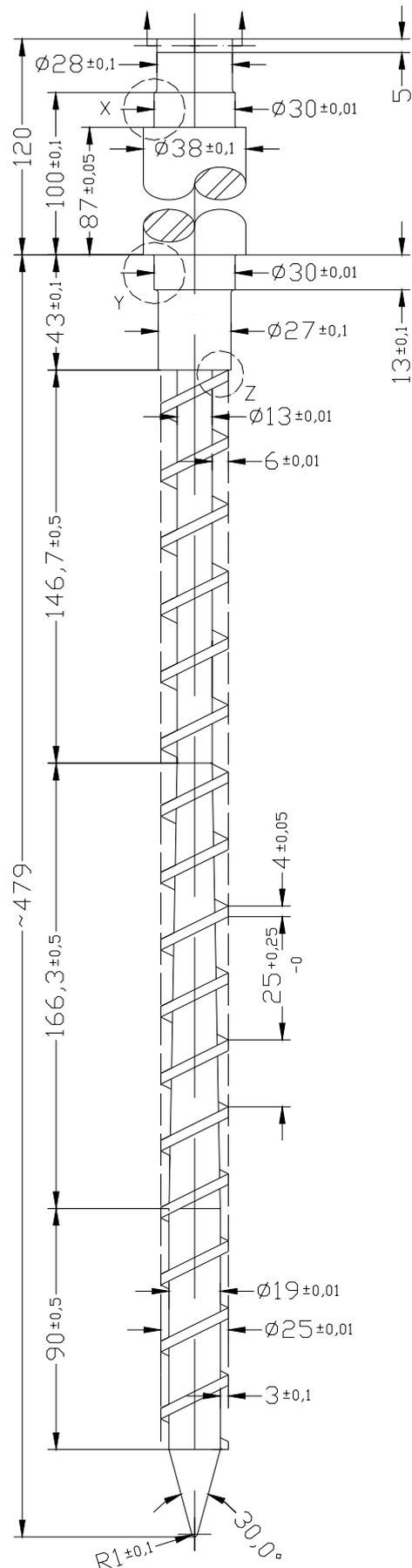
C-05	01	RESISTENCIA	ALUMINIO	$\phi 33 \times 140$ 120V 150W
C-04	02	RESISTENCIA	ALUMINIO	$\phi 33 \times 75$ 120V 150W
RENGLON	CANT	DESCRIPCIÓN	MATERIAL	OBSERVACIONES
	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE MECÁNICA	
Dibujado	28 Oct 03	Hector D.		
Comprob.	19 Nov 03	Ing. Flores		
Normas	11 Nov 03	Ing. E. TORO		
ESC 1:2,5	UNIDAD ELEMENTAL DE INYECCIÓN DE PLÁSTICO			PLANO N°10 RESISTENCIAS
Medidas sin indicación de tolerancias según: DIN 7168 FINO				
			Br. Héctor A. Ordóñez M. Br. Lizbethe A. Saade C. Tutor: Ing. Guillermo Flores	



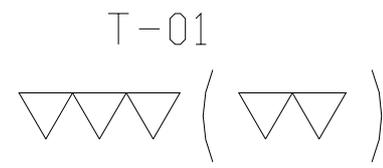
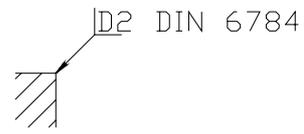
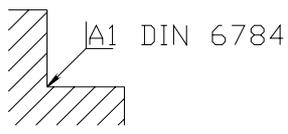
DETALLE X
ESC 1:1



DETALLE Y
ESC 1:1

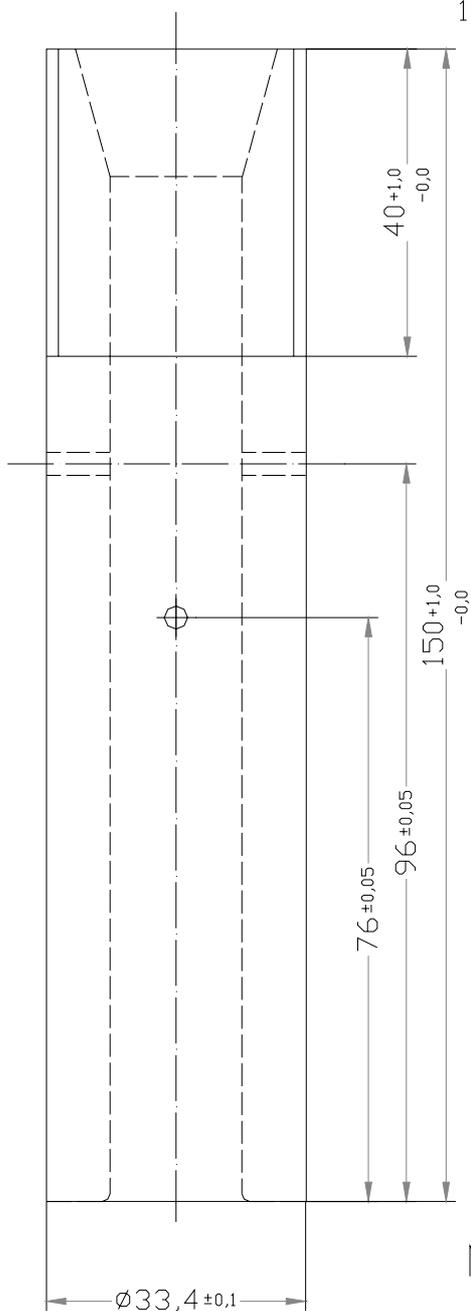


DETALLE Z
ESC 1:1

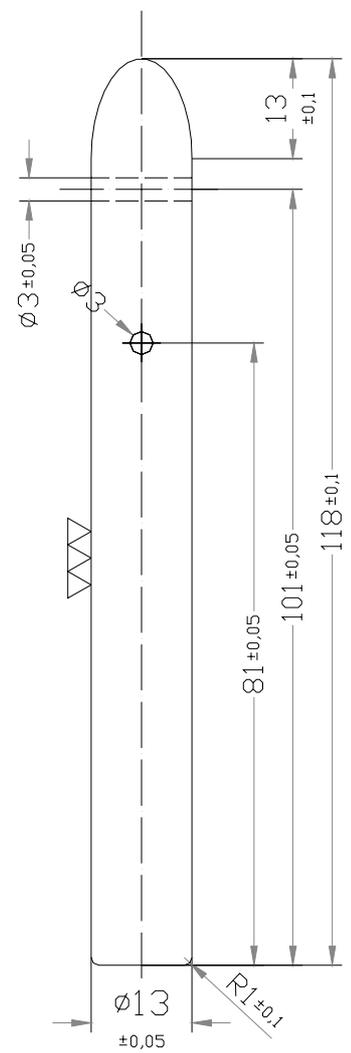
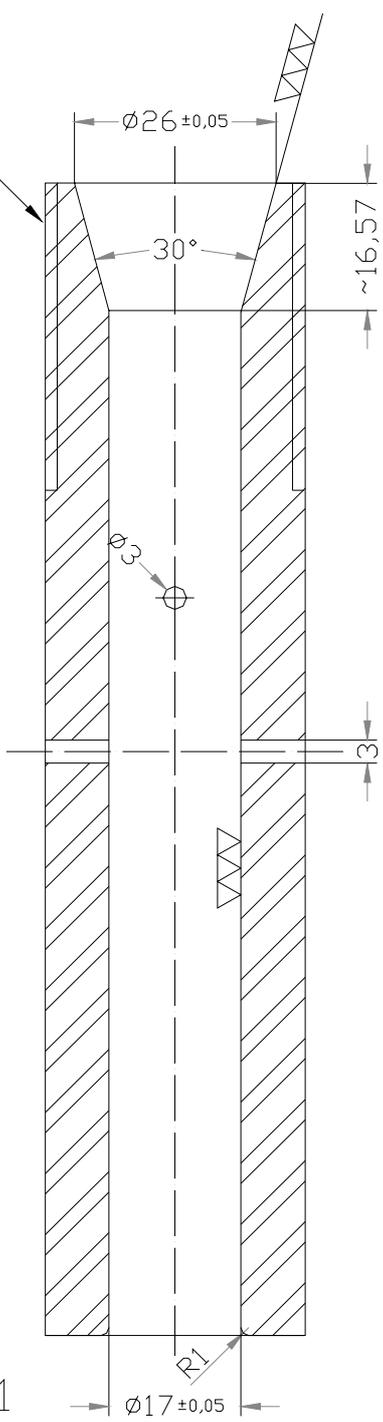


	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA FACULTAD DE INGENIERIA ESCUELA DE MECÁNICA	Br. Héctor A. Ordóñez M. Br. Lizbethe A. Saade C.
Dibujado	12Sep03	Hector D.		
Comprob.	19Nov03	Ing. Flores		
Normas	11Nov03	Ing. E. Toro		
ESC 1:2,5	UNIDAD ELEMENTAL DE INYECCIÓN DE PLÁSTICO			Tutor: Ing. Guillermo Flores
Medidas sin indicación de tolerancias según: DIN 7168 FINO				PLANO N°11 TORNILLO
	CANT	MATERIAL	DESCRIPCIÓN	
	1	AISI 4140	-	

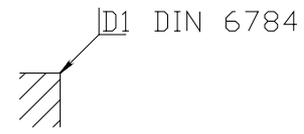
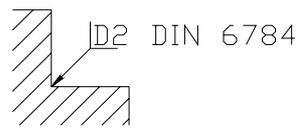
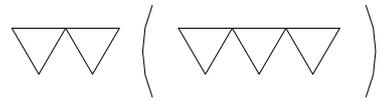
ROSCA
RECTA
PARA
TUBOS
SCD 40
1"



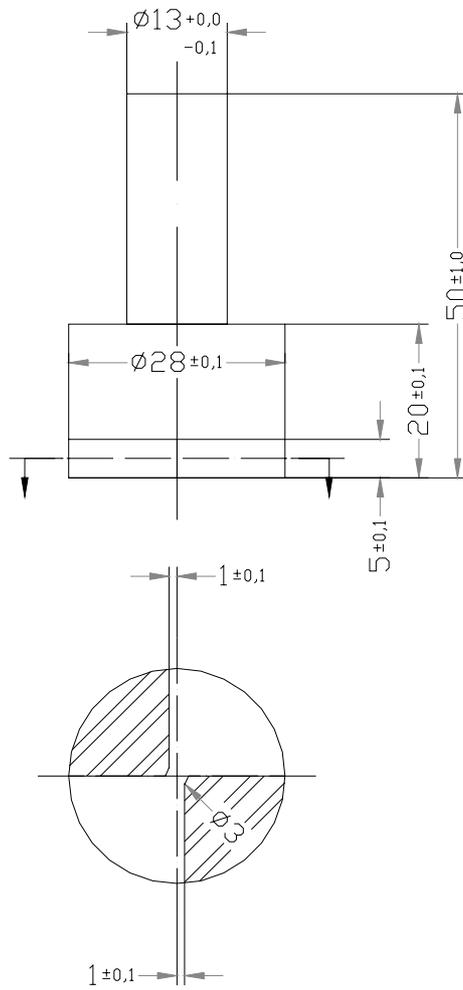
M-01



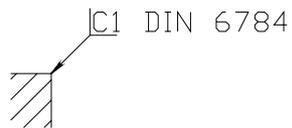
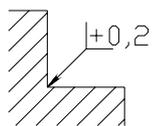
M-02



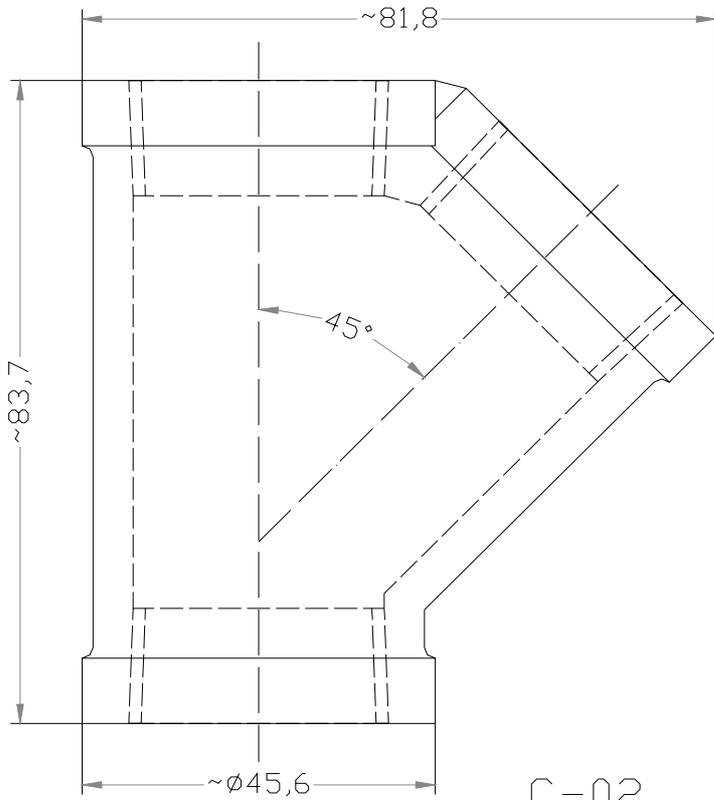
M-02	01	MATRIZ DE EXTRUSIÓN	AISI 4140	
M-01	01	BASE DE MOLDE	AISI 4140	
REGLÓN	CANT	DESCRIPCIÓN	MATERIAL	OBSERVACIONES
Dibujado	14Sep03	Hector D.	UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE MECÁNICA	
Comprob.	19Nov03	Ing. Flores		
Normas	11Nov03	Ing. E. TORO		
ESC 1:1	UNIDAD ELEMENTAL DE INYECCIÓN DE PLÁSTICO			PLANO N°12 MOLDE
Medidas sin indicación de tolerancias según: DIN 7168 F1ND				Br. Héctor A. Ordóñez M. Br. Lizbethe A. Saade C. Tutor: Ing. Guillermo Flores



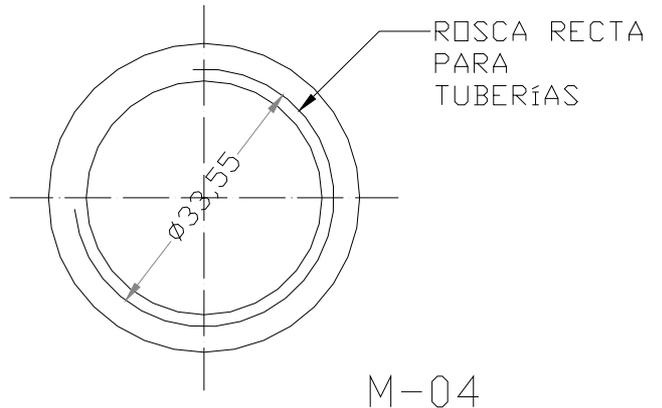
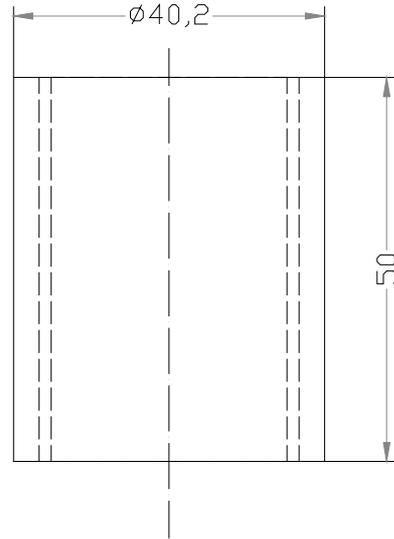
P-01



	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE MECÁNICA	Br. Héctor A. Ordóñez M. Br. Lizbethe A. Saade C.	
Dibujado	03Oct03	Hector D.		Tutor: Ing. Guillermo Flores	
Comprob.	19Nov03	Ing. Flores			
Normas	11Nov03	Ing. E. TORO			
ESC 1:1	UNIDAD ELEMENTAL DE INYECCIÓN DE PLÁSTICO			PLANO N°13 ACOPLE	
Medidas sin indicación de tolerancias según: DIN 7168 FINO				CANT	MATERIAL
	1	AISI 1020	-		



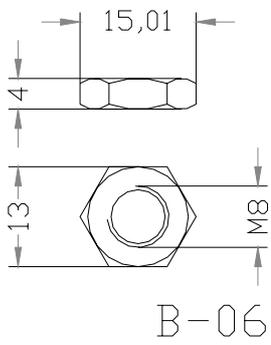
C-02



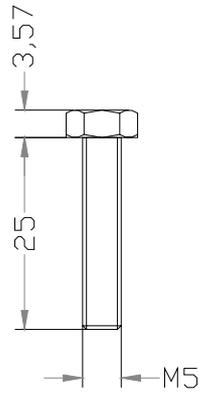
M-04

M-04	01	ANILLO	ACERO COMERCIAL	SCH 40 1"
C-02	01	UNIÓN "Y"	ACERO COMERCIAL	SCH 40 1"
REGLON	CANT	DESCRIPCIÓN	MATERIAL	OBSERVACIONES
	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE MECÁNICA Br. Héctor A. Ordóñez M. Br. Lizbethe A. Saade C. Tutor: Ing. Guillermo Flores	
Dibujado	12Sep03	Hector D.		
Comprob.	19Nov03	Ing. Flores		
Normas	11Nov03	Ing. E. TORO		

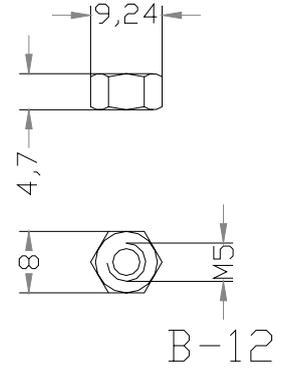
ESC 1:1 Medidas sin indicación de tolerancias según: DIN 7168 FINO	UNIDAD ELEMENTAL DE INYECCIÓN DE PLÁSTICO	PLANO N°14 ESTÁNDARES DE TUBERÍA
--	---	----------------------------------



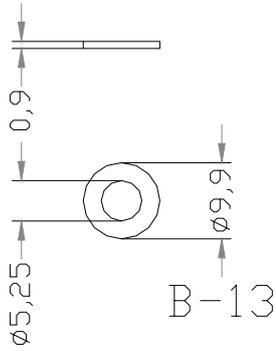
B-06



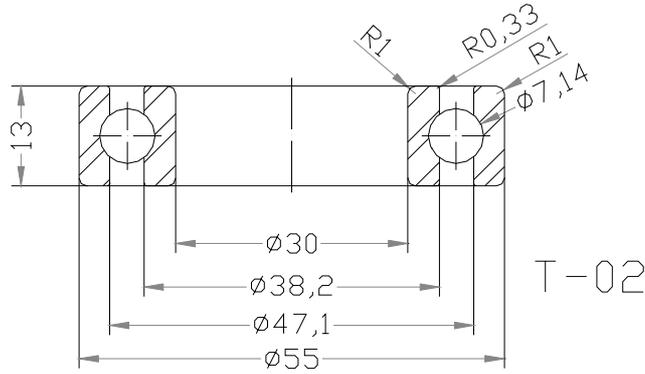
B-11



B-12

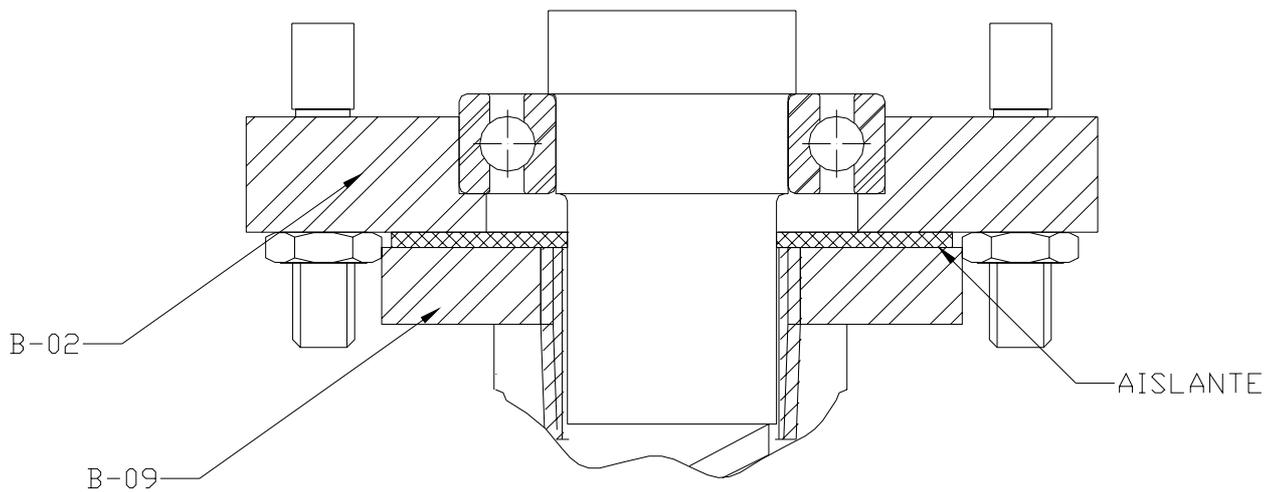


B-13

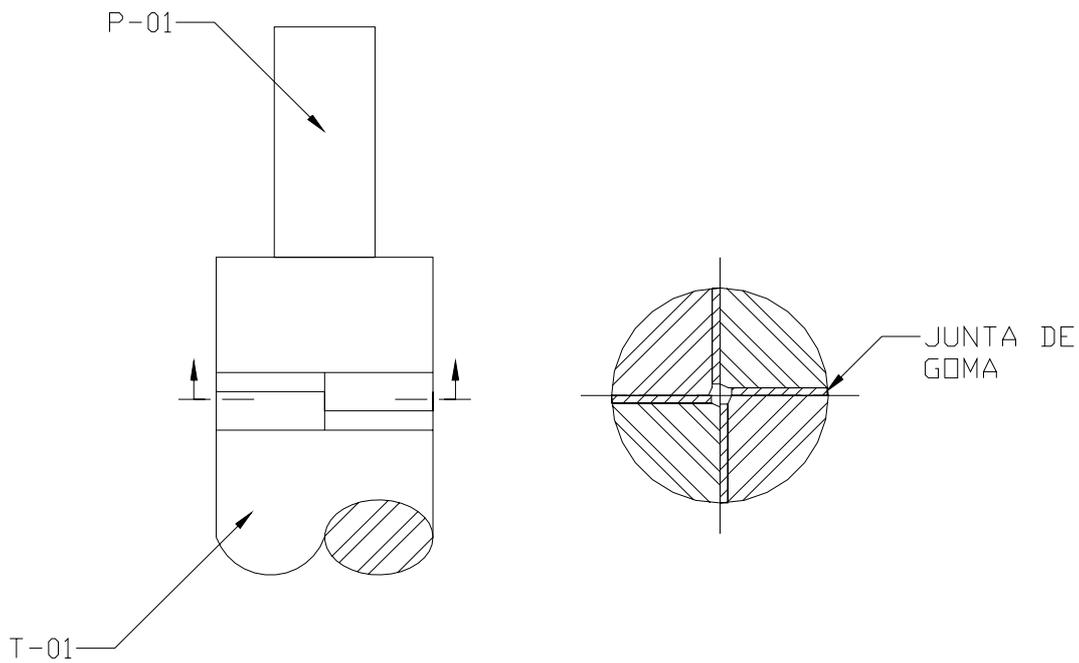


T-02

T-02	02	COJINETES	ACERO	Ø30 BOLA SKF-6006
B-13	16	ARANDELAS CALIBRADAS	ACERO	Ø5
B-12	08	TUERCAS	ACERO	M5
B-11	08	TORNILLOS	ACERO	HEXAGONAL M5x25
B-06	08	TUERCAS	ACERO	M8
RENGLON	CANT	DESCRIPCIÓN	MATERIAL	OBSERVACIONES
	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE MECÁNICA	
Dibujado	15Nov03	Hector D.		
Comprob.	19Nov03	Ing. Flores		
Normas	11Nov03	Ing. E. TORO	Tutor: Ing. Guillermo Flores	
ESC 1:1	UNIDAD ELEMENTAL DE INYECCIÓN DE PLÁSTICO			PLANO N°15 ESTÁNDARES DE TUBERÍA
Medidas sin indicación de tolerancias según: DIN 7168 FINO				

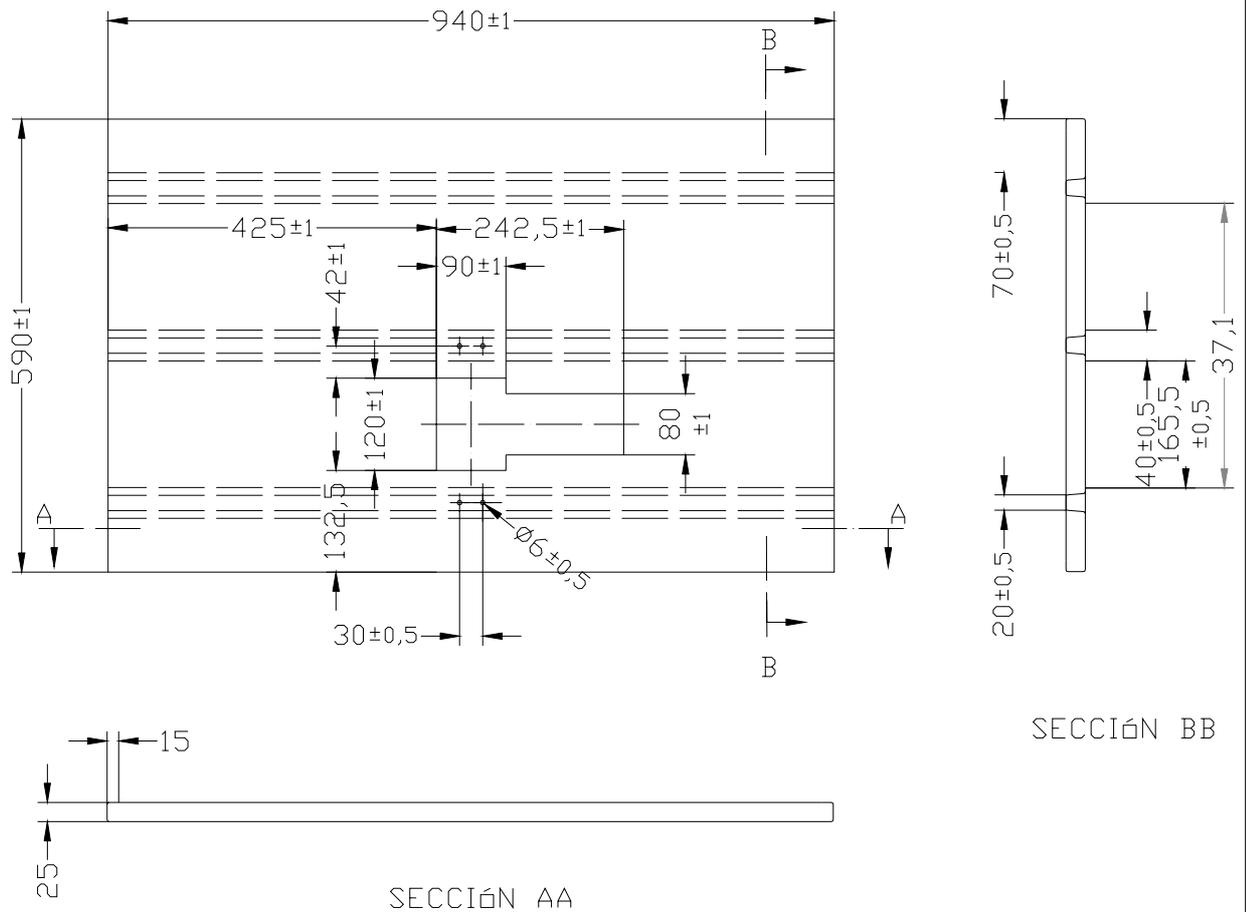


DETALLE DE LA JUNTA
ENTRE LA BASE
INFERIOR Y LA BASE
DEL BARRIL



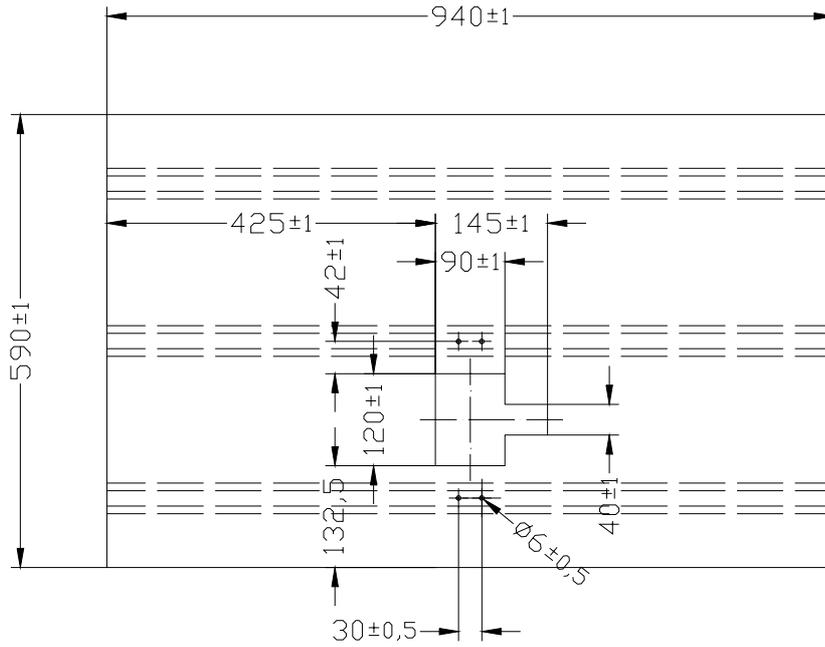
DETALLE DE LA JUNTA
EN EL ACOPLE

	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE MECÁNICA	Br. Héctor A. Ordóñez M. Br. Lizbethe A. Saade C.
Dibujado	10Nov03	Hector D.		
Comprob.	19Nov03	Ing. Flores		Tutor: Ing. Guillermo Flores
Normas	11NOV03	Ing. E. TORO		
ESC X:X	UNIDAD ELEMENTAL DE INYECCIÓN DE PLÁSTICO			PLANO N°16 DETALLES DE LA UNIDAD
Medidas sin indicación de tolerancias según: DIN 7168 FINO				

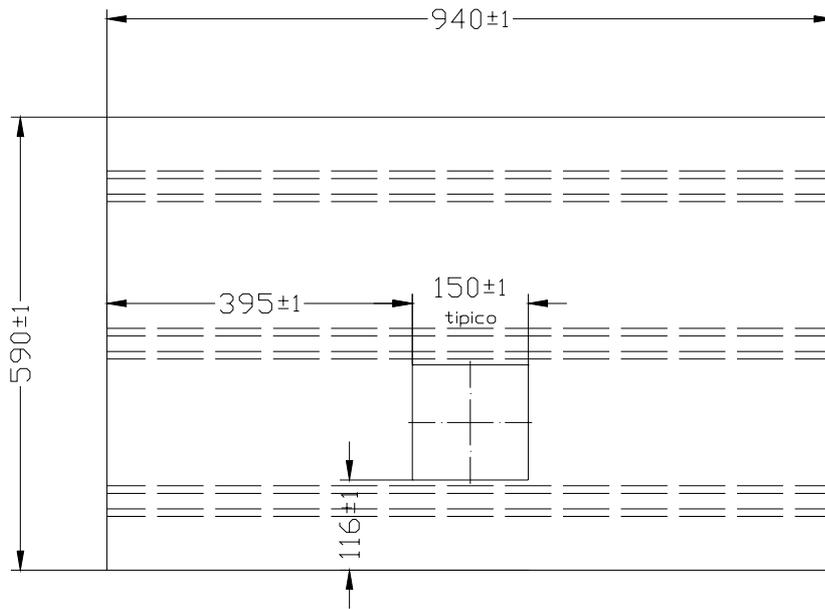


A-01

	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE MECÁNICA	Br. Héctor A. Ordóñez M. Br. Lizbethe A. Saade C.			
Dibujado	10Nov03	Hector D.					
Comprob.	19Nov03	Ing. Flores		Tutor: Ing. Guillermo Flores			
Normas	25Nov03	Ing. E. TORO	UNIDAD ELEMENTAL DE INYECCIÓN DE PLÁSTICO		PLANO N°17 TRAMO #1		
ESC 1:10					CANT	MATERIAL	DESCRIPCIÓN
Medidas sin indicación de tolerancias según: DIN 7168 FINO					1	LATON	-



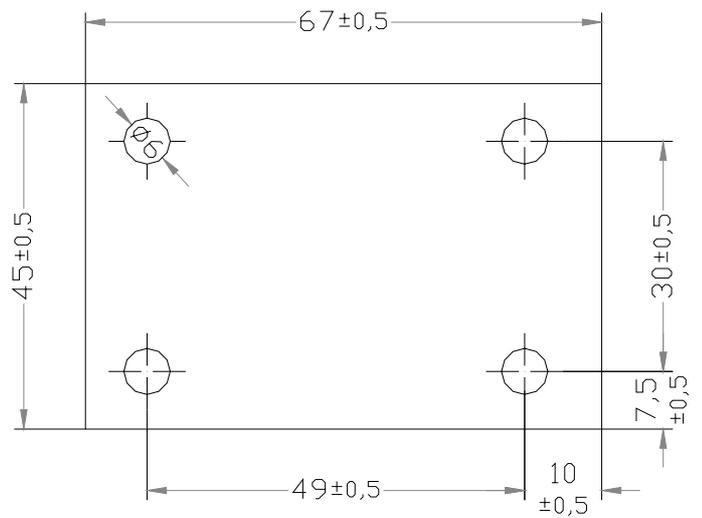
A-02



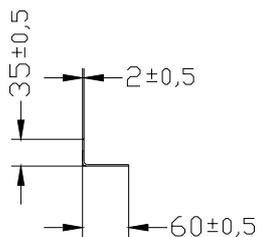
A-03

A-03	01	TRAMO #3	LATÓN	
A-02	01	TRAMO #2	LATÓN	
REGLON	CANT	DESCRIPCIÓN	MATERIAL	OBSERVACIONES
	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE MECÁNICA	
Dibujado	10Nov03	Hector D.		
Comprob.	19Nov03	Ing. Flores		
Normas	25Nov03	Ing. E. TORO		
ESC 1:10	UNIDAD ELEMENTAL DE INYECCIÓN DE PLÁSTICO		PLANO N°18 TRAMO #2 Y #03	
Medidas sin indicación de tolerancias según: DIN 7168 FINO				

Br. Héctor A. Ordóñez M.
Br. Lizbethe A. Saade C.
Tutor: Ing. Guillermo Flores

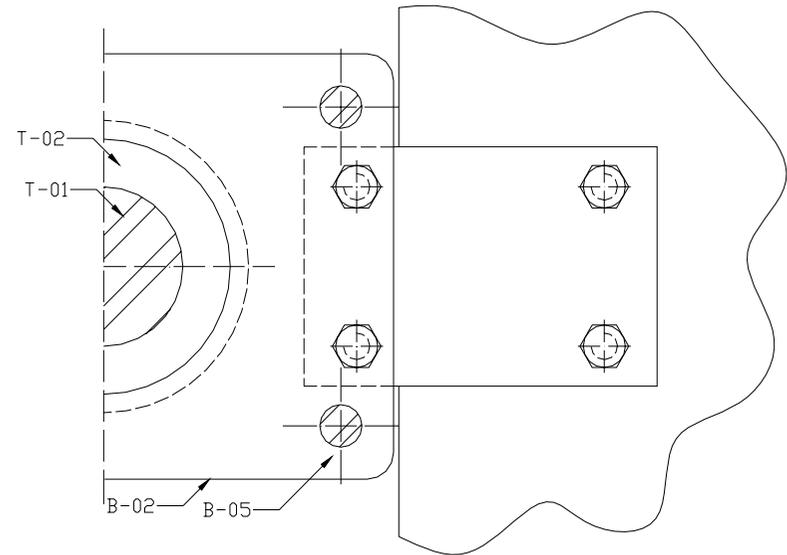
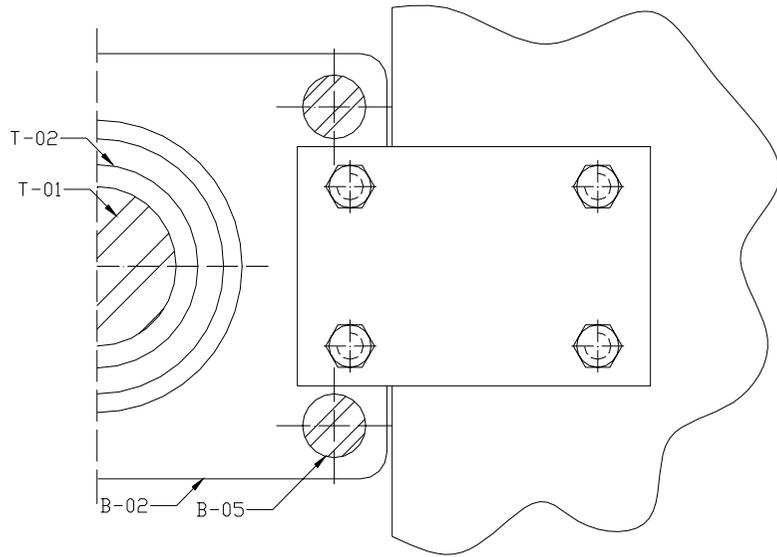
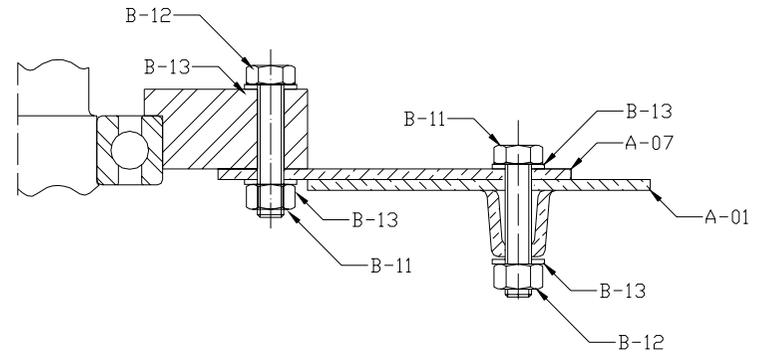
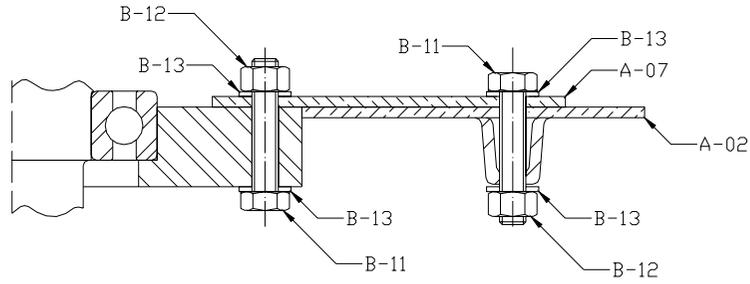


A-06
 ESC 1:1
 ESPESOR 2



A-05

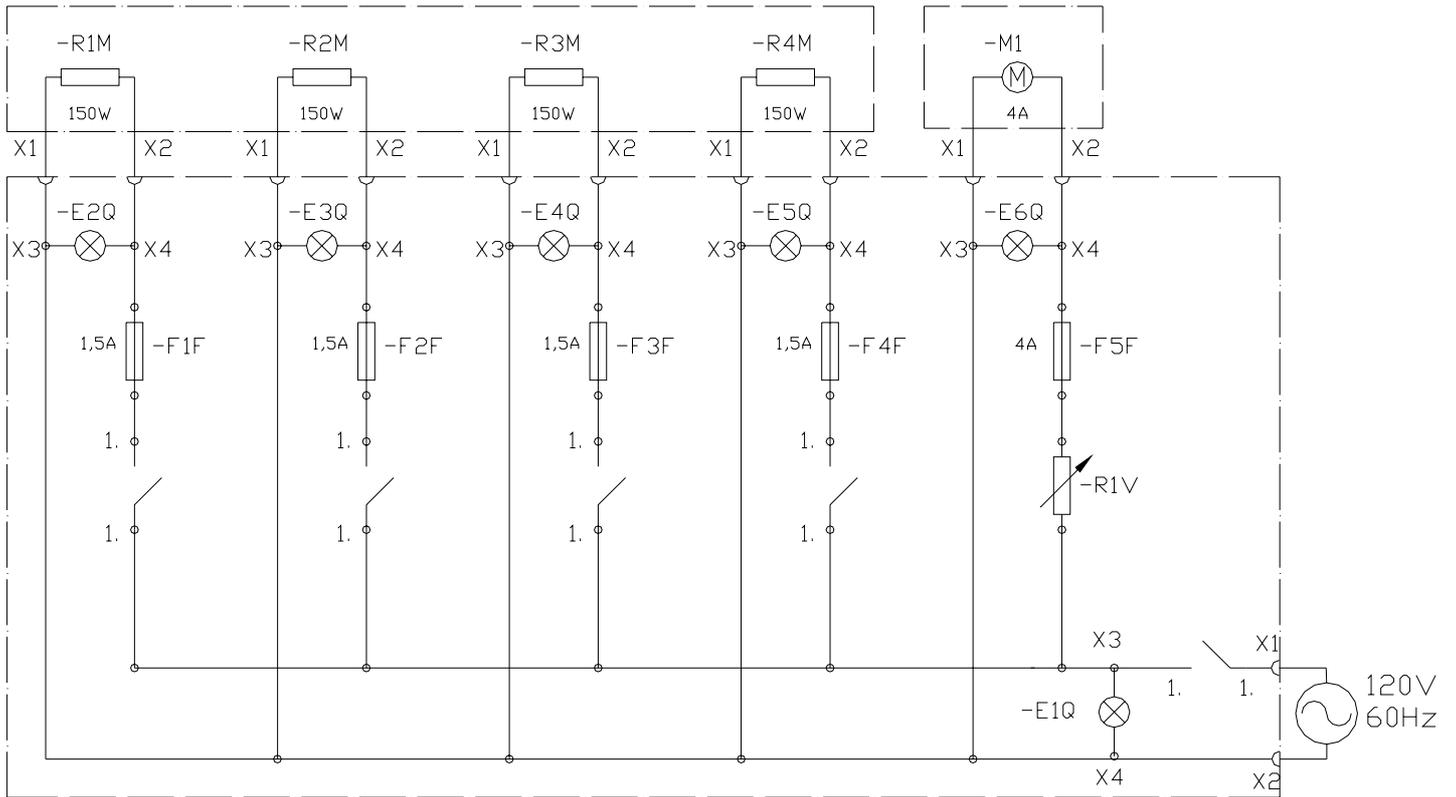
A-06	04	PLATINAS	LATÓN	
A-05	04	VIGAS	LATÓN	
RENGLON	CANT	DESCRIPCIÓN	MATERIAL	OBSERVACIONES
	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE MECÁNICA	
Dibujado	10Nov03	Hector D.		
Comprob.	19Nov03	Ing. Flores		
Normas	25Nov03	Ing. E. TORO	Tutor: Ing. Guillermo Flores	
ESC 1:10	UNIDAD ELEMENTAL DE INYECCIÓN DE PLÁSTICO		PLANO N°19 VIGAS Y PLATINAS	
Medidas sin indicación de tolerancias según: DIN 7168 FINO				



DETALLE P
BASE INFERIOR

DETALLE Q
BASE SUPERIOR

	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA FACULTAD DE INGENIERIA ESCUELA DE MECANICA	Br. Héctor A. Ordóñez M. Br. Lizbethe A. Saade C. Tutor: Ing. Guillermo Flores
Dibujado	18NOV03	Hector D.		
Comprab.	19Nov03	Ing. Flores		
Normas	25Nov03	Ing. E. TORO		
ESC 1:1	UNIDAD ELEMENTAL DE INYECCIÓN DE PLÁSTICO			PLANO N°20 DETALLES DE LA UNIÓN ESTANTE - BASE



	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA DE MECÁNICA	Br. Héctor A. Ordóñez M. Br. Lizbethe A. Saade C. Tutor: Ing. Guillermo Flores
Dibujado	18Nov03	Hector O.		
Comprob.	19Nov03	Ing. Flores		
Normas	25Nov03	Ing. E. TORO		
ESC S/E	UNIDAD ELEMENTAL DE INYECCIÓN DE PLÁSTICO		PLANO N°21 PLANOS ELÉCTRICOS	

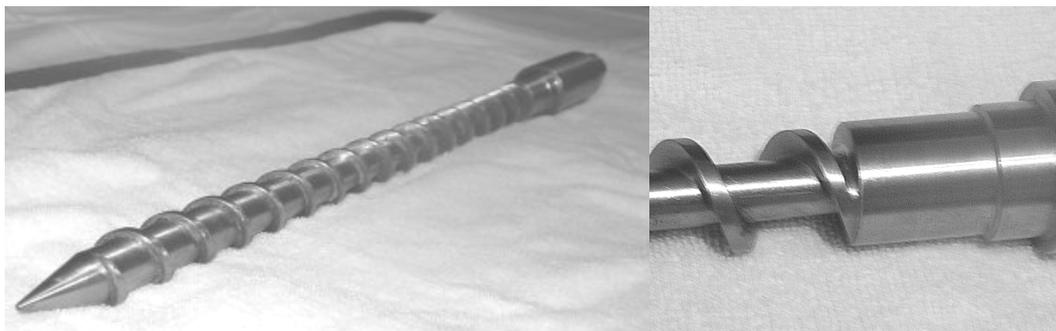


Figura 03. Tornillo de inyección

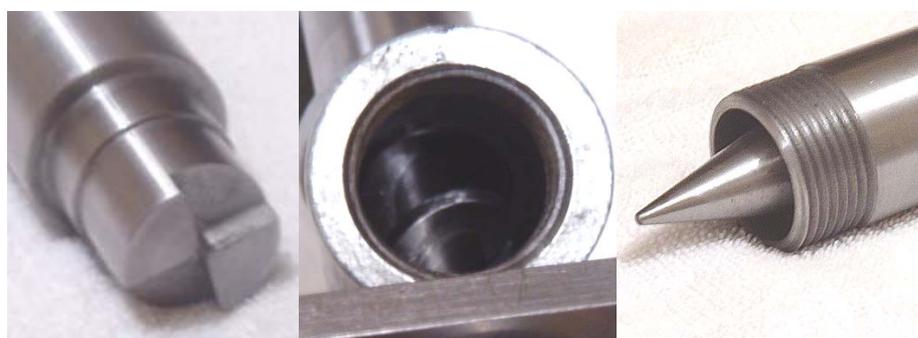


Figura 04. Detalle de acoplamiento del Tornillo (izquierda). Tornillo visto a través del ducto de alimentación (centro) visto desde la punta del barril (derecha)



Figura 05. Acople



Figura 06. Barril

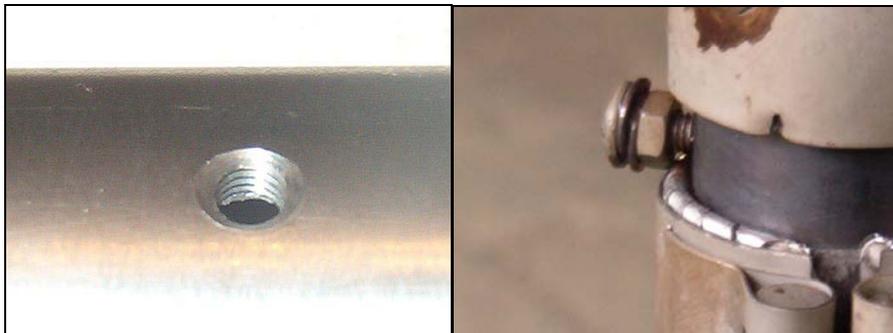


Figura 07. Detalle del agujero para el alivio de presión y escape de gases

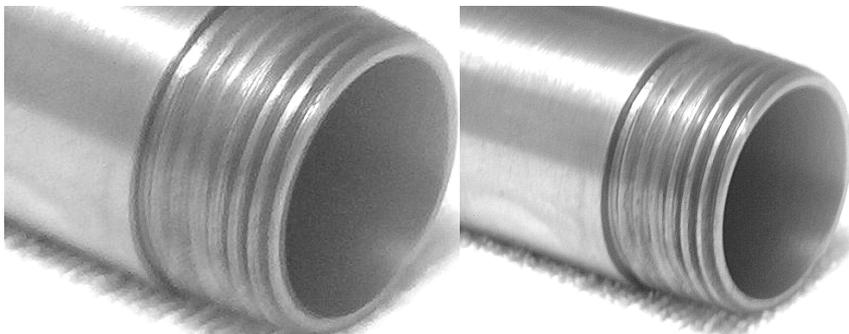


Figura 08. Detalles de rosca del barril.
Izquierda: rosca cónica para la "Y". Derecha: rosca recta para el molde



Figura 09. Resistencias



Figura 10. Molde



Figura 11. Detalles del molde.

Izquierda: Agujero para los pasadores. Centro: entrada cónica. Derecha: parte posterior.

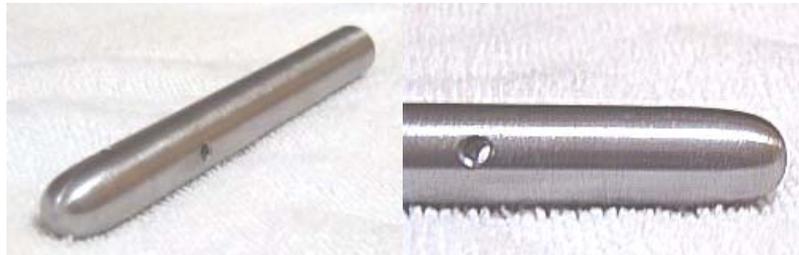


Figura 12. Extrusor (izquierda). Detalle del agujero para el pasador (derecha)



Figura 13. Izquierda: detalle de la salida del molde. Derecha Molde acoplado al anillo



Figura 14. Base del barril



Figura 15. Detalle de la base del barril.

Izquierda: Ranura para el ducto. Derecha acoplado al tubo roscado



Figura 16. Base del barril ensamblada



Figura 17. Tubo roscado de unión entre la “Y” y la base del barril

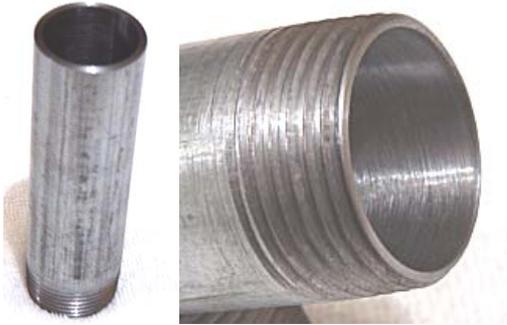


Figura 18. Ducto de alimentación



Figura 19. Anillo (izquierda) Y (derecha)



Figura 20. Base superior (izquierda) e inferior (derecha)



Figura 21. Detalle de de los agujeros del la base inferior



Figura 22. Barras

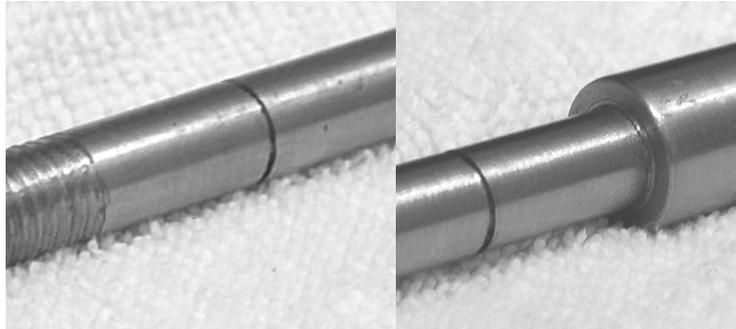


Figura 23. Detalle de ranura para anillo de retención



Figura 24. Rolineras SKF

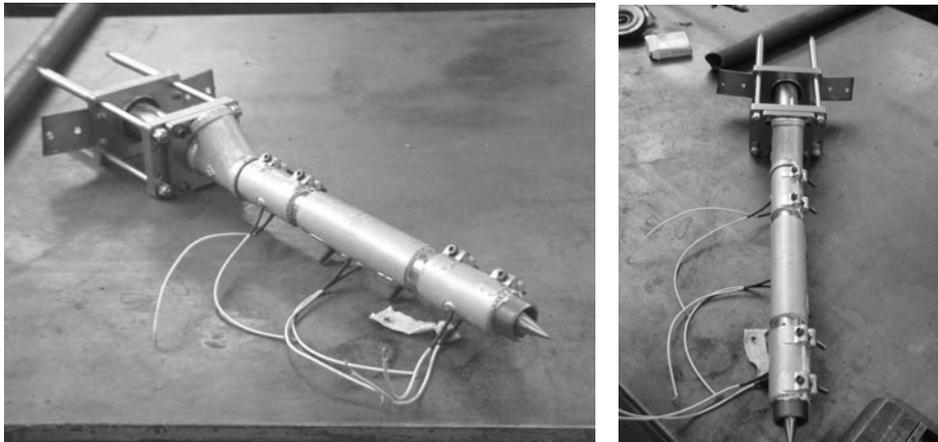


Figura 25. Unidad de Inyección UEI-HL V1

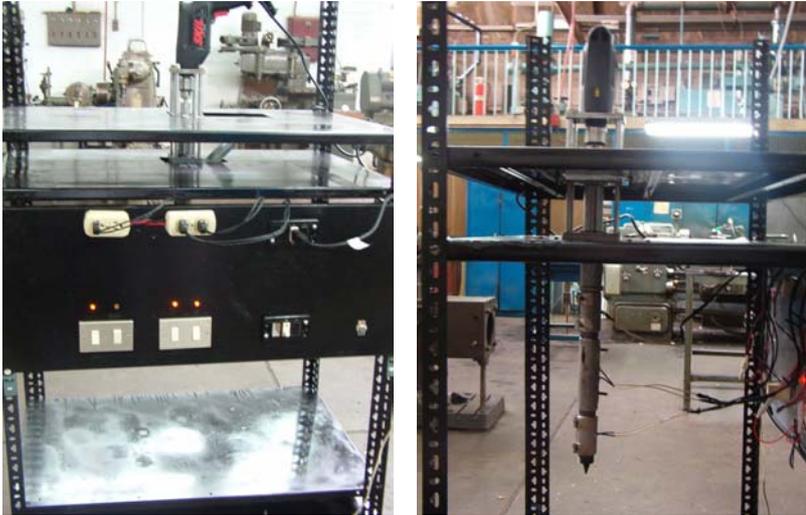


Figura 26. Máquina de Inyección en soporte

CAPÍTULO 4 - PRUEBAS DEL EQUIPO

Aquí se hará una breve descripción del procedimiento para comprobar el funcionamiento de la UEI-HL V1.

4.1 Materiales y Equipos

Fueron utilizados los siguientes equipos:

- 1) UEI-HL V1
- 2) Medidor de temperatura láser con apreciación de 1°C

El material utilizado fue Polietileno de Baja densidad color negro en cilindros de diámetro 2mm y largo 5 a 6 mm

4.2 Procedimiento

- 1) Se conectaron cada resistencia fuera de la unidad para determinar el tiempo en que cada una llega a la temperatura de funcionamiento deseada.
- 2) Se apagaron las resistencias y se dejaron enfriar.
- 3) Se montaron las resistencias en el barril.
- 4) Se encendieron las resistencias para ver el tiempo que tarda en elevar la temperatura en el interior del barril a la de funcionamiento.
- 5) Se apagaron las resistencias y se dejaron enfriar.
- 6) Se encendieron las resistencias, según la temperatura que debían alcanzar según los tiempos estimados, en el siguiente orden:
 - a) Primero la #3
 - b) Segundo la #1

- c) Por último la #4
- 7) Una vez transcurrido el tiempo en que se estimó se llegara a la temperatura de trabajo se apagaron las resistencias.
 - 8) Se introdujo el polímero por la tolva de alimentación
 - 9) Se encendió el motor a aproximadamente 25 rpm.
 - 10) Una vez obtenido una pasta homogénea se introdujo silicón para verificar el proceso de mezcla
 - 11) Una vez comprobado que la UEI-HL V1 funcionaba bien se dejó enfriar el barril.
 - 12) Se colocó el molde y se repitieron los pasos 6) al 11).
 - 13) Se quitó el molde y se desmontó la pieza interna.
 - 14) Se colocó el molde y se repitieron los pasos 6) al 11).
 - 15) Se desconectó el motor de la unidad.
 - 16) A 4 velocidades diferentes se midió la potencia consumida por el motor.
 - 17) Se montó el motor en la unidad.
 - 18) Se encendieron las resistencias durante 45 minutos.
 - 19) Se tomaron medidas de la potencia consumida por el motor en 4 velocidades.
 - 20) Se construyeron las gráficas.

4.3 Resultados

Se obtuvieron los siguientes resultados de las pruebas tanto teóricas como experimentales:

Tabla 07. Resultados de los cálculos

Parámetro	Valor de diseño para pruebas	Valores para Caudal máximo
Rpm	25	436
Caudal inyectado	$1,58 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$	$2,76 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$
Potencia del motor	22,76 W (0,0305 HP)	1447,19 W (1,9407 HP)
Presión máxima	514683,78 Pa (74,6486 psi)	514853,53 Pa (74,6732 psi)

Tabla 08. Tiempos en alcanzar las temperaturas de operación

	Tiempo en alcanzar la temperatura		
	Temperatura de operación	Resistencia sola	Resistencia en el barril
R1	170°C	10'	10'
R2-3	180°C	16'	17'
R4	150°C	6'	7'

Tabla 09. Temperatura de los componentes durante el proceso

Componente	Temperatura °C
Base superior	29
Base Inferior	32
Base del Barril	90
Y	100
Ducto de alimentación	60-90
Barril	150-180°C
Tornillo (rosca)	120
Tornillo (base)	32
Molde	80

Tabla 10. Especificaciones de la máquina de inyección.

Especificación	Unidad	
Diámetro del tornillo	mm	25
Velocidad Máxima del tornillo	rpm	200
Paso	mm	25
Relación L/D	–	16
Presión máxima a 60 rpm	Pa	97.000.000
Presión máxima de inyección a 436 rpm	Pa	514853,53
Capacidad de plastificación a 436 rpm	Kg/hr	$165,5 \times 10^{-5}$
Tiempo mínimo de arranque (T=180°C)	hr:min	0:45
Tiempo en llegar a la temperatura óptima de operación (T=210°C)	hr:min	1:30

Especificación	Unidad	
Tiempo de inicio de inyección	hr:min	0:04
Potencia del motor	W	440
rpm máxima del motor sin carga	rpm	800
Corriente máxima de trabajo del motor	A	4
Tensión de alimentación del motor	V	110
Potencia de las resistencias	W	150
Tensión de alimentación de las resistencias	V	110 AC

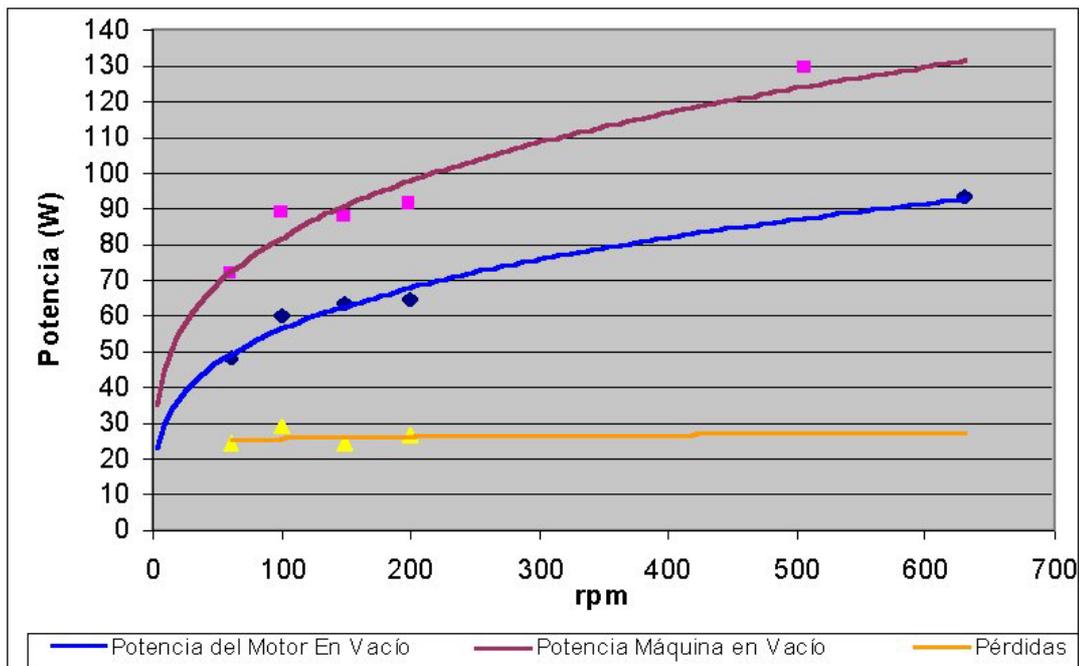


Figura 27. Gráfica de la potencia del motor a distintas rpm

Una vez calentada las resistencias, se retiró el motor en medio de una de las pruebas y se hizo girar manualmente el tornillo, este giró con facilidad comprobándose que la potencia necesaria para hacer girar el tornillo obtenida en los cálculos de 23 W es aceptable. El problema se presentó con el molde, que en la práctica, requirió mayor potencia de lo necesaria debido a que enfrió al fluido al pasar por él ya que la temperatura a la que se encontraba el molde era mucho menor a la

temperatura de entrada del fluido y por el fenómeno de transferencia de calor se empezó a solidificar formando un tapón que demandaba una potencia mucho mayor a la potencia de diseño de la UEI-HL V1 sobrepasando los 480W.

Se observó que para poder inyectar fluido el tornillo debe tener material que viene desde la SP ya que si sólo hay presente material en la SM este se recircula y no es empujado hacia adelante.

El material obtenido es homogéneo, sin inclusiones y poros, además es bastante compacto, la máquina cumple perfectamente su función de mezcla ya que al introducir Silicón con PEBD la mezcla final no presenta diferenciación entre un polímero y otro, por lo que la máquina puede usarse perfectamente para mezclar distintos polímeros, colores y hasta polvos de metales junto con los polímeros, aunque para éste último se requiere construir un nuevo barril con un acero más resistente al desgaste que el construido en el presente trabajo.

La temperatura de salida del polímero del barril se encuentra en el rango de 130°C y 170°C por lo que se pudo comprobar que la transferencia de calor es buena dentro de las secciones del tornillo donde están presentes las resistencias.

Se pudo comprobar que a pesar de presentarse una temperatura de hasta 180°C en el barril, la temperatura de la base inferior se eleva hasta a sólo 35°C, siempre y cuando el tiempo en que estén encendidas las resistencias no exceda los 30 min. La temperatura en el acople sólo subió 1°C por lo que el motor no sufre aumento de temperatura por el calentamiento del barril.

CAPÍTULO 5 - POLÍMEROS

En este capítulo se hará una breve descripción de los plásticos, los cuales consisten en un conjunto de materiales muy variados, en su gran mayoría son productos sintéticos que contienen carbono, hidrógeno, oxígeno y nitrógeno, con un componente esencial el polímero de alto peso molecular, los cuales son moléculas gigantes formadas por unidades repetitivas. En dicho capítulo no se realizará un estudio exhaustivo de los plásticos, como: propiedades, composición, clasificación y demás tópicos referentes a los mismos, ya que en la actualidad existe diversidad de bibliografías que tratan este tema de una forma más detallada, aunque solo hace referencia aquellos parámetros que son de utilidad para esta obra.

5.1 El plástico y sus inicios

En la Tabla 11 se muestra una descripción con la fecha, país y características del desarrollo de los materiales plásticos y ciertos productos elaborados. Se observa que desde el descubrimiento hasta la aplicación comercial de ciertos polímeros, pasaron muchos años.

Tabla 11. Desarrollo Histórico de los principales plásticos y productos elaborados. Descubrimientos, patentes y explotación comercial.

Material	Año	País	Características
Celuloide	1868	U.S.A	John W. Hyatt
Celulosa regenerada	1892	—	Patente Proceso Viscosa
Resinas Fenólicas	1906 1909	—	Resinas Fenol – Formaldehídos producidas por Leo H. Backeland
Celulosa regenerada	1912	Francia	Película Comercial (Cello phane)
Policloruro de Vinilo (P.V.C)	1912	Alemania Rusia	Primeras patentes alemanas (Klatte) y Rusa (Ostromislenky) describiendo el proceso de Polimerización
Acetato de Celulosa	1920/24	—	Producción Comercial de Inglaterra y U.S.A
Celulosa Regenerada	1930's	—	Primeros paquetes de cigarrillos envueltos en papel celofán
Poliamida (PA)	1930's	—	W.H.: Carothers desarrolló el método de Polimerización base para la producción de Poliamidas
Poliétileno de Baja Densidad (PEBD)	1933/35	Inglaterra	Resina en el laboratorio
Poliestireno (PS)	1937	U.S.A	Bakelite Corp. Dow (PS) Chem. Inician con éxito la producción industrial del PS
Policloruro de Vinilo (P.V.C)	1937/45	Alemania	Películas calandradas
Poliétileno de Baja Densidad (PEBD)	1939/45	Inglaterra	Películas calandradas
Poliamida (PA)	1940/41	Alemania	Primera Poliamida para moldeo
Policloruro de Vinilideno (P.V.D.C)	1945/48	U.S.A	Dow Chemical desarrolla las resinas Saran y se introduce al mercado las primeras películas (actual marca Cryovac)
ABS (Acrilonitrilo / Butadieno / Estireno)	1948	U.S.A	U.S Rubber obtiene la primera patente para la fabricación de este copolímero (marca: Royalite)
Poliétileno de Baja Densidad (PEBD)	1949	—	Primera Película Tubular Soplada
Poliéster (PET)	1953	U.S.A	

Nota: tomado de www.unsam.edu.ar/cursoitali/Plastico.doc

5.2 Definición de Plástico y su Clasificación

Los plásticos son materiales polímeros orgánicos (compuestos formados por moléculas orgánicas gigantes) y se caracterizan por una alta relación resistencia/densidad, unas propiedades excelentes para el aislamiento térmico y eléctrico y una buena resistencia a los ácidos, álcalis y disolventes.

Aunque se encuentran en estado sólido a temperatura ambiente pueden ser llevados a un estado de fluencia que permite llevarlo a diferentes formas mediante la aplicación de calor en forma controlada, el endurecimiento necesario para los artículos comerciales se logra usualmente mediante enfriamiento.

Los plásticos pueden ser clasificados en dos grandes tipos: Materiales termoplásticos y Materiales termorrígidos de acuerdo a su comportamiento durante la operación de moldeo.

Un material termoplástico es una sustancia en la que no se produce una reacción química cuando se calienta su posterior solidificación sólo sufre un cambio físico. Cuando se lo aplica calor se funde transformándose en un líquido viscoso que permite ser moldeado llenando un molde o matriz. Cuando se enfría, se solidifica y endurece tomando el material la forma del molde o matriz. Puede ser vuelto a fundir y una nueva forma con el mismo procedimiento repetidas veces sin que se produzcan cambios en la constitución química básica del material.

Un material termorrígido se denomina así porque se transforma en rígido como consecuencia de una reacción química. Una vez que se lleva a cabo la reacción química, mediante la aplicación de calor, presión o simple contacto de los monómeros se produce la solidificación o curado y el material no puede ser usado nuevamente mediante la misma operación de transformación.

Adicionalmente a esta clasificación los plásticos pueden ser subdivididos en: Plásticos o Resinas Sintéticas y Resinas Naturales.

Otra clasificación frecuente de los materiales plásticos es desde el punto de vista de su estructura morfológica: Plásticos o Polímeros Cristalinos y Amorfos.

5.3 Propiedades típicas de los materiales plásticos

5.3.1 Propiedades tensiles

Un material dúctil plástico sometido a la tracción genera una curva Tensión vs. Deformación que se muestra en la Figura 28 donde se observa una zona de deformación proporcional (recta) hasta un Punto de Cedido o Límite Elástico (denominado Yield Point en inglés).

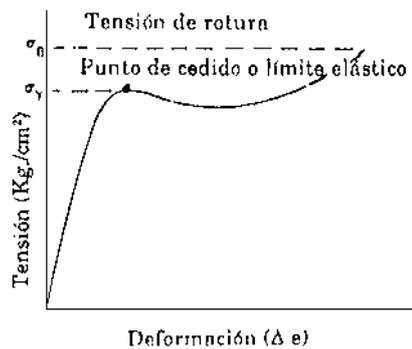


Figura 28. Curva tensión – deformación. Plásticos con características dúctiles.
Tomado de la página www.unsam.edu.ar/cursoitali/Plastico.doc

La diferencia esencial entre el comportamiento de los plásticos y metales es que los plásticos cuando se someten a tensión, la deformación resultante no depende sólo de la magnitud de la tensión sino también del tiempo durante el cual la tensión fue aplicada. Como consecuencia de ello el comportamiento de los plásticos sometidos a tensión no puede ser representado por un único valor y deben ser perfectamente definidas las condiciones de ensayo (tiempo o velocidad, temperatura, forma de moldeo de la probeta).

En el caso de los plásticos, el Módulo de Elasticidad se define como el cociente de la tensión en el punto de cedido y la deformación correspondiente.

En el caso de los plásticos rígidos la curva tensión/deformación es distinta. A medida que se aplica una tensión se produce una deformación permanente y creciente hasta la rotura, como se observa en la Figura 29

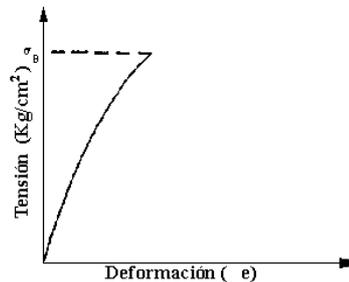


Figura 29. Curva Tensión – Deformación. Plásticos con características frágiles
Tomado de la página www.unsam.edu.ar/cursoitali/Plastico.doc

5.3.2 Temperatura vítrea en los polímeros

A pesar de que las moléculas del polímero están enredadas, cuando hay agitación térmica, existe un arreglo continuo de los átomos y moléculas dentro de un polímero líquido. Debido a esto, tiene que haber un "espacio libre" en el líquido a medida que la temperatura disminuye, la agitación térmica aminora y ocurre una disminución tanto en el "espacio libre" como en la amplitud vibracional. La disminución en volumen continúa abajo del punto de congelación hasta la región del líquido superenfriado (Figura 30). La estructura líquida se retiene. Como sucede con un líquido, a una temperatura más alta puede existir el flujo; sin embargo, naturalmente éste es más difícil (la viscosidad aumenta) a medida que las caídas de temperatura y el exceso de espacio entre las moléculas disminuyen.

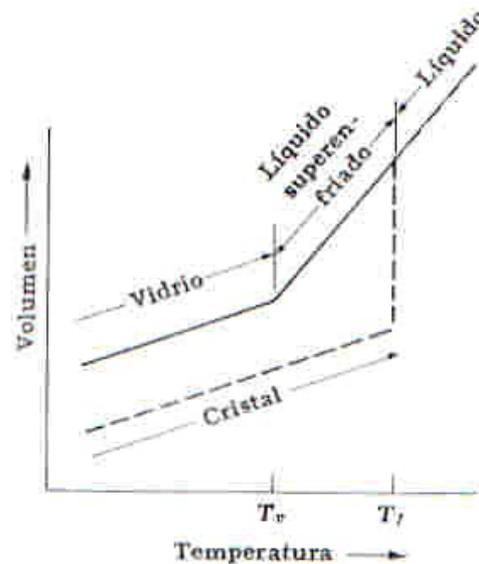


Figura 30. Volumen en función de la temperatura en los polímeros
Tomado de "Materiales para Ingeniería" por Van Vlack, Lawrence.(1980).

Aquellos polímeros que son enfriados sin cristalizar llegan a alcanzar punto en el cual la agitación térmica no es suficiente para permitir un rearrreglo de las moléculas. Aunque no es cristalino, el polímero se vuelve marcadamente más rígido. También se vuelve más quebradizo. Cuando el rearrreglo de las moléculas no pueden continuarse de modo que haya menos "espacio libre" y mejor empaque, las disminuciones adicionales de la temperatura significan solamente que las vibraciones de las moléculas son de amplitud más pequeña. De esta manera, la pendiente de la curva de la (Figura 30) se hace mucho menos pronunciada. Este punto de cambio en la pendiente se llama *punto vítreo*, o *temperatura de transición vítrea* (Van Vlack (14)), ya que este fenómeno es típico en todos los vidrios. De hecho, abajo de esta temperatura, tal como con los vidrios normales de silicato, un polímero no cristalino es un vidrio (aunque se admite que es un vidrio orgánico).

La temperatura de transición vítrea, o más simplemente, la temperatura vítrea T_g , es tan importante en los polímeros como la temperatura de fusión (o congelación), T_f .

5.3.3 Conductividad Térmica

Los materiales plásticos son malos conductores del calor comparados con los metales. La conductividad térmica de los polímeros amorfos generalmente está dentro del rango de 3×10^{-4} a 5×10^{-4} cal/cm. seg. °C, en un rango de temperatura de 0-300 °C. Por el contrario los termoplásticos semicristalinos tienen una mayor conductividad térmica alcanzando valores de hasta 12×10^{-4} cal/cm. seg. °C dado que la estructura cristalina ordenada tiene una mayor conductividad térmica que las regiones amorfas.

Por encima del punto de fusión, donde desaparece el componente cristalino la conductividad térmica tiene niveles similares a la de los polímeros amorfos. En la tabla puede observarse que los materiales plásticos son entre 100 y 1000 veces más aislantes del calor que los metales. La conductividad térmica del vidrio, muy usado en envases, es entre 7 y 3 veces más grande que la de los materiales plásticos.

Tabla 12. Conductividad (k) térmica de algunos plásticos, metales y vidrio

Materiales	k(cal./cm.seg. °C)
PE Baja Densidad (0,918 gr./cm ³) (25 °C)	$6,0 \times 10^{-4}$
PE Alta Densidad (0,951 – 0,958 gr./cm ³) (25 °C)	$9,5 - 10,9 \times 10^{-4}$
PVC (sin plastificante) (25 °C)	$3,85 \times 10^{-4}$
PVC (con 40 % de plastificante) (25 °C)	$3,70 \times 10^{-4}$
Polipropileno Homopolímero (20 °C)	$5,25 \times 10^{-4}$
Poliamida (Nylon 6 y Nylon 6-6)	$6,0 \times 10^{-4}$
Politetrafluoretileno (teflón) (20 –35 °C)	$6,0 \times 10^{-4}$
Acero al carbono	$12,4 \times 10^{-2}$
Acero Inoxidable	$3,9 \times 10^{-2}$
Aluminio	$52,0 \times 10^{-2}$
Vidrio	$25,8 \times 10^{-4}$

Nota: tomado de www.unsam.edu.ar/cursositali/Plastico.doc

Tabla 13. Propiedades térmicas de los polímeros

Polímero	Calor Específico (kJ/kg°C)	Calor latente de fusión (kJ/Kg)	Calor total para el proceso (kJ/Kg)
Acrilonitrilo Butadieno Estireno	1,47	—	300
Copolímero del acetal	1,47	163	465
Polimetil metracrilato	1,47	—	300
Nylon 6.6	1,67	130	570
Policarbonato	1,26	—	350
Polietileno	2,30	209	720
Polipropileno	1,93	100	550
Poliestireno	1,34	—	240
Pseudocloruro de polivinilo	1,00	—	160
Acetato de celulosa	1,51	—	260
Difeniloxazol	1,34	—	390

Nota: tomado de “Procesamiento de Plásticos. Inyección. Moldeo. Hule. PVC” por D.H. Morton (04) Pág. 63.

5.4 Polietileno (PE)

El Polietileno pertenece al grupo de las Poliolefinas, se han venido produciendo desde los años 30's y es el polímero mas comúnmente utilizado en la actualidad, por su versatilidad.

Los Polietilenos se clasifican atendiendo a:

Contenido de monómero:

- Homopolímero
- Copolímero

Densidad

- Baja Densidad
- Alta Densidad

Peso Molecular

- Alto Peso Molecular
- Ultra Alto Peso Molecular

Los Polietilenos son clasificados de acuerdo al código ASTM, por su densidad como:

- Polímeros de Baja Densidad: tienen una densidad comprendida entre 0,910 – 0,940 g/Cm³.
- Polímeros de Alta Densidad: Tienen una densidad comprendida entre 0,941 – 0,965 g/Cm³.

En la siguiente tabla se presenta como se ven afectadas ciertas propiedades del Polietileno al aumentar la densidad del mismo; por ejemplo al aumentar la densidad el producto terminado tiene una mayor rigidez y una mayor dureza.

Tabla 14. Efecto sobre las propiedades del polietileno con el incremento de la densidad.

Propiedades	Efecto
Rigidez	Aumenta
Dureza	Aumenta
Resistencia a la tensión	Aumenta
Resistencia a la abrasión	Aumenta
Resistencia química	Aumenta
Barrera a los gases	Aumenta
Brillo	Disminuye
Punto de reblandecimiento	Aumenta
Impacto a bajas temperaturas	Aumenta
Resistencia al rasgado	Disminuye
Elongación	Disminuye

Nota: tomado de “Guía Práctica de los Materiales Plásticos”. AVIPLAT. 2003. Pág. 31

Tabla 15. Clasificación de los polietilenos de acuerdo al peso molecular

Clasificación Peso Molecular (g/gmol)	
LDPE	100.000 - 300.000
LLDPE	200.000 - 500.000
HDPE	200.000 - 400.000
HMWHDPE	200.000 - 500.000
UHMWPE	1.500.000 - 6.000.000

Nota: tomado de “Guía Práctica de los Materiales Plásticos”. AVIPLAT. 2003. Pág. 32

Tabla 16. Efectos del aumento de peso molecular en el Polietileno

Propiedad	Efecto
Viscosidad de la masa fundida	Aumenta
Resistencia a la tensión	Aumenta
Resistencia al impacto	Aumenta
Dureza	Aumenta
Resistencia a la abrasión	Aumenta
Elongación	Disminuye
Resistencia química	Aumenta
Barrera contra gases	Aumenta
Punto de reblandecimiento	Aumenta
Transparencia	Disminuye
Brillo	Disminuye
Índice de Fluidez	Disminuye

Nota: tomado de “Guía Práctica de los Materiales Plásticos”. AVIPLAT. 2003. Pág. 32

El Polietileno es un polímero termoplástico cuya estructura es simétrica y presenta una gran tendencia a cristalizar, por ello se considera un polímero semicristalino cuya estructura general se presenta a continuación:



Figura 31. Cadena del polietileno
Tomado de “Guía Práctica de los Materiales Plásticos”. AVIPLAT. 2003. Pág. 33

Según las condiciones de la reacción de presión, temperatura, uso de iniciadores y catalizadores para la obtención del Polietileno, la polimerización puede originar, tanto macromoléculas lineales o poco ramificadas, como macromoléculas muy ramificadas.

Las diferencias mencionadas en la cadena de la macromolécula del Polietileno, se reflejan en las características físicas de cada tipo de Polietileno. El Polietileno con cadenas poco ramificadas tiene capacidad de cristalizar, esto hace que este plástico se empaquete mejor obteniendo una alta densidad y una mayor resistencia mecánica. Por otra parte, los Polietilenos de estructuras muy ramificadas, tiene una cristalinidad menor que la del Polietileno de cadenas lineales, dando como resultado una estructura menos densa y por ende una menor resistencia mecánica.

En cuanto a los tipos de estructuras de los Polietilenos se tienen las siguientes, de manera muy general:

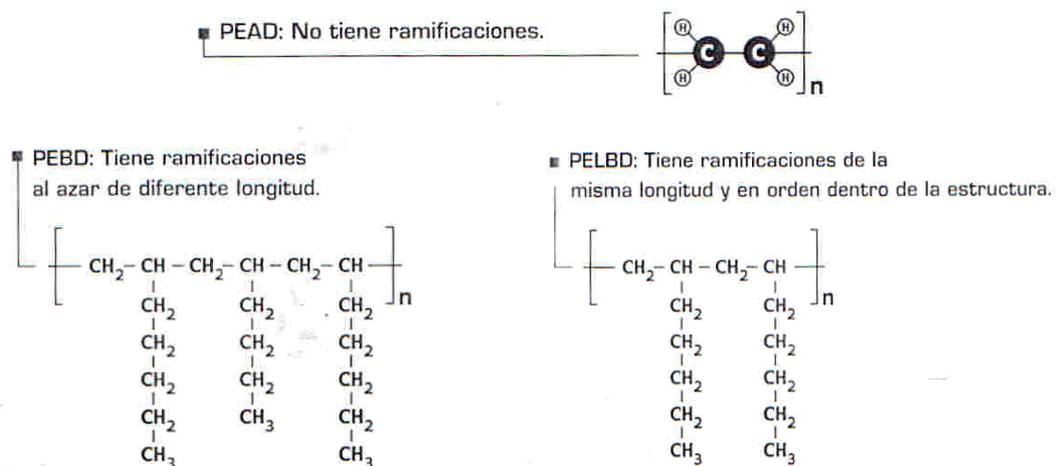


Figura 32. Cadena molecular de los distintos Polietilenos
Tomado de “Guía Práctica de los Materiales Plásticos”. AVIPLAT. 2003. Pág. 33

Para la fabricación del Polietileno existen dos procesos:

- Proceso de Alta Presión:
 - Polietileno de Baja Densidad.
- Proceso de Baja Presión
 - Polietileno de Alta Densidad.
 - Polietileno Lineal de Baja Densidad.
 - Polietileno de Alta Peso Molecular.
 - Polietileno de Ultra Alto Peso Molecular.

En el Proceso de Alta Presión el etileno gaseoso, muy puro, se polimeriza en presencia de un iniciador a presiones de 1000 a 3000 atm y temperaturas de 10° C a 300° C. La reacción se puede efectuar en reactores autoclaves con agitador o en reactores tubulares. Dependiendo del proceso utilizado para efectuar la reacción se pueden obtener Polietilenos de amplia distribución de pesos moleculares y grandes ramificaciones. Adicionalmente se pueden obtener Polietilenos con pocas ramificaciones y una distribución de pesos moleculares angosta, lo cual hace que tenga mayor facilidad para su transformación.

En los procesos de baja presión, se cambian las altas presiones que se utilizan en los procesos anteriores por compuestos organometálicos de aluminio y titanio denominados catalizadores de Ziegler-Natta. La reacción se lleva a cabo en condiciones de presión de 1 a 100 kg/cm² y de temperatura de 25 a 100°C. Dependiendo del tipo de polimerización utilizada se obtienen: Polímeros en solución, en suspensión o en fase gaseosa. En solución se obtienen Polietileno Lineal de Baja Densidad, en suspensión el Polietileno de Alta Densidad.

La clasificación utilizada en la industria se basa en la densidad, y partiendo de esta, se hará el análisis por cada tipo de Polietileno. En la siguiente tabla se describirán las propiedades del polietileno y sus aplicaciones.

Tabla 17. Características, propiedades y aplicaciones de los Polietilenos

Material	PEBD(LDPE)	PEAD(HDPE)	HMW-DPE	UHMWPE	PELBD
Características	Estructura amorfa, mantienen buenas propiedades por encima de 60° C, impermeable al agua.	Alta grado de cristalinidad, casi no tiene ramificaciones.	Tiene un peso molecular promedio de 200.000 - 500.000 g/mol	Su peso molecular varia entre 3*10 ⁶ - 6*10 ⁶ g/mol. Es altamente cristalino.	Es un Copolímero Tiene una viscosidad mayor que el PEBD
Apariencia	Traslucida, inodoro	Material opaco, aspecto ceroso.			Es menos transparente que el PEBD.
Propiedades Reológicas		Presenta mayor dificultad de procesamiento.	Es muy difícil de procesar por su elevado peso molecular.		
Propiedades Físicas	Densidad = 0,910 - 0,925 g/cm ³ , T _{fusión} = 110° C, T _{reblandecimiento} = 80 - 100° C Índice de Fluidez 0,9	Densidad = 0,941 - 0,965 g/cm ³ , T _{fusión} = 120 - 136° C.	Densidad = 0,944 - 0,954 g/cm ³ , rango de trabajo -40 a 120° C.		T _{fusión} = 1400C
Propiedades Mecánicas	Dependen del grado de Polimerización, al aumentar el PM, se mejoran las propiedades mecánicas.	Presenta mejores propiedades mecánicas que el PEBD o el PELBD. Buena resistencia al impacto y a la abrasión.	Buena resistencia al rasgado.	Excelente resistencia al impacto, a la fatiga, a la abrasión, por debajo de -200° C.	Mayor resistencia a la tracción, al rasgado, es más duro, resistencia al impacto
Propiedades Químicas	Gran resistencia a las sustancias químicas.	Excelente resistencia a las sustancias químicas, no es resistente a los oxidantes.	En cuanto a sus propiedades químicas, son muy parecidas a las del PEAD, pero aún mejores.	Excelente resistencia a los medios agresivos, incluyendo a los oxidantes.	Presenta las mismas características que el PEBD, es atóxico.
Aplicaciones	Sector de envases y empaques, botellas, envase industrial. Tuberías. Película para invernadero. Aislante para cables, cables de alta frecuencia, material dieléctrico, juguetes, etc.	Bolsas para mercancía, para basura, botellas para leche, cajas para transporte de botellas, envases para productos químicos. Aislante de cable para conexiones. Recipientes para aceites y gasolina, conexiones y tanques para agua. etc.	Fabricación de películas, bolsas, empaque de alimentos y recubrimiento de latas, tuberías a presión. Contenedores con capacidades de 200 Lt. Conducto de la fibra óptica para las instalaciones telefónicas.	Partes y refacciones de maquinaria, cintas de guías, canales, cintas de rodamientos, recubrimientos para bandas transportadoras. Partes de motores eléctricos, interruptores y acopladores.	Películas y láminas, película encogible, bolsas grandes de uso pesado, en contacto con alimentos empacados al vacío como carnes frías y quesos, bolsas de hielo por su baja permeabilidad a los gases, pañales desechables.

Nota: Tomado de "Guía Práctica de los Materiales Plásticos". AVIPLAT. 2003. Pág. 36

Tabla 18. Ficha técnica del polietileno de baja densidad (PEBD)

Grupo	Resinas Poliolefinicas
Material	Polietileno de Baja Densidad
Símbolo ISO	PE Baja densidad
Especificaciones	DIN 16776 UNI 7054
Estructura molecular	Semicristalina

	Método de prueba	Unidades	Valores típicos
Peso Específico (Densidad)	ASTM D792	g/cm ³	0,918 – 0,930
Densidad Aparente	ASTM D954	g/cm ³	–
Absorción de agua (24h – 23°C)	ASTM D570	%	0,015
Temperatura de ablandamiento (VICAT – 5kg)	ASTM D1525	°C	–
Dureza Rockwell	ASTM D785	Escala	–
Dureza Shore	ASTM D1706	Escala D	40 – 45
Esfuerzo a la Tensión (a la rotura)	ASTM D638	N/mm ²	10 – 16
Elongación (a la rotura)	ASTM D638	%	500 – 700
Módulo elástico (a la flexión)	ASTM D790	N/mm ²	600 – 800
Esfuerzo al impacto (IZOD – con ranura)	ISO 180	mJ/mm ²	No se rompe
Resistencia dieléctrica. Condiciones de la probeta: 23°C – 50% de humedad relativa	ASTM D149	kV/mm	18 – 20

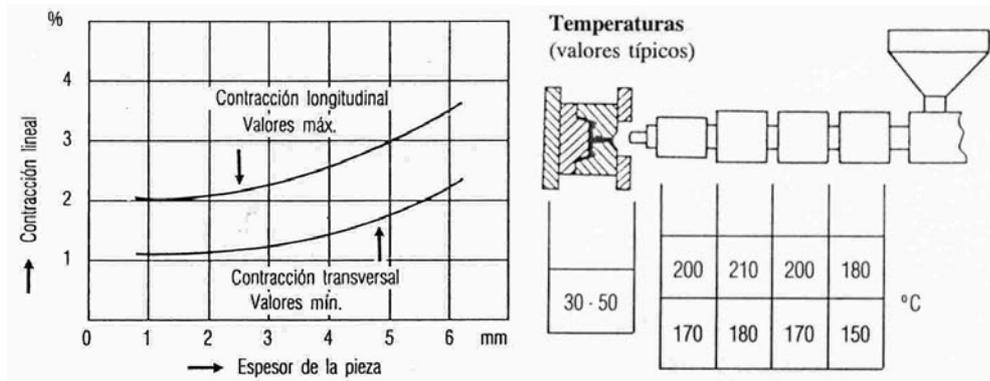


Figura 33. Valores típicos de contracción lineal y temperatura en el barril

Tabla 19. Ficha técnica del polietileno de alta densidad (PEAD)

Hay que considerar varios aspectos en el momento de procesar el Polietileno, los más importantes son los siguientes:

- Debido a que este polímero no absorbe casi agua, no es necesario realizar un presecado antes de su procesamiento, a menos que se estén utilizando aditivos higroscópicos.
- Este tipo de material tiende a oxidarse en el aire, cuando está fundido. Por ello el tiempo de exposición debe ser el más pequeño posible.
- Presenta elevada contracción al enfriarse.
- Las propiedades de las películas obtenidas dependen en gran medida del tipo de Polietileno que se utiliza y de las condiciones del proceso.
- Las propiedades del producto acabado dependen de la elección del tipo de Polietileno y de condiciones de proceso.

CAPÍTULO 6 - LA MÁQUINA DE INYECCIÓN

En este capítulo se hará una breve descripción de la máquina de inyección, su historia, las unidades que la conforman, sus disposiciones constructivas más comunes, se hará mención a los aspectos que hay que tomar en cuenta para el diseño de este tipo de máquinas para de esta manera poder entender el funcionamiento y papel que desempeña esta y las unidades que la conforman. Existe un gran número de autores que explican en detalle todo lo referente a las máquinas de inyección así como también cada una de las unidades que la conforman. Sólo se hará referencia a los aspectos más relevantes para la realización de este trabajo según son expuestos por Munns (06) y Rosalto (08). Se profundizará un poco más en los parámetros de diseño descritos en la sección 8.2 titulada Cinemática del Tornillo de Plastificación, que es parte del marco conceptual para el diseño y cálculo del equipo.

6.1 Breve Historia

Munns (06) destaca que el trabajo con los materiales termoplásticos comenzó hace noventa años con el movimiento comercial de celuloide en Estados Unidos. Unos veinte años después Schönbein descubrió el nitrato de celulosa que hizo posible el desarrollo de los primeros materiales sintéticos termoplásticos. En Inglaterra, Alexander Parkers en 1862, desarrollo este material como un compuesto de nitrato de celulosa con aceite de castor como agente plastificante. Tres años después patentó el uso del alcanfor como agente ablandante para conseguir un material en una forma que sería la base para el moldeo por inyección.

La primera máquina fue diseñada, no para moldear piezas sino para la producción de redondos, planchas o tubos, y fue, por tanto una máquina de extrusión.

John e Isaiah Hyatt fueron lo propietarios de una patente en noviembre de 1872 para esta máquina de extrusión de nitrato de celulosa.

El pistón de extrusión de Hyatt consiste en un pistón hidráulico con movimiento hacia abajo que se mueve en un cilindro. A fin de limitar el desastroso efecto de un explosión que podía producirse en este material inflamable, se dio un juego de 3,2mm entre el pistón y el barril, llamado por Munns (06) “cilindro de caldeo”, este a su vez era enfriado por la parte superior por agua la cual impedía el retorno de material durante el trabajo de la máquina.

A fin de adaptar este tipo de máquina a la producción de piezas por inyección, John Hyatt obtuvo una patente en 1878. Este moldeo se efectuaba conectando la boquilla en el extremo inferior del cilindro de caldeo a un molde que se mantenía cerrado por una prensa hidráulica.

Alguna de las primeras aplicaciones fueron el recubrimiento de núcleos de material con celuloide para la producción de hebillas de las guarniciones y brochas para afeitar hacia finales del siglo XIX.

En Alemania el Dr. Eichengrün patentó en 1921 el método de obtención de piezas de acetato de celulosa por el proceso de inyección. Las primeras máquinas fueron construidas por Eckert Ziegler hacia el año 1925, cuyo diseño influyó tanto en Estados Unidos como en Inglaterra.

En 1927 la necesidad de mayor potencia obligó la utilización de un pistón de inyección accionado reumáticamente. Estas primeras máquinas eran de pequeña capacidad con posibilidad de inyección de piezas de pequeños gramos.

Para comienzos de 1930 ya se habían diseñado las máquinas totalmente automáticas con secuenciadores eléctricos programados y cilindros de inyección calentados eléctricamente y algunas de las mayores máquinas tenían la capacidad de obtener piezas de 140gr.

Para este período el conocimiento sobre los materiales termoplásticos era muy poco y pronto se hicieron evidentes las dificultades de calentar totalmente el material

lo que trajo como consecuencia la introducción de un torpedo en el cilindro de caldeo para incrementar el área de calentamiento, patentado por Hans Gastow con lo cual se producía una más favorable relación área/volumen dentro del cilindro aumentando así la efectividad, siendo adoptado con gran rapidez por todos los fabricantes de este tipo de máquinas.

Durante la última parte de los 30 se importaron este tipo de máquinas a Estados Unidos donde no existían este tipo de máquinas, pero lo inadecuado de estas máquinas para las necesidades norteamericanas provocó que los ingenieros americanos comenzaran a producir sus propias máquinas, haciendo uso de los proyectos importados pero incorporando nuevas características que les permitieran obtener altas presiones. Los fabricantes termoplásticos vieron que la carencia de conocimientos científicos acerca del tema retazaba de sobremanera la expansión de estas máquinas. Se comenzaron programas de investigación para estudiar la relación entre la temperatura del material, presiones, velocidad de inyección y fuerza de cierre durante el moldeo.

La segunda guerra mundial fue la causante de un gran desarrollo técnico en muchos campos de la industria. Una de las influencias más importantes sobre el desarrollo de los materiales fue la escasez en tiempo de guerra de caucho natural, tanto los aliados como las fuerzas del Eje sufrieron reducciones en sus suministros de materias primas. La industria de los plásticos demostró ser una fuente inagotable de sustitutos aceptables. Los americanos construyeron grandes plantas químicas para la producción de caucho sintético, a fin de salvar la carencia de la goma natural, cuyas fuentes estaban en manos japonesas en 1942.

A parte de los celulósicos se desarrollaron muchos otros materiales en tiempo de guerra. Estos materiales incluían el poliestireno, metacrilato de metilo, polietileno, nylon y vinílicos.

Durante los años de la posguerra se mantuvo el elevado ritmo de los descubrimientos y desarrollos de la industria de los plásticos. Tuvieron especial interés los avances en plásticos, como los policarbonatos, los acetatos y las

poliamidas. Se utilizaron otros materiales sintéticos en lugar de los metales en componentes para maquinaria, cascos de seguridad, aparatos sometidos a altas temperaturas y muchos otros productos empleados en lugares con condiciones ambientales extremas. En 1953, el químico alemán Karl Ziegler desarrolló el polietileno, y en 1954 el italiano Giulio Natta desarrolló el polipropileno, que son los dos plásticos más utilizados en la actualidad. En 1963, estos dos científicos compartieron el Premio Nobel de Química por sus estudios acerca de los polímeros.

6.2 Ventajas y Desventajas del Moldeo Por Inyección

El moldeo por inyección se diferencia primordialmente del moldeo por extrusión en el sistema hidráulico de cierre y apertura del molde que posee, el resto de componentes que lo conforman son casi idénticos, por lo que la comparación entre estos dos procesos se realiza más a las virtudes o que tiene principalmente la unidad de apertura y cierre del molde, por ende no se aplica a el caso de esta tesis ya que no involucra el diseño del molde.

6.2.1 Ventajas

- 1 El manejo de material por parte de operadores está reducido a causa de la tolva de prensa contendrá usualmente suficiente material para moldear piezas por un período extendido.
- 2 Tras haber sido cerrado el molde antes de inyectar en él cualquier material adentro, las piezas que contienen inserciones de metal pueden ser moldeadas sin tener inserciones de rebabas de metales.
- 3 Las tolerancias relativamente más apretadas a través de las líneas de separación son posibles.
- 4 La rebaba en la línea de separación puede ser mantenida a un grosor mínimo si el molde está diseñado apropiadamente y bien mantenido.

- 5 El moldeo por inyección de materiales termoendurecidos es apto para automatizar el proceso lo que puede resultar en bajos precios por pieza.

6.2.2 Desventajas

- 1 La deformación puede ser un problema en la inyección a causa de que los flujos de materiales de inyección son más suaves y el encogimiento es más grande. Introducir por la fuerza el material por el bebedero, canales y entrada, puede orientar el material produciendo encogimiento no uniforme.
- 2 El llenar de las piezas por una de las dos entradas produce piezas que tienen líneas de punto. Estas líneas de punto son las más débiles áreas en la pieza.
- 3 La cantidad de chatarra en total producida durante moldeo por inyección será usualmente superior que la de moldeo por compresión a causa de la chatarra adicional del bebedero y canal. En el pasado, la chatarra termoendurecida tenía que ser tirada en un vertedero de basuras. Sin embargo, ahora están siendo reciclados con éxito algunos materiales termoendurecidos.

6.3 Tipos de Máquinas

Durante los años de post-guerra los caminos de investigación permitieron conseguir muchas mejoras de a máquinas de inyección, algunas para solucionar problemas técnicos generales del proceso y otras para solucionar técnicas especiales.

A pesar de la gran variedad de máquinas, éstas están conformadas por las mismas partes básicas. Estas son:

- 1.- La unidad de fijación del molde o unidad de cierre: consta de los dispositivos necesarios para la colocación, accionamiento y funcionamiento de las dos mitades del molde.

- 2.- La unidad de inyección: comprende aquellas partes de la máquina necesarias para la carga, plastificación o fundición e inyección del material plástico.
- 3.- La unidad de potencia: comprende toda aquella parte de la máquina necesaria para transformar y suministrar la fuerza motriz a las unidades de inyección y cierre.
- 4.- La unidad de control: necesaria para que el proceso de la máquina sea de una forma predeterminada y pueda variarse a voluntad si es necesario.

Las cuatro unidades constituyen las partes de la máquina. La disposición de la máquina tiene que tener en cuenta los siguientes puntos:

- 1.- Forma de trabajo.
- 2.- Facilidad de manejo.
- 3.- Accesibilidad de los dispositivos de la máquina que necesiten ajuste.
- 4.- Facilidad de montaje.
- 5.- Accesibilidad para el mantenimiento.
- 6.- Superficie del suelo que ocupa.

Cada uno de estos factores debe tomarse en cuenta a la hora de seleccionar la disposición de las unidades de la máquina, y cuando son contradictorios, se adopta un compromiso entre ellos.

6.3.1 Disposición constructiva de las máquinas

Las dos partes más importantes de la máquina son la Unidad de Inyección y la Unidad de Cierre. Aunque hay muchas disposiciones de estas dos unidades, se presentan cuatro principales, diferenciándose por la combinación de colocación de estas en posición vertical u horizontal. Estas son:

- 1.- Inyección y Cierre Horizontal.
- 2.- Inyección Horizontal y Cierre Vertical.

- 3.- Inyección y Cierre vertical.
- 4.- Inyección vertical y Cierre Horizontal.

6.3.1.1 Inyección y Cierre Horizontal

Las máquinas que tiene esta disposición con los movimientos de cierre e inyección opuestos son la mayoría. Esta disposición ocupa generalmente más espacio en el suelo, la ventaja es que las distintas partes de esta máquina se encuentran a una altura adecuada para el montaje, ajuste, cambios de molde y mantenimiento. El llenado de la tolva con sacos de 25kg de resina no presenta gran dificultad, excepto con máquinas que tengan gran tamaño.

Las caras del molde son invariablemente verticales permitiendo la expulsión de la pieza por gravedad, aspecto que favorece en la velocidad de producción en serie de piezas de plástico, aunque esto puede ser una desventaja si la pieza es frágil ya que al caer de la máquina puede dañarse.

En las grandes máquinas, el peso de las partes móviles obliga la utilización de cojinetes y guía adecuadas para reducir el desgaste de las piezas de la misma.

Un problema común de esta disposición, es que la producción de piezas de inyección que llevan insertos requiere de una atención especial, el movimiento de la máquina y del molde deben ser tales que los insertos no estén mal colocados cuando se cierre el molde.

6.3.1.2 Inyección Horizontal y Cierre Vertical.

Un número sustancial de este tipo de máquinas se ha modificado por los moldeadores que tenían prensas verticales. Estas prensas, normalmente utilizadas en el moldeo por compresión, prensado de planchas, moldeo de formas y otros procesos, se han equipado con unidades de inyección horizontales. De esta manera se ha obtenido una mayor utilización de la máquina, aumentando la versatilidad de la prensa.

Aparte de las ventajas económicas de la conversión del equipo existente y extensión de su uso a procesos diferentes, este tipo particular de máquina tiene sus ventajas aún cuando se emplee únicamente para inyección. La superficie del suelo y mayor altura de la máquina, comparadas con la máquina horizontal de tamaño equivalente, son características que merecen tenerse en cuenta. Cuando la altura de la máquina es más fácil de encajar que la longitud de la misma, este tipo particular de construcción puede tener ventajas, especialmente para máquinas de grandes recorridos.

Muchos métodos de cierre pueden emplearse, el más usado, especialmente para los tipos mayores, es la prensa hidráulica de carrera descendente. Cuando se emplean moldes de ataque lateral en este tipo de máquinas, la boquilla de la Unidad de Inyección se sitúa para que coincida con la línea de partición del molde.

6.3.1.3 Inyección y Cierre vertical.

Esta disposición ofrece la máxima economía en superficie. Esta ventaja puede perderse debido a que la gran altura necesaria del taller para máquinas grandes puede ser prohibitiva.

La Unidad de Inyección se monta por encima de la Unidad de Cierre. La Unidad de Cierre vertical tiene sus ventajas para la inyección de piezas que requieren el empleo de insertos o machos. Y pueden instalarse en la mitad de la superficie necesaria para máquinas horizontales de capacidad similar.

El trabajo totalmente automático de las máquinas verticales requiere de dispositivos adicionales para asegurar una separación adecuada de las piezas moldeadas del molde. Sin embargo, este problema particular de la descarga automática ha sido resuelto por el empleo de métodos normalmente utilizados en el moldeo por compresión automático.

6.3.1.4 Inyección vertical y Cierre Horizontal.

La unidad se encuentra montada en un plano vertical y la inyección de material al molde se realiza desviando el material a 90° en el extremo final del barril.

Una ventaja característica es la flexibilidad del trabajo con diferentes tipos de moldes no queda disminuida. Pueden emplearse moldes de inyección contral e inyección lateral, tanto de una como de múltiples cavidades con la misma facilidad de una máquina horizontal aunque más compacta ocupando menos superficie.

6.4 La Unidad de Inyección

La unidad de inyección es la más importante pues es la que realiza la mayor parte del trabajo. A ella se suministra el material, se plastifica, comprime y finalmente debe ejercer la presión necesaria para inyectarlo en el molde y llenar todas sus cavidades.

En esta unida se efectúa la transferencia de calor hacia el material, está formado por el barril o cilindro de caldeo, el tornillo y los calentadores.

El movimiento de giro del tornillo crea una turbulencia en el material contenido en sus canales que contribuye la transferencia de calor a través del material desde las paredes del barril. En adicción al calor transferido desde la superficie del cilindro existe también un efecto apreciable de calentamiento debido a la conversión de energía mecánica en calor, esta energía se origina por la resistencia ofrecida por el polímero al girar el tornillo, venciendo éste dicha resistencia y ejerciendo fuerzas de resbalamiento sobre el material.

Como el material termoplástico es un mal conductor de calor, es obvio que una gruesa capa de material necesitará una temperatura más elevada o mayor tiempo de exposición, a fin de que el material más alejado de la fuente de calor para alcanzar la temperatura necesaria.

La tolva de entrada está montada directamente sobre la parte posterior del tornillo y los gránulos forman una columna que proporciona una alimentación continua de material sobre el tornillo..

El factor volumétrico del material tiene una influencia indirecta sobre la máquina debido a la densidad aparente del material que ingresa a la unidad, haciendo necesario, aparentemente, introducir un volumen mayor de material al teóricamente requerido.

Respecto a la mezcla, es sistema por tornillo favorece notablemente a este proceso debido a la turbulencia que se genera cuando el tornillo está girando, esto ayuda a la homogenización del material lo que permite el mejor coloreado del polímero antes de ser inyectado al molde.

6.4.1 Tornillo de plastificación

El tornillo normalmente es un dispositivo aparentemente simple, pero realiza muchos funcionamientos diferentes al mismo tiempo. Éstos incluyen (1) alimentación y transporte de sólidos; (2) compresión y fundición; y (3) mezclando, refinamiento de la fusión, presión y estabilización de temperatura. Para ello el tornillo se divide en tres secciones, la primera de alimentación, la segunda de plastificación y la tercera llamada de medición¹⁴.

6.4.1.1 Sección de alimentación (SA)

Plástico no-fundido en pelotillas u otra forma entra en el principio de la sección de alimentación y es arrastrado a través del barril como es arrastrado la nieve por una barredora de nieve. A medida que va avanzando las pelotillas se van juntando cada vez más unas a otras llenándose así los espacios de las hélices del tornillo debido a la resistencia que ofrecen a ser empujadas. El movimiento de los sólidos es afectado por

¹⁴ Traducción literal de la palabra en inglés “metering”

varios factores, como el ángulo y la profundidad de la de la hélice, la fricción con las paredes del tornillo y del barril.

La forma del material a ser suministrado también es un factor determinante. Material en forma de polvo, a veces con pelusa, tiene más problemas a ser alimentado que el material en forma de esferas. La densidad del material a introducir afecta directamente la altura de la hélice en esta sección.

La cavidad de introducción de material al barril a evolucionado pasando de circular, a ovalado a cuadrado con una sección 1,5 a 2,5 veces del diámetro interno del barril, mejorando sustancialmente la admisión de material a esta sección del tornillo.

6.4.1.2 Sección de plastificación (SP)

También llamada sección de transición o de compresión. Esta es la sección en que el tornillo reduce la altura de hélice o el paso de esta para llegar la sección de medición que es de poco volumen. Esta reducción depende del polímero a procesar. Varios procesos ocurren en esta sección los cuales son: (1) fundición o plastificación, (2) consolidación y eliminación de vapores, y (3) el aumento de presión.

Aunque la fundición ocurre desde la sección de alimentación la mayoría ocurre en esta sección, por ello los tornillos más modernos suelen tener esta sección más larga que las otras. La sección va disminuyendo y el tapón sólido se va comprimiendo y frotando contra la superficie caliente produciendo además calor por fricción la cual aumenta considerablemente a velocidades más altas. Esto ocasiona que el 100% del plástico se funda y puede llegar a quemarse, lo cual se puede solucionar con velocidades menores o un mejor diseño de esta sección del tornillo.

El polímero cambia de pelotillas con aire entre ellas a una masa pura sin aire ni gases al final de la sección. Normalmente la densidad de la resina que entra a la sección de alimentación es la mitad de la resina fundida libre de gases. Esta zona logra este cambio utilizando una relación de compresión de 2:1 o mayor. Si esta relación es muy baja para el polímero de trabajo el producto fina contendrá espacios

de aire. Si por el contrario es muy alta, el tornillo pierde la capacidad de fundir en su totalidad la masa de plástico que transita por él. Esta compresión se puede lograr disminuyendo la profundidad en la sección de medición, aumentando la profundidad en la sección de alimentación o una combinación de ambas. Lo más común es disminuir la profundidad en la sección de medición.

La sección también aprieta el material comprimiéndolo por una variación de volumen. La mayor presión en el tornillo ocurre por ende al final de esta sección.

6.4.1.3 Sección de medición (SM)

En esta sección la profundidad de la hélice vuelve a ser constante y cuyo volumen debe contener la cantidad exacta de plástico a ser inyectado. En muchos mecanismos esta sección actúa como una bomba debido a la gran presión que se debe ejercer sobre el plástico para ser inyectado.

La sección de medición debe lograr lo siguiente: (1) una medición, presión y temperatura uniforme del material, (2) alguna fusión final, (3) refinamiento de la fundición y (4) sostenimiento de la presión final del barril.

CAPÍTULO 7 - MECÁNICA DE FLUIDOS Y TRANSFERENCIA DE CALOR

El presente capítulo tratará de explicar las relaciones aplicadas a la ingeniería del flujo por geometrías “normales”. Se tratará a fluidos independientes del tiempo con un esfuerzo cortante conocido, transferencia de calor en ductos de sección circular y anular. Se hará referencia a las ecuaciones necesarias para aplicar en los cálculos más no la formulación de cómo se llegaron a esas ecuaciones ya que tales deducciones aparecen bien explicadas en la bibliografía consultada. Una excepción es el desarrollo de la formulación para fluidos No-Newtonianos ya que se presenta en muy poca bibliografía, la formulación y teoría fue tomada de la planteada por Skelland (11) y se desarrollará con un poco más de detalle.

7.1 Propiedades Fundamentales

7.1.1 Viscosidad

Los esfuerzos cortantes hacen que un líquido fluya. La velocidad del flujo es inversamente proporcional a la viscosidad. Aquellos plásticos que se encuentran entre la temperatura vítrea, T_v , y la temperatura de fusión T_f se comportan como líquidos sobre-enfriados están por ello sujetos al flujo viscoso en adición a la deformación elástica. La velocidad de flujo puede ser lenta debido a que comúnmente la viscosidad η es alta. Sin embargo, esto conduce al ablandamiento cuando un plástico soporta una carga a largo plazo. En forma semejante, permite el procesado por deformación del plástico dentro de un molde a altas temperaturas.

Por encima de la temperatura vítrea las moléculas tienen la libertad de enredarse y voltearse por agitación térmica. Cuando caen abajo de esa temperatura,

no hay suficiente agitación térmica para permitir el rearrreglo de las moléculas en empaques más compactos. Así pues, esto representa una discontinuidad en el comportamiento térmico del material.

En el rango de la temperatura vítrea, el material tiene la consistencia del cuero, puede ser deformado e inclusive plegado, mas no recupera con rapidez su forma original. En la "meseta con comportamiento similar al del hule", el plástico se deforma fácilmente, pero recobra con rapidez su forma previa si el esfuerzo cesa. A temperaturas aún mayores, o bajo cargas sostenidas, el plástico se deforma mucho por flujo viscoso.

En la Figura 34 se muestra el comportamiento de la viscosidad en función de la temperatura. Nótese que el comportamiento no es lineal sino semilogaritmico.

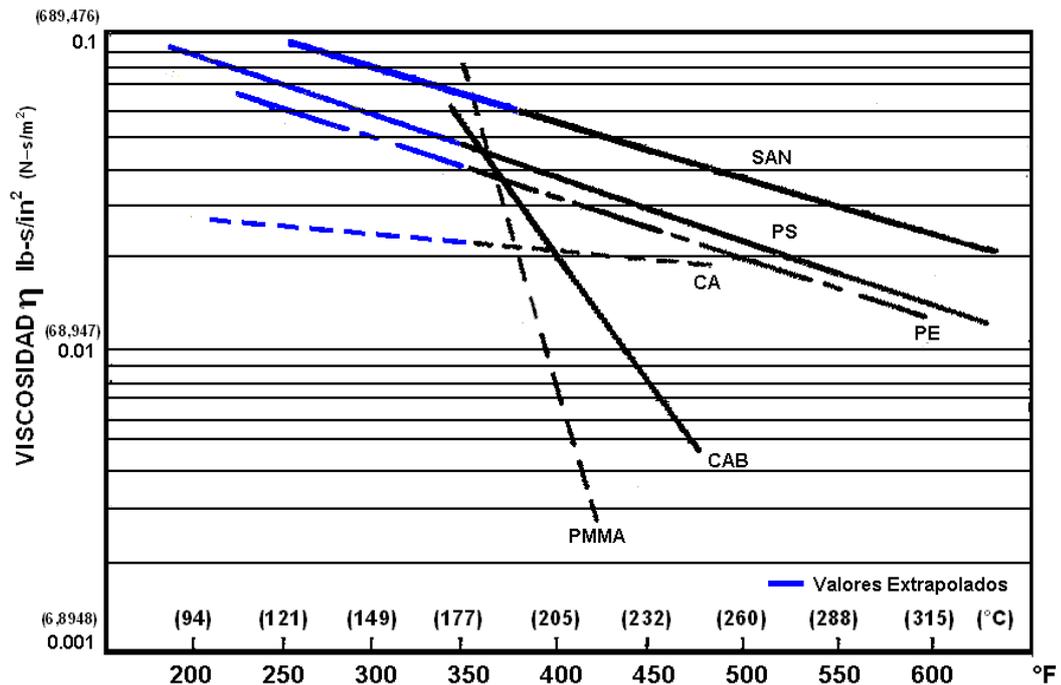


Figura 34. Viscosidad en función de la temperatura de algunos polímeros
 Tomado de "Plastics Engineering Handbook of the Society of the plastics" publicado por Society of the Plastics Industry.

7.2 Fluidos No Newtonianos

Willey (11) define Fluidos No-Newtonianos a todos aquellos cuya curva de flujo (τ_{xy} versus du/dy) no son líneas respecto al origen para una temperatura dada. Son por lo general divididos en tres grupos:

- 1) Fluidos independientes del tiempo: aquellos para los que la tasa de corte a un punto dado es únicamente dependiente del esfuerzo cortante en ese punto.
- 1) Fluidos dependientes del tiempo: aquellos para los que la tasa de corte es una función de la magnitud y la duración del corte y posiblemente del lapso de tiempo entre las aplicaciones consecutivas del esfuerzo cortante.
- 2) Fluidos viscoelásticos: son los que presentan una recuperación elástica parcial al retirar el esfuerzo de corte que lo deforma. Esos materiales poseen propiedades simultáneas de sólidos elásticos y fluidos.

Para el estudio del material plástico a manejar por la máquina tomaremos su comportamiento como fluido independiente del tiempo y no como viscoelástico a fin de simplificar los cálculos.

7.2.1 Fluidos No-Newtonianos independientes del tiempo

Estos materiales son llamados en ocasiones “Fluidos Viscosos No Newtonianos” o “fluidos completamente viscosos”. Estos fluidos se pueden a su vez clasificar en fluidos que requieren un esfuerzo de corte inicial antes de empezar a deformarse (esfuerzo de cedencia¹⁵) y los que no.

7.2.1.1 Fluidos con esfuerzo de cedencia τ_y

Se llama así a los fluidos cuya estructura interna impide el movimiento de las partículas hasta que la fuerza aplicada supera el esfuerzo de cedencia τ_y . Para τ_{xy}

¹⁵ Traducción literal del inglés “yield”

mayor que τ_y , la estructura interna colapsa completamente permitiendo el movimiento de corte y se considera, virtualmente, que la estructura interna se recupera cuando τ_{xy} disminuye su valor hasta que se hace menor que τ_y . Las curvas típicas para este tipo de fluidos se muestran en la Figura 35

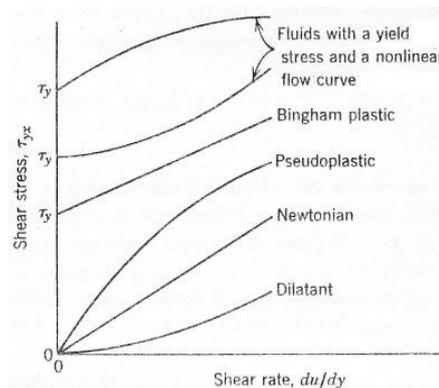


Figura 35. Esfuerzo de corte τ_{xy} vs tasa de corte du/dy .

Tomado de "Non Newtonian Flow and Head Transfer" Skelland John (1976). Pág 5

Algunos de los "modelos" empíricos que se han propuesto para relacionar esfuerzo de corte con la tasa de corte para estas sustancias se muestran en la Tabla 20 tomada de Skelland (11). El modelo de plástico de Bingham, contiene dos constantes el "esfuerzo de cedencia" τ_y y la "viscosidad plástica" η , describe una curva de flujo lineal y ha recibido una atención más analítica. Aunque el verdadero comportamiento del plástico de Bingham raramente se encuentra, partiendo del hecho de que la verdadera plasticidad de Bingham a veces es bastante pequeña para procedimientos basados en este modelo.

Por analogía con fluidos de Newtonianos con una "viscosidad aparente" se define habitualmente como:

$$\mu_a = \tau_{xy} \frac{du}{dy} \tag{Ec 24}$$

Para plásticos de Bingham:

$$\mu_a = \eta + \tau_y \frac{du}{dy} \tag{Ec 25}$$

mostrando que para estos materiales la viscosidad aparente disminuye proporcionalmente al aumentar el esfuerzo de corte.

A veces pueden encontrarse ejemplos de fluidos con esfuerzos de cedencia en los materiales siguientes: cierto plásticos fundidos, grasas mezclado con barro en taladros, menas, arenas en agua, margarina y reducciones, grasas, , suspensiones de granos en agua, mezclas del chocolate, pasta dentífrica, jabón y pulpa del papel.

Tabla 20. Modelos que Relacionan τ_{xy} con du/dr para fluidos con esfuerzo de cedencia

Modelo	Forma	Constantes Empíricas	Algunas Aplicaciones
Plástico de Bingham	$\tau_{rx} - \tau_y = \eta \left(\frac{du}{dr} \right)$	τ_y [F/A] η [m/L.t]	Flujo en tubos y anillos, mezclado, transferencia de calor
I. Herschel-Bulkley	$\tau_{rx} - \tau_y = \left[\eta' \left(\frac{du}{dr} \right) \right]^{1/m}$	τ_y [F/A] η' [$F^{m-1}m.L^{1-2m}/t$] m [adimensional]	Estimación de curvas de fluidos
II	$\tau_{rx} - \tau_y = \frac{\eta_0}{1 + C(\tau_{rx} - \tau_y)^n} \left(\frac{du}{dr} \right)$	τ_y [F/A] η_0 [m/L.t] C [$F^{-n}/L^{2/n}$] n [adimensional]	
III. Crowley-Kitzes	$\tau_{rx} = \mu_L \left[\frac{1,2 + S(c\tau_{rx}^{-0,2} + 1)^3}{1,2 - 2S(c\tau_{rx}^{-0,2} + 1)^3} \right] \left(\frac{du}{dr} \right)$	c [$F^{0,2}/L^{0,4}$]	Flujo en tubos de ThO ₂

Nota. Tabla elaborada con datos tomados de “Non-Newtonian flow and heat transfer” por Skelland John (1967) Pág. 6

7.2.2 Flujo laminar de fluidos no newtonianos

Estas formulaciones fueron tomadas según la plantea Skelland (11) en el cual se hace el análisis a flujo laminar de fluidos no Newtonianos, independientes del tiempo. No se pretende hacer un estudio profundo de este tipo de fluidos, únicamente se estudiará lo necesario referente al flujo anular, para de esta manera poder abordar los más aproximado posible los cálculos de caídas de presión en la Unidad de Inyección..

Las propiedades visco-elásticas de estos fluidos no influyen de manera significativa en tubos largos aunque si se sentirán cuando atraviesan montajes irregulares como en el caso de flujo a través de válvulas.

Muchas de las expresiones relacionan el caudal (Q) con la caída de presión (Δp). La mayor aplicación de de estas relaciones se encuentra en la ecuación del equilibrio de la energía:

$$Z_1 g + \frac{p_1}{\rho} + KE_1 - W = Z_2 g + \frac{p_2}{\rho} + KE_2 + \sum F \quad (\text{Ec 26})$$

donde Z es la diferencia de alturas entre los puntos de entrada 1 y salida 2 del flujo, p_i es la presión hidrostática, KE es la energía cinética promedio por unidad de masa y W es el trabajo por unidad de masa de fluido. El término $\sum F$ representa la energía mecánica convertida en calor resultado de la fricción.

$$\sum F = \frac{\Delta p}{\rho} + \text{Todas las pérdidas por fricción, efectos en la entrada, etc.}$$

Donde Δp es la caída de presión asociada a flujo totalmente desarrollado a través de la sección de flujo y calculado con la relación apropiada descrita más adelante.

7.2.2.1 Flujo Laminar en tubos cilíndricos

Considere el flujo ascendente de fluido en el tubo cilíndrico vertical de radio R constante mostrado en la Figura 36.

La suma de todas las fuerzas actuantes en el fluido entre las secciones 1 y 2 deben ser cero:

$$\pi R^2 (p_1 - p_2 + L \rho g - 2L \tau_w) = 0$$

Aplicando la ecuación (Ec 26) a esta situación se tiene:

$$\frac{p_1 - p_2}{\rho} - Lg = \sum F = \frac{\Delta p}{\rho}$$

Donde L es la diferencia de alturas y las velocidades de entrada y salida se suponen iguales. Entonces:

$$\tau_w = \frac{R\Delta p}{2L} \tag{Ec 27}$$

De manera similar para calcular el esfuerzo cortante para cualquier $r \leq R$:

$$\tau_{xw} = \frac{r\Delta p}{2L} \tag{Ec 28}$$

$$\tau_{xw} = \tau_w \frac{r}{R} \tag{Ec 29}$$

esta ecuación indica una distribución lineal del esfuerzo cortante.

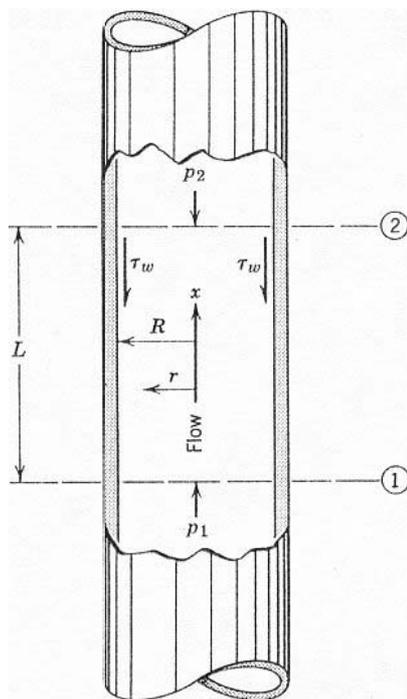


Figura 36. Cortante actuando en un elemento cilíndrico con fluido de radio R
Tomado del "Non-Newtonian flow and heat transfer" por Skelland John (1967) Pág. 70

Esta ecuación fue obtenida en 1930 por Rabinowitsch¹⁶ bajo las siguientes suposiciones: 1- fluido laminar, 2- fluido independiente del tiempo y 3- no hay deslizamiento en la superficie del tubo.

La tasa de flujo volumétrico a través de un anillo diferencial entre r y $r+dr$ es:

$$dQ = u2\pi r dr$$

donde u es la velocidad local en r .

$$Q = \int_0^Q dQ = \int_0^R u2\pi r dr$$

pero $d(r^2)=2rdr$, e integrando por partes

$$Q = \pi(ur^2 - \int r^2 du)_0^{R^2} \tag{Ec 30}$$

El término ur^2 es eliminado por la suposición 3

$$du = -f(\tau_{rx})dr$$

Manipulando la ecuación (Ec 29) y sustituyendo en (Ec 30) se tiene:

$$Q = \frac{\pi R^3}{3} \int_{\tau_w}^{\tau_{xw}^2} \tau_{xw}^2 f(\tau_{xw}) d\tau_{rw} \tag{Ec 31}$$

El verdadero comportamiento de los flujos plásticos de Bingham raramente se encuentra pero es un buen punto de partida para los cálculos.

La distribución de esfuerzo lineal indicada por ecuación (Ec 29) muestra que hay una porción del fluido que rodea el eje del tubo que mueve como un tapón sólido de radio r_p Así en:

$$\tau_{rx} - \tau_y = \eta \left(-\frac{du}{dr} \right)$$

$f(\tau_{xr})$ es discontinuo y

$$0 \leq r \leq r_p; \quad 0 \leq \tau_{xr} \leq \tau_y; \quad f(\tau_{xr})=0$$

¹⁶ Referencia hecha por Skelland (11)

$$r_p \leq r \leq R; \quad \tau_y \leq \tau_{xr} \leq \tau_w; \quad f(\tau_{xr}) = (\tau_{rx} - \tau_y) g_c / \eta$$

Por consiguiente el integral definida en la ecuación (Ec 31) y sustituyendo $f(\tau_{xr})$ puede escribirse como:

$$\frac{Q}{\pi R^3} = \frac{8Q}{\pi D^3} = \frac{1}{4} \left(\frac{8V}{D} \right) = \frac{\tau_w}{4\eta} \left[1 - \frac{4}{3} \frac{\tau_y}{\tau_w} + \frac{1}{3} \left(\frac{\tau_y}{\tau_w} \right)^4 \right] \tag{Ec 32}$$

Ésta es la ecuación de Buckingham, que evidentemente no puede resolverse directamente para la pérdida de presión. Esto ha llevado para aproximar los procedimientos para su real aplicación.

7.2.2.2 Flujo anular

Cuando el flujo plástico atraviesa ductos de geometría anular hay una porción del fluido que se transporta como si fuese un tapón sólido. Esta situación se muestra en la Figura 37 con un esquema de la distribución de velocidades.

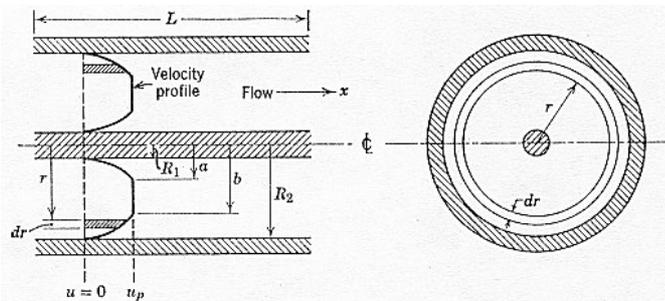


Figura 37. Flujo en estado laminar de fluidos plásticos en secciones anulares
Tomado de "Non-Newtonian flow and heat transfer" por Skelland John (1967) Pág. 83

El desarrollo de los cálculos se realiza en cuatro pasos:

- Paso 1: derivación del perfil de velocidades del equilibrio de fuerzas.
- Paso 2: evaluación de las constantes de integración.
- Paso 3: integración del perfil de velocidades para obtener el caudal.
- Paso 4: evaluación de los límites del tapón para su uso en el paso 3.

Ha de suponerse que no hay deslizamiento en las paredes.

Paso 1

Considerando cualquier superficie cilíndrica en el fluido, coaxial con el anillo y de radio r . Cuando $R_1 < r < a$, el esfuerzo de corte es:

$$\tau_{rx} = \tau_y + \eta \frac{du}{dr}$$

donde du/dr es positivo puesto que u aumenta al aumentar r en esta región ($r < a$). La fuerza de corte que actúa más allá de esta superficie es

$$-2\pi r L \tau_{rx} = -2\pi r T \left(\tau_y + \eta \frac{du}{dr} \right)$$

El signo menos es debido a que las fuerzas son consideradas positivas sólo si actúan en dirección del flujo. Si r aumenta a $r+dr$, el cambio diferencial en la fuerza de corte debe igualar al producto de la caída de presión y al cambio del diferencial de la sección transversal sobre la distancia dr , como sigue:

$$\frac{d}{dr} \left[r \left(\tau_y + \eta \frac{du}{dr} \right) \right] = -\frac{\Delta p r}{L}$$

(Ec 33)

donde $R_1 < r < a$.

Cuando $b < r < R_2$, es esfuerzo de corte en el superficie cilíndrica hipotética del fluido se vuelve:

$$\tau_{rx} = \tau_y + \eta \left(-\frac{du}{dr} \right)$$

El signo menos se debe a que la velocidad u disminuye al incrementar r en esta región ($r > b$). El esfuerzo de corte actuante es

$$2\pi r L \tau_{rx} = 2\pi r T \left(\tau_y - \eta \frac{du}{dr} \right)$$

Ahora al aumentar r la caída de presión será:

$$\frac{d}{dr} \left[r \left(-\tau_y + \eta \frac{du}{dr} \right) \right] = -\frac{\Delta p r}{L} \quad (\text{Ec 34})$$

Integrando las ecuaciones (Ec 33) y (Ec 34) se tiene:

$$u = \frac{1}{\eta} \left(-\frac{\Delta p r^2}{4L} + A_1 \ln r - \tau_y r + B \right) \quad (\text{Ec 35})$$

Para $R_1 < r < a$.

$$u = \frac{1}{\eta} \left(-\frac{\Delta p r^2}{4L} + A_2 \ln r + \tau_y r + C \right) \quad (\text{Ec 36})$$

Para $b < r < R_2$, donde A_1 , A_2 , B y C son constantes de integración. La velocidad en el tapón anular u_p se obtiene de la ecuación (Ec 35) cuando $r = a$ y de la ecuación (Ec 36) cuando $r = b$.

Paso 2

Las constantes de la integración B y C se evalúan en las ecuaciones (Ec 35) y (Ec 36) para la condición de no deslizamiento en las paredes, es decir $u = 0$ para $r = R_1$ y $r = R_2$ respectivamente. Esto lleva a

$$u = \frac{1}{\eta} \left[\frac{\Delta p}{4L} (R_1^2 - r^2) + A_1 \ln \frac{r}{R_1} + \tau_y r + \tau_y (R_1^2 - r^2) \right] \quad (\text{Ec 37})$$

para $R_1 < r < a$ y

$$u = \frac{1}{\eta} \left[\frac{\Delta p}{4L} (R_2^2 - r^2) + A_2 \ln \frac{r}{R_1} + \tau_y r - \tau_y (R_2^2 - r^2) \right] \quad (\text{Ec 38})$$

Para $b < r < R_2$.

Las constantes A_1 y A_2 se evalúan mediante el equilibrio de las fuerzas de corte en las paredes del anillo y las sumas de las fuerzas por presión:

$$\pi\Delta p(R_2^2 - R_1^2) = 2\pi R_1 L \left[\tau_y + \eta \left(\frac{du}{dr} \right)_{R_1} \right] + 2\pi R_2 L \left[\tau_y - \eta \left(\frac{du}{dr} \right)_{R_2} \right] \quad (\text{Ec 39})$$

donde du/dr a R_1 y a R_2 se obtienen al derivar las expresiones (Ec 35) y (Ec 36), con $r = R_1$ y R_2 respectivamente obteniendo:

$$\frac{\Delta p}{2L}(R_2^2 - R_1^2) = \tau_y(R_1 + R_2) - R_1 \left(\frac{\Delta p}{2L} R_1 - \frac{A_1}{R_1} + \tau_y \right) + R_2 \left(\frac{\Delta p}{2L} R_2 - \frac{A_2}{R_2} + \tau_y \right) \quad (\text{Ec 40})$$

Esto muestra que $A_1 = A_2 = A$. Si la ecuación (Ec 37) se reescribe para $r = a$ y la ecuación (Ec 38) para $r = b$, e igualando se obtiene:

$$A = \frac{\frac{\Delta p}{4L}(R_2^2 - R_1^2 + b^2 - a^2) - \tau_y(R_2 + R_1 + a + b)}{\ln \frac{R_2 a}{R_1 b}}$$

Paso 3

El caudal total Q para obtener el Δp se obtiene por la suma de de los caudales en los anillos entre R_1 y a , el anillo entre R_2 y b , y el anillo del tapón sólido entre a y b .

$$Q = 2\pi \int_{R_1}^a r u dr + 2\pi \int_b^{R_2} r u dr + 2\pi \int_a^b r u dr$$

Las ecuaciones (Ec 37) y (Ec 38) son insertada e integradas. Respués u_p es reemplasado de la ecuación (Ec 37) para $r = a$ para obtener la siguiente ecuación simplificada:

$$\begin{aligned}
 Q = & \frac{2\pi}{\eta} \left[\frac{\Delta p}{16L} \left(R_2^4 - R_1^4 \right) \right] + \frac{2\pi}{\eta \ln \frac{aR_2}{bR_1}} \left[-\frac{\Delta p}{16L} \left(R_2^2 - R_1^2 \right)^2 + (b^2 - a^2)^2 \right] \\
 & + \frac{2\pi}{\eta \ln \frac{aR_2}{bR_1}} \left[\frac{\tau_y}{4} \left[- (a+b) (R_2^2 - R_1^2) + (R_1 + R_2) (R_2^2 - R_1^2) \right] \right. \\
 & \left. - (R_1 + R_2) (a^2 - b^2) + (a+b) (b^2 - a^2) \right] \\
 & + \frac{\pi \tau_y}{3\eta} (a^3 + b^3 - R_1^3 - R_2^3)
 \end{aligned} \tag{Ec 41}$$

La fuerza total de corte que actúa en las superficies del tapón anular iguala el producto de caída de presión por fricción y la sección transversal del tapón:

$$\Delta p \pi (b^2 - a^2) = 2\pi L \tau_y (b + a) \tag{Ec 42}$$

También se puede escribir de la siguiente manera

$$b - a = \frac{2L \tau_y}{\Delta p} \tag{Ec 43}$$

Laird simplificó la ecuación (Ec 41) sustituyendo (Ec 43) obteniendo:

$$\begin{aligned}
 Q = & \frac{2\pi}{\eta} \left[\frac{\Delta p}{16L} \left(R_2^4 - R_1^4 \right) \right] + \frac{2\pi \tau_y}{\eta} \frac{1}{6} (a^3 + b^3 - R_1^3 - R_2^3) \\
 & + \frac{2\pi}{\eta \ln \frac{aR_2}{bR_1}} \left[-\frac{\Delta p}{16L} \left(R_2^2 - R_1^2 \right)^2 + \frac{\tau_y}{8} (a+b) (b^2 - a^2) \right. \\
 & \left. + \frac{\tau_y}{4} \left[(R_1 + R_2) (R_2^2 - R_1^2) - (R_1 + R_2) (b^2 - a^2) \right] \right]
 \end{aligned} \tag{Ec 44}$$

Paso 4

Ecuación (Ec 44) todavía contiene los límites del tapón a y b , los cuales son funciones de Δp y que puede evaluarse con la siguiente condición:

$$\left. \frac{du}{dr} \right|_a = \left. \frac{du}{dr} \right|_b = 0$$

donde du/dr evaluado en a y b se obtienen derivando las ecuaciones (Ec 35) y (Ec 36) con $r = a$ y b respectivamente. Esto da

$$-\frac{\Delta p a}{2L} + \frac{A}{a} - \tau_y = 0 \tag{Ec 45}$$

$$-\frac{\Delta p b}{2L} + \frac{A}{b} + \tau_y = 0 \tag{Ec 46}$$

Suma de ecuaciones (Ec 45) y (Ec 46) muestra que

$$A = \frac{\Delta p a b}{2L} \tag{Ec 47}$$

Sustituyendo este valor de A en la ecuación (Ec 40) y reemplazando τ_y despejada de la ecuación (Ec 43). Es resultado es:

$$ab = \frac{(R_2^2 - R_1^2) + (b^2 - a^2) - 2(b - a)(R_1 + R_2)}{2 \ln \frac{aR_2}{bR_1}} \tag{Ec 48}$$

El procedimiento para usar la ecuación (Ec 44) para realizar la gráfica Q vs Δp para un plástico de Bingham dado que fluye en una sección anular es como sigue:

- 1.- Asuma un valor para a/b y expresa a en términos de b .
- 2.- Sustituir en ecuación (Ec 48) para obtener los valores de R_1 y R_2 y resuelve para a y b . (Esta solución es simple desde ecuación 3.57 reduce a una ecuación cuadrática ordinaria cuando el procedimiento anterior se sigue.)
- 3.- Sustituya estos valores de a y b , junto con los valores conocidos de τ_y y L , en ecuación (Ec 43) para calcular el correspondiente Δp .

- 4.- Insertar estos valores de a , b y Δp en la ecuación (Ec 44), y calcula los caudales correspondientes.
- 5.- Repetir los pasos 1 a 4 para otros valores supuestos de a/b , y trace la curva resultante de Q contra Δp .

Una aplicación aproximada de ecuación (Ec 41)

A valores altos de Δp , tal que el tapón anular es bastante pequeño para ser despreciado, se asume $a = b$ así la ecuación (Ec 48) se convierte:

$$r_0^2 = \frac{R_2^2 - R_1^2}{2 \ln \frac{R_2}{R_1}} \quad (\text{Ec 49})$$

Que es el radio de velocidad máxima ocurre en flujos Newtonianos en anillo. Cuando $a = b$ así la ecuación (Ec 41) se reduce a:

$$Q = \frac{\pi}{8\eta} \left\{ \frac{\Delta p}{L} \left[(R_2^4 - R_1^4) - \frac{(R_2^2 - R_1^2)^2}{\ln R_2 / R_1} \right] - \frac{8}{3} \tau_y [R_1^3 + R_2^3 + 4r_0^3 - 3r_0^3(R_1 + R_2)] \right\} \quad (\text{Ec 50})$$

Para los materiales Newtonianos $\tau_y = 0$ $\eta = \mu$ para que ecuación (Ec 50) reducida a:

$$Q = \frac{\pi \Delta p}{8\mu L} \left[(R_2^4 - R_1^4) - \frac{(R_2^2 - R_1^2)^2}{\ln R_2 / R_1} \right] \quad (\text{Ec 51})$$

7.2.3 Flujo turbulento de fluidos No-Newtonianos

Los estudios del fenómeno de turbulencia en fluidos No-Newtonianos han estado bastante limitados, por un lado debido a que la turbulencia es menos frecuente en este tipo de fluidos y otra por lo poco que se conoce acerca de estos fluidos en si.

La mayoría de las primeras investigaciones intentaron representar el comportamiento de los fluidos No-Newtonianos haciendo la analogía con el comportamiento turbulento de los fluidos newtonianos, despreciando cualquier variación de la viscosidad aparente así se realizó la correlación de los datos de fricción en tubos con el factor convencional del Número de Reynolds de los fluidos newtonianos.

En el caso de los plásticos de Bringham, Caldwell y Babbit, se obtuvo la correlación en un medio de dispersión como el agua, por cuanto se usaron la viscosidad del plástico η . Usando el valor η el valor de $DV\rho/\eta$ en donde ocurre la transición del flujo de laminar a turbulento es dependiente del número de Hedstrom N_{He} .

Metzner y Reed sugirieron un procedimiento que consideraba flujo laminar hasta un Número de Reynolds comprendido entre 2100 y 2800, con una transición que aparentemente se extiende a 70.000 para fluidos altamente pseudoplásticos. Ellos recomendaron usar una curva con $n'=0,5$. La predicción para caída de presión tenía una tolerancia de $\pm 30\%$ para este procedimiento.

7.2.3.1 Relación Teórica Para la Resistencia al Flujo Turbulento en Tubos Lisos

Skelland (11) presenta en su teoría los trabajos de Dodge y Metzner y sus tratamientos para este problema. El desarrollo usa fluidos de la Ley de Energía como modelo para realizar su modelo a fin de relacionar el factor de fricción de Fanning f y el número de Reynolds generalizado.

$$\text{Re}_{gen} = \frac{D^{n'} V^{2-n'} \rho}{\gamma} \quad (\text{Ec } 52)$$

La expresión resultante es válida para fluidos que no se rigen por la ley de energía siempre y cuando las características físicas sean similares.

Las zonas de flujo para los fluidos No-Newtonianos en condiciones turbulentas se muestran en la Figura 38 haciendo la similitud con fluidos newtonianos.

Como en fluidos newtonianos, los efectos de turbulencia son despreciables en la subcapa laminar, se consideran estos efectos y los efectos viscosos del mismo orden de magnitud en la zona de transición y se desprecian los efectos viscosos en la zona turbulenta.

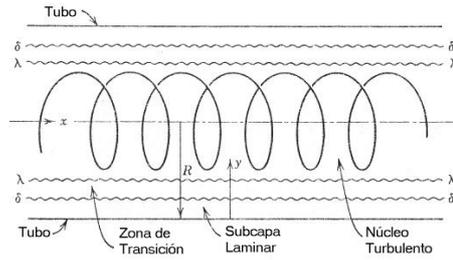


Figura 38. Zonas de flujo en flujo turbulento

Tomado de “Non-Newtonian flow and heat transfer” por Skelland John (1967) Pág. 182

Si \$y\$ es la distancia desde la pared del tubo, entonces los espesores de la zonas serán:

$$\text{Subcapa Laminar: } 0 \leq y \leq \delta$$

$$\text{Zona de transición: } \delta \leq y \leq \lambda$$

$$\text{Corazón turbulento: } \lambda \leq y \leq R$$

Skelland (11) describe muy detalladamente el procedimiento para llegar a las ecuaciones necesarias para representar analíticamente este fenómeno¹⁷ por lo que no haremos énfasis en los detalles sino que nos limitaremos a plasmar las ecuaciones necesarias como sigue:

$$f = \frac{D\Delta p}{2\rho LV^2(1-c)} \tag{Ec 53}$$

donde:

$$V = \frac{R\tau_y}{\eta} \left(\frac{c^4 - 4c + 3}{12c} \right) \tag{Ec 54}$$

$$c = \frac{\tau_y}{\tau_w} = \frac{r_p}{R} \tag{Ec 55}$$

r_p Radio del tapón

R radio del tubo

V Velocidad en dirección \$x\$

¹⁷ Skelland John and Sons. Non Newtonian flow and heat transfer. Pág. 183-198

τ_y Esfuerzo de cedencia

7.2.3.2 Secciones anulares

Datos experimentales en flujo turbulento de fluidos No-Newtonianos a través de espacios anulares es escaso. Se ha recomendado el uso del factor de fricción convencional para el Número de Reynolds en tubos lisos. Esta propuesta funciona por encima de un número de Reynolds limitado por la ecuación de Blasius:

$$f = \frac{0,0791}{\text{Re}_{(n,K)}^{0,25}} \tag{Ec 56}$$

para $3 \times 10^3 < \text{Re} < 10^5$

$$\text{Re}_{(n,\bar{K})} = \frac{(2R_2)^n V^{2-n} \rho (1 + \bar{K})}{K 2^{n-3} (1 - \bar{K}^2)^{n-1}} \Omega_p^n \tag{Ec 57}$$

$$\Omega_p = \frac{n \Upsilon (1 - \bar{K})^{(2n+1)/n}}{2n + 1} \tag{Ec 58}$$

Obteniendo la caída de presión mediante la siguiente ecuación:

$$f = \frac{\Delta p R_2 (1 - \bar{K}^2)}{L (1 + \bar{K}) \rho V^2} \tag{Ec 59}$$

Donde:

K índice de consistencia del fluido

\bar{K} relación R_1/R_2

n índice de fluidez del material

L Longitud del tramo.

Ω_p Flujo másico adimensional

Υ se obtiene de la Figura 39

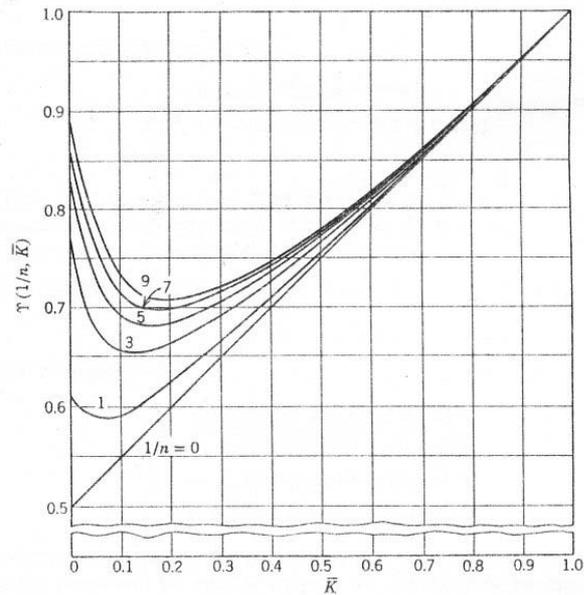


Figura 39. $\Upsilon(1/n, \bar{K})$ vs \bar{K}

Tomado de "Non-Newtonian flow and heat transfer" por Skelland John (1967) Pág. 113

7.3 Transferencia de Calor

Skelland (11) en su desarrollo plantea un equilibrio de energía de un fluido en estado laminar que fluye a través de una tubería para obtener la ecuación diferencial de la transferencia de calor planteando después las soluciones para varios tipos de fluidos reológicos, en nuestro caso el que nos interesa son los plásticos de Bingham.

La Figura 40 se muestra un fluido en estado laminar fluyendo a través de un tubo de sección circular, donde el calor es transferido al fluido desde las paredes del tubo con una temperatura T_w .

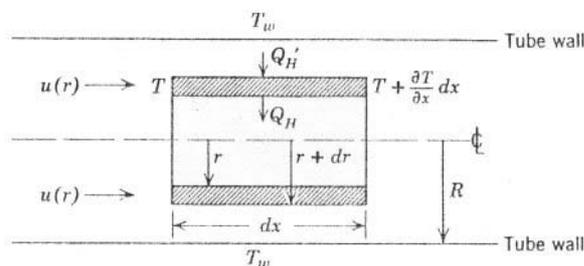


Figura 40. Transferencia de calor hacia un fluido en estado laminar a través de un tubo de sección circular

Tomado de "Non-Newtonian flow and heat transfer" por Skelland John (1967) Pág. 363

Se sabe que:

$$-q_r = q = k \frac{\partial T}{\partial r} \quad (\text{Ec 60})$$

Realizando el desarrollo del equilibrio energético llegamos a la siguiente ecuación diferencial:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{\alpha}{u} \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} \right] \quad (\text{Ec 61})$$

Donde la difusividad térmica es:

$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p} \quad (\text{Ec 62})$$

La solución de esta ecuación diferencial para el caso de los plásticos de Bingham se realiza con las siguientes suposiciones:

1. La temperatura de pared de tubo es constante a lo largo del tubo.
2. La temperatura del fluido es uniforme en la sección de entrada.
3. El perfil de velocidad de laminar se desarrolla totalmente a la entrada a la sección de transferencia de calor.
4. La conducción térmica en la dirección axial es despreciable.
5. El proceso es "isotérmico" lo que significa que las propiedades físicas son independientes de la temperatura. El perfil de velocidad es por consiguiente independiente de x.
6. El calor producido por fricción viscosa es despreciable.

Skelland (11) aclara que los datos para plásticos de Bingham fueron tomados a partir de procedimientos experimentales obteniendo la forma general de las expresiones como sigue:

$$\frac{T_w - T}{T_w - T_i} = \sum_{j=1}^{j=\infty} A_j(\xi) R_j\left(\frac{r}{R}\right) \tag{Ec 63}$$

donde:

ξ Distancia axial reducida $\xi = \alpha x / u_m R^2$

$A_j(\xi)$ Variable compuesta

$R_j\left(\frac{r}{R}\right)$ Eigen Función

En el caso de que la generación de calor en el centro es cero la ecuación (Ec 63) toma la forma:

$$\frac{T_w - T}{T_w - T_i} = \sum_{j=1}^{j=\infty} C_j \exp(-\beta_j^2 \xi) R_j\left(\frac{r}{R}\right) \tag{Ec 64}$$

Donde β es dependiente de n' como se muestra en la Figura 41, cuyo valor y el de C_j se encuentran en tablas para valores de $c = \tau_y / \tau_w$ (0, 1/4, 1/2, 3/4, 1).

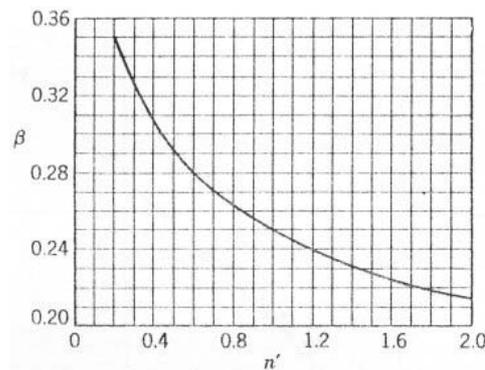


Figura 41. Relación entre n' y β

Tomado de "Non-Newtonian flow and heat transfer" por Skelland John (1967) Pág. 196

Si se presenta generación de calor interna (q_G) la generación de calor específica por unidad de volumen es:

$$q_G' = \frac{q_G R^2}{(T_i - T_w)k} \tag{Ec 65}$$

La temperatura promedio reducida esta dada por $(T_w - \bar{T}) / (T_w - T_i)$, donde \bar{T} es la temperatura promedio de tasa de mezcla¹⁸ a ξ . Los valores de $(T_w - \bar{T}) / (T_w - T_i)$ se obtienen de las Figura 42 y Figura 43 para valores de q_G' 0 y 1 respectivamente.

Antes de entrar en estas gráficas es necesario estimar un valor de c para calcular el valor de temperatura promedio \bar{T} para cualquier distancia ξ a lo largo del tubo.

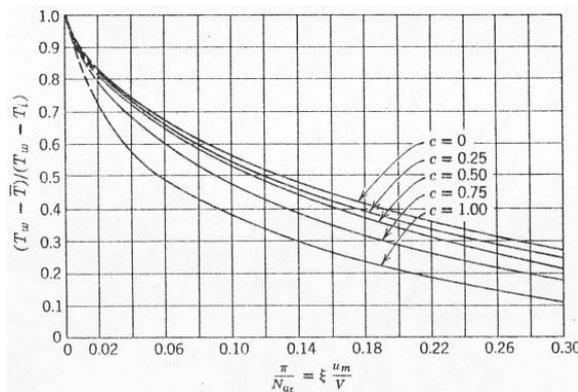


Figura 42. Temperatura promedio reducida para transferencia de calor de flujo laminar con $q_G'=0,0$
Tomado de “Non-Newtonian flow and heat transfer” por Skelland John (1967) Pág. 368

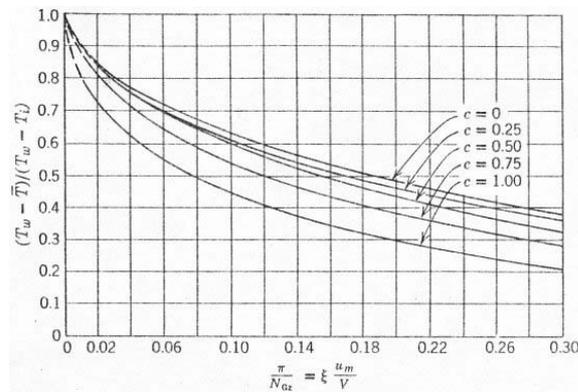


Figura 43. Temperatura promedio reducida para transferencia de calor de flujo laminar con $q_G'=1,0$
Tomado de “Non-Newtonian flow and heat transfer” por Skelland John (1967) Pág. 369

De la ecuación (Ec 64) la temperatura promedio o de tasa de mezcla para x o ξ es:

¹⁸ Traducción literal de “mixing-cup” del Skelland (11)

$$\bar{T}_x = T_w + \frac{(T_i - T_w) \sum_{j=1}^{j=\infty} C_j \exp(-\beta_j^2 \xi) 2\pi \int_0^R ru R_j \left(\frac{r}{R}\right) dr}{2\pi \int_0^R rudr} \quad (\text{Ec 66})$$

Manipulando algebraicamente y tomando un radio unitario se tiene:

$$\bar{T}_x = T_w + (T_i - T_w) \frac{2u_m}{V} \sum_{j=1}^{j=\infty} C_j^2 N_j \exp(-\beta_j^2 \xi) \quad (\text{Ec 67})$$

Del balance de energía se tiene que el flujo de calor local en la pared es:

$$q_w = \frac{R}{2} V \rho C_p \frac{d\bar{T}_x}{dx} \quad (\text{Ec 68})$$

El calor total transferido en la longitud L es:

$$q_{Hw} = \pi R^2 V \rho C_p (\bar{T}_L - T_i) \quad (\text{Ec 69})$$

El coeficiente de transferencia de calor medio se calcula por la siguiente ecuación:

$$h_{m,\log} = \frac{q_{Hw}}{2\pi RL \Delta T_{\log}} \quad (\text{Ec 70})$$

donde

$$\Delta T_{\log} = \frac{(T_w - T_i) - (T_w - \bar{T}_L)}{\ln \frac{T_w - T_i}{T_w - \bar{T}_L}} \quad (\text{Ec 71})$$

7.3.1 Transferencia de Calor en la fundición de sólidos a líquidos no newtonianos

Considerando un bloque sólido fundiéndose sobre una superficie plana inclinada como la de la Figura 44. El bloque se resbala lentamente y el material fundido fluye hacia abajo en una película entre el bloque y la superficie caliente que tiene un ángulo ϕ respecto a la horizontal.

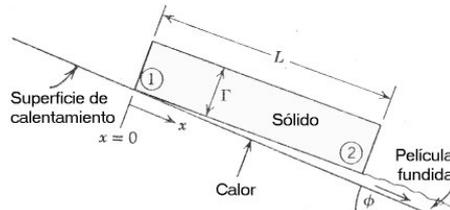


Figura 44. Bloque sólido fundiéndose en una superficie plana caliente inclinada Tomado de “Non-Newtonian flow and heat transfer” por Skelland John (1967) Pág. 401

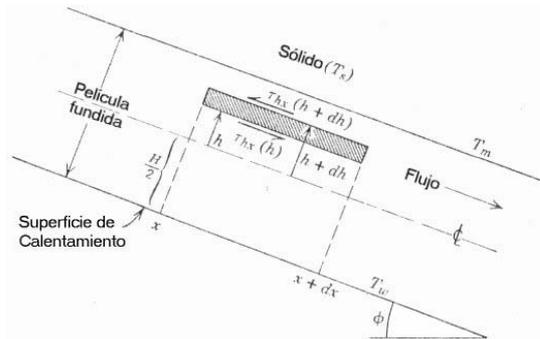


Figura 45. Ampliación de la sección de la película fundida de la Figura 44. Tomado de “Non-Newtonian flow and heat transfer” por Skelland John (1967) Pág. 401

La tasa de calor transferido al elemento en la superficie de fusión $w dx$ cuando el flujo es laminar es:

$$q w dx = \frac{k w dx (T_w - T_m)}{H} \tag{Ec 72}$$

$$H = \left\{ \frac{2(3n + 1)k(T_w - T_m)x}{n[C_{ps}(T_m - T_s) + \lambda + \frac{1}{2}C_{pL}(T_w - T_m)]\rho} \left[\frac{2K}{(-dp/dx)g} \right]^{\frac{1}{n}} \right\}^{\frac{n}{3n+1}} \tag{Ec 73}$$

La tasa de flujo másico en la película fundida para un espesor de bloque Γ es:

$$W_L = \frac{h_m w L (T_w - T_m)}{C_{ps} (T_m - T_s) + \lambda + \frac{1}{2} C_{pL} (T_w - T_m)}$$

(Ec 74)

Nomenclatura

- c τ_y/τ_w adimensional
- C_p, C_{ps} Calor específico y calor específico del sólido
- f Factor de fricción
- h Distancia desde la línea central o coeficiente de transferencia de calor.
- H Espesor de fundición
- h_m, h_x valores promedio y local del coeficiente de transferencia de calor
- k Conductividad térmica
- K índice de consistencia del fluido.
- L Longitud del tubo
- n Índice de fluidez
- Δp Caída de presión por fricción
- q Tasa de calor
- Q Caudal, tasa de flujo másico
- q_G Tasa de generación calor por unidad de volumen
- q_G' Tasa de generación calor reducida, adimensional
- r, R Distancia radial y radio, respectivamente.
- t Temperatura del flujo anular.
- T Temperatura del fluido, los subíndices $i, m, 0, s$ y w representan respectivamente: interior, de plastificación, externa de la capa límite, inicial del sólido y de pared.
- w Espesor del canal de flujo

W	Flujo másico total.
α	Difusividad térmica
β	Cantidad definida por la Figura 41. Adimensional
Γ	Espesor del bloque sólido
η	Viscosidad del plástico
λ	Calor latente de fusión
ξ	Distancia axial reducida. Adimensional
ρ, ρ_s	Densidad y densidad del sólido.
τ_w, τ_y	Esfuerzo de corte en la pared y esfuerzo de corte de cedencia.

CAPÍTULO 8 - RESISTENCIA DE MATERIALES Y ELEMENTOS DE MÁQUINAS

En este capítulo se establecerán las bases teóricas para el cálculo de resistencia de los materiales a utilizar en el diseño de las partes mecánicas, ya sea para definir espesores, número de pernos o seleccionar elementos como rodamientos, motor, etc. No se pretende hacer un estudio profundo de estos temas, sólo plasmar las ecuaciones necesarias para el desarrollo del diseño, a excepción del cálculo de “Pared Gruesa” que se tratará con un poco más de profundidad. Para un estudio más específico de las ecuaciones y teorías planteadas se recomienda consultar la bibliografía de referencia.

8.1 Cilindro de Pared Gruesa.

Según Timoshenko (13), si un cilindro circular cuya pared tiene un espesor constante está sometido a las acciones de presiones, interna y externa, uniformemente distribuidas, la deformación que se produce es simétrica alrededor del eje del cilindro y no varía a lo largo de su longitud. Consideraremos

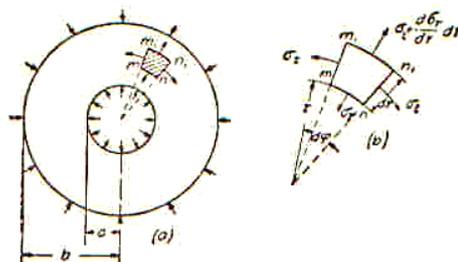


Figura 46. Diagrama de esfuerzos en cilindro de pared gruesa
Tomado de “Resistencia de materiales” por Tomoshenko, S (1976) Tomo 2 Pág 241

un anillo separado del cilindro mediante dos planos perpendiculares a su eje y separados por la unidad de distancia (Figura 46). Por simetría, en las caras de un elemento de este anillo mm_1n_1 separado por dos planos axiales y dos superficies cilíndricas concéntricas, no existen fatigas cortantes. Sea σ_t el esfuerzo tangencial

normal a las caras mm_1 , y nn_1 , del elemento, y σ_r el esfuerzo radial normal en la cara mn . Este esfuerzo es función del radio r y varía en $(d\sigma_r/dr)dr$ cuando r varía en dr . El esfuerzo radial en la cara m_1n_1 , es, por tanto,

$$\sigma_r + \frac{d\sigma_r}{dr} dr$$

Sumando las proyecciones de las fuerzas que actúan sobre el elemento en dirección de la bisectriz del ángulo $d\varphi$, se obtiene la ecuación de equilibrio siguiente

$$\sigma_r r d\varphi + \sigma_t dr d\varphi - \left(\sigma_r + \frac{d\sigma_r}{dr} dr \right) (r + dr) d\varphi = 0$$

(Ec 75)

O bien, despreciando cantidades de orden superior,

$$\sigma_t - \sigma_r - r \frac{d\sigma_r}{dr} = 0$$

(Ec 76)

Esta ecuación contiene dos incógnitas: los esfuerzos σ_t y σ_r . Es necesario pues, otra ecuación, y se obtiene considerando la deformación del cilindro. La deformación es simétrica respecto al eje y consiste en un corrimiento radial de todos los puntos de la pared del cilindro. Este corrimiento es constante en dirección circunferencial, pero varía a lo largo del radio; es decir, es una función del radio. Representando con u al corrimiento de la superficie cilíndrica de radio r , el corrimiento para la superficie de radio $r + dr$ será

$$u + \frac{du}{dr} dr$$

Por consiguiente, un elemento tal como mnm_1n_1 , experimenta en sentido radial un alargamiento total $(du/dr)dr$ y su alargamiento unitario en dicha dirección es

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr}$$

(Ec 77)

El alargamiento unitario del mismo elemento en dirección tangencial es igual al alargamiento unitario del radio correspondiente; es decir,

$$\varepsilon_t = \frac{u}{r} \quad (\text{Ec 78})$$

Las expresiones de los esfuerzos en función de la deformación son

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{E}{1-\mu^2} \left(\frac{du}{dr} + \mu \frac{u}{r} \right), \\ \sigma_t &= \frac{E}{1-\mu^2} \left(\frac{u}{r} + \mu \frac{du}{dr} \right) \end{aligned} \quad (\text{Ec 79})$$

Los esfuerzos normales σ_r y σ_t dependen, por consiguiente, del corrimiento u . Sustituyendo las expresiones (Ec 79) en la ecuación (Ec 76) se obtiene la ecuación siguiente en u :

$$\frac{d^2u}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{du}{dr} - \frac{u}{r^2} = 0 \quad (\text{Ec 80})$$

La solución general de esta ecuación es

$$u = C_1 r + \frac{C_2}{r} \quad (\text{Ec 81})$$

lo que puede comprobarse sustituyendo. Las constantes C_1 y C_2 determinan por las condiciones en las superficies interior y exterior del cilindro en las que las presiones, es decir, los esfuerzos normales σ_r , son conocidas. Sustituyendo (Ec 81) en las ecuaciones (Ec 79), se obtiene

$$\sigma_r = \frac{E}{1-\mu^2} \left[C_1(1+\mu) - C_2 \frac{1-\mu}{r^2} \right] \quad (\text{Ec 82})$$

$$\sigma_t = \frac{E}{1-\mu^2} \left[C_1(1+\mu) + C_2 \frac{1-\mu}{r^2} \right] \quad (\text{Ec 83})$$

Si p_i y p_o representan las presiones interna y externa, respectivamente, las condiciones en las superficies exterior e interior del cilindro son

$$\begin{aligned} (\sigma_r)_{r=b} &= -p_o \\ &\text{y} \\ (\sigma_r)_{r=a} &= -p_i \end{aligned} \quad (\text{Ec 84})$$

El signo del segundo miembro de cada ecuación es negativo, debido a que se toman como positivas los esfuerzos normales de extensión. Sustituyendo la expresión de σ_r , en las ecuaciones (Ec 79), se obtienen dos ecuaciones para determinar las constantes C_1 y C_2 , y, de ellas

$$C_1 = \frac{1-\mu}{E} \frac{a^2 p_i - b^2 p_o}{b^2 - a^2}, C_2 = \frac{1+\mu}{E} \frac{a^2 b^2 (p_i - p_o)}{b^2 - a^2} \quad (\text{Ec 85})$$

Con estos valores de las constantes, las ecuaciones (Ec 82) y (Ec 83) que dan los esfuerzos normales σ_r y σ_t serán

$$\begin{aligned} \sigma_r &= \frac{a^2 p_i - b^2 p_o}{b^2 - a^2} - \frac{(p_i - p_o) a^2 b^2}{r^2 (b^2 - a^2)} \\ \sigma_t &= \frac{a^2 p_i - b^2 p_o}{b^2 - a^2} + \frac{(p_i - p_o) a^2 b^2}{r^2 (b^2 - a^2)} \end{aligned} \quad (\text{Ec 86})$$

Conviene observar que la suma de los dos esfuerzos permanece constante, de modo que la deformación de todos los elementos en la dirección del eje del cilindro es la misma, y las secciones rectas del cilindro permanecen planas después de la deformación.

Consideremos el caso particular $p_o = 0$, es decir, el cilindro sometido únicamente a presión interna. Las ecuaciones (Ec 86) serán

$$\sigma_r = \frac{a^2 p_i}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{b^2}{r^2} \right) \quad (\text{Ec 87})$$

$$\sigma_t = \frac{a^2 p_i}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{b^2}{r^2} \right) \quad (\text{Ec 88})$$

Estas ecuaciones muestran que σ_r es siempre un esfuerzo de compresión, mientras que σ_t es una extensión. Esta última es máxima en la superficie interior del cilindro, donde

$$(\sigma_t)_{\max} = \frac{p_i (a^2 + b^2)}{b^2 - a^2} \quad (\text{Ec 89})$$

$(\sigma_t)_{\max}$ es siempre numéricamente mayor que la presión interna y se aproxima a ella según crece b . El valor mínimo de σ_t acontece en la superficie exterior del cilindro. La relación

$$\frac{(\sigma_t)_{\max}}{(\sigma_t)_{\min}} = \frac{a^2 + b^2}{2a^2}$$

aumenta al aumentar el espesor de la pared del cilindro. Si el espesor es pequeño, no hay gran diferencia entre los valores máximo y mínimo de σ_t . Si, por ejemplo, $b = 1,1a$, $(\sigma_t)_{\max}$ excede a $(\sigma_t)_{\min}$ en un 10,5%. Se ve, por consiguiente, que no se comete grave error suponiendo que el esfuerzo σ_t se distribuye uniformemente a lo largo del espesor de la pared.

Y, empleando la ecuación

$$\sigma_t = \frac{p_i a}{b - a}$$

que coincide con la de cilindros delgados. El esfuerzo cortante es máxima en la superficie interior del cilindro, donde

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_t - \sigma_r}{2} = \frac{1}{2} \left[\frac{p_i (a^2 + b^2)}{b^2 - a^2} + \frac{p_i (a^2 - b^2)}{b^2 - a^2} \right] = \frac{p_i b^2}{b^2 - a^2}$$

(Ec 90)

Cuando actúa solamente sobre el cilindro una presión exterior, $p_i = 0$, y las ecuaciones (Ec 86) dan

$$\sigma_r = -\frac{p_o b^2}{b^2 - a^2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right)$$

(Ec 91)

$$\sigma_t = -\frac{p_o b^2}{b^2 - a^2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right)$$

En este caso σ_r y σ_t son ambos esfuerzos de compresión, y σ_t a, es siempre numéricamente mayor σ_r . El esfuerzo compresor máximo acontece en la superficie interior del cilindro, donde

$$(\sigma_t)_{r=a} = -\frac{2p_o b^2}{b^2 - a^2}$$

(Ec 92)

Debe subrayarse que cuando la relación b/a aumenta, este esfuerzo compresor máximo tiende a un valor doble que el de la presión exterior que actúa sobre el cilindro. Consideremos ahora la deformación del cilindro. Sustituyendo las expresiones (Ec 85) de las constantes arbitrarias en la ecuación (Ec 81), tenemos

$$u = \frac{1-\mu}{E} \frac{1-\mu}{E} \frac{a^2 p_i - b^2 p_o}{b^2 - a^2} r + \frac{1+\mu}{E} \frac{a^2 b^2 (p_i - p_o)}{(b^2 - a^2) r}$$

(Ec 93)

Esta ecuación da el corrimiento radial de cualquier punto de la pared del cilindro. En el caso particular de un cilindro sometido solamente a presión interna, $p_o = 0$, y el corrimiento radial en la superficie interior, deducido de la ecuación (Ec 93), es

$$(u)_{r=a} = \frac{ap_i}{E} \left(\frac{a^2 + b^2}{b^2 - a^2} + \mu \right)$$

(Ec 94)

Cuando el cilindro está sometido a presión externa solamente, $p_i = 0$, y el corrimiento radial en la superficie exterior es

$$(u)_{r=b} = -\frac{bp_o}{E} \left(\frac{a^2 + b^2}{b^2 - a^2} - \mu \right) \quad (\text{Ec 95})$$

El signo menos indica que el corrimiento es hacia el eje del cilindro.

8.2 Cinemática del Tornillo de Plastificación

Existen discrepancia entre los autores que plantean los parámetro de diseño en este tipo de máquinas, esto debido a que algunos hacen referencia a máquinas de pequeña capacidad, como el caso de Munns (06), y otros ya a máquinas de mayor capacidad y por ende mayor tamaño como en el caso de Rosalto (08). En esta sección plantaremos ambas propuestas de diseño para así tener presentes sus valores luego en el Capítulo 2 - se escogerá, según el diseño, los datos que mejor se adapten al prototipo.

Los sistemas de plastificación para inyectoras tiene que satisfacer las muy diversas que se plantean a las máquinas para los tipos de aplicación. Por tal razón los tornillos se diseñan para una amplia gamma de aplicaciones, siendo necesarios usillo especiales para aplicaciones muy particulares. El tornillo debe ser efectivo, no solamente como dispositivo de plastificación, sino también como dispositivo de inyección.

El tornillo debe poder fundir el material continua y uniformemente a la temperatura necesaria, además la velocidad de alimentación del tornillo debe ser constante para una determinada velocidad de giro.

8.2.1 Relaciones Geométricas

Tabla 21. Relaciones geométricas del tornillo de inyección

Nombre	Símbolo	Valores Típicos
Diámetro Nominal	D_S	22-140mm
Ángulo de Hélice	ϕ	17,8°
Espesor de Hélice	s	6mm
Profundidad de Hélice en SA.	h_F	Depende de h_F/ h_M
Profundidad mínima en SM	h_M	5,59mm
Longitud efectiva del tornillo	L	Depende de L/D_S
Holgura Radial	δ	0,127mm
Relación L/D	L/D_S	12-17 ⁽¹⁹⁾ 16-24 ⁽²⁰⁾
Tasa de Compresión	h_F/ h_M	1,2 – 4,0 (ver Tabla 22)
Sección de alimentación	SA	0,25-0,33L
Sección de plastificación	SP	0,5L
Sección de Medición	SM	0,25-0,33L

Nota: Tomado de Valores de “Injection Molding Handbock” de Rosalto Dominick (08) y “Plantas de moldeo de plásticos por inyección” de Munns (06)

Tabla 22. Tasa de compresión para algunos plásticos.

Tipo de tornillo	h_F/ h_M	Material
Tornillo de Baja Compresión	1,2 – 1,8	Acrílicos, ABS, SAN, Polivinil Clorado
Tornillo de Compresión Media	2,0 – 2,8	Acetato de celulosa, Nylon (de bajo índice de fluidez), policarbonatos, polietileno (de bajo a medio índice de fluidez) polipropileno (de bajo a mediano índice de fluidez), Poliestileno
Tornillo de Alta Compresión	3,0 – 4,5	Acetato, fluoroplásticos, Nylon (alto índice de fluidez), Polietileno (alta densidad)

Nota: Tomado de Valores de “Injection Molding Handbock” de Rosalto Dominick (08)

¹⁹ Según Munns

²⁰ Según Rosalto

8.2.2 Tasa de inyección

De las tres secciones del tornillo de inyección la tasa de inyección depende únicamente de la sección de Medición. Si las dimensiones de esta sección es conocida y se pueden asumir como conocidos las condiciones de operación, es posible calcular la tasa de inyección de la unidad.

Tres tipos de flujo fundido se presentan en la sección de medición del tornillo:

1. Flujo de arrastre. Este flujo fundido que proviene de la sección anterior bombeado o empujado por el tornillo sin restricciones de flujo.
2. Flujo a presión. Esto significa que una parte del flujo se regresa presentando pérdidas de inyección, esto debido a restricciones en el sistema como el dado, boquilla o cualquier otro dispositivo.
3. Flujo de pérdida²¹: esto el fluido que pasa por encima de las hélices debido a la presencia de flujo a baja presión y la holgura radial.

La tasa de inyección de inyección entonces será la suma algebraica de estos tres valores siendo el flujo a presión y el flujo negativo debido a que se mantienen en la unidad recirculándose.

Debido a que la holgura radial es muy pequeña, no se toman en cuenta las pérdidas.

Se tiene la siguiente formulación para el cálculo de la tasa de inyección:

$$Q = \alpha N - \frac{\beta \Delta p}{\eta} \quad (\text{Ec } 96)$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} n D_s b h_M \cos^2(\phi) F_d \quad (\text{Ec } 97)$$

$$\beta = \frac{b h_M^3 \sin \phi \cos \phi}{12 L_{SM}} F_p \quad (\text{Ec } 98)$$

²¹ *Pérdida* Traducción literal del inglés “Leakage”

La viscosidad es dependiente de la tasa de corte y esta se estima de la siguiente manera:

$$Y = \frac{\pi DN}{h_M} \tag{Ec 99}$$

Donde:

- b longitud axial del canal (paso – espesor de hélice) F_d Factor de flujo de arrastre
- n Número de hélices paralelas (en tornillos convencionales 1) F_p Factor de flujo a presión.
- L_{SM} Longitud de la sección de medición N rps del tornillo.

8.2.3 Velocidad del fluido en el tornillo.

Una vez fundido el plástico este no se mueve como un bloque en el tornillo. Debido a la fricción entre el fluido con el barril y el fluido con el tornillo, este tiende a presentar el fenómeno de turbulencia. Por una parte el fluido cercano al barril tiende a “pegarse” a este siendo regresado, una vez que llega a la hélice, ésta la empuja hacia el núcleo del tornillo, empujándolo este con dos velocidades, una de rotación perpendicular al eje y otra de traslación, “lineal” y paralela al eje del tornillo.

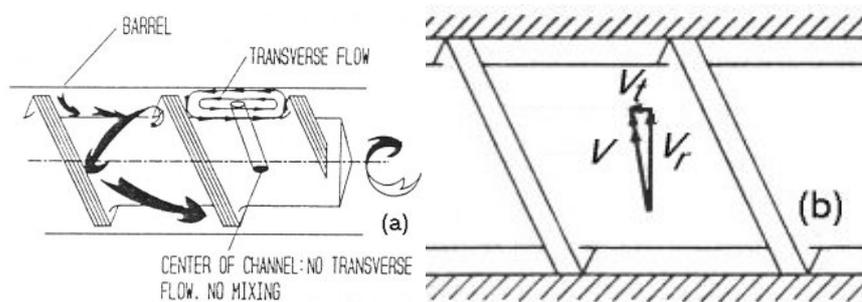


Figura 47. Movimiento del fluido en el tornillo
 Tomado de Injection Holding Handbook de Rosalto Dominick. Pág 163

De esta manera el fluido presenta una turbulencia “forzada” cuya velocidad se toma como la resultante de las velocidades de rotación y de traslación, estas se estiman respectivamente con las ecuaciones (Ec 100) y (Ec 101) como sigue:

$$V_r = \pi D \omega \quad (\text{Ec 100})$$

$$V_t = p \omega \quad (\text{Ec 101})$$

donde:

p	paso del tornillo en metros	V_r	Velocidad de rotación en m/s
D	Diámetro medio del tornillo en metros	V_t	Velocidad de traslación en m/s
		ω	Rotación del tornillo en rps

La velocidad resultante será:

$$V = \sqrt{(\pi D \omega)^2 + (p \omega)^2} \quad (\text{Ec 102})$$

8.2.4 Tornillos de potencia

Estos son dispositivos que convierten el giro o desplazamiento angular en un desplazamiento rectilíneo y transmitir una fuerza o potencia, así como también el transporte de material en forma de grava. La nomenclatura utilizada por Shigley (10) para el cálculo del torque necesario para elevar o bajar una carga por medio de este tipo de dispositivos es:

d_r	Diámetro de raíz	ϕ, ψ	Ángulo de hélice
d_m, d_c	Diámetro medio o de paso	F	Fuerza
p	Paso	μ	Coefficiente de fricción
λ	Ángulo de avance	l	Desplazamiento del tornillo

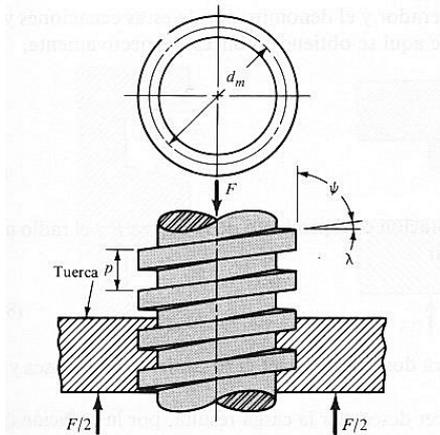


Figura 48. Parte de un tornillo de transmisión de fuerza o impulso
Tomado de “Diseño en ingeniería Mecánica” por SHIGLEY, J (1999) Pág 373

En la Figura 48 se muestra un tornillo de potencia de rosca cuadrada de un solo filete que tiene un diámetro medio d_m , un paso p , un ángulo λ de avance, y un ángulo de hélice ψ , que soporta una carga axial de compresión F , el torque necesario para levantar esta carga será:

$$T_s = \frac{F \cdot d_m}{2} \left(\frac{\pi \cdot \mu \cdot d_m + l}{\pi \cdot d_m - \mu \cdot l} \right) \quad (\text{Ec 103})$$

Donde T es el valor del momento requerido para vencer el rozamiento en la rosca y levantar la carga.

Entonces la potencia será:

$$Pot = \omega_1 \frac{F \cdot d_m}{2} \left(\frac{\pi \cdot \mu \cdot d_m + l}{\pi \cdot d_m - \mu \cdot l} \right) \quad (\text{Ec 104})$$

Donde Pot es la potencia requerida para hacer girar el tornillo, ω_1 son las rps del mismo.

CAPÍTULO 9 - CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La secuencia de pruebas del equipo comenzó por verificar la capacidad de la maquinaria de hacer fluir el material platificado a través del dado obteniéndose una barra cilíndrica. Posteriormente se procede a efectuar pruebas obligando a un flujo anular mediante la inserción del cilindro (dado) de la barra guía. En este proceso se detecto que debido a la longitud de esta pieza y a presencia de una pequeña excentricidad al final del dado la pieza obtenida no cumplía dimensionalmente con el objetivo propuesto.

Aquí confluyen dos fenómenos, por un lado el efecto del choque térmico encontrándose con un medio a 50° C esto produce un efecto en el patrón de flujo. La solución es proceder a calentar el dado para mejorar la fluidez de la pasta y otra, seria mas drástica, proceder a recortar la sección del dado; eventualmente, la combinación de las dos soluciones sea el resultado de una pieza aceptable. Adicionalmente a esto el material con que se trabajo no ha sido utilizado con aditivos, se ha hecho el esfuerzo por efectuar pruebas en condiciones más adversas y con un material virgen sin aditivos. Se verifico las capacidades de la maquina entre 25 y 40 rpm, lográndose procesar aproximadamente 0,09 kg/min.

Desde el punto de vista operativo es aceptable que las proyecciones de condiciones de diseño que fueron estimadas para una rango de 15 a 20, ya que en la práctica se obtuvieron resultados favorables en un rango de 20 a 30 rpm.

Es importante resaltar que las estimaciones de los parámetros involucrados en los cálculos del funcionamiento de la máquina, tales como la reología del material utilizado, los rangos permisibles asociados a los coeficientes de roce, transferencia de calor y otros parámetros termofísicos, fueron muy cercanos a los reales, comprobándose que las estimaciones y suposiciones realizadas se aproximaron

bastante bien a los resultados experimentales de las pruebas del equipo, indicando que los modelos utilizados para los cálculos se adaptan al comportamiento del equipo.

El material utilizado es considerado por las industrias como sub-estándar, ya que éstas acostumbran a clasificar los grados de estos polímeros en estándar y sub-estándar, con lo cual se le certifica a los compradores la calidad del producto, a fin de garantizarle las propiedades finales de los productos que serán manufacturados con esa material prima, por ello puede haber una pequeña desviación entre los datos de las propiedades de los polímeros obtenidos en la literatura existente y los reales de la materia prima utilizada.

Es nuestro caso podemos concluir que el dispositivo para el manejo de plástico reciclado, desde el punto de vista de cinemática cumple con las especificaciones de este tipo de equipos, debido a que mezcla muy bien el fluido, obteniendo piezas sin porosidad ni inclusiones superficiales visibles, además cumple con el requisito de maximizar la transferencia de calor de forma uniforme en la mezcla.

Se recomienda lo siguiente:

- 1) Confirmar los datos termofísicos en la mezcla en las diferentes fases.
- 2) Instrumentar el equipo para la adquisición de datos repetitivos y confiables de parámetros como rpm, presión, caudal y potencia consumida tanto en la unidad motora como en la calefactora de la UEI-HL-V1 para hacer un estudio más profundo del comportamiento de fluidos no Newtonianos.
- 3) Confirmar el modelo matemático sobre todo en lo respectivo a la potencia.
- 4) Hacer un estudio, experimental o por simulación, sobre el comportamiento del los fluidos al pasar de una sección cilíndrica a una anular para así poder conocer las pérdidas que se presentan al realizar este cambio de geometría, entre otros parámetros.
- 5) Diseñar un sistema de control de temperatura para el uso continuo o prolongado del UEI-HL-V1.
- 6) Agregar una sección de calefacción adicional en la sección del molde.

- 7) Hacer estudio de diferentes diseños de tornillo para verificar su eficiencia en el mezclado y plastificación de los polímeros.
- 8) Si se quiere reducir el tiempo en que se llega a la temperatura de trabajo, cambiar las resistencias por una de mayor potencia.

CAPÍTULO 10 - GLOSARIO

Carga límite de un perno: es la fuerza máxima que un perno puede resistir sin experimentar una deformación permanente.

Densidad: relación entre la masa de una sustancia y su volumen, o el volumen de otra tomada como referencia.

Extrusión: proceso mediante el cual se obliga a una sustancia, especialmente un metal o un termoplástico, a pasar por un troquel o dado, creando así distintas formas de sección uniforme utilizadas en la industria, la construcción y la fabricación de distintos tipos de utensilios y aparatos.

Fluido newtoniano: fluidos en la cual la relación entre el esfuerzo cortante y la deformación son directamente proporcional.

Fluido no newtoniano: fluido en la que la relación entre esfuerzo cortante y deformación no son directamente proporcional.

Fluidos de Bingham: fluidos que requieren un esfuerzo cortante mínimo para causar su movimiento.

Fluidos plásticos ideales: ver Fluidos de Bingham.

Índice de Fluidez (IF): El índice de fluidez (IF) es una medida de la capacidad de flujo de la resina bajo condiciones controladas y es fácilmente medible con un sencillo dispositivo denominado plastómetro. Esta variable se relaciona inversamente con el peso molecular (PM), el cual da una idea del tamaño de las cadenas moleculares de los polímeros.

Líquido: estado de la materia en el que las moléculas están relativamente libres para cambiar de posición unas respecto a otras, pero restringidas por fuerzas de cohesión, con el fin de mantener un volumen relativamente fijo.

Material Termorígido: Se denomina así porque se transforma en rígido como consecuencia de una reacción química. Una vez que se lleva a cabo este proceso se produce la solidificación y el material no puede ser usado nuevamente mediante la misma operación de transformación.

Material Termoplástico: Son aquellos materiales capaces de ser ablandados repetidamente por aumento de temperatura y endurecidos por disminución de la temperatura.

Molécula gramo: Es la masa de una molécula de una sustancia multiplicado por el número de Avogadro ($6,02 \times 10^{23}$).

Peso específico relativo: coeficiente de la densidad de una sustancia respecto a la densidad del agua a temperatura de referencia de 4°C.

Peso específico: viene dado por la densidad del material multiplicado por la gravedad local.

Peso Molecular (PM): Es la masa de la molécula gramo. Los polímeros con aplicación práctica tienen peso molecular mayor de 5.000/10.000.

Plásticos, materiales: materiales polímeros orgánicos (compuestos formados por moléculas orgánicas gigantes) que son plásticos, es decir, que pueden deformarse hasta conseguir una forma deseada por medio de extrusión, moldeo o hilado. Las moléculas pueden ser de origen natural, por ejemplo la celulosa, la cera y el caucho (hule) natural, o sintéticas, como el polietileno y el nailon. Se deriva de la palabra griega PLASTIKOS, que significa "apto para moldear"; generalmente, se refiere a un artículo que ha sido formado o moldeado a partir de una resina mediante la aplicación de presión o calor o ambos

Plastificación: Es la capacidad que presenta un material de ser deformado debido a un esfuerzo mecánico, pero sin perder su liga, o romperse.

Polietileno: polímero termoplástico del etileno sólido y traslúcido.

Polímeros: son moléculas gigantes formadas por unidades repetitivas (meros: partes, poly: muchos).

Poliiolefinas: Nombre genérico dado a polímeros obtenidos a partir de hidrocarburos (sustancias orgánicas formadas por carbono e hidrógeno). Las principales poliolefinas son: polietileno de baja densidad, polietileno de alta densidad y polipropileno.

Presión: fuerza ejercida sobre una unidad de superficie de un cuerpo por un sólido, líquido o gas.

Temperatura de Fusión (T_m): Es la temperatura por encima de la cual comienza a haber movilidad entre las cadenas de la fase cristalina de un material. Y también el pasaje del estado sólido para el estado líquido.

Temperatura de Transición Vítrea (T_g): donde se produce el cambio de un sólido frágil y rígido como el vidrio (vítreo) a una sustancia elastomérica o dúctil. Debajo de T_g las cadenas moleculares son rígidas mientras que por encima son flexibles.

Troquel: herramienta empleada para dar forma a materiales sólidos, y en especial para el estampado de metales en frío.

Viscosidad: resistencia que ofrecen los fluidos al movimiento relativo entre las partículas, siendo inversamente proporcional a la fluidez.

CAPÍTULO 11 - BIBLIOGRAFÍA

- (01) BACHMANN, Albert. (1968) Dibujo Técnico. Editorial Labor S.A. Barcelona – España. 2da Edición en español.
- (02) HOLMAN, J. P. (1998) Transferencia de Calor. McGraw Hill. Madrid – España.
- (03) Microsoft Corporation 1993-1999. Enciclopedia Microsoft® Encarta® 2000.
- (04) MORTON, D. H.: Procesamiento de Plásticos. Inyección. Moldeo. Hule. PVC., Editorial: Limusa, México, 1º Edición, 1993
- (05) MOTT, Robert (1995). Diseño de Elementos de Máquinas. Prentice Hall Hispanoamericana S.A. Segunda Edición. México.
- (06) MUNNS. M. G. (1976) Plantas de moldeo de plásticos por inyección. Editorial INdex. Madrid – España.
- (07) POTTER, Merle y otros (1998). Mecánica de los Fluidos. Prentice Hall Hispanoamericana S.A. Segunda Edición México.
- (08) ROSALTO, Dominick y otros. Injection Molding Handbook. Kluwer Academic Publishers. Tercera Edición. Boston
- (09) SANTAMARÍA, Germán. (1985) Manual de automatización eléctrica. Editorial Arco Libros S.A. Madrid – España.
- (10) SHIGLEY, Joseph y otros (1999). Diseño en ingeniería mecánica. Mc Graw Hill Interamericana de México. Cuarta edición en español. México.
- (11) SKELLAND, A. H. P. (1967). Non – Newtonian flow and heat transfer. John Wiley & Sons. Nueva York.
- (12) Society of the Plastics Industry. (1976) Plastics Engineering Handbook of the Society of the plastics. Editorial Van Nostrand Reinhold Company. NY

-
- (13) TIMOSHENKO, S. (1976) Resistencia de Materiales. Editorial Espasa – Calpe S.A. Madrid. Tomos 1 y 2
- (14) VAN VLACK, Lawrence. (1980) Materiales para Ingeniería. Primera publicación. Editorial Continental S.A.México

CAPÍTULO 12 - APÉNDICES

12.1 Manual de Operación y Mantenimiento

12.1.1 Operación del equipo

¡Precaución! Antes realizar cualquier operación asegúrese que todos los interruptores estén en modo apagado (off)

- 1) Colocar el molde apretándolo ligeramente con una llave inglesa en por el anillo.
- 2) Encender el interruptor principal.
- 3) Encender las cuatro resistencias.
- 4) Al pasar 10 min. Apagar las resistencias y encender el motor para expulsar el silicón.
- 5) Una vez extraído todo el silicón apagar el motor.
- 6) Encender las resistencias en el siguiente orden: (1) Resistencias #2 y #3. (2) a los 5 min. encender la resistencia #1. (3) a los 2 min. encender la resistencia #4.
- 7) Apagar las resistencias a los 120 min. **Nota:** evitar dejar más tiempo de lo necesario las resistencias encendidas ya que el plástico en lugar de fundirse se “quema” y se endurece drásticamente.
- 8) Introducir el polímero por la tolva de alimentación.
- 9) Encender el motor y graduar la perilla hasta que gire a unos 25 rpm.
- 10) Una vez terminado el proceso introducir silicón en la tolva para limpiar el materia dentro del barril, cuando salga por el molde apagar.
- 11) Esperar unos 10 min. para extraer el molde. **¡Precaución!** Debe tener presente que el barril se encuentra a unos 80°C aproximadamente.

12.1.2 Mantenimiento

12.1.2.1 General

- 1) Para expulsar el polímero sobrante se recomienda introducir un polímero tipo limpiante y hacer funcionar el motor.
- 2) Para evitar que la oxidación del barril y el tornillo, introducir silicón después de procesar el polímero para que este ocupe todo el interior del barril.

12.1.2.2 Montaje

¡Precaución! Antes de realizar cualquier operación asegúrese que todos los interruptores estén en modo apagado (off)

- 1) Atornillar las platinas A-06 a la BS.
- 2) Introducir las cuatro barras en la base.
- 3) Montar la BM.
- 4) Colocar las molineras en el tornillo.
- 5) Colocar el tornillo en la BI.
- 6) Montar por debajo la BI empujando ligeramente para que la molinera superior entre en la BS.
- 7) Montar las cuatro tuercas que sujetan la BS.
- 8) Montar la base al estante.
- 9) Montar el barril y ajustarlo en la “Y” de la BB
- 10) Introducir la resistencia #1 hasta llegar al final de la rosca cónica y ajustarla.
- 11) Introducir las resistencias #2 y #3 a una distancia de 7mm entre una resistencia y otra. (Esta distancia va a depender de la longitud del barril y de las resistencias).
- 12) Introducir la última y ajustarla a tope del final de la rosca recta.
- 13) Montar la válvula de alivio.
- 14) Montar el aislante.
- 15) Montar la base del barril en la base inferior, teniendo cuidado de no golpear el tornillo.

- 16) Atornillar la base del barril a la base inferior.
- 17) Montar el motor en la base.
- 18) Encender y hacer rotar el tornillo lentamente para verificar el alineamiento.
- 19) Apagar todo.
- 20) Montar el DA.

12.1.2.3 Intercambio de partes

Barril. Para el reemplazo del barril se procede como sigue:

- 1) Quitar el aislante.
- 2) Quitar el DA.
- 3) Encender todas las resistencias por 7 min.
- 4) Apagar las resistencias y encender el motor para expulsar el silicón.
- 5) Apagar el motor. Esperar hasta que se enfríe el barril para poder manipularlo.
- 6) Desconectar las cuatro resistencias.
- 7) Quitar los cuatro tornillos que sostienen la base del barril.
- 8) Sacar el barril y su tratando de no hacerlo chocar contra el tornillo.
- 9) Quitar la válvula de alivio del barril.
- 10) Desmontar las resistencias del barril
- 11) Introducir una llave para hacer girar el barril.
- 12) Montar el nuevo barril siguiendo los pasos 9) al 20) de la sección de montaje

Tornillo:

- 1) Desmontar el barril siguiendo los pasos 1) al 8) de la sección de intercambio del barril.
- 2) Quitar los tornillos que unen la BI al estante.
- 3) Sostener la BI mientras se quitan las cuatro tuercas que la unen al resto de la base.
- 4) Empujar ligeramente para hacer salir la rolinera de la BS.
- 5) Quitar el tornillo de la BI.

- 6) Quitarle las rolineras al tornillo.
- 7) Para montar uno nuevo seguir los pasos 4) al 7) de la sección de montaje.
- 8) Montar el barril.

Resistencias

- 1) Desconecte las resistencias.
- 2) Quite el aislante del barril.
- 3) Afloje los tornillos que sujetan cada resistencia y sáquelas.
- 4) Para montar resistencias nuevas siga los pasos 10) al 14) de la sección de montaje.

12.2 Hoja de datos de seguridad del Polietileno