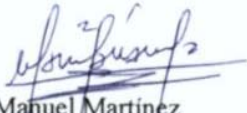


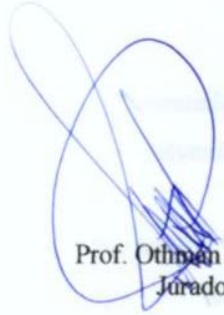
Caracas, 30 de Julio de 2004.

Los abajo firmantes, miembros del jurado designado por el Consejo de la Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Bachilleres Jenny Castillo y Ángel Suzzarini, titulado:

**“DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE DOS TORNILLOS  
PARA INYECCIÓN DE POLÍMEROS”**

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al Título de Ingeniero Mecánico, y sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por los autores, lo declaran APROBADO

  
Prof. Manuel Martínez  
Jurado

  
Prof. Othman Falcón R.  
Jurado

  
Prof. Guillermo Flores M.  
Tutor Académico.



**TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE DOS TORNILLOS  
PARA INYECCIÓN DE POLÍMEROS**

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de  
Venezuela

Por los Brs. Castillo, Jenny  
Suzzarini, Ángel  
para optar al Título  
de Ingeniero Mecánico.

Caracas, 2004

## **TRABAJO ESPECIAL DE GRADO**

### **DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE DOS TORNILLOS PARA INYECCIÓN DE POLÍMEROS**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Guillermo Flores Marcano.

Presentado ante la ilustre  
Universidad Central de  
Venezuela  
Por los Brs. Castillo, Jenny  
Suzzarini, Ángel  
para optar al Título  
de Ingeniero Mecánico.

Caracas, 2004.

## **DEDICATORIA**

*A quienes nos han sabido entender y han llenado nuestras vidas de alegría incondicionalmente, elevando nuestro espíritu y motivándonos a continuar aún cuando todo lo demás está en contra*

*Gracias a quienes nunca se les agradece*

*TMTST*

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, le damos gracias a Dios: por permitirnos vivir cada uno de los días a plenitud, en esta búsqueda del conocimiento que durante años hemos transitado.

A nuestros Padres, a nuestras Madres: por estar siempre allí, brindándonos todo su apoyo, moral y financiero, para la exitosa culminación de este proyecto. Finalmente, hoy saben que valió el esfuerzo.

A nuestro Tutor y amigo el Ingeniero Guillermo Flores Marcano: por aceptar la responsabilidad de ser nuestro tutor, por estimularnos a creer en la capacidad que tenemos para producir nuestra propia Tecnología Nacional y por recordarnos en todo momento que el sendero de la investigación no tiene límites y estamos convencidos que gracias a la confianza que depositó en nosotros, hemos comenzado a transitarlo.

A María Elena Álvarez, por suministrarnos una gran parte del material bibliográfico empleado, y por aportarnos múltiples sugerencias útiles para el diseño de las piezas.

Al Señor Yubert Boyer: por contribuir con la construcción de todas las piezas diseñadas, permitiéndonos en todo momento ser parte de este proceso, respondiendo a nuestras dudas, orientándonos acerca del uso de las máquinas herramientas en cada una de las piezas construidas y haciendo oportunas sugerencias que permitieron abaratar los costos y obtener excelentes resultados.

A nuestra amiga la Ing. Isabel Guerrero, porque nos brindó su máxima colaboración y tuvo la paciencia suficiente para no quejarse en ningún momento por

todo lo que la fastidiamos. Todas las imágenes fotográficas de este Trabajo, fueron tomadas con su cámara.

Al Ingeniero Leonardo Ruiz por su asesoría con en la realización de los planos de las distintas piezas.

Al Sr. José Peraza, por su paciencia, apoyo y ayuda, al momento de efectuar las modificaciones adicionales sugeridas por el jurado.

Finalmente un agradecimiento especial a dos personas que nos ayudaron en momentos claves, cuando aparecen esas emergencias y pareciera que todas las puertas se cierran, ellos estuvieron allí: nuestra amiga Zobjes Lares y nuestro amigo Alejandro Gil.

Ángel y Jenny.

# ÍNDICE

Dedicatoria

Agradecimientos

Índice de Tablas

Índice de Figuras

Abreviaturas y Símbolos

Resumen

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Objetivos y Alcances.....	1
1.1.1 Objetivo General.....	1
1.1.2 Objetivos Específicos.....	2
1.1.3 Alcances.....	3
1.2 Sumario.....	3
CAPÍTULO 2 DISEÑO Y CÁLCULOS.....	5
2.1 Bases de diseño .....	5
2.1.1. Generales.....	5
2.1.2. Tornillo de Paso Variable y Sección Constante (PV).....	6
2.1.3. Tornillo de Paso constante y Sección Constante (Universal).....	8
2.1.4. Termofísicas.....	8
2.2. Procedimiento de Cálculos.....	9

2.2.1. Tornillo de Paso Variable y Sección Fija.....	11
2.2.1.1 Zona de Alimentación.....	12
2.2.1.2. Zona de Dosificación.....	24
2.2.1.3. Zona de Fusión.....	30
2.2.2. Tornillo de Paso Constante y Sección Fija.....	37
2.2.2.1. Zona de Alimentación.....	38
2.2.2.2. Zona de Dosificación.....	44
2.2.2.3. Zona de Fusión.....	48
2.2.3. Transferencia de Calor (Régimen uniforme estado estable).....	51
2.2.3.1. Tornillo de Paso Variable. Etapa de Alimentación.....	52
2.2.3.2. Tornillo de Paso Variable. Etapa de Fusión.....	60
2.2.3.3. Tornillo de Paso Variable. Etapa de Dosificación.....	61
2.2.3.4. Tornillo Universal. Etapa de Alimentación.....	63
2.2.3.5. Tornillo Universal. Etapa de Fusión.....	63
2.2.3.6. Tornillo Universal. Etapa de Dosificación.....	64
2.2.4. Análisis de Esfuerzos y Cálculo de la Potencia Requerida.....	66
2.2.4.1. Teoría del Esfuerzo Normal Máximo.....	75
2.2.4.2. Teoría del Esfuerzo Cortante Máximo.....	76
2.2.4.3. Potencia Requerida.....	77
CAPÍTULO 3: PLANOS.....	80
3.1. Tornillo de Paso Variable.....	81
3.2. Tornillo de Paso Constante.....	82
3.3. Molde.....	83
3.4. Bridas.....	84
3.5. Acople.....	85



3.6. Dispositivo para Limpieza del Barril.....	86
3.7. Dispositivo para Limpieza del Molde.....	87
3.8. Árbol 2.....	88
3.9. Árbol 3.....	89
3.10. Placa – Bocina.....	90
3.11. Apoyo.....	91
3.12. Fotos de las piezas.....	92
CAPÍTULO 4: PRUEBAS DEL EQUIPO.....	95
4.1. Procedimiento Experimental.....	95
4.1.1. Pruebas 0.....	95
4.1.2. Diseño de la Transmisión Mecánica.....	96
4.1.2.1. Árbol <sub>2</sub> .....	102
4.1.2.2. Árbol <sub>3</sub> .....	109
4.1.3. Protocolo de pruebas realizadas.....	113
4.2. Resultados.....	130
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES.....	132
CAPÍTULO 6: RECOMENDACIONES.....	135
CAPÍTULO 7: BIBLIOGRAFÍA.....	138
CAPÍTULO 8: GLOSARIO.....	140
CAPÍTULO 9: APÉNDICES.....	144
9.1. Reseña sobre Máquinas de Extrusión y Polímeros:.....	144
9.1.1. La Máquina de Extrusión.....	144
9.1.2. El tornillo de extrusión.....	146

9.1.3. Unidad a ser utilizada.....	148
9.1.4. Polímeros.....	149
9.1.4.1. Estructura de los polímeros.....	150
9.1.4.2. Síntesis de los polímeros.....	151
9.1.5. Plásticos.....	152
9.1.5.1. Historia.....	152
9.1.5.1.1. El avance de la química de los plásticos .....	153
9.1.5.1.2. La segunda guerra mundial.....	154
9.1.5.1.3. El auge de la posguerra.....	154
9.1.5.2. Clasificación de los plásticos.....	155
9.1.5.3. Fabricación.....	156
9.1.5.4. Aplicaciones.....	159
9.1.5.5. Salud y riesgos para el entorno.....	160
9.1.5.6. Algunas propiedades típicas de los plásticos:.....	161
9.1.5.6.1. Comportamiento de los plásticos sometidos a tensión.....	161
9.1.5.6.2. Temperatura vítrea en los polímeros.....	162
9.1.5.6.3. Conductividad Térmica.....	164
9.1.6. Polietileno .....	164
9.2. Hoja de seguridad del polímero.....	168
9.3. Proceso de fabricación de los tornillos (FOTOS).....	171
9.4. Equipo en funcionamiento (FOTOS).....	173
9.5. Modificaciones efectuadas en base a las recomendaciones 7 y 14 propuestas por el jurado y ejecutadas como actividades adicionales.....	175
9.5.1. Investigación adicional sobre el arranque y parada de las máquinas de extrusión de polietileno comerciales.....	180
9.5.2. Sugerencias para producir piezas de calidad con la Unidad de extrusión.....	182

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 01: Dimensiones del Tornillo de Sección Variable y Paso Constante..	10
Tabla N° 02: Dimensiones Base.....	13
Tabla N° 03: Datos para la iteración.....	22
Tabla N° 04: Iteración $\emptyset$ y .....	22
Tabla N° 05: Datos para la Zona 3 del Tornillo PV.....	28
Tabla N° 06: Iteración $\Delta P_3$ con $Q_3$ para el Tornillo PV.....	29
Tabla N° 07: Variación del Perfil del Lecho Sólido.....	34
Tabla N° 08: Dimensiones del Tornillo de Sección Fija y Paso Variable.....	36
Tabla N° 09: Paso y ángulos del Tornillo de Sección Fija y Paso Variable.....	37
Tabla N° 10: Datos para la Zona 3 del Tornillo Universal.....	46
Tabla N° 11: Iteración de $Q_3$ y $\Delta P_3$ para el Tornillo Universal.....	47
Tabla N° 12: Dimensiones del Tornillo Universal.....	50
Tabla N° 13: Convección Natural para cilindro circular en flujo cruzado [6]...	55
Tabla N° 14: Temperatura en función del tiempo de residencia Zona 3 Tornillo PV.....	62
Tabla N° 15: Temperatura en función del tiempo de residencia Zona 3 Tornillo Universal.....	65
Tabla N° 16: Variables para el cálculo de fuerzas del Tornillo PV.....	70
Tabla N° 17: Variables para el cálculo de fuerzas del Tornillo Universal.....	70
Tabla N° 18: Pasos y ángulos del Tornillo PV.....	71
Tabla N° 19: Fuerzas R y U para el Tornillo PV.....	72
Tabla N° 20: Fuerzas R y U para el Tornillo Universal.....	72
Tabla N° 21: Esfuerzos es los filetes de cada zona del Tornillo PV.....	74
Tabla N° 22: Esfuerzos es los filetes de cada zona del Tornillo Universal.....	75
Tabla N° 23: Potencia en cada etapa del Tornillo PV.....	78
Tabla N° 24: Potencia en cada etapa para el Tornillo Universal.....	78

Tabla N° 25: Momentos ejercidos sobre el Árbol 2.....	108
Tabla N° 26: Factores de seguridad para cada diámetro del Árbol 2.....	109
Tabla N° 27: Momentos ejercidos sobre el Árbol 3.....	112
Tabla N° 28: Factores de seguridad para cada diámetro del Árbol 3.....	113
Tabla N° 29: Pruebas del Tornillo SV.....	121
Tabla N° 30: Duración de cada prueba del Tornillo SV.....	123
Tabla N° 31: Pruebas del Tornillo PV.....	124
Tabla N° 32: Duración de cada prueba del Tornillo PV.....	126
Tabla N° 33: Pruebas del Tornillo Universal.....	127
Tabla N° 34: Duración de cada prueba del Tornillo Universal.....	129
Tabla N° 35: Resultados y comparación a 248 rpm.....	131
Tabla N° 36: Conductividad térmica (k) de algunos materiales.....	164
Tabla N° 37: Efecto del aumento de densidad sobre las propiedades del polietileno.....	166
Tabla N° 38: Ficha técnica del polietileno de baja densidad (PEBD).....	166

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 01: Pellets.....	13
Figura N° 02: Gráfico explicativo del significado físico del ángulo de hélice....	14
Figura N° 03: Representación esquemática de las dimensiones físicas de los Tornillos.....	15
Figura N° 04: Sistema de Coordenadas.....	16
Figura N° 05: Significado físico de la longitud de filete (long).....	25
Figura N° 06: Diagrama de Viscosidad en función de la Temperatura.....	25
Figura N° 07: productos.....	30
Figura N° 08: Variación del Perfil del Lecho Sólido.....	35
Figura N° 09: Tornillo Universal y barril después de la Operación.....	51
Figura N° 10: Analogía Eléctrica para Transferencia de Calor.....	57
Figura N° 11: Diagrama de Cuerpo Libre.....	66
Figura N° 12: Analogía del filete a una viga empotrada.....	72
Figura N° 13: Carga distribuida.....	73
Figura N° 14: Diagrama de Fuerza Cortante.....	73
Figura N° 15: Diagrama de Momento Flector.....	74
Plano N° 1: Tornillo de Paso Variable.....	81
Plano N° 2: Tornillo de Paso Constante.....	82
Plano N° 3: Molde.....	83
Plano N° 4: Bidas.....	84
Plano N° 5: Acople.....	85
Plano N° 6: Dispositivo para Limpieza del Barril.....	86
Plano N° 7: Dispositivo para Limpieza del Molde.....	87
Plano N° 8: Árbol 2.....	88
Plano N° 9: Árbol 3.....	89
Plano N° 10: Placa – Bocina.....	90

Plano N° 11: Apoyo.....	91
Figura N° 16: Tornillo Universal y Tornillo de Paso Variable.....	92
Figura N° 17: Molde.....	92
Figura N° 18: Molde con el torpedo instalado.....	92
Figura N° 19: Bridas.....	93
Figura N° 20: Torpedo.....	93
Figura N° 21: Acople.....	93
Figura N° 22: Dispositivos Limpiadores.....	93
Figura N° 23: Árbol 2 y apoyo.....	94
Figura N° 24: Árbol 3 y placa – bocina.....	94
Figura N° 25: Designación de las bandas en función de la potencia y la velocidad de rotación.....	97
Figura N° 26: Motor empleado.....	98
Figura N° 27: Árbol 2 montado y desmontado.....	100
Figura N° 28:Árbol 3 y Polea 4.....	100
Figura N° 29: Vista frontal de la transmisión.....	100
Figura N° 30: Dimensiones físicas de una transmisión por bandas.....	101
Figura N° 31: Disposición espacial de los tres árboles de transmisión.....	103
Figura N° 32: Diagramas de Fuerza Cortante, Momento Flector y Par Torsor para el Árbol 2.....	106
Figura N° 33: Diagramas de Fuerza Cortante, Momento Flector y Par Torsor para el Árbol 3.....	111
Figura N° 34: La transmisión.....	112
Figura N° 35: Tornillo fuera del barril.....	116
Figura 36: Molde.....	120
Figura N° 37: Estructura básica de los polímeros.....	150
Figura N° 38: Curva esfuerzo vs. Deformación para materiales plásticos con Características dúctiles.....	162

Figura N° 39: Curva esfuerzo vs. Deformación para plásticos con comportamiento frágil.....	162
Figura N° 40: Comportamiento del Volumen en función de la temperatura en los polímeros.....	163
Figura N° 41: Hoja de seguridad del polímero.....	168
Figura N° 42: Medidas de las barras brutas mediante Calibrador de Vernier.....	171
Figura N° 43: Medidas de las barras brutas mediante tornillo micrométrico.....	171
Figura N° 44: Torno empleado para el conformado de las piezas.....	171
Figura N° 45: Inicio del Devastado.....	171
Figura N° 46: Acción de la Herramienta de corte en la torreta mientras se ejerce la lubricación.....	172
Figura N° 47: Utilización de la Torreta y el Centro-punto.....	172
Figura N° 48: Muesca previa al fresado.....	172
Figura N° 49: Fresado del extremo superior del Tornillo.....	172
Figura N° 50: Montaje para el Roscado.....	172
Figura N° 51: Roscado.....	172
Figura N° 52: Roscado de la Zona 3 del Tornillo PV.....	173
Figura N° 53: Lubricación en el roscado de la Zona 3 del Tornillo PV.....	173
Figura N° 54: Inicio de la producción continua.....	173
Figura N° 55: Evolución de la producción continua.....	173
Figura N° 56: Inicio de deformación lateral por descentrado del torpedo.....	174
Figura N° 57: Formación de codo de 90°.....	174
Figura N° 58: Final de la producción de codo a 90°.....	174
Figura N° 59: Inicio de producción continua axial.....	174
Figura N° 60: Desarrollo de la producción continua axial.....	174
Figura N° 61: Efecto del calentamiento gradual del molde durante producción..	174
Figura N° 62: Fin de la producción continua axial.....	175
Figura N° 63: Representación gráfica de las camisas de separación.....	176

Figura N° 64: Taladrado y fresado de los perfiles angulares.....	177
Figura N° 65: Taladrado y fresado de los perfiles angulares.....	177
Figura N° 66: La máquina vista de frente.....	179
Figura N° 67: Vista lateral del equipo.....	179
Figura N° 68: Pieza en extrusión.....	180
Figura N° 69: Control de temperatura por resistencias y ventilación.....	182
Figura N° 70: Control de temperatura por resistencias y ventilación.....	182
Figura N° 71: Controlador de temperatura por resistencias y ventilación.....	183
Figura N° 72: Extrusora con refrigeración y bandas transportadoras.....	183
Figura N° 73: Motor y transmisión de la extrusora .....	184



## ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

<b><i>B</i></b>	Ancho del canal en la dirección axial
<b><i>B</i></b>	Ancho del filete en la dirección axial
<b><i>Db</i></b>	Diámetro del Barril
<b><i>De</i></b>	Diámetro Exterior del Tornillo
<b><i>Di</i></b>	Diámetro del alma del Tornillo
<b><i>Dm</i></b>	Diámetro medio del filete
<b><i>e</i></b>	Espesor del filete
<b>F</b>	Representa la suma de todas las fuerzas axiales que actúan sobre el área normal de la rosca.
<b>Fj</b>	Se refiere a la fuerza de roce entre la carga y el tornillo.
<b><i>Fs</i></b>	Coefficiente de roce entre el tornillo y el polímero
<b>H</b>	Profundidad del canal
<b>L</b>	Paso del tornillo
<b><i>long</i></b>	Longitud del filete
<b><i>M</i></b>	Flujo másico
<b><i>Mg</i></b>	Masa de polímero
<b>N</b>	Revoluciones por minuto
<b>P</b>	Número de hilos de la rosca
<b><i>pasos</i></b>	Número de Pasos
<b>PE</b>	Polietileno
<b>PEAD</b>	Polietileno de alta densidad
<b>PEBD</b>	Polietileno de baja densidad
<b><i>Pot</i></b>	Potencia

<b>Ql</b>	Caudal
<b>R</b>	Es la fuerza necesaria para mover la Carga
<b>Sy</b>	Índice de fluencia del material
<b>T</b>	Temperatura
<b>V</b>	Volumen de polímero
<b>vb</b>	Módulo de la velocidad a la cual giraría el barril si se mantuviera el tornillo fijo
<b>Vc</b>	Volumen Cilindro
<b>Vesp.</b>	Volumen específico
<b>Vf</b>	Volumen de los Filetes
<b>vpl</b>	Velocidad del tapón sólido
<b>w</b>	Ancho del canal medido perpendicularmente al filete
<b>zt</b>	Longitud Axial
<b>z</b>	Longitud de la zona en cuestión
<b>δ</b>	Holgura Radial
<b>ΔP</b>	Variación de presión
<b>θ</b>	Ángulo del filete
<b>μ</b>	Viscosidad
<b>ρ</b>	Densidad
<b>Σ</b>	Esfuerzo provocado por flexión
<b>τ</b>	Esfuerzo de corte
<b>φ</b>	Flujo de materia que puede fundirse por cada unidad de distancia axial del tornillo
<b>Ψ</b>	Tasa de fusión por unidad de distancia axial
<b>Ω</b>	Velocidad de fusión

$\Phi$

Transporte del polímero respecto a la dirección perpendicular al eje de la máquina

**Castillo R., Jenny E. y Suzzarini B., Ángel F.**

**DISEÑO, CONSTRUCCIÓN Y PRUEBAS DE DOS TORNILLOS  
PARA INYECCIÓN DE POLÍMEROS**

**Tutor académico: Prof. Ing. Guillermo Flores. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Ingeniería Mecánica. 2004, n° de págs. 184.**

Diseño, Extrusión, Polietileno, Polímeros

El Trabajo Especial de Grado que se presenta a continuación, tiene como característica fundamental el hecho de ser la continuación de una investigación que comenzó a partir del diseño y construcción del equipo elemental para el manejo de plásticos, pastas y otros materiales con comportamiento similar al de estos. Dado que una de las principales partes del equipo es el tornillo, y que según la forma que presente este elemento, el comportamiento del fluido de trabajo varía, y por ende la pieza final que se obtiene presentará unas propiedades diferentes, el presente trabajo se basa en el diseño y construcción de dos tornillos distintos al existente. Para ello se efectúan todos los cálculos necesarios, y se establecen las condiciones de diseño bajo las que se trabaja, para finalmente proceder a construir, probar y evaluar los resultados obtenidos con cada uno de los tornillos, trabajando con un mismo material, polietileno de baja densidad, para poder establecer comparaciones y arrojar como resultado, que, bajo las condiciones de operación empleadas, el Tornillo de Sección Constante y Paso Variable presenta un mejor comportamiento, en comparación con los otros dos: El tornillo de Paso y Sección Constante y El Tornillo de Paso Constante y Sección Variable.

## **CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN**

En la actualidad, el manejo de pastas y fluidos no newtonianos representa un área de aplicación de mucho interés en los procesos industriales. Este tipo de fluidos están presentes, por ejemplo, en sectores como la tecnología de alimentos, la industria del plástico y otras. Particularmente el manejo de plástico o de otro tipo de polímeros se ha vuelto sumamente importante ya que, en los últimos años, se han hecho múltiples avances en investigaciones que han permitido emplear los polímeros para la fabricación de elementos, tales como: tuberías sumamente resistentes y más económicas que las metálicas, aislantes para conductores eléctricos, algunas piezas para repuestos automotrices, utensilios de cocina, y muchos otros más.

En pro de avanzar en la investigación y desarrollo de la tecnología nacional, en el presente trabajo se pretende efectuar el diseño y construcción de dos tornillos de inyección de plástico y evaluar el funcionamiento del equipo con cada uno de los tornillos, para un mismo material de trabajo, y finalmente poder establecer comparaciones y obtener conclusiones con respecto a la influencia que tiene el tipo de tornillo utilizado en el producto final y con respecto a la influencia del uso de cada uno de los tornillos en la eficiencia del equipo, al comparar el caudal inyectado vs. la potencia consumida en cada uno de los casos.

### **3.3. Objetivos y Alcances:**

#### **3.3.1. Objetivo General:**

3.3.2. Diseño, cálculo, construcción y pruebas de dos tornillos incluyendo pruebas al existente para elaborar análisis comparativos para la unidad de inyección de la

Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Central de Venezuela (EIM).

### 3.3.3. Objetivos Específicos:

a) Cálculo y Diseño del Tornillo Universal (sección constante y paso fijo).

Longitud Útil: 428 mm.

Diámetro Externo: 25 mm.

Material: Acero AISI 1060.

La sección y el paso serán resultado del cálculo a ser efectuado.

b) Cálculo y Diseño del Tornillo de Paso Variable y Sección Fija.

Longitud Útil: 428 mm.

Diámetro Externo: 25 mm.

Material: Acero AISI 1060.

Las secciones y el paso serán producto del cálculo a ser efectuado.

c) Construcción en torno de ambos tornillos.

d) Elaboración de un protocolo para el análisis experimental de los tornillos que incluye RPM, potencia y flujo másico.

e) Realización de las pruebas de ambos tornillos incluyendo el existente, utilizando plástico reciclado de suministro nacional.

f) Presentación y análisis comparativo de los resultados de las pruebas realizadas en los tornillos.

### **3.3.4. Alcances:**

3.3.4.1. Ofrecer dos nuevas opciones en tornillos para la operación de la máquina de inyección de plásticos disponible, que permita operarla bajo diversas condiciones.

3.3.4.2. Comparar el desempeño de los distintos tipos de tornillos (el existente y los dos a ser construidos), de forma tal que pueda seleccionarse uno para cada aplicación.

1.1.3.3 Modelar matemáticamente la forma física de los tornillos de inyección.

### **3.4. Sumario:**

Capítulo 2: Diseño y cálculos: En este capítulo se expondrán las bases de diseño empleadas para efectuar los cálculos, así como una descripción detallada de la metodología de cálculo empleada para obtener las dimensiones de los tornillos a construir.

Capítulo 3: Planos y Detalles: Se presentan los planos de los dos tornillos y de todas las piezas adicionales que se diseñaron y construyeron para poder poner en funcionamiento la unidad.

Capítulo 4: Procedimiento Experimental: Se presenta un protocolo de las pruebas que se efectuaron con cada uno de los tornillos, así como una descripción detallada de los eventos particulares que se presentaron, y los resultados obtenidos para cada uno de los casos.

Capítulo 5: Conclusiones y Recomendaciones: En este capítulo se presentan las conclusiones obtenidas luego de analizar los resultados, así como un listado de puntos relevantes, que será conveniente considerar para futuros estudios relacionados con el tema.

Capítulo 6: Glosario: Contiene los términos de uso frecuente, cuya definición no aparece en el desarrollo del trabajo.

Capítulo 7: Bibliografía: Lista de material bibliográfico consultado para la realización del presente trabajo.

Capítulo 8: Apéndices: En este capítulo se encuentran la hoja de seguridad del polietileno y otras informaciones de interés, así como un conjunto de información teórica que contiene los conocimientos básicos para poder entender el funcionamiento de un equipo de extrusión, las propiedades de los plásticos, y otros aspectos que permitirán establecer las bases de diseño con las cuales se trabajará.



## **CAPÍTULO 2: DISEÑO Y CÁLCULOS.**

El diseño de equipos para extrusión de polímeros presenta una serie de dificultades, sobretodo a la hora de obtener la información necesaria para la realización de cálculos que correspondan con los procesos que ocurren en realidad. La mayor parte de la información la manejan los fabricantes de equipos y por lo complejo de trabajar con fluidos de comportamiento no newtoniano, en la mayoría de los casos, se efectúan suposiciones que permiten facilitar la obtención de resultados.

A continuación se presentará la metodología empleada para realizar el cálculo, diseño y construcción de los dos tornillos, en base a la información obtenida y a las suposiciones efectuadas.

### **2.1. Bases de diseño**

#### **2.1.1. Generales**

Se trabaja con base en la Unidad existente en la Escuela de Ingeniería Mecánica U.C.V. (2003), esto quiere decir que se diseñarán dos tornillos que operarán en el equipo existente, se adaptarán a sus dimensiones, y no se modificará ninguna de las otras partes del equipo, tales como: el barril, la boquilla, el sistema de controles, y demás componentes, con excepción del molde.

1. La potencia del motor estará alrededor de  $\frac{1}{2}$ HP y no superará los  $\frac{5}{8}$  HP (466 W).

2. La longitud de los tornillos está dada por la longitud del barril ya existente.
3. Se trabajará con un solo hilo ( $p=1$ ), para ambos tornillos.
4. La holgura radial será de 0,5mm por razones constructivas y de precisión.
5. El tornillo en funcionamiento girará en sentido contrario a las roscas de sujeción del barril, presentes en la sección de alimentación, para así evitar que el barril gire y se salga.
6. Los tornillos serán elaborados en acero AISI 1060, ya que, como se verificará en los cálculos, es un material que cumple con los requerimientos de resistencia y resulta bastante económico, así como por tratarse de un equipo experimental.
7. Los tornillos serán diseñados para descarga abierta para poder ser implementados en cualquier molde.

### **2.1.2. Tornillo de Paso Variable y Sección Constante (PV)**

8. Se consideró el tornillo dividido en tres secciones: sección de alimentación, sección de fusión y sección de compresión, cada una de estas secciones tiene un valor determinado para el paso.
9. Para los efectos de cálculos, se trabajó cada sección por separado, considerando el flujo másico de material como constante para las tres.

10. La longitud de cada una de las secciones está dada por la longitud de las resistencias, ya que son tres resistencias, una para cada sección.
11. El plástico se considerará en tres estados diferentes en cada sección del tornillo: en la sección de alimentación se considerará en estado sólido, en la zona de fusión se considerará parcialmente sólido y líquido con aire y finalmente, en la sección de dosificación líquido libre de aire y ligeramente comprimido.
12. La temperatura del fluido se considera constante en el área de entrada de cada sección.
13. La profundidad del tornillo será de 5mm para que pueda entrar la materia prima en la sección de alimentación, no será mayor de 5mm dado que el núcleo sería demasiado esbelto y podría fallar por torsión.
14. En la sección de alimentación, se considerará el paso igual al diámetro, para poder obtener el ángulo de hélice apropiado.
15. En las secciones de fusión y dosificación se considerará régimen de flujo turbulento, debido al movimiento inducido por las hélices del tornillo.
16. Flujo anular en el barril en las secciones de fusión y dosificación.
17. El tornillo terminará en un cono de  $30^\circ$ , siendo éste un ángulo común para este tipo de tornillos, en lugar de emplear una válvula antiretorno, puesto que no se justifica su presencia ya que las presiones de trabajo del equipo no son elevadas.

### **2.1.3. Tornillo de Paso Constante y Sección Constante (Universal)**

18. El tornillo terminará en un cono de  $30^\circ$ , siendo éste un ángulo común para este tipo de tornillos, en lugar de emplear una válvula antiretorno, puesto que no se justifica su presencia ya que las presiones de trabajo del equipo no son elevadas.
19. La profundidad del tornillo será de 5mm para que pueda entrar la materia prima en la sección de alimentación, no será mayor de 5mm dado que el núcleo sería demasiado esbelto y podría fallar por torsión.
20. Se considerará el paso igual al diámetro en toda la longitud del tornillo, para obtener el ángulo de hélice apropiado, y que pueda entrar la materia prima en la alimentación.

### **2.1.4. Termofísicas.**

21. La transferencia de calor ocurre según el modelo de conducción-convección en todas las secciones.
22. 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 fusión, y  $170\pm 5^\circ\text{C}$  en la sección de compresión.
23. El plástico en estado fundido se trabajará como plástico de Bingham, con un  $\tau_y=0$ , de esta manera se puede aproximar a fluido de comportamiento newtoniano.

24. La viscosidad del fluido plástico no es lineal con respecto a la temperatura, sino semilogarítmica, por ello se tomará como temperatura de trabajo para la viscosidad  $T=120^{\circ}\text{C}$ , siendo la temperatura de fusión del polietileno es de  $110^{\circ}\text{C}$ .
25. Se considera despreciable la conducción térmica axial.
26. Proceso isotérmico. El perfil de velocidad es independiente de la temperatura.
27. Para los efectos de cálculos de transferencia de calor, se despreciarán los efectos del aire y de los vapores producto de la fusión del plástico.

## **2.2. Procedimiento de Cálculos**

Antes de iniciar el cálculo de los tornillos de extrusión, se deben considerar una serie de factores sin los cuales una posterior comparación entre los tres tornillos (el existente y los dos a construir) carecería de fundamentos. Esto quiere decir que ciertos parámetros físicos deben mantenerse iguales para las piezas a diseñar, lo que implica que muchas de las condiciones serán similares.

La tabla que se presentan a continuación expresa algunos de los parámetros del Tornillo construido que sirven de base para el diseño y la construcción de las nuevas piezas.

<b>Símbolo</b>	<b>Alimentación</b>				<b>Fusión</b>				<b>Dosificación</b>			
	<b>Magnitud</b>		<b>Magnitud SI</b>		<b>Magnitud</b>		<b>Magnitud SI</b>		<b>Magnitud</b>		<b>Magnitud SI</b>	
<b>Db</b>	26	mm	0.026	m	26	mm	0.026	m	26	mm	0.026	m
<b>Di</b>	13	mm	0.013	m	13 - 19	mm	0.013 – 0.019	m	19	mm	0.019	m
<b>Zt</b>	146.7	mm	0.1467	m	166.3	mm	0.1663	m	900	mm	0.09	m
<b>Vc</b>	58,4	cm <sup>3</sup>	5.84x10 <sup>-5</sup>	m <sup>3</sup>	54.9	cm <sup>3</sup>	5.49x10 <sup>-5</sup>	m <sup>3</sup>	22.3	cm <sup>3</sup>	2.2x10 <sup>-5</sup>	m <sup>3</sup>
<b>Pasos</b>	5.87		5.87		6.65		6.65		3.6		3.6	
<b>E</b>	4	mm	4x10 <sup>-3</sup>	m	4	mm	4x10 <sup>-3</sup>	m	4	mm	4x10 <sup>-3</sup>	m
<b>Δ</b>	0.5	mm	5x10 <sup>-4</sup>	m	0.5	mm	5x10 <sup>-4</sup>	m	0.5	mm	5x10 <sup>-4</sup>	m
<b>H</b>	6	mm	6x10 <sup>-3</sup>	m	6 – 3	mm	4.5x10 <sup>-3</sup>	m	3	mm	3x10 <sup>-3</sup>	m
<b>Long</b>	82.4	mm	0.0824	m	82.4	mm	0.0824	m	82.4	mm	0.0824	m
<b>Vf</b>	11.6	cm <sup>3</sup>	1.16x10 <sup>-5</sup>	m <sup>3</sup>	9.87	cm <sup>3</sup>	9.87 x10 <sup>-6</sup>	m <sup>3</sup>	3.56	cm <sup>3</sup>	3.56 x10 <sup>-6</sup>	m <sup>3</sup>
<b>V</b>	46.8	cm <sup>3</sup>	4.68 x10 <sup>-5</sup>	m <sup>3</sup>	45	cm <sup>3</sup>	4.5 x10 <sup>-5</sup>	m <sup>3</sup>	18.7	cm <sup>3</sup>	1.87 x10 <sup>-5</sup>	m <sup>3</sup>

Tabla N°1: Dimensiones del Tornillo de Sección Variable y Paso Constante

En esta tabla se considera *zt* como la longitud de la zona en cuestión, mientras el término *long* representa la longitud, en este caso del filete y la letra *V* expresa el volumen. Por último, la *H* expresa la profundidad del canal.

Partiendo de las bases de diseño generales, se mantendrá igual el diámetro del barril, el diámetro externo de los tornillos, la longitud de cada sección, el ancho del filete, la holgura radial, el volumen de polímero en cada sección y una serie de factores que no aparecen en esta tabla, tales como el cono de 30° al final del tornillo y las temperaturas en cada sección.

Se diseñarán los dos tornillos por separado y cada sección independientemente, tomando como factor vinculante el flujo continuo de polímero entre una zona y otra (Base de diseño 9).

En primer lugar se diseñará el Tornillo de Paso Variable y Sección Constante, iniciando los cálculos por la zona de alimentación, luego la de dosificación y por último la de fusión. Adicionalmente se predecirá analíticamente la potencia necesaria para poner en marcha la unidad.

Se elige trabajar en un principio con este Tornillo porque implica una serie de consideraciones que no se ajustan al de Paso y Sección Constante, de forma tal que cuando llegue el momento de estudiar ese otro Tornillo, el proceso de comprensión por parte del lector se vea acelerado. Es importante destacar que muchas de las consideraciones y explicaciones que se efectuarán para explicar el diseño del Tornillo de Paso y Sección Constante, estarán plasmadas en la redacción correspondiente al diseño del Tornillo de Paso Variable y Sección Fija.

### **2.2.1. Tornillo de Paso Variable y Sección Fija.**

El propósito de variar el paso en un tornillo de esta naturaleza se basa en mantener la ecuación de continuidad a lo largo del eje del tornillo al considerar el cambio en la densidad del termofluido a lo largo de su trayectoria, esta estrategia de diseño a su vez aprovecha las características elastoplásticas del fluido especialmente en la zona de compresión generando un efecto de relajación elástica que ayuda a impulsar la masa a través de la boquilla de la unidad. La otra razón, por la cual se varía el paso, es porque la sección de alimentación presenta condiciones específicas para que las partículas del polímero en estado sólido puedan transportarse sin inconvenientes, y ya en la zona de fusión, el polímero debe fundirse gradualmente mediante la variación de lo que en su momento será definido como *el perfil del lecho sólido*, para lo cual es conveniente una reducción del paso. Por último, en la zona de dosificación, se busca lograr lo que se comentó a principios de este párrafo, para lo

cual normalmente se requiere del uso de una boquilla. Dado que la máquina que se usa en este proyecto no cuenta con estos dispositivos, será necesario provocar la compresión por medio de la ya señalada compresión volumétrica. Cabe destacar que el Tornillo diseñado es de una hélice como se expresa en la Base de Diseño N° 3. La razón de esta selección se explicará cuando se realice el cálculo del caudal volumétrico de la Etapa de Alimentación.

#### **2.2.1.1. Zona de Alimentación**

La función de la zona de alimentación es el transporte de material sólido, ingresándolo de forma lo más homogénea y continuamente al conjunto Barril-Tornillo. En esta parte del equipo se realiza un precalentamiento del material de trabajo hasta unos 110 °C, que corresponden a la temperatura de fusión del polímero. Este calentamiento es producto de una fuente de calor que se halla a 150 °C que aún cuando esta temperatura supera la temperatura de fusión del polímero a las condiciones de trabajo, lo poco extensa de esta zona y el movimiento de transporte hacen que el polímero se acerque hasta el punto límite de fusión, sin llegar a fundirse. El estudio detallado del proceso de transferencia de calor se estudiará más adelante en un capítulo especialmente dedicado a este efecto.

Una de las principales limitantes para el diseño de esta zona es el tamaño de las partículas destinadas a alimentar la extrusora, las cuales en este caso son de las denominadas *pellets*, porque presentan una longitud acotada en un rango entre 1 y 5 milímetros, similar a un grano de arroz..





*Figura N° 01: Pellets*

Este tamaño es el óptimo según las recomendaciones de la bibliografía N°13, ya que ha ofrecido mejores resultados experimentales: los tamaños pequeños (polvos) tienden a ser cohesivos y atrapan aire por lo que se requeriría que la tolva funcionara al vacío o existiera un mecanismo desgasificador en la extrusora; los gránulos pequeños también tienden a atrapar aire y pueden requerir de instrumentos especiales para la alimentación como un vibrador en la tolva; las partículas de gran tamaño pueden trancar la máquina, aún más considerando que la unidad que se utiliza en este trabajo es un prototipo de dimensiones sumamente reducidas.

<b><i>Dimensión</i></b>	<b><i>Símbolo</i></b>	<b><i>Magnitud</i></b>		<b><i>Magnitud SI</i></b>	
<b><i>Diámetro del Barril</i></b>	<i>Db</i>	26	<i>mm</i>	0.026	<i>m</i>
<b><i>Diámetro Exterior del Tornillo</i></b>	<i>De</i>	25	<i>mm</i>	0.025	<i>m</i>
<b><i>Diámetro del alma del Tornillo</i></b>	<i>Di</i>	15	<i>mm</i>	0.015	<i>m</i>
<b><i>Espesor del filete</i></b>	<i>e</i>	4	<i>mm</i>	0.004	<i>m</i>

*Tabla N°2: Dimensiones Base*

Tomando lo anterior en consideración, junto con una serie de datos conocidos (Tabla N° 2) impuestos por las dimensiones físicas de la unidad y la recomendación de las bibliografías N° [7] y [13] de tomar un paso cuadrado con respecto al diámetro

exterior del tornillo, se puede deducir matemáticamente la magnitud del paso del tornillo en la primera sección:

$$L = De = 25mm$$

Una vez conocido el paso, se procede a calcular el ángulo de inclinación del filete, para lo cual se requiere desarrollar el sólido, llevándolo desde un objeto tridimensional hasta una superficie bidimensional:

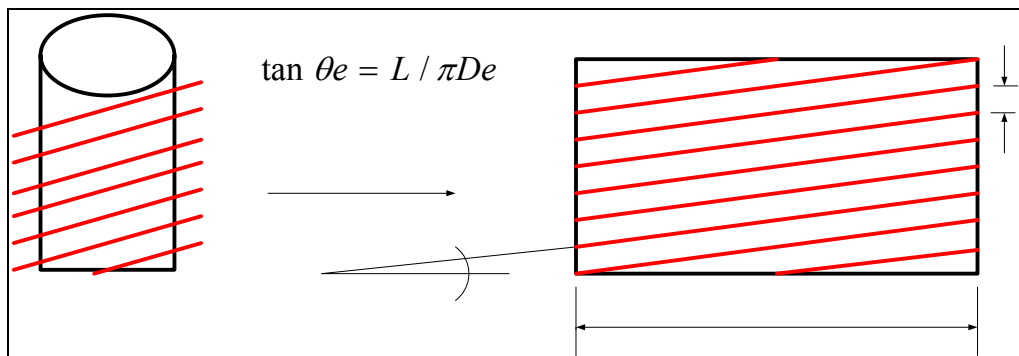


Figura N°2: Gráfico explicativo del significado físico del ángulo de hélice

De esta forma se determina el ángulo  $\theta_e = 17,66^\circ$ , y de manera similar se pueden calcular las aberturas  $\theta_b = 17,02^\circ$  y  $\theta_i = 31,47^\circ$  relativas a los diámetros de barril e interno respectivamente.

Adicionalmente se señala que el no poder cambiar la longitud de la zona provoca que en ella se encuentren un total de 5,87 vueltas del filete.

El siguiente paso es calcular la holgura radial ( $\delta$ ), la cual debe ser semejante a la de la sección de alimentación del Tornillo de Diámetro Variable ya construido.

(E. 01)

$$\tan\theta_e = 0,3183$$

Entonces, la holgura radial será  $\delta = \frac{Db - De}{2} = 0,5 \text{ mm}$  (E. 02), lo que puede considerarse despreciable para esta etapa de la pieza, aún cuando esta dimensión se mantendrá constante para la extensión del tornillo.

De forma idéntica se determina la profundidad del canal ( $H$ ), que se debe semejar a la de la primera etapa del Tornillo de Diámetro Variable:  $H = \frac{De - Di}{2} = 5 \text{ mm}$  (E. 03). Este valor permanecerá constante, al igual que la holgura radial, durante toda la extensión de la pieza a construir.

Es hora de calcular el ancho del canal. El símbolo  $w$  expresa el ancho del canal medido perpendicularmente al filete;  $B$  es el ancho del canal en la dirección axial y  $b$ , el ancho del filete en la dirección axial. Para comprender más fácilmente el significado de estos parámetros se recomienda la observación de las siguientes gráficas, donde se pueden obtener los valores numéricos de  $w$ ,  $B$  y  $b$  relativos al ángulo  $\theta e$ ; es decir,  $w_e$ ,  $B_e$  y  $b_e$ .

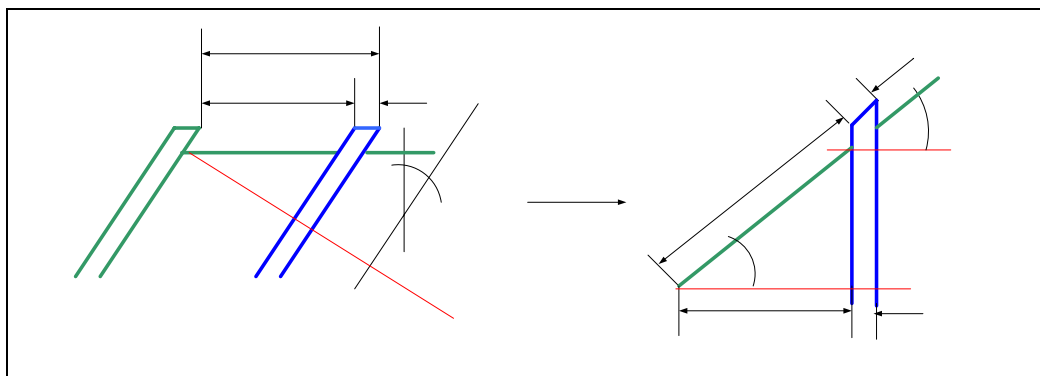


Figura N° 3: Representación esquemática de las dimensiones físicas de los Tornillos

$$\cos \theta_e = \frac{e}{be} = \frac{we}{Be} \quad (E. 04)$$

$$\Rightarrow be = \frac{e}{\cos \theta_e} = 4,2 \text{ mm}$$

Se puede apreciar que  $L = Be + be$  (E. 05), y por lo tanto  $Be = L - be$  (E. 06)  $\Rightarrow Be = 20,8 \text{ mm}$ , lo que a su vez hace que  $we = B \cos \theta_e$  (E. 07)  $\Rightarrow we = 19,8 \text{ mm}$ .

Un paso más que debe cumplirse antes de iniciar los cálculos del flujo del polímero, es fijar un eje de coordenadas en el cual el eje X está orientado en la dirección del filete, es decir, con una inclinación  $\theta_e$  respecto al eje de la máquina (vertical); el eje Y se orienta en dirección perpendicular al eje de la unidad en dirección al alma del tornillo y por último, el eje Z seguirá la dirección perpendicular al filete, siguiendo la regla de la mano derecha.

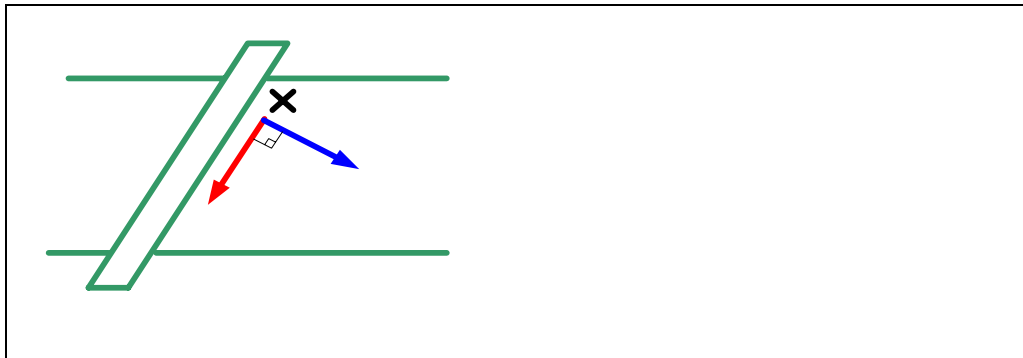


Figura N° 4: Sistema de Coordenadas

El eje de coordenadas esta centrado en un punto determinado de la superficie del filete, por lo que para efectos de cálculo el tornillo estará fijo y el barril en movimiento. Esta suposición es totalmente válida, ya que por movimiento relativo se toma que el barril gira en sentido opuesto al preestablecido mientras el tornillo permanece fijo. Todo esto con el objeto de facilitar los cálculos y la comprensión del sistema.

Una vez conocidos los valores numéricos de estas magnitudes será posible determinar analíticamente el caudal volumétrico y másico de polímero que atraviesa por la zona de alimentación. Sin embargo; antes de calcular el volumen desplazado por unidad de tiempo, se debe calcular la velocidad del tapón sólido  $v_{pl}$ :

$$v_{pl} = vb \frac{\tan \phi \tan \theta}{\tan \phi + \tan \theta} \quad (E. 08)$$

Donde  $\phi$  representa el ángulo de transporte del polímero respecto a la dirección perpendicular al eje de la máquina y  $vb$  expresa el módulo de la velocidad a la cual giraría el barril si se mantuviera el tornillo fijo.

Para calcular el valor de la velocidad del barril se debe seguir la siguiente ecuación:

$$vb = \frac{\pi N D b}{60} \quad (E. 09)$$

Con  $N$  = revoluciones por minuto.

Se decidió incrementar el valor de la velocidad de rotación a poco menos de 250 giros cada minuto, lo que implicó el diseño, la construcción y la implementación de una transmisión mecánica por poleas que será descrita ampliamente en capítulos subsiguientes. Con el objeto de verificar si esta velocidad es apta para el proceso que se desea en la unidad, se siguieron las recomendaciones de [13] en las cuales este valor se encuentra dentro del rango normal de funcionamiento de las extrusoras comerciales ya que, normalmente se utilizan velocidades bajas, aún cuando es posible utilizar máquinas de 300 rpm. Para estos autores 20 rpm es la cota inferior.

Continuando con el cálculo del caudal, ahora se integra el producto de la velocidad del tapón por el área longitudinal en diferenciales radiales.

$$Q_1 = \int_{R_i}^{R_e} vpl \left( 2\pi r - \frac{pe}{\text{sen } \theta b} \right) dr \quad (E. 10)$$

Esta ecuación propuesta por [7] contiene el símbolo  $p$ , el cual indica el número de hilos. Para el tornillo diseñado se usará un solo hilo, porque un número mayor de hilos implica mayores pérdidas por fricción y la máquina requeriría de una extensión más larga para obtener los resultados esperados por cuanto hace que quepa menos material, aún cuando una hélice más reduciría las vibraciones.

La ecuación anterior, al desarrollarse, queda:

$$Q_1 = vpl\left(\frac{\pi}{4}\right)(De^2 - Di^2) - \frac{eH}{\text{sen}\theta} = \pi^2\left(\frac{N}{60}\right)HD\alpha(De-H)\left(1 - \frac{e}{\pi(De-H)\text{sen}\theta}\right) \frac{\tan\phi \tan\theta}{\tan\phi + \tan\theta}$$

(E. 11)

El ángulo  $\theta$  sin subíndice alguno para esta ecuación, y de ahora en adelante, expresará el promedio de los ángulos referidos al diámetro externo e interno del Tornillo:

$$\theta = \frac{\theta_e + \theta_i}{2} \quad (E. 12)$$

Al igual que con el ángulo promedio, se debe definir el ancho del canal promedio, identificado como  $w$  sin subíndice alguno. El ancho del canal promedio puede ser calculado por la expresión:

$$w = \pi(De - H)\text{sen}\theta - e \quad (E. 13)$$

Como el ángulo de transporte no se encuentra definido, la expresión del caudal presenta una variable indefinida. Para poder otorgarle un valor numérico al ángulo de transporte se plantea un balance de las fuerzas que se ejercen sobre el filete y los momentos actuantes.

El producto del desarrollo del sistema de ecuaciones resultantes de la sumatoria de las fuerzas axiales y por la suma de momentos, es la expresión de una constante que será identificada como  $M$ , y ella es:

$$M = \cos \phi - K \operatorname{sen} \phi \quad (E. 14)$$

y

$$2 \frac{H}{wb} \frac{fs}{fb} \operatorname{sen} \theta b \left( K + \frac{D}{Db} \operatorname{ctg} \theta \right) + \frac{ws}{wb} \frac{fs}{fb} \operatorname{sen} \theta b \left( K + \frac{Di}{Db} \operatorname{ctg} \theta i \right) + \frac{w}{wb} \frac{H}{zb} \frac{1}{fb} \operatorname{sen} \theta \left( K + \frac{D}{Db} \operatorname{ctg} \theta \right) \ln \frac{P2}{P1} = M \quad (E. 15)$$

De esta expresión, se entiende que los dos primeros términos se relacionan con las fuerzas de fricción por la interacción de los filetes y alma del tornillo con el polímero. El tercer término indica las fuerzas asociadas a la presión.

Existe un factor más a considerar en la expresión de  $M$ , y éste es la constante  $K$ , definida como:

$$K = \frac{D}{Db} \frac{\operatorname{sen} \theta + fs \cos \theta}{\cos \theta - fs \operatorname{sen} \theta} \quad (E. 16)$$

Según [1], la presión en cualquier punto de la zona de alimentación puede ser calculada mediante la siguiente expresión:

$$P = P_1 \exp \left[ \left( \frac{B_1 - A_1 K}{B_2 + A_2 K} \right) zt \right] \quad (E. 17)$$



Para lo cual se deben conocer los valores de las constantes  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$  y  $B_2$ :

$$A = fbw \operatorname{sen} \phi + 2Hf \operatorname{sen} \theta b + wsf \operatorname{sen} \theta b \quad (E. 18)$$

$$A_2 = Hw \operatorname{sen} \theta \quad (E. 19)$$

$$B_1 = fbwb \cos \phi - 2Hf \operatorname{sen} \theta b \operatorname{ctg} \theta \frac{D}{Db} - wsf \operatorname{sen} \theta b \operatorname{ctg} \theta \frac{Di}{Db} \quad (E. 20)$$

$$B_2 = Hw \cos \theta \frac{D}{Db} \quad (E. 21)$$

Se debe considerar que las expresiones de las constantes  $A_i$  y  $B_i$  involucran el ángulo de transporte, lo que sugiere una iteración para hallar los valores de  $\phi$  y  $P_2$ , pero antes se debe transformar la ecuación de definición de  $M$  en:

$$\operatorname{sen} \phi = \frac{\sqrt{1 + K^2 - M^2} - KM}{1 + K^2} \quad (E. 22)$$

Ahora se supondrá un valor inicial de  $f$  para calcular  $P_2$ , con el que se calculará un nuevo valor de  $\phi$ .

Valores fijos:

<b><i>f<sub>s</sub></i></b> =	0.5		0.5	
<b><i>f<sub>b</sub></i></b> =	0.6		0.6	
<b><i>W</i></b> =	19.2	mm	0.0192	m
<b><i>w<sub>b</sub></i></b> =	19.9	mm	0.0199	m
<b><i>w<sub>i</sub></i></b> =	18.9	mm	0.0189	m
<b><i>H</i></b> =	5	mm	0.005	m
<b><i>θ<sub>i</sub></i></b> =	0.36	Rad	20.6	°
<b><i>θ<sub>b</sub></i></b> =	0.3	Rad	17	°

<b><i>θ<sub>i</sub></i></b> =	0.41	rad	23.5	°
<b><i>D</i></b> =	20	mm	0.02	m
<b><i>D<sub>i</sub></i></b> =	15	mm	0.015	m
<b><i>D<sub>b</sub></i></b> =	26	mm	0.026	m
<b><i>K</i></b> =	0.829		0.829	
<b><i>A<sub>2</sub></i></b> =	0.337	cm <sup>2</sup>	3.37 x10 <sup>-5</sup>	m <sup>2</sup>
<b><i>B<sub>2</sub></i></b> =	0.691	cm <sup>2</sup>	6.91 x10 <sup>-5</sup>	m <sup>2</sup>
<b><i>P<sub>1</sub></i></b> =	92.5	KPa	92500	Pa

Tabla N°3: Datos para la iteración

Además se tiene que la longitud axial de la zona de alimentación es:

$$z_t = 146,7 \text{ mm} = 0,1467 \text{ m}$$

Se procede a la iteración como hipótesis inicial con base experimental recomendada por [7] de  $\phi = 90 - \theta_b$  (E. 23).

<b><i>φ<sub>1</sub></i></b>	<b><i>M</i></b>	<b><i>A<sub>1</sub></i></b>	<b><i>B<sub>1</sub></i></b>	<b><i>ΔP<sub>1</sub></i></b>	<b><i>φ<sub>2</sub></i></b>	<b><i>abs (φ<sub>1</sub>-φ<sub>2</sub>)</i></b>
72.98	-0.5	0.0157	-3.18 x10 <sup>-5</sup>	2.19 x10 <sup>-2</sup>	72.98	1.4211E-14
72.98	-0.5	0.0157	-3.18 x10 <sup>-5</sup>	2.19 x10 <sup>-2</sup>	72.98	0

Tabla N°4: Iteración  $\phi$  y  $\Delta P$

Se puede apreciar que la primera iteración, utilizando el software MICROSOFT EXCEL, arroja valores con un error por el orden de  $10^{-14}$ , lo cual prueba que la hipótesis de  $\phi = 90 - \theta b$  se acerca lo suficiente a la realidad y que  $\Delta P_1 \approx 0$ .

Por consiguiente, al sustituir en la expresión del caudal, el resultado será:

$$Q_1 = 2,812 \times 10^{-5} \text{ m}^3 / \text{s} = 28,12 \text{ cm}^3 / \text{s}$$

Para determinar el flujo másico del material que circula por la sección de alimentación y la cantidad de aire, se determina la densidad aparente del polímero de trabajo. Mediante métodos experimentales se determina que "500 cm<sup>3</sup> del polímero en estado sólido, presenta una masa de 250 gramos". Esto quiere decir que la densidad aparente del polímero que ingresa a la máquina es de  $500 \text{ Kg/m}^3$ , por lo tanto, el caudal másico será  $0,0014 \text{ Kg/s}$  ( $5,1 \text{ Kg/hora}$ ). Pero es bien conocido que el polietileno de baja densidad en estado sólido a condiciones ambientales presenta una densidad real de  $918 \text{ Kg/m}^3$  y el aire a las condiciones ambientales de Caracas en un día normal ( $25 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $92,5 \text{ KPa}$ ) presenta una densidad de  $0,925 \text{ Kg/m}^3$ . Por lo tanto, la cantidad de polímero que realmente está dentro de la máquina es aproximadamente  $23,4 \text{ gramos}$  ( $2,34 \times 10^{-2} \text{ Kg}$ ) y el flujo real del polímero es:

$$2,58 \times 10^{-2} \text{ Kg/s}$$

Ó lo que es lo mismo:  $92,94 \text{ Kg/hora}$ .

### 2.2.1.2. Zona de Dosificación

Una vez calculada la primera sección del tornillo, se procede a diseñar la última, ya que los cálculos necesarios para diseñar la Zona de Fusión dependen de una serie de factores y criterios que se fundamentan en el diseño de las Zonas 1 y 3.

Partiendo de la premisa de que el flujo másico de polímero permanece constante a lo largo de toda la extensión de la máquina y que se espera que en esta sección el fluido ocupe una porción de espacio de unos  $18,7 \text{ cm}^3$  ( $1,87 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ ) y utilizando una temperatura superior la de fusión del polímero propiciada por las resistencias, se hace inducir un valor de densidad para el material por el orden de los  $3,28 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3$ .

Con el objeto de lograr una compresión homogénea, el ángulo de paso del Tornillo en esta sección se basa en la cantidad de espacio ocupado por el polímero y en el flujo másico de material que está pasando. Una vez determinado el espacio libre total, se define el volumen ocupado por la hélice del tornillo, determinado por medio de un elemento continuo la longitud del filete y por consiguiente, el ángulo. Claro está, manteniendo una profundidad y un ancho de filete constante.

Para cumplir con estas condiciones y mantener los parámetros físicos se define la longitud del filete como:

$$long = \sqrt{L_3^2 + (\pi De)^2} \quad (E. 24)$$

para lo cual el paso  $L$  ha de ser

$$L = \pi D e \sqrt{\frac{1}{\left(\frac{V_{filete}}{H e z t}\right)^2 - 1}} \quad (E. 25)$$

con  $D e$  = diámetro externo del filete;  $V_{filete}$  = volumen del filete;  $H$  = profundidad del canal;  $e$  = ancho del filete y  $z t$  = longitud axial de la sección en estudio. Las dimensiones físicas del tornillo para esta sección se pueden identificar fácilmente en el siguiente bosquejo:

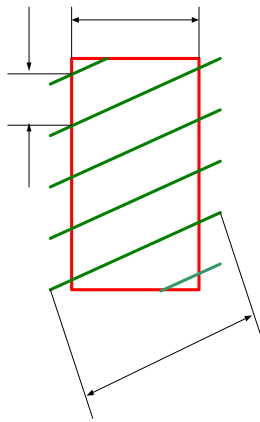


Figura N° 5: Significado físico de la longitud de filete ( $long$ )

Se debe recordar que  $pasos$  expresa el número de giros que da el filete en la etapa de estudio, en este caso, en la Zona de Dosificación.

Al mantener estos parámetros fijos, resulta sencillo calcular el ángulo del filete para esta sección que, al igual que en la etapa de alimentación, se determinará mediante la arcotangente del cociente del paso entre la longitud periférica de la circunferencia a la cual pertenece del diámetro exterior de la helicoidal:

$$\arctan\left(\frac{L}{\pi D_e}\right) = \theta_e \quad (E. 26)$$

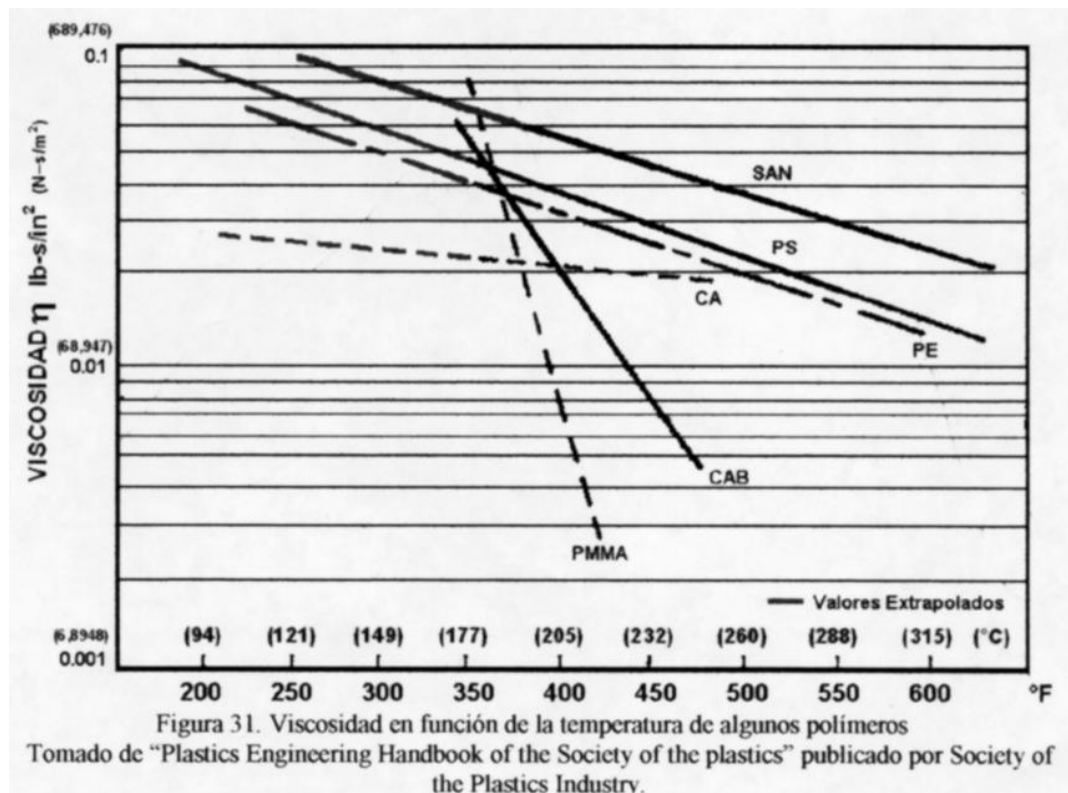


Figura N° 6: Diagrama de Viscosidad en función de la Temperatura

En este momento [1], define dos ecuaciones para calcular la variación de presión y el caudal volumétrico de polímero que circula por esta parte de la máquina:

$$Q_3 = \frac{-wH^3}{12\mu} \frac{\Delta P}{z} + \frac{vbwHw}{2} = \frac{-(\pi Dbsen\theta b)H^3 \Delta P}{12\mu l / sen\theta b} + \frac{\pi^2 NDb^2 \cos\theta b \pi Dbsen\theta b H}{2}$$

(E. 27)

$$Q_3 \text{ max} = \frac{\pi^2 Db^2 H \cos\theta bsen\theta b N}{2} \quad (E. 28)$$

En la cual resulta crucial entender que el sistema funciona con la denominada “descarga abierta”, o lo que es lo mismo, no presenta boquilla de dosificación alguna ni un plato rompedor que elimine el movimiento de rotación inducido al fluido a la salida del Tornillo. Al eliminar esta pérdida energética, se considera un caudal máximo y una variación de presión mínima:

$$\Delta P_3 = \frac{6Q_3\mu L}{wH^3 sen\theta b} \quad (E. 29)$$

Aún cuando se considera que se está en presencia de una descarga abierta, se debe tomar en consideración que acoplado al final del barril, se encuentra el molde, por lo que, al igual que en la primera etapa del tornillo, se determinarán los valores reales del incremento de presión y de la cantidad de fluido que atraviesa esta parte del tornillo mediante una iteración entre estas dos variables, para lo cual se deben recordar cuáles son los valores numéricos de los parámetros involucrados:

<i>Parámetro</i>	<i>magnitud</i>	<i>unidades</i>	<i>Expresión</i>
<i>vb (velocidad del barril)</i>	33,8	<i>cm/s</i>	(E.09)
<i>vbz (proyección en la dirección z del la velocidad del barril)</i>	33,5	<i>cm/s</i>	$vbz = vb \cos\theta_e$ (E. 30)
<i>vx (proyección de la velocidad del barril en la dirección x)</i>	- 4,1	<i>cm/s</i>	$vbz = - vb \sin\theta_e$ (E. 31)
$\mu_3$ (viscosidad a la temperatura de la Zona 3)	413,682	<i>Ns/m<sup>2</sup></i>	(ver figura N° 6)
$T_3$ (temperatura de la zona 3)	129,5	<i>°C</i>	(ver tabla N° 15)
$\theta_e$ (ángulo de hélice)	7,24	<i>°</i>	(E. 01)
<i>L (paso)</i>	9,98	<i>mm</i>	$(L = \pi D e \tan\theta_e)$ (E. 32)
<i>w (ancho del canal)</i>	9,91	<i>mm</i>	$(w = \pi D e \sin\theta_e)$ (E. 33)

Tabla N°5: Datos para la Zona 3 del Tornillo PV

La iteración se hace hasta que ambas variables coincidan en su tercera cifra significativa. Se facilita el cálculo mediante la definición de los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$ :

$$\alpha = \frac{\pi^2 D b^2 H \cos\theta_b \sin\theta_b}{2} \quad (E. 34)$$

$$\beta = \frac{\pi D b H^3 \sin^2\theta_b}{12l} \quad (E. 35)$$



Donde:

$\alpha$  = relativa al flujo de arrastre por fricción.

$\beta$  = relativa al flujo de retorno por presión de retroceso.

Por lo que la ecuación del caudal queda:

$$Q_3 = \alpha N - \beta \frac{\Delta P_3}{\mu} \quad (E. 36)$$

En este momento se procede a efectuar la iteración:

$\Delta P_3$ [MPa]	$Q_3$ [cm <sup>3</sup> /s]
1,32	8,3
1,32	7,84
1,24	7,87
1,25	7,86
1,25	7,86

Tabla N° 6: Iteración  $\Delta P_3$  con  $Q_3$  para el Tornillo PV

De lo que resulta que la variación de presión es 1,25 MPa y el caudal de fundido, 7,86 cm<sup>3</sup>/s.

Al utilizar el valor del flujo másico de polímero que circula por toda la máquina y establecerlo como constante por medio de la ecuación de continuidad se puede determinar que un valor acorde para la densidad media del polímero es el de  $3,28 \times 10^3 \text{ Kg/m}^3$  supuesto en un principio.



*Figura N° 7: productos*

### **2.2.1.3. Zona de Fusión**

El análisis de la sección intermedia involucra un alto grado de comprensión en lo que al comportamiento del fluido se refiere. Los datos experimentales que rigen los estudios estadísticos mediante los cuales se logra modelar las condiciones de operación de este tipo de unidades están referidos a modelos industriales de dimensiones y proporciones mayores a las previstas para el prototipo que es el modelo de estudio. Por esta razón, la sección intermedia de la máquina se diseña en base a las otras dos ya especificadas.

El procedimiento que se sigue para hallar el volumen ocupado por el fluido y el cálculo del caudal volumétrico a partir de la ecuación de continuidad es similar al ejecutado en la Zona de Dosificación. Una vez definidos los parámetros físicos se

procede a definir y calcular los parámetros relacionados con la fusión del polímero. Por lo tanto se parte de la premisa de que para esta etapa de la máquina se requieren una temperatura ya especificada de unos 180 °C para fundir  $45 \text{ cm}^3$  ( $4,5 \times 10^{-5}$  metros cúbicos) de Polietileno de Baja Densidad en una longitud preestablecida de  $166,3 \text{ mm}$  ( $0,1663$  metros), confinados en el barril de  $66,2 \text{ cm}^3$  ( $6,62 \times 10^{-5}$  metros cúbicos), lo que implica que al aplicar la ecuación E. 25, donde será posible identificar el valor cuantitativo de  $15,03 \text{ mm}$  ( $1,503 \times 10^{-2}$  metros) como el paso del tornillo para esta etapa. Una vez definido este parámetro, de calculará la longitud del filete mediante la expresión E. 24, lo que produce un resultado de  $long = 79,97 \text{ mm}$  ( $7,997 \times 10^{-2}$  metros).

Ahora resulta sencillo determinar el ángulo  $\theta_e$  para esta etapa de la extrusora que, al igual que en las otras dos zonas, responde a la expresión E. 26, arrojando un valor numérico del ángulo  $\theta_e$  para esta zona del Tornillo es de  $10,83^\circ$ .

Con estos parámetros ya se puede definir el diseño físico de la Etapa de Fusión del Tornillo; sin embargo, existen parámetros útiles para determinar variables relacionadas con la producción y la efectividad del tornillo al igual que ciertas condiciones que debe cumplir para su adecuado funcionamiento.

Tal vez la más importante de estas condiciones es la base de diseño N° 11, relacionada con el cambio de fase del material en función del tiempo de retención en la Etapa de Fusión. Para poder estudiar la evolución del proceso de fusión se define la variable denominada “Perfil del Lecho Sólido”, la cual se denota como  $x/w$ .

Para poder entender el significado físico de esta variable se hace referencia a la distancia denominada “ancho del canal”, denotado anteriormente como  $w$  y se define  $x$  como la longitud del material de trabajo en su fase sólida acumulado en la parte delantera del canal. Se debe recordar que según la base de diseño N° 11, el polímero ingresa a la unidad en la Zona de Alimentación en forma sólida y se asume que se compacta lo suficiente como para considerarlo un medio continuo, siendo éste un lecho sólido.

Una vez comprendidos a cabalidad los significados de las variables  $x$  y  $w$  por separado, será fácil entender lo que expresa el perfil del lecho sólido: una disminución de la cantidad de sólido en la mezcla mientras se funde expresada en forma de fracción. Por lo tanto, el perfil del lecho sólido debe variar a medida que se avance longitudinalmente en el tornillo desde un valor inicial de  $1$  hasta uno final de  $0$ .

Antes de definir una expresión cuantitativa para calcular el valor numérico del perfil del lecho sólido, se deben definir otros parámetros importantes tales como la magnitud de la velocidad de fusión ( $\Omega$ ) y la velocidad de fusión por unidad de distancia axial ( $\Psi$ ).

La magnitud de la velocidad de fusión  $\Omega$  expresa el flujo de materia que cruza por un determinado espacio en el que ocurre la fusión del material por transferencia de calor. Este valor es definido por [7] como:

$$\Omega = \frac{2m}{ztw^{1/2}} \quad (E. 37)$$

Para el caso del Tornillo de Paso Variable en su Zona de Fusión, este valor es  $46,2 \text{ Kg} / \text{sm}^{3/2}$ . El parámetro  $\Psi$ , también definido por [7] para tornillos de sección constante se obtiene de la siguiente expresión:

$$zt = \frac{2H}{\Psi} \Rightarrow \Psi = \frac{2H}{zt} \quad (E. 38)$$

Y el valor numérico de este parámetro adimensional está alrededor del  $0,0601$ .

Un factor adicional a determinar es la velocidad promedio de fusión a lo largo de la Zona en cuestión, demarcada como  $\varphi$ , quien expresa cuanto flujo de materia puede fundirse por cada unidad de distancia axial del tornillo.

$$\varphi = \frac{\Omega w^{1/2}}{2} \quad (E. 39)$$

El resultado de este cálculo es el valor de  $\varphi = 2,4 \text{ Kg/sm}$ .

Una vez conocidos los valores numéricos de estos parámetros se puede estimar cuánta será la variación del perfil del lecho sólido en función de la distancia axial del tornillo, tomando como el origen el inicio de la Etapa de Fusión:

$$\frac{x}{w} = \left(1 - \frac{\Psi z}{2H}\right)^2 \quad (E. 40)$$

que también puede ser denotado como:

$$\frac{x}{w} = \left(1 - \frac{z}{zt}\right)^2 \quad (E. 41)$$

De estas ecuaciones se obtiene un patrón de variación que se ajusta a las condiciones en que se realiza la fusión:

<i>z [mm]</i>	<i>w/x</i>
<i>0</i>	<i>1</i>
<i>20</i>	<i>0.77393</i>
<i>40</i>	<i>0.5768</i>
<i>60</i>	<i>0.40858</i>
<i>80</i>	<i>0.2693</i>
<i>100</i>	<i>0.15894</i>
<i>120</i>	<i>0.07751</i>
<i>140</i>	<i>0.02501</i>
<i>160</i>	<i>0.00144</i>
<i>166</i>	<i>0</i>

*Tabla N° 7: Variación del Perfil del Lecho Sólido*

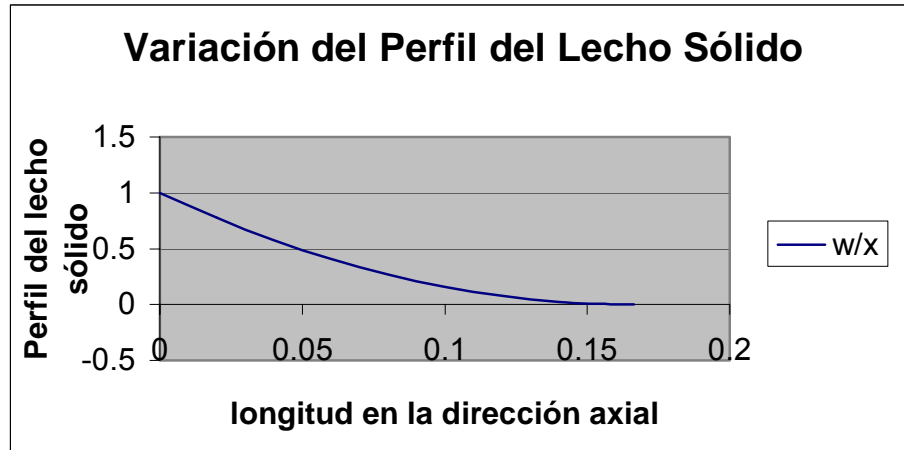


Figura N° 8: Variación del Perfil del Lecho Sólido

Una vez conocido todo esto se puede determinar el caudal volumétrico del polímero a partir del flujo másico mediante la expresión

$$m = \rho dV \quad (E. 42)$$

y se define el volumen específico como el inverso de la densidad  $\rho = 1/V_{esp}$  (E. 43). Por lo tanto:

$$m dV_{esp} = dV \quad (E. 44)$$

Se debe recordar que la densidad es variable durante todo el recorrido del polímero en esta sección e incluso varía puntualmente dentro del canal en relación a la evolución del perfil del lecho sólido. Es por esta razón que se aproxima la densidad media de la Etapa de Fusión, utilizando la expresión:

$$V_{esp} = \frac{\int_0^{z_l} V_{esp} dl}{\int_0^{z_l} dl} \Rightarrow V_{esp} \approx \frac{V_{esp}(Z_1) + V_{esp}(Z_2)}{2} \quad (E. 45)$$

En donde  $Z_1$  se refiere al final de la Zona de Alimentación y  $Z_3$ , al inicio de la Etapa de Dosificación; por lo que resulta válido aproximar  $Q_2 = m V_{esp} = 12,9 \text{ cm}^3/\text{s}$  ( $1,29 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ ).

La compresión que se genera obedece una relación semejante a la de la tercera etapa E. 29, aplicada a las condiciones de la Zona de Fusión, por lo que la variación de presión en esta zona será de unos  $1908 \text{ KPa}$ .

En este momento, es prudente mostrar un cuadro resumen de las dimensiones físicas del Tornillo obtenidas a partir de la metodología y los cálculos realizados.

	<i>Alimentación</i>				<i>Fusión</i>				<i>Dosificación</i>			
<b>Di</b>	15	mm	$1,5 \times 10^{-2}$	m	15	mm	$1,5 \times 10^{-2}$	m	15	mm	$1,5 \times 10^{-2}$	m
<b>V cilindro</b>	58,4	cm <sup>3</sup>	$5,84 \times 10^{-5}$	m <sup>3</sup>	66,2	cm <sup>3</sup>	$6,62 \times 10^{-5}$	m <sup>3</sup>	35,8	cm <sup>3</sup>	$3,58 \times 10^{-5}$	m <sup>3</sup>
<b>pasos</b>	5,87		5,87		11,06		11,06		9,02		9,02	
<b>H</b>	5	mm	0,005	m	5	mm	0,005	m	5	mm	0,005	m
<b>Long</b>	82,4	mm	0,0824	m	79,9	mm	0,0799	m	79,1	mm	0,0791	m
<b>V filete</b>	11,6	cm <sup>3</sup>	$1,16 \times 10^{-5}$	m <sup>3</sup>	21,2	cm <sup>3</sup>	$2,12 \times 10^{-5}$	m <sup>3</sup>	17,1	cm <sup>3</sup>	$1,71 \times 10^{-5}$	m <sup>3</sup>
<b>V</b>	46,8	cm <sup>3</sup>	$4,68 \times 10^{-5}$	m <sup>3</sup>	45	cm <sup>3</sup>	$4,50 \times 10^{-5}$	m <sup>3</sup>	18,7	cm <sup>3</sup>	$1,87 \times 10^{-5}$	m <sup>3</sup>

Tabla N° 8: Dimensiones del Tornillo de Sección Fija y Paso Variable

Los ángulos más importantes son:



<i>Parámetro</i>	<i>Zona 1</i>		<i>zona 2</i>		<i>zona 3</i>	
<i>PASO (L)</i>	<i>25 mm</i>	<i>0,025 m</i>	<i>15,03 mm</i>	<i>0,015 m</i>	<i>9,98 mm</i>	<i>9,98 x10<sup>-3</sup> m</i>
<i>ángulo <math>\theta_e</math></i>	<i>17,7 °</i>	<i>0,308 rad</i>	<i>10,83 °</i>	<i>0,189 rad</i>	<i>7,24 °</i>	<i>0,126 rad</i>
<i>ángulo <math>\theta_b</math></i>	<i>17 °</i>	<i>0,297 rad</i>	<i>10,4 °</i>	<i>0,182 rad</i>	<i>6,97 °</i>	<i>0,122 rad</i>
<i>ángulo <math>\theta_i</math></i>	<i>31,5 °</i>	<i>0,55 rad</i>	<i>20,2 °</i>	<i>0,353 rad</i>	<i>13,7 °</i>	<i>0,239 rad</i>

*Tabla N° 9: Paso y ángulos del Tornillo de Sección Fija y Paso Variable*

### **2.2.2. Tornillo de Paso Constante y Sección Fija**

Este Tornillo será fungirá como muestra de control respecto a los otros dos. Se justifica la inversión de recursos en su estudio por cuanto es más sencillo de construir que los otros y que, si al comparar el funcionamiento de los tres, las diferencias entre el control y los demás son insignificantes, el Tornillo de Paso Constante y Sección Fija será la pieza preferencial a la hora de construir una máquina comercialmente operable. En otras palabras, lo que se busca es determinar si es productivo o no el invertir en Tornillos de construcción más complicada como lo son el Tornillo de Paso Variable y Sección Fija y el Tornillo de Paso Constante y Sección Variable.

Una vez realizado el estudio del Tornillo de Paso Variable, resulta más sencillo analizar en denominado “Tornillo Universal”, que como ya se ha mencionado, presenta una sección transversal fija y paso constante a lo largo de todo el recorrido de su longitud roscada. Al igual que los otros dos tornillos, éste presentará tres etapas definidas por las temperaturas aportadas por las resistencias eléctricas ubicadas en el Barril de la Unidad: la primera de ellas será la de Alimentación; la segunda, la de Fusión y la tercera, la de Dosificación.

Al igual que los otros dos Tornillos, éste contará con sólo una hélice porque un número mayor de hilos implica mayores pérdidas por fricción; adicionalmente la máquina requeriría de una extensión más larga para obtener los resultados esperados ya que cabría menos material el proceso de mezclado se vería perjudicado, aún cuando una hélice más reduciría las vibraciones.

#### **2.2.2.1. Zona de Alimentación**

La función de la zona de alimentación, como ya se ha explicado, es transportar material sólido, ingresándolo de forma lo más homogénea y continuamente a la unidad. En esta parte del equipo se realiza un precalentamiento de la sustancia de trabajo hasta unos  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$ , siendo esta temperatura la de fusión del PEBD, provocado por la generación de calor de la resistencia eléctrica de  $150\text{ W}$  que se mantiene a  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Al igual que sucede con los otros Tornillos, una de las principales limitantes para el diseño de esta zona es el tamaño de las partículas destinadas a alimentar la extrusora. Las partículas de polietileno utilizadas también son las denominadas *pellets*, porque presentan una longitud acotada en un rango entre 1 y 5 milímetros. Se debe recordar que este tamaño es el óptimo según las recomendaciones de [13].

Se parten de premisas para esta zona idénticas a las que se tomaron como punto de partida para el Tornillo de Paso Variable, a las cuales ya se les ha hecho mención en la *Tabla N° 2*.

Se debe recordar que estas limitaciones han sido impuestas por las dimensiones físicas de la unidad y la recomendación de [7] y [13] de tomar un paso cuadrado con respecto al diámetro exterior del Tornillo, lo que hace que se pueda deducir matemáticamente la magnitud del paso del Tornillo en la primera sección:

$$L = De = 25mm$$

Al conocer el paso, se procede a calcular el ángulo de inclinación del filete. Para esto se requiere desarrollar el sólido que lo envuelve, en este caso un cilindro, llevándolo desde un objeto tridimensional hasta una superficie bidimensional (ver figura N° 1).

De esta forma se determina el ángulo  $\theta_e = 17,66^\circ$ , y de manera similar se pueden calcular las aberturas  $\theta_b = 17,02^\circ$  y  $\theta_i = 31,47^\circ$  relativas a los diámetros de barril e interno respectivamente.

Adicionalmente se señala que el no poder cambiar la longitud de la zona provoca que en ella se encuentren un total de 5,87 vueltas del filete.

Siguiendo con la metodología impuesta con el cálculo del Tornillo de Paso Variable, el próximo paso es calcular la holgura radial ( $\delta$ ), la cual debe ser semejante a la de la sección de alimentación del Tornillo de diámetro variable ya construido. Entonces, la holgura radial se calculará mediante E 02, resultando los mismos 0,5 milímetros, lo que puede considerarse despreciable para esta etapa de la pieza, aún cuando esta dimensión se mantendrá constante para la extensión del tornillo tal como se hizo con los otros tornillos.

Igualmente se determina la profundidad del canal ( $H$ ), que se debe ser idéntica a la de la primera etapa del Tornillo de Diámetro Variable calculada por medio de la E. 03, arrojando el valor de 5 milímetros, quién permanecerá constante, al igual que la holgura radial, durante toda la extensión de la pieza a construir.

En este momento se procede a calcular el ancho del canal medido perpendicularmente al filete, variable que se denota con el símbolo  $w$ ; además,  $B$  será el ancho del canal en la dirección axial y  $b$ , el ancho del filete en la dirección axial. Para comprender más fácilmente el significado de estos parámetros se recomienda la observación de las representaciones gráficas de la Figura N° 2, donde se pueden obtener los valores numéricos de  $w$ ,  $B$  y  $b$  relativos al ángulo  $\theta_e$ ; es decir,  $w_e$ ,  $B_e$  y  $b_e$ , más aún si se aplica la expresión E. 04:

$$\cos \theta_e = \frac{e}{be} = \frac{we}{Be} \Rightarrow be = \frac{e}{\cos \theta_e} = 42mm$$

Igualmente, se determina  $B_e$  utilizando E. 05, siendo  $B_e = 20,8 mm$ , lo que a su vez implica que al utilizar E. 06 se obtenga  $w_e = 19,8mm$ .

Un paso más que debe cumplirse antes de iniciar los cálculos de flujo de polímero, se debe fijar un eje de coordenadas en la cual el eje X está orientado en la dirección del filete, es decir, con una inclinación  $\theta_e$  respecto al eje de la máquina (vertical); el eje Y se orienta en dirección perpendicular al eje de la unidad en dirección al alma del Tornillo y por último, el eje Z seguirá la dirección perpendicular al filete, siguiendo la regla de la mano derecha (ver Figura N° 3).

El eje de coordenadas esta centrado en un punto determinado de la superficie del filete, por lo que para efectos de cálculo el Tornillo estará fijo y el barril en movimiento. Esta suposición es totalmente válida, ya que por movimiento relativo se toma que el barril gira en sentido opuesto al preestablecido mientras el Tornillo permanece fijo. Todo esto con el objeto de facilitar los cálculos y la comprensión del sistema.

Una vez determinados estos parámetros, será posible determinar analíticamente el volumen y la masa desplazados por unidad de tiempo que atraviesa por la zona de alimentación. Sin embargo, antes de calcular los caudales volumétrico y másico de polímero, se debe calcular la velocidad del tapón sólido  $vpl$  aplicando E. 08, quedando la velocidad del tapón en función del ángulo de transporte del polímero respecto a la dirección perpendicular al eje de la máquina ( $\phi$ ) y de la velocidad del barril ( $vb$ ).

Para calcular el módulo de la velocidad del barril se debe seguir la ecuación E. 09, donde la velocidad angular denotada (N) presenta el valor de 248 giros por minuto, el cual se encuentra entre el rango recomendado para este tipo de unidades: desde 20 rpm hasta 300.

Continuando con el cálculo del caudal, ahora se ha de integrar el producto de la velocidad del tapón en el área longitudinal con diferencial en la distancia radial del Tornillo como se señala en la E. 10. Esta ecuación propuesta por [7] contiene el símbolo  $p$ , el cual indica el número de hilos. Se debe recordar que para el Tornillo diseñado se usará un solo hilo.

La ecuación E. 10, al desarrollarse, origina la E. 11, donde se aprecia el ángulo  $\theta$  sin subíndice alguno que para esta ecuación, y de ahora en adelante, expresará el promedio de los ángulos referidos al diámetro externo e interno del tornillo (ver E. 12).

Al igual que con el ángulo promedio, se debe definir el ancho del canal promedio, identificado como  $w$  sin subíndice alguno. El ancho del canal promedio puede ser calculado por la expresión E. 13

Dado que el ángulo de transporte no se encuentra definido, la expresión del caudal presenta una incógnita. Para poder otorgarle un valor numérico al ángulo de transporte se plantea un balance de las fuerzas que se ejercen sobre el filete y los momentos actuantes.

El resultado del desarrollo del sistema de ecuaciones resultantes de la sumatoria de fuerzas axiales y por la suma de momentos, es la expresión de una constante que será identificada como  $M$  cuya definición se muestra en la E. 14 y se encuentra su utilidad en la E. 15 donde se le relaciona con la variación de presión en la Etapa de Alimentación.

De la expresión E. 15, se entiende que los dos primeros términos se relacionan con las fuerzas de fricción por la interacción de los filetes y alma del Tornillo con el polímero. El tercer término indica las fuerzas asociadas a la presión.

Se define a continuación la constante  $K$  utilizando E. 16. Según [1] la presión en cualquier punto de la Zona de Alimentación responde a la ecuación E. 17:

Para esto se deben conocer los valores de las constantes  $A1$ ,  $A2$ ,  $B1$  y  $B2$ , que serán determinados por las ecuaciones E. 18, E. 19, E. 20 y E. 21 respectivamente.

Se puede notar que las constantes  $A1$  y  $B1$  dependen del ángulo de transporte, lo que sugiere una iteración para hallar los valores de  $\phi$  y  $P2$ , pero antes se debe transformar la ecuación de definición de M en E. 22

Ahora se supondrá un valor inicial de  $\phi$  para calcular  $P2$ , con el que se calculará un nuevo valor de  $\phi$ .

Se parte de los mismos valores fijos plasmados en la Tabla N° 3 y además se tiene que la longitud axial de la zona de alimentación es:

$$z_t = 146,7 \text{ milímetros}$$

Ahora, se procede a la iteración como hipótesis inicial con base experimental recomendada por [7] de E. 23. El resultado, al igual que como sucede con el Tornillo de Sección Fija y Paso Variable se puede apreciar en la Tabla N° 4, donde se emplea el software Microsoft Excel, para hacer la iteración que da como resultado en el primer ciclo un error por el orden de  $10^{-14}$ , lo cual prueba que la hipótesis de  $\phi = 90 - \theta b$  se acerca lo suficiente a la realidad y que  $\Delta P = 0$ .

Por consiguiente, al sustituir en la expresión del caudal, el resultado será:

$$Q_1 = 28,12 \text{ cm}^3 / \text{s} = 2,812 \times 10^{-5} \text{ m}^3 / \text{s}$$

Para determinar el flujo másico del material que circula por la sección de alimentación y la cantidad de aire, se determina la densidad aparente del polímero de trabajo. Mediante métodos experimentales se logró determinar la densidad aparente del polímero que ingresa a la máquina, que se encuentra alrededor de los  $500 \text{ Kg/m}^3$ , por lo tanto, el caudal másico será  $0,0014 \text{ Kg/s}$  ( $50,62 \text{ Kg/hora}$ ). Pero es bien conocido que el polietileno de baja densidad en estado sólido a condiciones ambientales presenta una densidad real de  $918 \text{ Kg/m}^3$  y el aire a las condiciones ambientales de Caracas en un día normal ( $25 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $95,5 \text{ KPa}$ ) presenta una densidad de  $0,925 \text{ Kg/m}^3$ . Por lo tanto, la cantidad de polímero que realmente está dentro de la máquina es aproximadamente  $2,34 \times 10^{-2} \text{ Kg}$  y el flujo real del polímero es:

$$2,58 \times 10^{-2} \text{ Kg/s}$$

Ó lo que es lo mismo:  $92,94 \text{ Kg/hora}$ .

#### **2.2.2.2. Zona de Dosificación**

En este momento resulta sencillo darse cuenta que la Zona de Alimentación es la que rige al Tornillo Universal, por cuanto es esta zona la que define el acceso de materia de trabajo a la máquina y este ingreso de materia es el que rige la producción.

Con el objeto de continuar con la metodología empleada en el diseño del Tornillo de Paso Variable, se procede a diseñar la última etapa, la Zona de



Dosificación. Es importante considerar que el fluido al ingresar a la Etapa de Dosificación, es totalmente líquido y no existe presencia de aire licuado con el polímero.

Los parámetros volumétricos tomados como base para la definición de las características físicas del Tornillo de Paso Variable no son relevantes para el Tornillo Universal. Como se expresa en la Base de Diseño N° 20, tanto el paso como el diámetro del alma del tornillo y todas las variables derivadas de ellos permanecen constantes a lo largo de toda la longitud roscada.

En este momento, [1] define dos ecuaciones para calcular la variación de presión y el caudal volumétrico de polímero que circula por esta parte de máquina. La expresión que identifica el caudal de fluido se puede apreciar en la E. 27 y en la E. 28 se da la que calcula el caudal máximo posible para esta geometría. De la misma forma se presenta la E. 29, donde se expresa la variación de presión.

Es imprescindible recordar que la máquina no cuenta con una boquilla dosificadora por lo que se asume como valores iniciales para el caudal y la presión como “descarga abierta”, donde el flujo volumétrico es máximo y la compresión es mínima.

Aún cuando se considera que se está en presencia de una descarga abierta, se debe tomar en consideración que acoplado al final del barril se encuentra el molde junto con las bridas de acople de éste, por lo que se procede a efectuar un cálculo iterativo de estas dos variables hasta lograr que el error se encuentre en la tercera cifra significativa de ambos parámetros.

Antes de proceder a este cálculo, se deben tener en cuenta los valores numéricos de las siguientes variables, las cuales se verán involucradas en el desarrollo de los cálculos repetitivos:

<i>Parámetro</i>	<i>magnitud</i>	<i>unidades</i>	<i>Expresión</i>
<i>vb (velocidad del barril)</i>	33,8	cm/s	(E.09)
<i>vbz (proyección en la dirección z del la velocidad del barril)</i>	32,2	cm/s	(E. 30)
<i>vx (proyección de la velocidad del barril en la dirección x)</i>	- 10,2	cm/s	(E. 31)
<i><math>\mu_3</math> (viscosidad a la temperatura de la Zona 3)</i>	413,682	Ns/m <sup>2</sup>	(ver figura N° 6)
<i>T<sub>3</sub> (temperatura de la zona 3)</i>	129,5	°C	(ver tabla N°16)
<i><math>\theta_e</math> (ángulo de hélice)</i>	17,66	°	(E. 01)
<i>L (paso)</i>	25	mm	(E. 32)
<i>W (ancho del canal)</i>	19,8	mm	(E. 33)

*Tabla N° 10: Datos para la Zona 3 del Tornillo Universal*

La iteración se resume significativamente mediante la definición de los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  definidos por las ecuaciones E. 34 y E. 35 respectivamente, donde  $\alpha$  es relativa al flujo de arrastre por fricción y  $\beta$  representa el flujo de retorno por presión de retroceso

Por lo que la ecuación del caudal queda como se expresa en la E. 36 y en este momento se procede a efectuar la iteración:

$Q_3 [cm^3/s]$	$\Delta P_3 [MPa]$
18,4	3,12
14,6	2,57
12,4	2,12
11,6	1,89
10,9	1,47
10,2	1,11
9,7	0,98
9,5	0,78
9,6	0,76
9,6	0,75

Tabla N° 11: Iteración de  $Q_3$  y  $\Delta P_3$  para el Tornillo Universal

De lo que resulta que la variación de presión es  $0,75 MPa$  y el caudal de fundido  $9,6 cm^3/s$ .

Al utilizar el valor cuantitativo del flujo másico de polímero que circula por toda la máquina y establecerlo como constante por medio de la ecuación de continuidad se puede determinar que un valor acorde para la densidad media del polímero se encuentra alrededor de los  $2,69 \times 10^3 Kg/m^3$ .

### **2.2.2.3. Zona de Fusión**

Al igual que como sucede con el Tornillo de Paso Variable, el análisis de la sección intermedia involucra un alto grado de comprensión en lo que al comportamiento del fluido se refiere. Se debe hacer referencia a datos experimentales que rigen los estudios estadísticos mediante los que se logra modelar las condiciones de operación de este tipo de unidades. Los estudios en cuestión están referidos a modelos industriales de dimensiones y proporciones mayores a las previstas para el prototipo que es el modelo de estudio, razón por la cual la sección intermedia de la máquina se diseña en base a las otras dos ya especificadas.

Para el Tornillo Universal no se requiere del análisis volumétrico realizado en el de Paso Variable en ninguna de sus secciones, ya que las condiciones físicas que le definen su geometría.

Con las dimensiones físicas ya delimitadas y las temperaturas ya especificadas para cada sección, resulta difícil controlar estos procesos problemáticos. Sólo el tiempo de permanencia del polímero en la máquina podrá predecir si la sustancia de trabajo es capaz o no de fundirse. Una alta velocidad también garantiza que los gases y vapores alcancen la presión necesaria puedan escapar libremente por efectos de la presión de retorno. En el procedimiento experimental se explicará el proceso de mezclado que contribuye al escape de gases indeseados.

Es por esto que se estudia el cambio de fase del material durante su estadía en la Etapa de Fusión, definiendo el Perfil del Lecho Sólido, representado como  $x/w$  por

su relación entre el ancho del canal  $w$  y  $x$ , la longitud del material de trabajo en su fase sólida acumulado en la parte delantera del canal.

Las condiciones requeridas para que ocurra esta fusión son las mismas que para el Tornillo de Paso Variable, siendo la magnitud de la velocidad de fusión  $\Omega$  la que se calcula mediante E. 37 y para el Tornillo Universal en su Zona de Fusión, este valor es  $2,21 \text{ Kg/sm}^{3/2}$ .

El parámetro  $\Psi$  para Tornillos de sección constante se obtiene de la siguiente expresión E. 38 y el valor numérico de este parámetro adimensional está alrededor del 722, al igual que sucede con el Paso Variable.

La velocidad promedio de fusión a lo largo de la zona  $\phi$ , quien expresa cuanto flujo de materia puede fundirse por cada unidad de distancia axial del tornillo se define por medio de E. 39, resultando de este cálculo es el valor de  $\phi = 0,155 \text{ Kg/sm}$ .

Una vez conocidos los valores numéricos de estos parámetros se puede estimar cuánta será la variación del perfil del lecho sólido en función de la distancia axial del tornillo, tomando como el origen el inicio de la Etapa de Fusión. Para ello se utilizan las ecuaciones E. 40 y E. 41 de las cuales se obtiene un patrón de variación que se ajusta a las condiciones en que se realiza la fusión, el cual coincide con el del Paso Variable y pueden ser observados en la Tabla N° 7 y en la Figura 5.

Una vez conocido todo esto se puede determinar el caudal volumétrico del polímero a partir del flujo másico mediante la expresión E. 42 y se define el volumen específico como el inverso de la densidad (E. 43), resultando E. 44

Se debe recordar que la densidad es variable durante todo el recorrido del polímero en esta sección e incluso varía puntualmente dentro del canal en relación a la evolución del perfil del lecho sólido. Es por esta razón que se aproxima la densidad media de la Etapa de Fusión, utilizando la expresión E. 45.

En donde  $Z_1$  se refiere al final de la Zona de Alimentación y  $Z_3$ , al inicio de la Etapa de Dosificación; por lo que resulta válido aproximar  $Q = m \text{ Vesp} = 2,42 \text{ cm}^3/\text{s}$ .

La compresión que se genera obedece una relación semejante a la de la tercera etapa: la E. 29. Entonces la variación de presión en esta zona será de unos  $233 \text{ KPa}$ .

A continuación se presentan las dimensiones finales del Tornillo Universal

	<i>Alimentación</i>				<i>Fusión</i>				<i>Dosificación</i>			
<b>Di</b>	15	mm	$1,5 \times 10^{-2}$	m	15	mm	$1,5 \times 10^{-2}$	m	15	mm	$1,5 \times 10^{-2}$	m
<b><math>\theta\epsilon</math></b>	17,7	°	0,3082	rad	17,7	°	0,3082	rad	17,7	°	0,3082	Rad
<b>pasos</b>	5,87		5,87		6,65		6,65		3,6		3,6	
<b>H</b>	5	mm	0,005	m	5	mm	0,005	m	5	mm	0,005	m
<b>V</b>	46,8	cm <sup>3</sup>	$4,68 \times 10^{-5}$	m <sup>3</sup>	53,1	cm <sup>3</sup>	$5,31 \times 10^{-5}$	m <sup>3</sup>	28,7	cm <sup>3</sup>	$2,87 \times 10^{-5}$	m <sup>3</sup>

Tabla N° 12: Dimensiones del Tornillo Universal



*FiguraN° 9: Tornillo Universal y barril después de la Operación*

### **2.2.3. Transferencia de Calor (Régimen uniforme estado estable)**

En la unidad se encuentran instaladas cuatro (4) resistencias eléctricas que producen una tasa de calor de  $150\text{ W}$  cada una. Una de estas resistencias se encuentre en la Etapa de Alimentación, dos en la de Fusión y la última en la de Dosificación. Se recuerda que la primera zona del equipo opera a  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ , la segunda a  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$  y la última a  $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ . De esta forma se puede cuantificar independientemente la transferencia de calor hacia el polímero en cada etapa de la unidad.

Antes de iniciar los cálculos se asume que el anillo donde se encuentran las resistencias eléctricas, por su espesor, presenta una temperatura estable cuyo valor numérico es igual tanto en su pared interior como en su pared exterior.

La metodología para calcular y evaluar la transferencia de calor será la siguiente: en primer lugar se calculará el flujo calor y temperaturas en el Tornillo de Paso Variable, empezando por la etapa de alimentación, siguiendo por la de Fusión y terminando con la de Dosificación, todo esto sin el uso de aislante térmico. Una vez culminado el análisis del Paso Variable, procederá el del Tornillo Universal sin aislante en sus tres zonas. Al finalizar estos procesos, se repetirán los cálculos para el

Tornillo de Paso Variable, pero esta vez con el uso de un aislante térmico exterior y por último el del Tornillo Universal con aislante externo.

### 2.2.3.1. Tornillo de Paso Variable. Etapa de Alimentación.

El calor que se conduce hacia el polímero que ingresa a la unidad es igual al que se genera menos el que se pierde en la atmósfera, sin considerar el calor asociado a las irreversibilidades del mecanismo de impulsión, roce del tornillo, tasa de corte con el polímero:

$$Q_{\text{interno}} = Q_{\text{generado}} - Q_{\text{externo}} \quad (\text{E. 46})$$

El flujo de calor que se disipa al exterior se puede cuantificar mediante el modelaje matemático del flujo de calor que se transmite de un cilindro a un ambiente externo:

$$Q_{\text{externo}} = hA (T_w - T_\infty) \quad (\text{E. 47})$$

Para esta expresión se toma como  $h$  el coeficiente de convección natural con el ambiente;  $A$  es el área de transferencia de calor;  $T_w$  será la temperatura de pared externa y  $T_\infty$  representará la temperatura del ambiente que se encuentra inalterable respecto al proceso efectuado por el equipo. El área de transferencia de calor es  $A = 2\pi R_{\text{rext}} zt$ , que a su vez involucra el radio externo del anillo donde se hallan las resistencias  $R_{\text{rext}} = 20,5 \text{ mm } (0,0205\text{m})$  y la longitud de la etapa  $zt = 146,7 \text{ mm } (0,1467 \text{ m})$  y por otro lado, la temperatura de pared  $T_w$  es  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  y la temperatura  $T_\infty$  del ambiente invariable es de unos  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , acorde a una temperatura promedio de Caracas.



El coeficiente de convección natural se determina mediante las relaciones empíricas a partir de parámetros adimensionales:

- Número de Reynolds ( $Re$ ): parámetro adimensional que relaciona las fuerzas inerciales con las fuerzas viscosas de un fluido.
- Número de Nusselt ( $Nu$ ): parámetro adimensional que relaciona la transferencia de calor por convección con la transferencia por conducción en una misma sustancia.
- Número de Biot ( $Bi$ ): parámetro adimensional que relaciona la resistencia térmica de un sólido con la resistencia térmica de la capa límite.
- Número de Prandtl ( $Pr$ ): parámetro adimensional que relaciona los espesores relativos de las capas límite hidrodinámica y térmica. Pr se relaciona con la razón de las difusividades de momento y térmica.
- Número de Grashof ( $Gr$ ): parámetro adimensional que relaciona las fuerzas de flotabilidad (empuje) con las fuerzas viscosas.
- Número de Rayleigh ( $Ra$ ): parámetro adimensional que engloba a los números de Grashof y Prandtl.

En primer lugar se determina el número de Reynolds:

$$Re = \frac{xv\rho}{\mu} \quad (E. 48)$$

En esta ecuación,  $x$  representa la longitud característica del sólido, en este caso es el diámetro del cilindro. El símbolo  $v$  expresa la velocidad del flujo y  $\rho$  la densidad del fluido. Por último,  $\mu$  se refiere a la viscosidad dinámica.

Antes de determinar la densidad se deben recordar las condiciones atmosféricas para Caracas, las cuales oscilan entre los 25 °C de temperatura ambiental y una presión barométrica de 92,5 KPa.

Esto implica que la densidad del aire puede calcularse mediante la ley de los gases ideales:

$$\frac{P}{\rho} = \bar{R}T \Rightarrow \rho = \frac{P}{\bar{R}T} \quad (\text{E. 49})$$

Se debe recordar que  $P$  es la presión;  $T$ , la temperatura expresada en °K y  $\bar{R}$  es la constante energética propia del aire (0,287 KJ/Kg°K).

Por lo tanto, la densidad del aire para Caracas será de 1,081 Kg/m<sup>3</sup>.

Dado que el proceso se efectúa en ausencia de cualquier medio mecánico que movilice el fluido atmosférico, se asegura que la convección es del tipo natural y se considera aceptable asumir una velocidad de desplazamiento del aire como 1 m/s, lo que sugiere un “aire quieto”.

Otro valor necesario definir para poder calcular el Número de Reynolds, es el diámetro del cilindro el cual alcanza los 41mm (0,041 m).

Por último, se determina la viscosidad dinámica para las condiciones ambientales de Caracas:  $\mu = 1,8462 \times 10^{-5} \text{ Pa s}$ .

Entonces, el valor de  $Re$  será:  $Re = 2400$

Este valor puede definir al flujo como en estado transitorio entre el laminar y el turbulento.

Se presenta ahora la ecuación que refiere el Número de Nusselt a los Números de Reynolds y Prandlt con el objeto de determinar el coeficiente convectivo  $h$ :

$$Nu = \frac{hx}{k} = C(Re)^m (Pr)^{1/3} \quad (E. 50)$$

Esta expresión, válida para flujo externo de un cilindro con transferencia de calor por convección natural, sugiere para los valores de las constantes  $C = 0,683$  y  $m = 0,466$  para los  $Re$  pertenecientes al intervalo definido entre los 40 y 4000.

<b><i>Re</i></b>	<b><i>C</i></b>	<b><i>m</i></b>
<i>0,4 – 4</i>	<i>0,989</i>	<i>0,33</i>
<i>4 – 40</i>	<i>0,911</i>	<i>0,385</i>
<i>40 – 4000</i>	<i>0,683</i>	<i>0,466</i>
<i>4000 – 40.000</i>	<i>0,193</i>	<i>0,618</i>
<i>40.000 – 400.000</i>	<i>0,027</i>	<i>0,805</i>

*Tabla N° 13: Convección Natural para cilindro circular en flujo cruzado [6]*

El número de Prandlt se define como:

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k} \quad (E. 51)$$

Donde  $C_p$  representa el calor específico a presión constante del aire, cuyo valor es  $1,0057 \text{ KJ/Kg}^\circ\text{K}$ , para Caracas a condiciones ambientales. Igualmente, la

conductividad térmica  $k$  del aire en el estado antes mencionado es de  $0,02624 \text{ W/m}^\circ\text{K}$ . Por lo tanto, el valor numérico de  $Pr$  para este caso es de  $0,708$ .

Ahora se puede calcular el Número de Nusselt, dando como resultado  $22,888$ ; por lo que en este momento se podrá determinar el coeficiente de convección natural como:

$$h = \frac{k}{x} Nu = 1,4648 \frac{W}{m^2 \circ K} \quad (\text{E. 52})$$

Ahora se puede determinar la transferencia de calor al exterior:  $Q_{\text{externo}} = 3,46 \text{ W}$ . Por lo tanto, el flujo de calor que ingresa al interior de la máquina es de  $Q_{\text{interno}} = 146,54 \text{ W}$ .

Para poder seguir adelante, se debe plantear el modelo de conducción térmica de la Ley de Fourier para cilindros concéntricos con generación interna:

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left( r \frac{dT}{dr} \right) + \frac{(Q_{\text{generado}} / V_{\text{resistencias}})}{k} = 0 \quad (\text{E. 53})$$

Al separar variables y suponer generación uniforme, esta expresión se integra para obtener

$$r \frac{dT}{dr} = \frac{Q_{\text{gen}} / V_{\text{res}}}{2k} r^2 + C1 \quad (\text{E. 54})$$

Si el procedimiento se repite, la solución general para la distribución de temperaturas es

$$T(r) = -\frac{Q_{gen} / V_{res}}{4k} r^2 + C1 \ln(r) + C2 \quad (E. 55)$$

Para obtener las constantes de integración  $C1$  y  $C2$ , se aplican las condiciones de frontera. Sin embargo, ya que anteriormente se han determinado ciertas variables útiles, se puede buscar un coeficiente de transferencia de calor equivalente a las resistencias térmicas de tal manera que se prediga cual es la temperatura del polímero, para lo cual se plantea una analogía eléctrica.

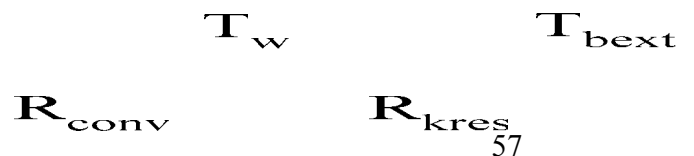


Figura N° 10: Analogía Eléctrica para Transferencia de Calor

Se tomará la resistencia equivalente entre el radio del alma del tornillo y el borde externo del barril, ya que las situaciones exteriores ya han sido modeladas anteriormente mediante la transferencia por convección. Entonces se tiene que los valores de las resistencias térmicas son:

$$R_{max} = \frac{\ln\left(\frac{r_{barrilexterior}}{r_{barrilinterior}}\right)}{2\pi k_{aceroinoxidable} zt} \quad (E. 56)$$

Donde el radio externo del barril es  $16,7 \text{ mm}$  ( $0,0167 \text{ m}$ ) y el radio del barril interno,  $13 \text{ mm}$  ( $0,013 \text{ m}$ ). Además, la conductividad térmica del acero inoxidable a la temperatura de trabajo es  $0,039 \text{ W/m}^\circ\text{C}$  y el único valor faltante es el de la longitud de la sección:  $zt = 146,7 \text{ mm}$  ( $0,1467 \text{ m}$ ).



Entonces, se puede asegurar que la transferencia de calor entre el borde exterior del barril responde a:

$$Q_{\text{interno}} = \frac{T_{\text{bext}} - T_{\text{bint}}}{\text{Re } q} = \frac{T_{\text{bext}} - T_{\text{alma}}}{\frac{\ln\left(\frac{r_{\text{barril exterior}}}{r_{\text{barril interior}}}\right)}{2\pi k_{\text{acero inoxidable}} z t}} \quad (\text{E. 57})$$

De donde se puede despejar la temperatura interna del barril:

$$T_{\text{bint}} = T_{\text{bext}} - \frac{Q_{\text{interno}}}{\text{Re } q} \quad (\text{E. 58})$$

Para los efectos de cálculo se asume que la temperatura exterior del barril es la misma que la temperatura interior del anillo de las resistencias, es decir  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Entonces, la temperatura interna del barril será  $143,03\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Se debe recordar que la temperatura de fusión del Polietileno de Baja densidad es  $110\text{ }^{\circ}\text{C}$  y que el polímero ingresa a la máquina a temperatura ambiente,  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ., por lo que se calcula el calor necesario para cumplir esta premisa:

$$Q_1 = mCe(T_{\text{fus}} - T_{\text{amb}}) \quad (\text{E. 59})$$

En esta expresión,  $m$  es el flujo másico de polímero que circula por el equipo  $m = 9,155\text{ Kg/hora}$  ( $0,002543\text{ Kg/s}$ ) y  $Ce$  se refiere al calor específico del polímero  $2,3\text{ KJ/Kg}^{\circ}\text{K}$ . Por lo que el calor necesario para la Etapa de Alimentación es  $497,16\text{ W}$ .

En este momento se presenta un problema: si la resistencia de esta etapa aporta apenas  $146,54 W$ , se hace imposible que la máquina logre precalentar esta tasa de alimentación de polímero hasta su temperatura de fusión.

Para solucionar este inconveniente se detiene el avance del Tornillo. Lo que sugiere que la operatividad de este equipo no se puede ejercer de forma continua, sino intermitente.

Si el flujo se halla estático dentro del barril en la Zona de Alimentación, se requiere de una energía de:

$$q1 = MgCe(T_{fus} - T_{amb}) \quad (E. 60)$$

Para esta expresión, el término  $Mg$  se refiere a la masa del polímero que se encuentra en el barril y  $q1$  es la energía transferida en forma de calor para lograr las condiciones finales.

Al sustituir los valores numéricos, se tiene que la energía necesaria es de  $8,4 KJ$ . Esto implica que a una fuente que genere  $146,54 W$  le tomaría un tiempo de  $57,9$  segundos calentar la sustancia de trabajo antes de echar a andar el motor.

Entonces se puede asegurar que el polímero puede alcanzar una temperatura promedio de  $110 ^\circ C$  al salir de esta Sección.

Por último se establece una temperatura promedio de operación para esta zona

$$\bar{T} = \frac{110 + 25}{2} = 67,5^\circ C \quad (E. 61)$$

### 2.2.3.2. Tornillo de Paso Variable. Etapa de Fusión.

Siguiendo los pasos de la etapa anterior se puede estimar un coeficiente de convección idéntico al de la Zona de Alimentación, por cuanto ninguno de los valores se ve alterado. Las alteraciones para esta zona se refieren a la temperatura de pared, que oscila alrededor de los  $180\text{ }^{\circ}\text{C}$ , lo que origina un flujo de calor al exterior de la máquina de  $4,29\text{ W}$  por cada resistencia, lo que dejará un aporte de  $145,71\text{ W}$  de cada resistencia al interior de la máquina.

En este momento resulta útil recordar que según la base de diseño N° 25, la transferencia de calor axial en el barril resulta despreciable.

El calor necesario para fundir el polímero es de  $CLF = 209\text{ KJ/Kg}$ , según [11] Si este valor se multiplica por el flujo másico de polímero que circula por el equipo  $9,155\text{ Kg/hora}$  ( $0,002543\text{ Kg/s}$ ), el resultado es  $531,4\text{ W}$ , lo que quiere decir que el calor generado es insuficiente para fundir el polímero. Partiendo de que la máquina debe obedecer los valores calculados para la velocidad de fusión promedio de  $\varphi = 23,6\text{ Kg/ms}$ , se plantea el funcionamiento intermitente.

En un proceso estático, si se asume que todo el canal está lleno del polímero, se determina que el barril contiene  $84,6\text{ gramos}$  ( $0,0846\text{ Kg}$ ) de material, que al aplicar la ecuación

$$q_2 = MgCLF \quad (\text{E. 62})$$

Donde  $CLF$  representa el calor de fusión del polímero, resulta una transferencia de energía térmica  $q_2 = 17,7\text{ KJ}$ . Como en esta Zona se hallan dos



resistencias eléctricas que aporta cada una  $145,71 W$ , se ha determinado que el polímero requiere de un tiempo de  $60,9$  segundos para fundirse.

La temperatura promedio del polímero en esta Etapa será obviamente  $110\text{ }^{\circ}C$ .

### **2.2.3.3. Tornillo de Paso Variable. Etapa de Dosificación**

La metodología empleada es la misma que en la Sección de Alimentación. La única variante es la temperatura de pared externa de  $170\text{ }^{\circ}C$ . Esta alteración arroja un valor de la potencia perdida por el calentamiento atmosférico de  $4,01 W$ , por lo que el calor que se conduce hacia adentro del barril es  $145,99 W$ . Al calcular la temperatura interna del polímero, se plantea como modelo la convección forzada en lugar de la conducción.

Para determinar las condiciones internas del polímero, se plantea la ecuación del calor:

$$Q_{\text{interno}} = hA(T_w - T_{\infty}) = mCe(T_{\text{sale}} - T_{\text{entra}}) \quad (\text{E. 63})$$

Para esta expresión, la temperatura de pared se refiere a la interna del barril y la temperatura  $T_{\infty}$  es una incógnita junto con el coeficiente convectivo  $h$ .  $T_{\text{entra}}$  es la temperatura de entrada a esta zona de la máquina,  $110\text{ }^{\circ}C$ . La temperatura  $T_{\text{sale}}$  se puede calcular para un flujo permanente y su valor numérico es  $134,96\text{ }^{\circ}C$ .

Este valor de temperatura es el máximo que debería producirse a la salida de la máquina si se opera la máquina sin interrupciones. Sin embargo, este valor no es sólo una referencia ya que, como se ha mencionado con anterioridad, la unidad no es de flujo permanente sino pulsante. Por esta razón se presenta una tabla que relaciona

la temperatura de salida en función de la energía térmica transferida basada en la ecuación:

$$q_3 = MgCe(T_{sale} - T_{entra}) \quad (E. 64)$$

En la que todos los valores involucrados ya se han definido con anterioridad salvo  $Mg$  que representa la masa de polímero que cabe en la Sección de Dosificación es 53,1 gramos (0,0531 Kg).

$Q$ [KJ]	$T_{sale}$ [°C]	$T_{prom}$ [°C]	tiempo [s]
0	110	110	0
0.366	113	111.5	2.51
0.733	116	113	5.02
1.099	119	114.5	7.53
1.466	122	116	10.04
1.832	125	117.5	12.55
2.199	128	119	15.06
2.565	131	120.5	17.57
2.932	134	122	20.08
3.298	137	123.5	22.59
3.664	140	125	25.10
4.031	143	126.5	27.61
4.397	146	128	30.12
4.764	149	129.5	32.63

Tabla N° 14: Temperatura en función del tiempo de residencia Zona 3Tornillo PV

Se deben tener en consideración los tiempos de residencia del polímero encada zona de la máquina para asegurar un correcto fundido y evitar reacciones desfavorables como la formación de una costra interna por “quemado” del material.

Para definir la temperatura promedio del polímero en esta Zona se presenta el valor  $T_{prom}$  en la tabla anterior

Como los tiempos de las etapas de alrededor de un minuto y el de esta última cercano al medio minuto (es la zona de menor longitud axial), es posible sincronizar el encendido de las resistencias, de forma tal de facilitarle al operador el control del proceso.

#### **2.2.3.4. Tornillo Universal. Etapa de Alimentación.**

La primera zona del Tornillo de Paso Variable es exactamente igual a la del Tornillo Universal, por lo que efectuar nuevamente los cálculos para esta sección sería una redundancia. La transferencia de calor al interior de la máquina es de  $146,54 W$  y el polímero se llega a  $110\text{ }^{\circ}C$  si se mantiene en esta sección por un tiempo de  $57,9$  segundos.

#### **2.2.3.5. Tornillo Universal. Etapa de Fusión.**

Para la Sección de Fusión del Tornillo Universal se presenta la transferencia de calor al exterior por convección libre idéntica a la calculada para el Tornillo de Paso Variable.

La diferencia entre el polímero que se encuentra en esta parte del equipo para este Tornillo comparándolo con el otro, radica en el estado físico en el cual se encuentra la sustancia de trabajo. La densidad del polietileno para esta parte Zona con

el Tornillo universal es considerablemente menor que la densidad cuando se usa el Paso Variable y el espacio ocupado es semejante, por lo que la masa contenida en esta Sección es  $39,4$  gramos ( $0,0394$  Kg).

De esta manera, al calcular el calor necesario para fundir  $39,4$  gramos de polímero es  $10,6$  KJ, lo cual se alcanza cuando el polímero permanece unos  $36,5$  segundos en esta etapa de la máquina. (E. 62)

#### **2.2.3.6. Tornillo Universal. Etapa de Dosificación**

Al igual que sucede en las otras Zonas del equipo, la pérdida de calor por convección natural al exterior del cilindro con el uso de este Tornillo es exactamente la misma que con el uso del Tornillo de Paso Variable. Es por esto que la tasa de flujo de calor útil es de  $145,99$  W, de los  $150$  W que produce la resistencia.

Si se opera la máquina en flujo permanente, la temperatura que alcanza el polímero a la salida del barril es  $112,24$  °C, debido a que la sustancia de trabajo cruza esta corta sección en apenas  $3,6$  giros del tornillo.

Entonces se plantea el calor requerido (E. 64) para elevar la temperatura de salida mediante y el tiempo de permanencia en la máquina mediante la siguiente tabla:

<i>Q [KJ]</i>	<i>T<sub>sale</sub> [°C]</i>	<i>T<sub>prom</sub> [°C]</i>	<i>tiempo [s]</i>
0	110	110	0
0.196	113	111.5	1.34
0.392	116	113	2.68
0.586	119	114.5	4.02
0.783	122	115	5.37
0.979	125	117.5	6.71
1.175	128	119	8.05
1.371	131	120.5	9.39
1.567	134	122	10.73
1.763	137	123.5	12.07
1.959	140	125	13.41
2.154	143	126.5	14.76
2.35	146	128	16.1
2.546	149	129.5	17.44

*Tabla N° 15: Temperatura en función del tiempo de residencia Zona 3Tornillo Universal*

Se aprecia con facilidad que el tiempo de estadía del polímero en esta Etapa del equipo cuando se usa el Tornillo Universal es mucho menor que cuando se usa el Paso Variable, debido a la cantidad de materia que circula por la máquina y al área de transferencia de calor más extensa.

Se tiene entonces, que para el Tornillo Universal, la secuencia de encendido de las resistencias es distinta a la que se debe aplicar cuando se use el otro Tornillo, debido a que el polímero espera casi un minuto en la Etapa de alimentación, luego unos 40 segundos mientras pasa al estado líquido y por último se toma 15 segundos para alcanzar una temperatura de 143 °C.

La temperatura promedio del polímero en esta Etapa con este Tornillo toma los valores de la columna de  $T_{prom}$  de la tabla anterior.

#### 2.2.4. Análisis de Esfuerzos y Cálculo de la Potencia Requerida.

Los tornillos diseñados presentan analogías estructurales respecto al existente. Numerosos parámetros dimensionales fueron conservados para el diseño y la construcción de las nuevas piezas. Sin embargo, se hace necesario comprobar que algunos de estos parámetros sea capaz de soportar las exigencias que presenta la máquina.

El espesor de la hélice de los tornillos se presenta con una magnitud de (4 milímetros), lo cual hace dudar de la capacidad de éste para soportar las cargas de funcionamiento de la unidad. Por esta razón se procede a analizar las cargas que interactúan con los filetes de los tornillos a diseñar.

En primer lugar se identifican las cargas aplicadas:

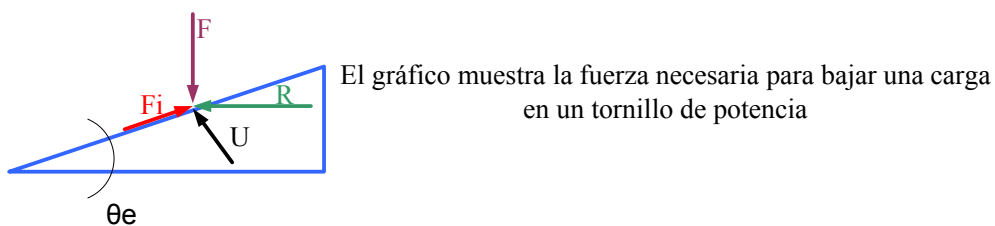


Figura N° 11: Diagrama de Cuerpo Libre

Donde

**R:** es la fuerza necesaria para mover la carga.

**F<sub>j</sub>:** se refiere a la fuerza de roce entre la carga y el Tornillo.

- F:** representa la suma de todas las fuerzas axiales que actúan sobre el área normal de la rosca.
- U:** es la fuerza normal que aplica la superficie del tornillo sobre la masa que se desea mover.

Asumiendo que el sistema está en equilibrio bajo la acción de las fuerzas con el objeto de determinar la carga P mínima:

Balance de fuerzas horizontales:

$$\sum F_H = -R - U \operatorname{sen} \theta e + F_j \cos \theta e = 0 \quad (\text{E. 65})$$

Balance de fuerzas verticales:

$$\sum F_V = F - F_j \operatorname{sen} \theta e - U \cos \theta e = 0 \quad (\text{E. 66})$$

Como  $F_j = f_s U$ , donde  $f_s$  es el símbolo del coeficiente de roce entre el polímero y el Tornillo, entonces se puede calcular  $R$  como

$$R = \frac{F(f_s \cos \theta e - \operatorname{sen} \theta e)}{\cos \theta e + f_s \cos \theta e} \quad (\text{E. 67})$$

y también  $U$ :

$$U = \frac{F}{f_s \operatorname{sen} \theta e + \cos \theta e} \quad (\text{E. 68})$$

ahora se deben definir las variables involucradas:

$$F = \iint dP dA_{(filete)} + g \int dm + \int \tau_{yz} dA_{(alma)} \approx \int \Delta P dA + g \int V d\rho + \int \tau_{yz} dA_{(alma)} \quad (\text{E. 69})$$

$$\Rightarrow F \approx \sum_{i=1}^3 (\Delta P A_{filete})_i + g \sum_{k=1}^3 (V \rho)_k + \sum_{n=1}^3 (\tau_{yz} A_{alma})_n \quad (\text{E. 70})$$

En esta ecuación el primer término representa la fuerza ocasionada por la compresión del polímero; el segundo, el peso de la masa del polímero y el último, los efectos viscosos provocados por el movimiento del polímero sobre el alma del tornillo.

Ahora, partiendo de la base de diseño 23.

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} + \tau_0 \quad (\text{E. 71})$$

En donde el aporte de  $\tau_0$  se considera despreciable.

En este momento se considerará el cálculo para el Tornillo de Paso Variable, ya que éste es el que genera condiciones de presión más altas que la de el de Paso Constante y Sección Fija, constituyendo así el caso más desfavorable a analizar, lo que genera la hipótesis de que si el de paso variable no falla, el de Sección Fija y Paso Constante tampoco fallará.



Antes de proseguir se debe acotar que las viscosidades son función de la temperatura de operación y los valores para cada zona son:

$$\mu_1 \approx 689,47 \text{ Pa s}$$

$$\mu_2 \approx 482,629 \text{ Pa s}$$

$$\mu_3 \approx 413,682 \text{ Pa s}$$

Además, se considera  $y = H$  y la velocidad promedio en cada zona.

Ahora bien, para el Tornillo de Paso Variable se tiene que:

$$\tau_{y1} \approx 1229 \text{ Pa}$$

$$\tau_{yz2} \approx 9340 \text{ Pa}$$

$$\tau_{yz3} \approx 736 \text{ Pa}$$

Y para el Universal:

$$\tau_{y1} \approx 1229 \text{ Pa}$$

$$\tau_{yz2} \approx 870 \text{ Pa}$$

$$\tau_{yz3} \approx 721 \text{ Pa}$$

Se debe recordar que los subíndices 1, 2 y 3 se refieren a las zonas (secciones) de Alimentación, Fusión y Dosificación de los tornillos, respectivamente.

A continuación se presenta una tabla de datos en la cual las filas señalan las zonas del tornillo y las columnas denotan de izquierda a derecha lo siguiente:

- Sección del tornillo.
- Área superficial del filete.
- Área superficial del alma del tornillo.
- Variación de presión.
- Volumen de polímero dentro de la máquina
- Densidad promedio del polímero en la máquina.

Tornillo de Paso Variable:

<b>Sección</b>	<b><i>A</i> (filete) [cm<sup>2</sup>]</b>	<b><i>A</i> (alma) [cm<sup>2</sup>]</b>	<b><math>\Delta P</math> [Pa]</b>	<b><i>V</i> [cm<sup>3</sup>]</b>	<b><math>\rho</math> [Kg/m<sup>3</sup>]</b>
<b>1</b>	24,18	49,81	$2,19 \times 10^{-2}$	40,9	918
<b>2</b>	53,08	94,95	$1,908 \times 10^6$	40,3	2099
<b>3</b>	42,8	77,67	$1,25 \times 10^6$	15,3	3281

Tabla N°16: Variables para el cálculo de fuerzas del Tornillo PV

Tornillo Universal:

<b>sección</b>	<b><i>A</i> (filete) [cm<sup>2</sup>]</b>	<b><i>A</i> (alma) [cm<sup>2</sup>]</b>	<b><math>\Delta P</math> [Pa]</b>	<b><i>V</i> [cm<sup>3</sup>]</b>	<b><math>\rho</math> [Kg/m<sup>3</sup>]</b>
<b>1</b>	24,18	49,81	$2,19 \times 10^{-2}$	40,9	918
<b>2</b>	27,4	56,44	$233 \times 10^3$	46,4	1805
<b>3</b>	14,8	30,54	$75 \times 10^4$	25,1	2693

Tabla N° 17: Variables para el cálculo de fuerzas del Tornillo Universal

Luego, se puede calcular la fuerza  $F$  para el Tornillo de Paso Variable como

$$F1 = 6,51 N$$

$$F2 = 1,01 \times 10^4 N$$

$$F3 = 5,36 \times 10^6 N$$

Análogamente, para el Tornillo Universal:

$$F1 = 6,51 N$$

$$F2 = 6,44 \times 10^2 N$$

$$F3 = 1,12 \times 10^3 N$$

En este momento se procede a calcular la fuerza  $R$  y la reacción  $N$ .  
Previamente se determinan los siguientes datos del Tornillo de Paso Variable:

<b><math>L1 =</math></b>	0,025	<i>m</i>	25	<i>mm</i>	<b><math>\theta e 1 =</math></b>	17,66	$^{\circ}$
<b><math>L2 =</math></b>	0,01503	<i>m</i>	15,03	<i>mm</i>	<b><math>\theta e 2 =</math></b>	10,83	$^{\circ}$
<b><math>L3 =</math></b>	0,009982	<i>m</i>	99.82	<i>mm</i>	<b><math>\theta e 3 =</math></b>	7,24	$^{\circ}$
<b><math>Dm =</math></b>	0,019	<i>m</i>	19	<i>mm</i>	<b><math>fs =</math></b>	0.5	

Tabla N° 18: Pasos y ángulos del Tornillo PV

Y para el Tornillo Universal se mantienen las condiciones de la sección 1 (Alimentación) para toda la extensión de la de la máquina.

En la tabla anterior,  $L$  se refiere al paso en cada zona;  $Dm$ , al diámetro medio del filete;  $\theta$ , al ángulo del filete y  $fs$ , al coeficiente de roce entre el Tornillo y el polímero. Las unidades de las dimensiones longitudinales están en metros; los ángulos, en grados y el factor de fricción es adimensional.

De allí se obtiene para el Paso Variable:

<b><i>R1</i></b> =	<i>0,79</i>	<i>N</i>	<b><i>U1</i></b> =	<i>5,9</i>	<i>N</i>
<b><i>R2</i></b> =	<i>2085</i>	<i>N</i>	<b><i>U2</i></b> =	<i>9421</i>	<i>N</i>
<b><i>R3</i></b> =	<i>1332</i>	<i>N</i>	<b><i>U3</i></b> =	<i>5080</i>	<i>N</i>

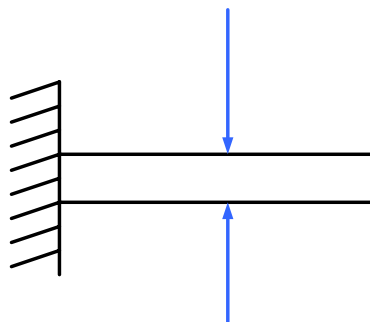
*Tabla N° 19: Fuerzas R y U para el Tornillo PV*

Y para el Universal:

<b><i>R1</i></b> =	<i>0,79</i>	<i>N</i>	<b><i>U1</i></b> =	<i>5,9</i>	<i>N</i>
<b><i>R2</i></b> =	<i>78,7</i>	<i>N</i>	<b><i>U2</i></b> =	<i>5835,3</i>	<i>N</i>
<b><i>R3</i></b> =	<i>136,3</i>	<i>N</i>	<b><i>U3</i></b> =	<i>1009,7</i>	<i>N</i>

*Tabla N° 20: Fuerzas R y U para el Tornillo Universal*

Una vez calculadas estas fuerzas se procede al análisis del filete como sólido susceptible a la fractura. Para lograr este fin, se debe modelar el filete como una viga empotrada en voladizo de longitud  $H$  sometida a cargas uniformemente distribuidas a lo largo de su extensión.



*Figura N° 12: Analogía del filete a una viga empotrada*

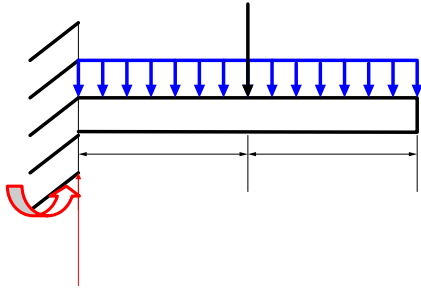


Figura N° 13: Carga distribuida

$$\sum F_v = U - Ev = 0 \Rightarrow U = Ev \quad (\text{E. 72})$$

$$\sum M_E = M - U \frac{H}{2} = 0 \Rightarrow M = \frac{UH}{2} \quad (\text{E. 73})$$

Ahora se procede a calcular las reacciones presentes en el empotramiento de la hélice y a realizar los diagramas de Fuerza Cortante y Momento flector con el objeto de determinar la ubicación de la zona crítica propensa a fallar.

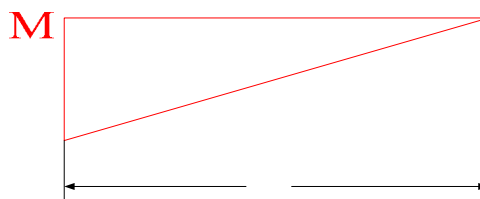


Figura N° 14: Diagrama de Fuerza Cortante

$$V(x) = -\left(\frac{U}{H}\right)(H - x) \quad (\text{E. 74})$$

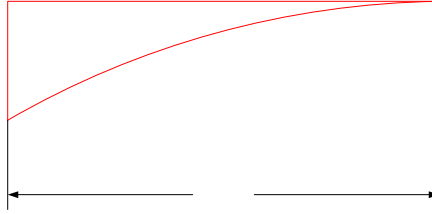


Figura N° 15: Diagrama de Momento Flector

$$M\langle x \rangle = -\left(\frac{U}{H}\right) \frac{\langle H-x \rangle^2}{2} \quad (\text{E. 75})$$

De todo esto se deduce que el punto crítico está en el empotramiento.

$$V(0) = -U \quad M(0) = -UH/2$$

**-NH/2**

Se determina el esfuerzo provocado por flexión como:

$$\sigma = \frac{M \frac{e}{2}}{I} = \frac{U \frac{H^2}{2} \frac{e}{2}}{\frac{\text{long}^3 e}{12}} = 3 \frac{UH}{\text{long}^3} \quad (\text{E. 76})$$

Aplicando la fórmula para el Paso Variable se obtiene la siguiente tabla:

$\sigma 1 =$	52,6	Pa
$\sigma 2 =$	92103,4	Pa
$\sigma 3 =$	51186,8	Pa

Tabla N° 21: Esfuerzos es los filetes de cada zona del Tornillo PV

Ocurre algo similar con el Universal:

$\sigma_1 =$	157,8	Pa
$\sigma_2 =$	15639,9	Pa
$\sigma_3 =$	27071,7	Pa

Tabla N° 22: Esfuerzos en los filetes de cada zona del Tornillo Universal

De esta forma se considera la Zona de Fusión del Tornillo Universal como la crítica y se toma el esfuerzo en esta sección para determinar si la pieza falla o no.

Dado que la pieza está construida en acero al carbón AISI 1060, se tomará como esfuerzo permisible  $372 \text{ MPa}$  ( $3,72 \times 10^8 \text{ Pa}$ ) [12], valor que corresponde al límite de fluencia para el 1060 recocido. Aún cuando se estima que el material es normalizado, se asume recocido por ser ésta la condición más desfavorable.

Con el objeto de verificar si el tornillo ha de ceder o no, se plantean distintas teorías de fallas, asumiendo que la sollicitación para la pieza en cuestión puede ser clasificada como una carga dinámica constante.

#### 2.2.4.1. Teoría del Esfuerzo Normal Máximo

Al aplicar esta teoría se busca que el esfuerzo provocado por las cargas aplicadas sea menor que el valor de resistencia del material. El factor de seguridad sería el cociente de la resistencia entre la exigencia:

$$\text{Resistencia } (S_y) = 372.000 \text{ KPa}$$

$$\text{Esfuerzo} = 15,639 \text{ KPa}$$

Como la resistencia es mayor que la sollicitación, se concluye que se cumple la teoría y que el factor de seguridad es de 23.787, lo que quiere decir que la pieza soporta cargas 23.787 veces mayor a la solicitada.

#### 2.2.4.2. Teoría del Esfuerzo Cortante Máximo

Cuando se aplica esta teoría, lo que se plantea es que toda falla ocurre cuando las sollicitaciones alcanzan un esfuerzo de corte que sobrepasa la resistencia del material ( $S_y$ ).

Si se asume que el esfuerzo calculado no es normal, sino cortante, se plantea que:

$$\frac{\tau_2}{\tau} \leq \tau_{\text{BFT}} \quad (\text{E. 77})$$

Considerando los valores anteriormente definidos, se concluye que la pieza si cumple con la teoría y se define el factor de seguridad como el cociente de la resistencia del material entre dos veces el esfuerzo de corte máximo. El resultado numérico de este factor de seguridad es de 11.893.

Al considerar teorías como las de Energías Deformantes o la de Fricción Interna, los valores del factor de seguridad se encuentran por el mismo orden de  $10^4$ , lo que asegura que la pieza no fallará.

Aplicarle la teoría de fallas al alma de cada tornillo implicaría el resultado de condiciones aún más favorables que las estudiadas en el filete ya que la sección del alma es mucho mayor que la de la hélice. Por lo tanto, este cálculo se omite.



Las posibles vibraciones que pueda presentar la máquina se ven minimizadas por el efecto amortiguador que se genera al sumergir el tornillo en el fluido de trabajo. Es por esta razón que este cálculo también se omite.

### 2.2.4.3. Potencia Requerida

El autor [1] propone una ecuación para cuantificar la cantidad de potencia que consume la unidad. Esta expresión es función de las fuerzas de empuje de material, las fuerzas viscosas y del efecto de la compresión del fluido provocado por la máquina.

La expresión en cuestión se aplica para cada etapa de la unidad, ya que cada una de estas zonas presenta características propias, cuyas variaciones presentan una gran influencia en el resultado final.

$$\delta(Pot) = \frac{\pi^3 D^3 N^2 \mu}{H} \delta\lambda + \frac{Q}{\cos^2 \theta} \delta P + \frac{\pi^2 D^2 N^2 \mu e}{\delta \tan \theta} \delta\lambda$$

(E. 78)

Al integrar los diferenciales usando como condiciones de borde los límites físicos de cada etapa de la máquina, queda la expresión:

$$Pot_i = \left( \frac{\pi^3 D^3 N^2 \mu}{H} L \right)_i + \left( \frac{Q}{\cos^2 \theta} \Delta P \right)_i + \left( \frac{\pi^2 D^2 N^2 \mu e}{\delta \tan \theta} L \right)_i$$

(E. 79)

Esta expresión se debe aplicar para cada sección, por ello el subíndice “i”, que indica que se utiliza para cada etapa definida.

Al sustituir las variables anteriormente definidas para esta expresión se presenta el siguiente resultado para el Tornillo de Paso Variable:

<b><i>Potencia en la Zona de Alimentación</i></b>	<i>49 W</i>
<b><i>Potencia en la Zona de Fusión</i></b>	<i>58,7 W</i>
<b><i>Potencia en la Zona de Dosificación</i></b>	<i>34,9 W</i>

*Tabla N° 23: Potencia en cada etapa del Tornillo PV*

Y para el Tornillo Universal:

<b><i>Potencia en la Zona de Alimentación</i></b>	<i>49 W</i>
<b><i>Potencia en la Zona de Fusión</i></b>	<i>19,7 W</i>
<b><i>Potencia en la Zona de Dosificación</i></b>	<i>21,1 W</i>

*Tabla N° 24: Potencia en cada etapa para el Tornillo Universal*

Estos resultados implican que la potencia total consumida por la máquina cuando utilice el Tornillo de Vaso Variable será de *142,6 W* y de *89,4 W* cuando esté montado el Tornillo Universal. Por lo tanto, se considerará el caso más desfavorable, es decir, el del Paso Variable.

Si se considera un factor de seguridad que prevenga picos de consumo de potencia en momentos en que ocurra fusión por fricción provocada por partículas sólidas que queden atrapadas entre la corona del filete y el barril y el efecto de fusión se provoque más por la cizalladura que por la transferencia de calor.

El valor del factor seleccionado es de 2,5. La razón por la cual se selecciona este valor es el de estandarizar a un valor comercial de un motor  $\frac{1}{2}$  HP de potencia con el objeto de lograr otorgarle la potencia necesaria para ejecutar el procedimiento

deseado y soportar las posibles fluctuaciones debidas al carácter elástico del fluido de trabajo.

## **CAPÍTULO 3: PLANOS**

**3.1. Tornillo de Paso Variable**

**3.2. Tornillo de Paso Constante**

**3.3. Molde**

**3.4. Bridas**

**3.5. Acople**

**3.6. Dispositivo para Limpieza del Barril**

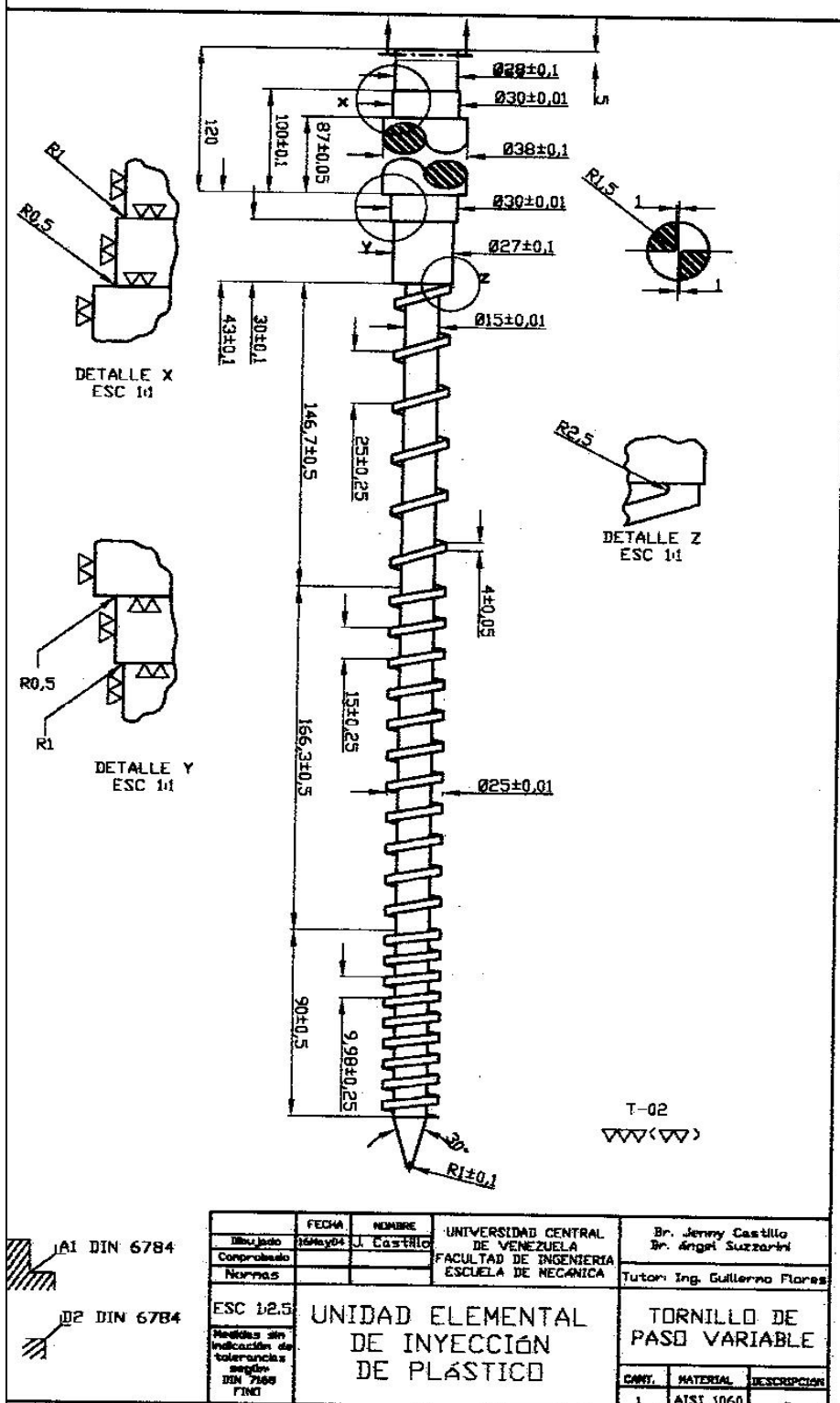
**3.7. Dispositivo para Limpieza del Molde**

**3.8. Árbol 2**

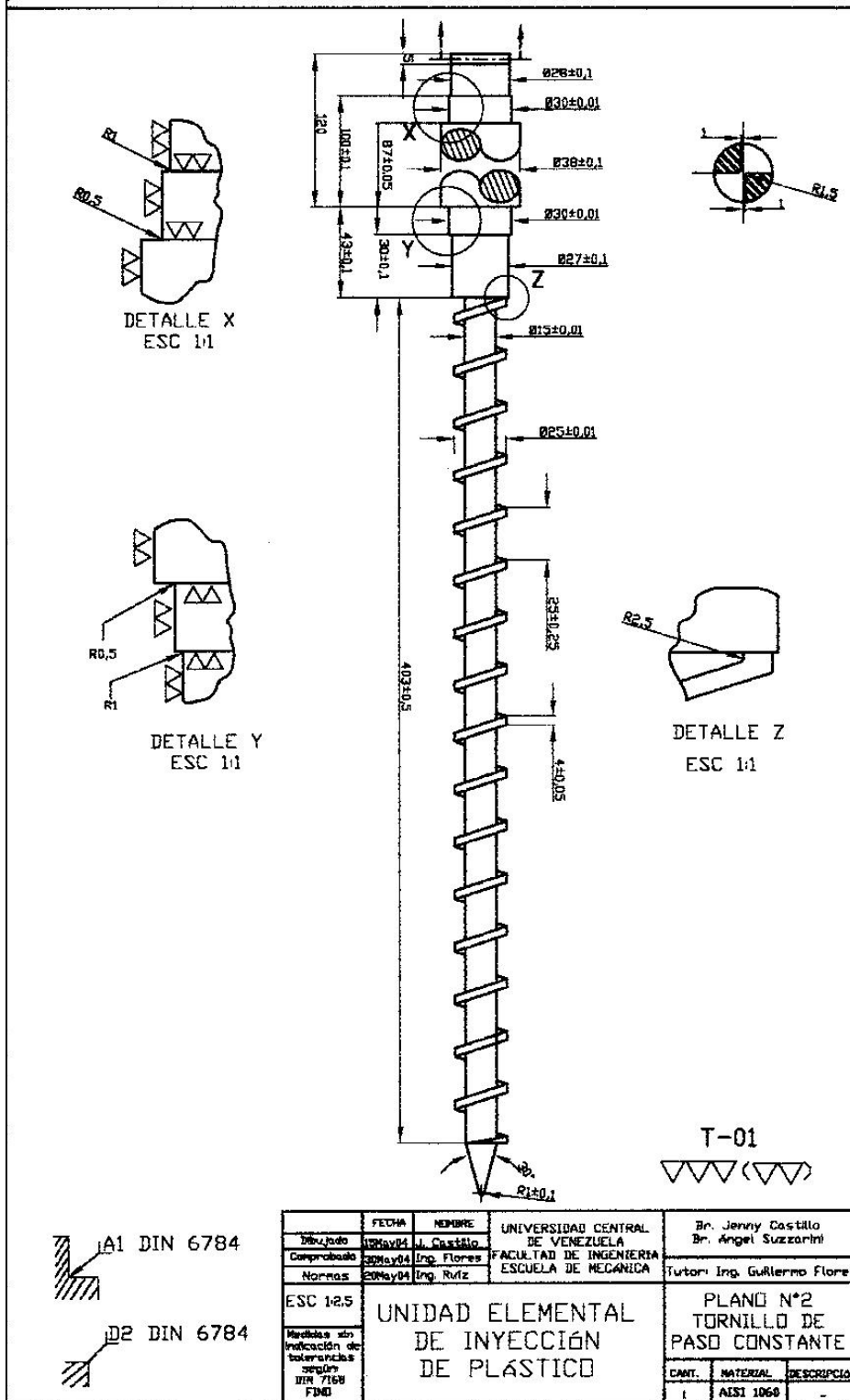
**3.9. Árbol 3**

**3.10. Placa – Bocina**

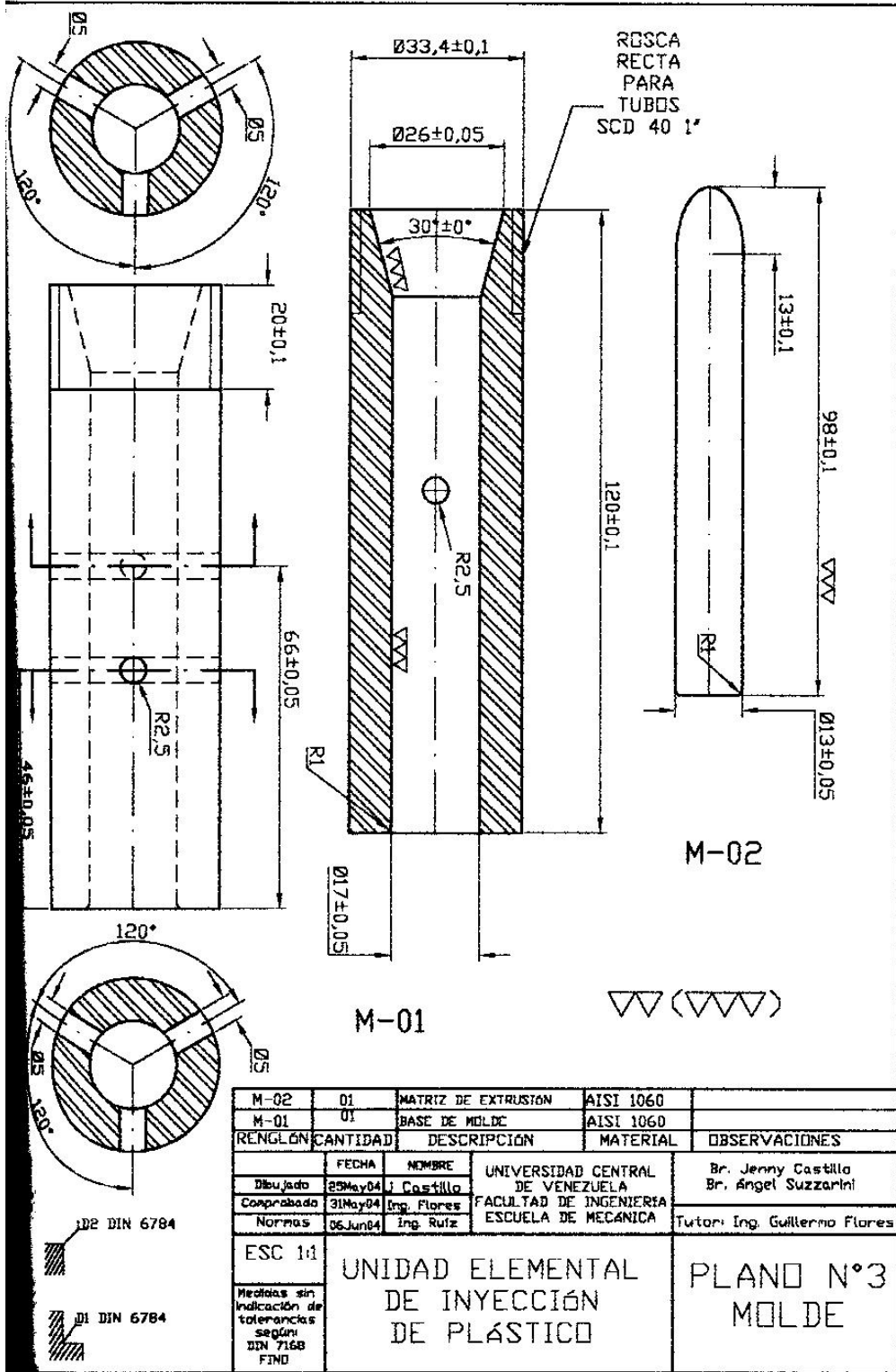
**3.11. Apoyo**



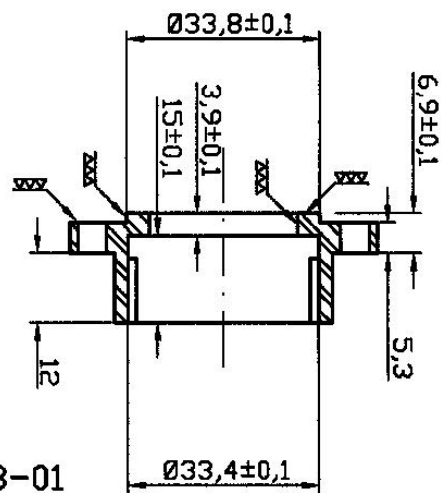
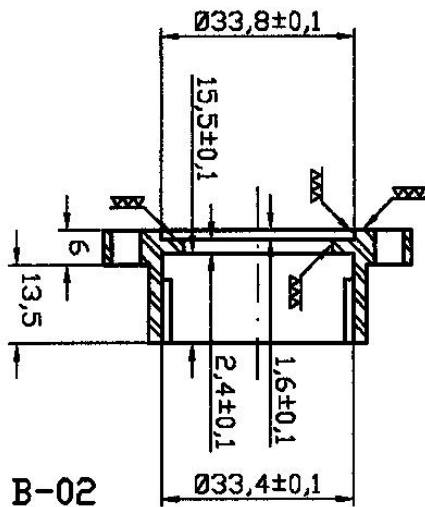
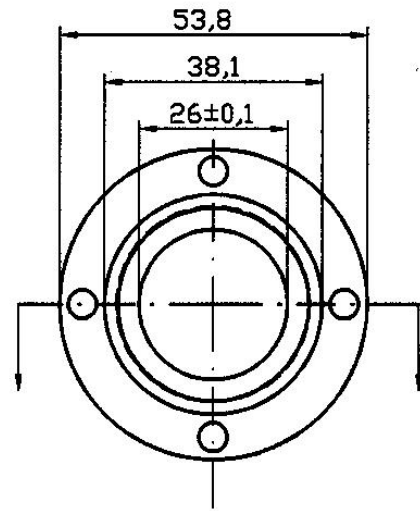
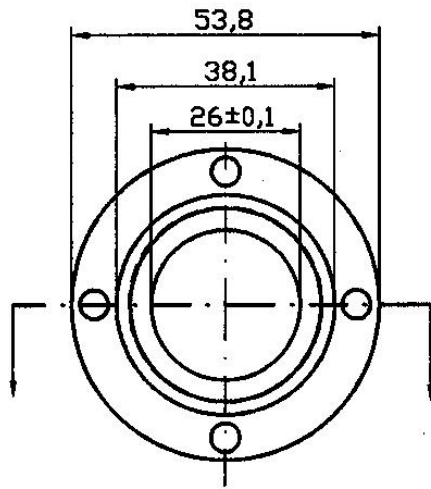
Dibujo Comprobado Normas	FECHA 16May04	NOMBRE J. CASTRICO	UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA FACULTAD DE INGENIERIA ESCUELA DE MECANICA	Br. Jenny Castillo Br. Angel Suzzarini Tutor: Ing. Guillermo Flores
ESC 1:2.5 Revistas sin indicación de tolerancias según DIN 7160 FINI	<b>UNIDAD ELEMENTAL          DE INYECCIÓN          DE PLÁSTICO</b>			<b>TORNILLO DE          PASO VARIABLE</b>
	CANT.	MATERIAL	DESCRIPCIÓN	
	1	AIISI 1060	-	



	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA	Bn. Jenny Castillo Bn. Angel Suzzarini
	Dibujado	17May04	J. Castillo	FACULTAD DE INGENIERIA
	Comprobado	22May04	Ing. Flores	ESCUOLA DE MECANICA
	Normas	22May04	Ing. Ruiz	Tutor: Ing. Guillermo Flores
ESC 1:2.5	UNIDAD ELEMENTAL DE INYECCION DE PLASTICO			PLANO N°2 TORNILLO DE PASO CONSTANTE
Medidas sin tolerancias según IIR 7168 FMO	CANT.	MATERIAL	DESCRIPCION	
	1	ALSI 1060	-	



M-02	01	MATRIZ DE EXTRUSIÓN	AISI 1060	
M-01	01	BASE DE MOLDE	AISI 1060	
RENGLÓN	CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	MATERIAL	OBSERVACIONES
	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA	
	25May04	J. Castillo	FACULTAD DE INGENIERIA	
	31May04	Ing. Flores	ESCUELA DE MECANICA	
	06Jun04	Ing. Ruiz	Tutor: Ing. Guillermo Flores	
ESC 1d	UNIDAD ELEMENTAL DE INYECCIÓN DE PLÁSTICO			PLANO N°3 MOLDE
Medidas sin indicación de tolerancias según DIN 7168 FINO				



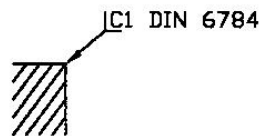
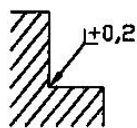
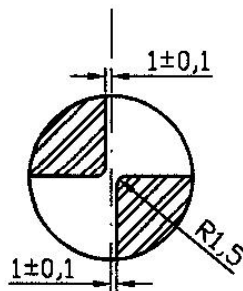
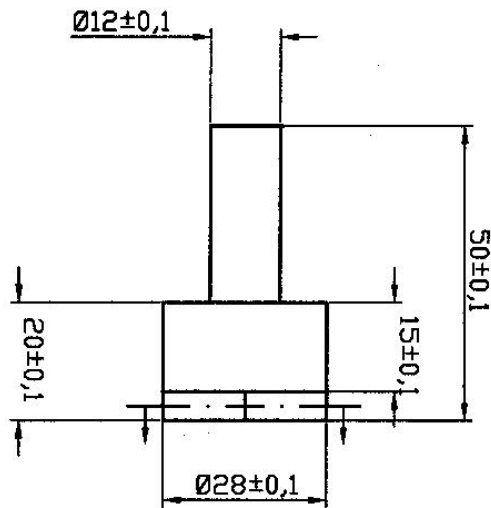
∇ (∇∇)

A1 DIN 6784

B2 DIN 6784

RENGLON	CANT.	DESCRIPCIÓN	MATERIAL	OBSERVACIONES
B-02	01	BRIDA DEL MOLDE	AISI 1045	
B-01	01	BRIDA DEL BARRIL	AISI 1045	
	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA	
	15.Jun04	J. Castillo	FACULTAD DE INGENIERIA	
	20.Jun04	Ing. Flores	ESCUELA DE MECANICA	
	NORMAS	Ing. Ruiz	Tutor: Ing. Guillermo Flores	
ESC1:1	UNIDAD ELEMENTAL DE INYECCIÓN DE PLÁSTICO			PLANO N°4 BRIDAS
Medidas sin indicación de tolerancias según DIN 7168 FINO				

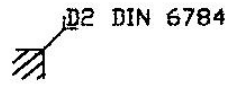
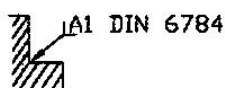
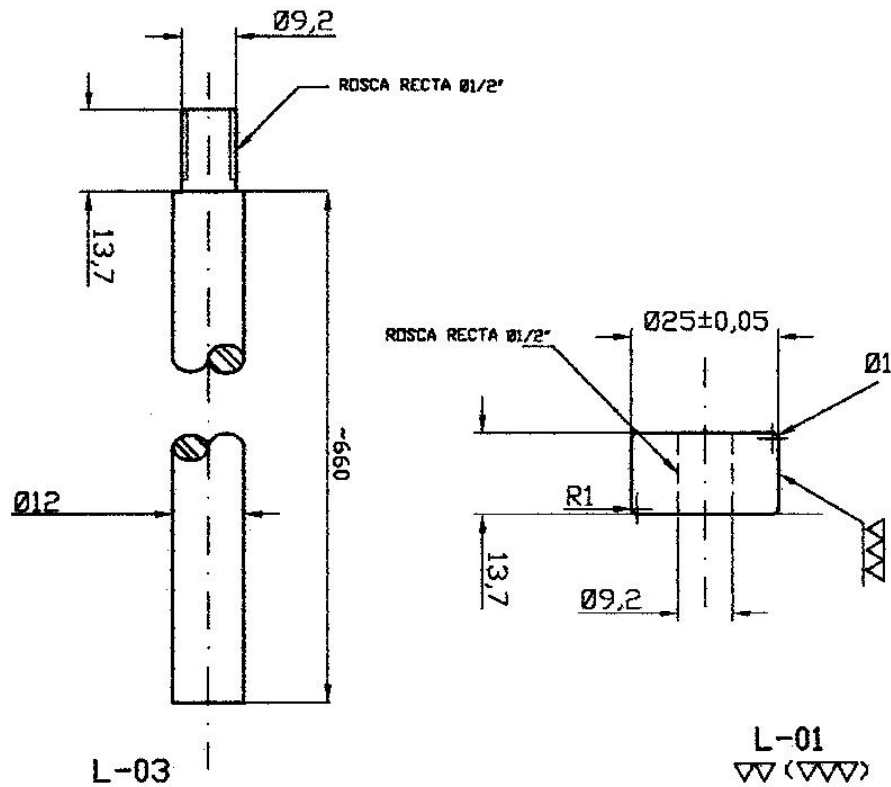




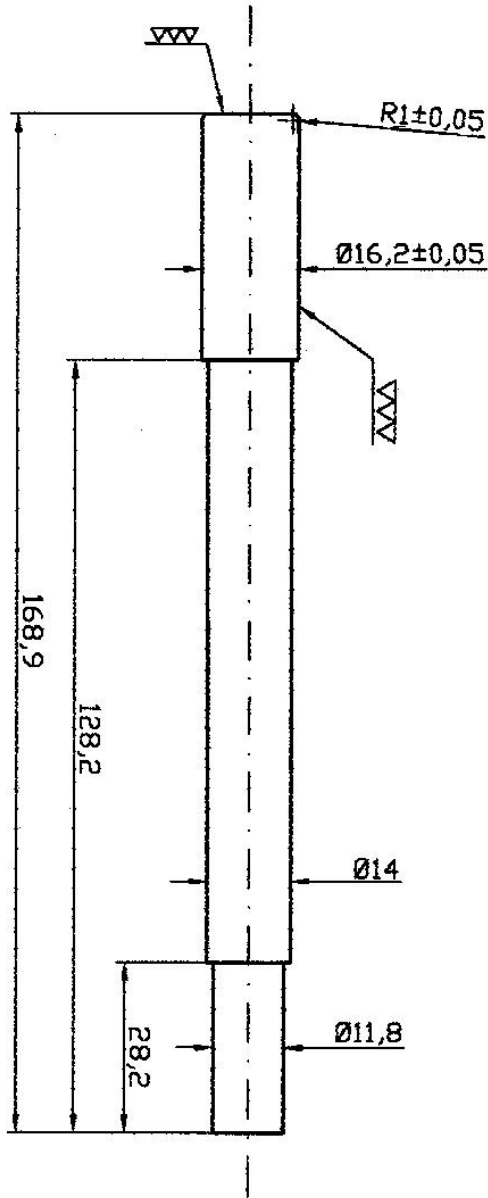
P-01



	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA	Br. Jenny Castillo Br. Angel Suzzarini
Dibujado	28May04	J.Castillo	FACULTAD DE INGENIERIA	
Comprobado	20Jun04	Ing.Flores	ESCUELA DE MECANICA	Tutor: Ing. Guillermo Flores
Normas	22Jun04	Ing.L.Rufz		
ESC 1:1	UNIDAD ELEMENTAL DE INYECCIÓN DE PLÁSTICO			ACOPLE
Medidas sin indicación de tolerancias según DIN 7168 FINO				
	CANT.	MATERIAL	DESCRIPCIÓN	
	1	AIISI 1060	-	



L-03	01	MANGO DEL LIMPIADOR	ALISI 1045	-
L-01	01	LIMPIADOR	ALUMINIO	-
REGLÓN	CANT.	DESCRIPCIÓN	MATERIAL	OBSERVACIONES
	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA FACULTAD DE INGENIERIA ESCUELA DE MECANICA	Br. Jenny Castillo Br. Ángel Suzzarini Tutor: Ing. Guillerma Flores
Dibujado	23 Jun 04	J. Castric		
Comprobado	04 Jul 04	Ing. Flores		
Normas	07 Jul 04	Ing. Ruiz		
ESC 1:1	UNIDAD ELEMENTAL DE INYECCIÓN DE PLÁSTICO			PLANO N°6 DISPOSITIVO PARA LIMPIEZA DEL BARRIL
Medidas sin indicación de tolerancias según DIN 7168 FINO				



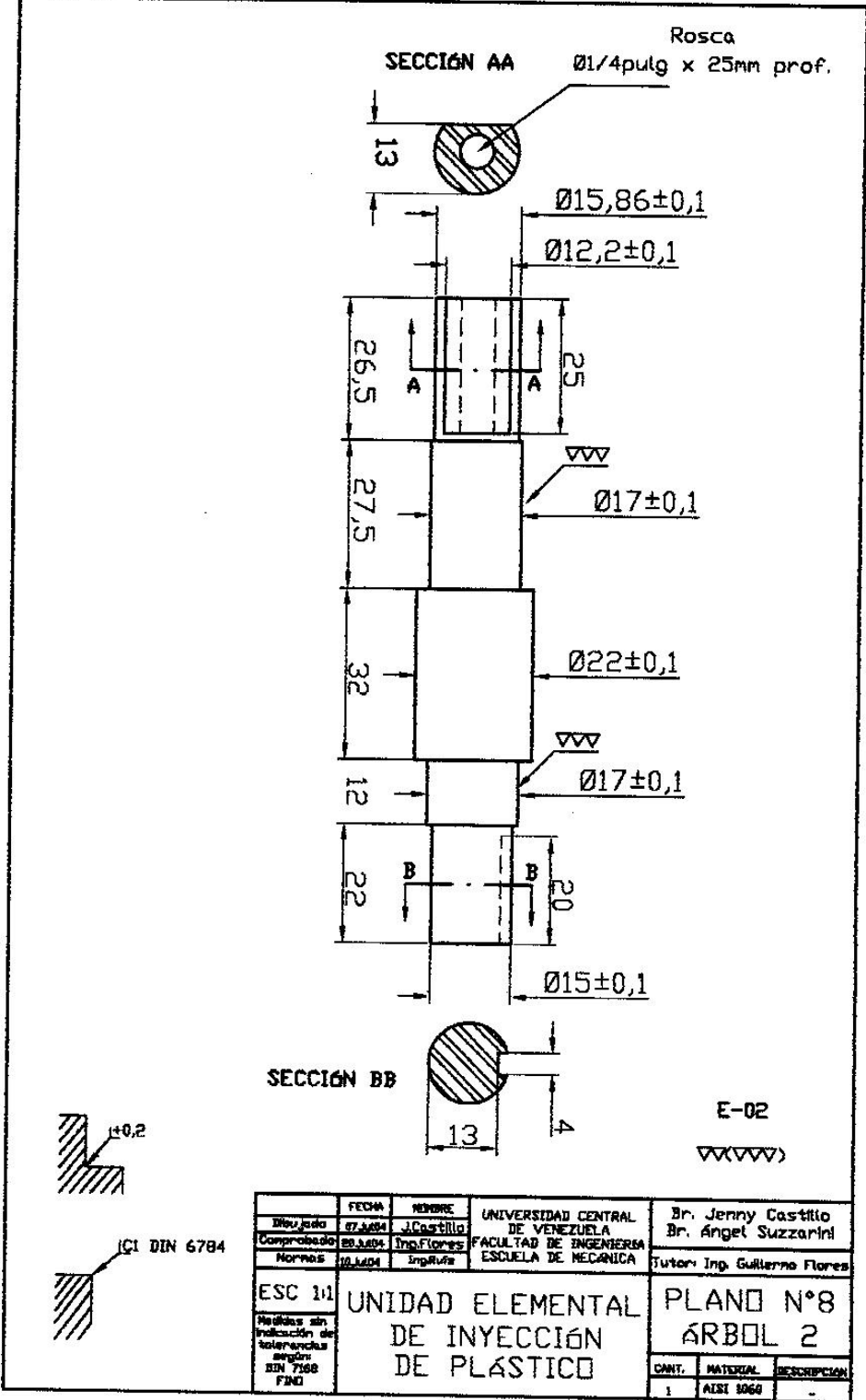
L-02

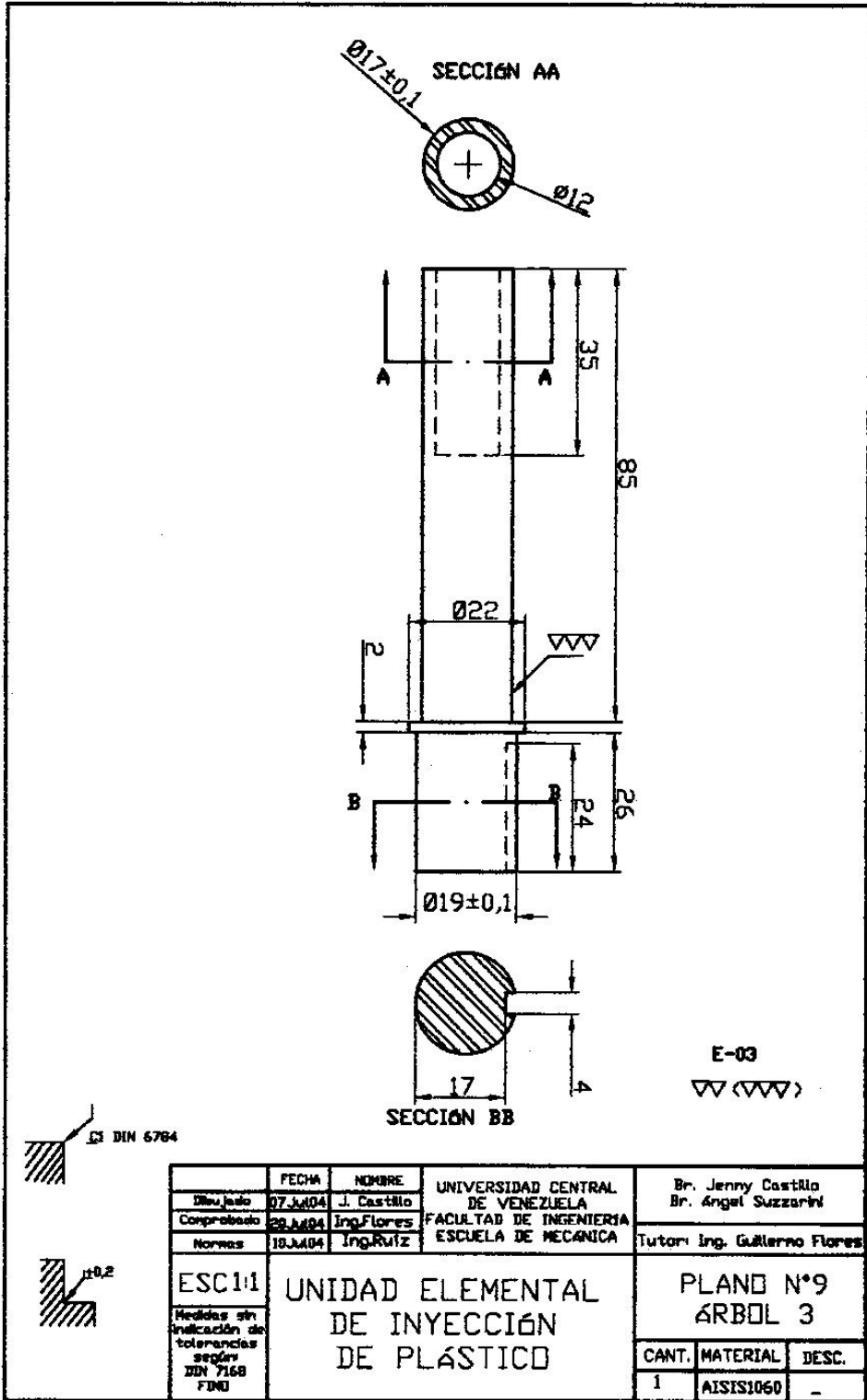
▽ (▽▽)

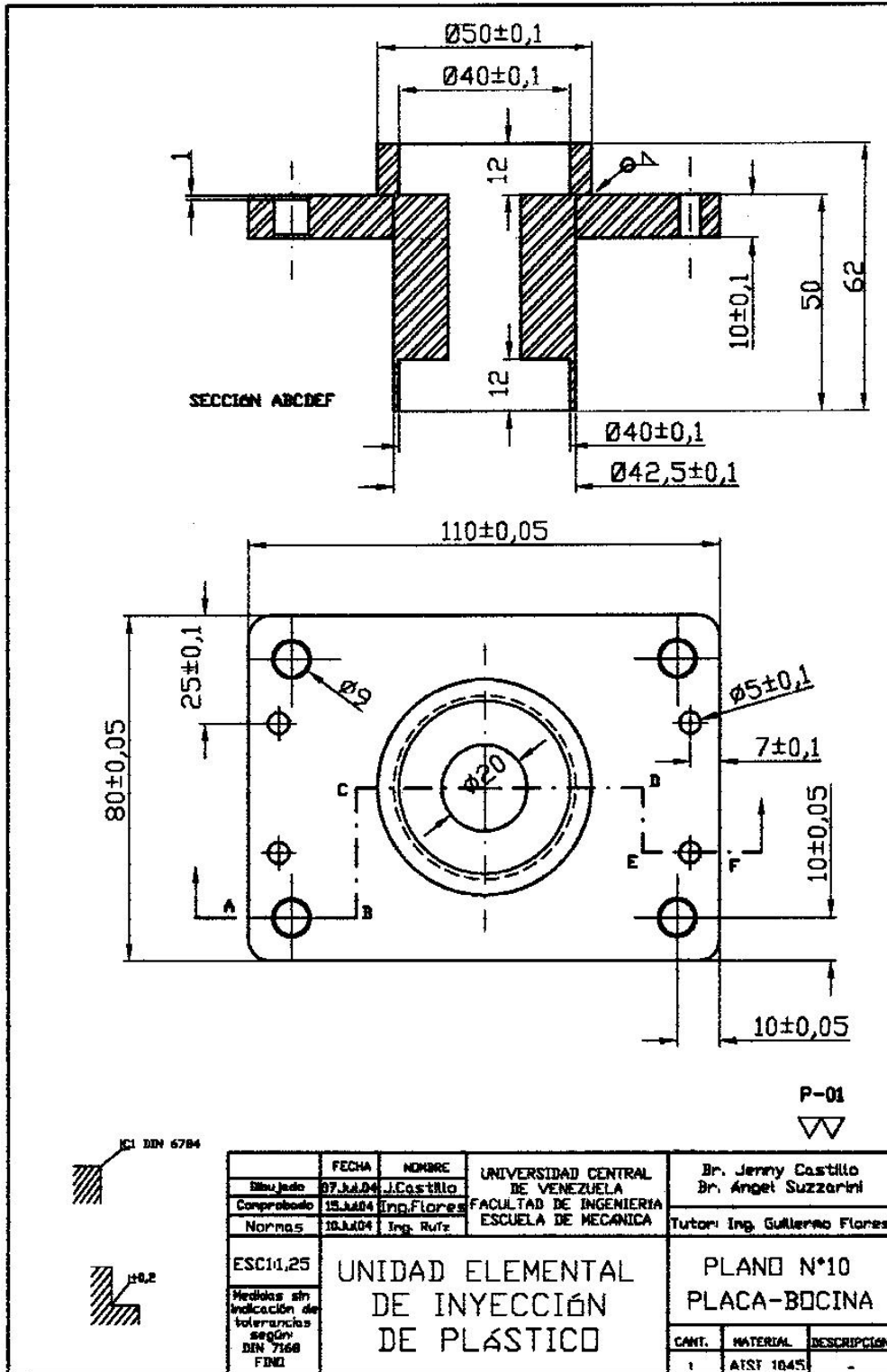
A1 DIN 6784

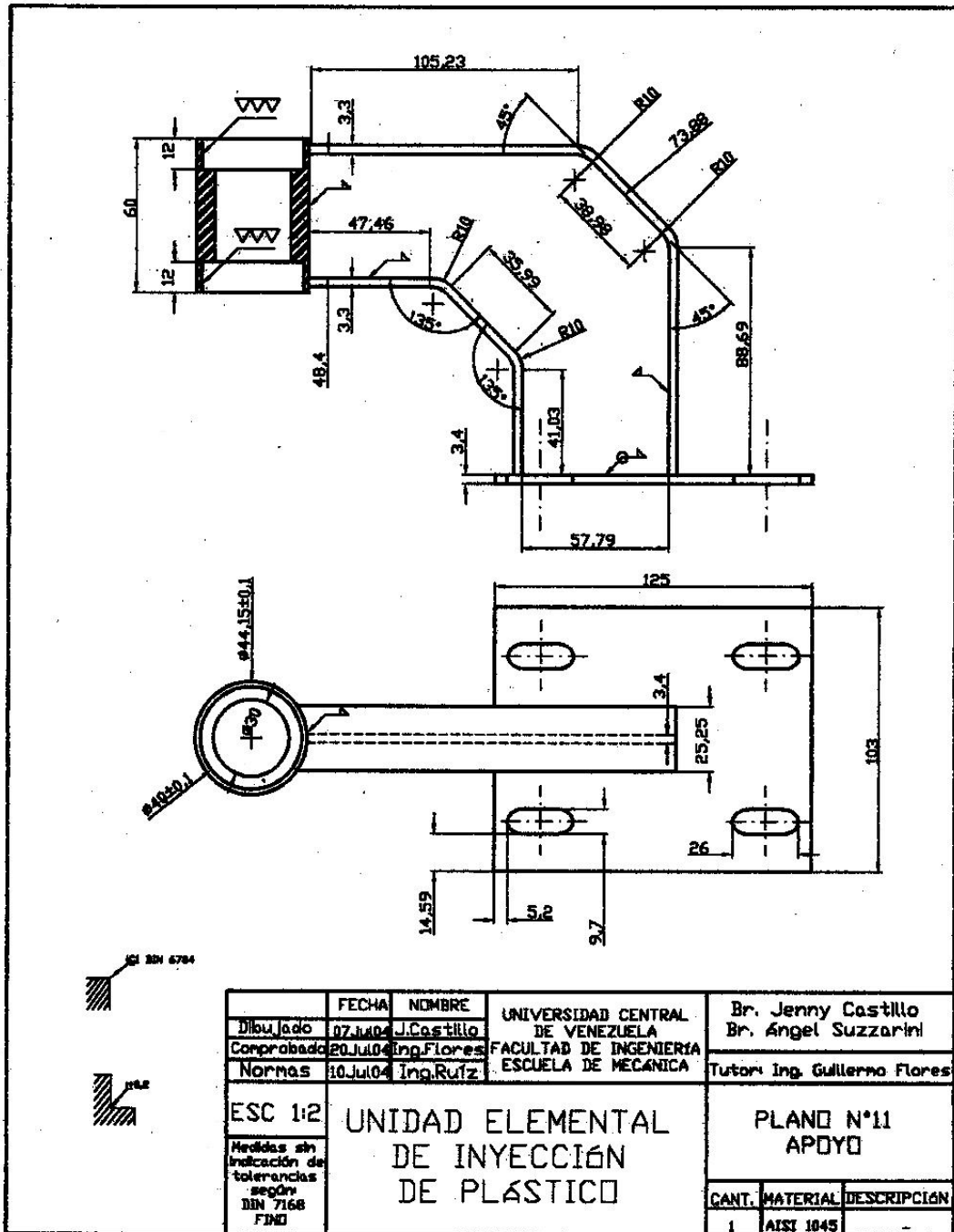
D2 DIN 6784

	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA	Dr. Jenny Castillo Dr. Angel Suzzarri
Dibujado	28.04.04	J. Castillo	FACULTAD DE INGENIERIA	
Comprobado	04.05.04	Ing. Flores	ESCUELA DE MECANICA	Tutor: Ing. Guillermo Flores
Normas	07.10.04	Ing. Ruiz		
ESC11	UNIDAD ELEMENTAL DE INYECCION DE PLASTICO		PLANO N°7 DISPOSITIVO PARA LIMPIEZA DEL MOLDE	
Realizado sin verificación de tolerancias según BDN 7168 FINO			CANT.	MATERIAL
			01	ALUMINIO
				OBS.
				-









	FECHA	NOMBRE	UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA	Br. Jenny Castillo
Dibujado	07.11.04	J.Castillo	FACULTAD DE INGENIERIA	Br. Angel Suzzarini
Comprobado	20.11.04	Ing.Flores	ESCUELA DE MECANICA	Tutor: Ing. Guillermo Flores
Normas	10.Jul.04	Ing.Ruiz		
ESC 1:2	UNIDAD ELEMENTAL DE INYECCION DE PLASTICO			PLANO N°11 APOYO
Medidas sin indicación de tolerancias según DIN 7168 FINO				
	CANT.	MATERIAL	DESCRIPCIÓN	
	1	AISI 1045	-	

**3.1.2. Fotos de las piezas**



*Figura N° 16: Tornillo Universal y Tornillo de Paso Variable*



*Figura N° 17 (izquierda): Molde. Figura N° 18 (derecha): Molde con el torpedo instalado.*





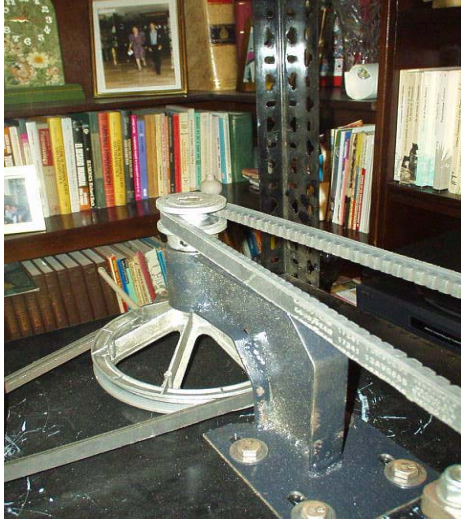
*Figura N° 19 (izquierda): Bridas. Figura N° 20 (derecha): Torpedo*



*Figura N° 21: Acople*



*Figura N° 22: Dispositivos Limpiadores*



*Figura N° 23 (izquierda): Árbol 2 y apoyo. Figura N° 24 (derecha): Árbol 3 y placa – bocina*

## **CAPÍTULO 4: PRUEBAS DEL EQUIPO.**

### **4.1. Procedimiento Experimental**

Inicialmente, el Tornillo de Sección Variable se encontraba en el barril, lleno de PEBD en sus tres zonas, ya que así se dejó la última vez que se utilizó.

#### **4.1.1. Pruebas 0.**

Antes de instalar el motor eléctrico y la transmisión mecánica se realizan dos pruebas catalogadas por los autores como Pruebas Cero. Para ello fue necesario encender las resistencias eléctricas un tiempo prudencial antes de iniciar la operación con el objeto de fundir el polímero contenido en el barril: en primer lugar se encendieron las resistencias 1 y 4 y a los 10 minutos la 2 – 3, esperando de nuevo otros 10 minutos para iniciar la operación.

En esta prueba el taladro sólo logró permanecer encendido poco más de 60 segundos antes de ser detenido por los operadores al juzgar que el torque proporcionado es insuficiente para operar el equipo, hecho evidenciado en el sobrecalentamiento del motor eléctrico.

Una segunda y última Prueba 0 consistió en accionar manualmente la máquina mediante el ajuste de una dado al acople y una palanca al dado. Se intentó hacer girar el tornillo a una velocidad cercana a los recomendados 25 rpm, con el molde unido al barril. El resultado fue una operación continua sin salida de material por el extremo del molde durante unos 20 minutos, por lo que se decidió retirar el torpedo.

A los 10 minutos de haber retirado el torpedo se logró producir una masa deforme de unos *35 gramos* y *25 cm<sup>3</sup>*.

En la realización de estas pruebas se pudo constatar que encendiendo las resistencias mediante los intervalos de tiempo especificados garantizan temperaturas cercanas a las de diseño en el barril, lo que implica que el polímero en su interior también se encuentre a una temperatura acorde y en un estado termodinámico de fundido o semi-fundido según la zona en la que se encuentre la sustancia de trabajo.

Una vez culminadas las pruebas se decidió diseñar, construir e implementar una transmisión mecánica para operar el equipo.

#### **4.1.2. Diseño de la Transmisión Mecánica**

Al momento de seleccionar el tipo de transmisión entre engranajes, cadena y poleas, se optó por las bandas y poleas ya que son fáciles de construir y constituyen un ente asegurador por cuanto en caso de que el torque requerido sobrepase al aportado por el motor, las bandas deslizarán, dando tiempo suficiente de suspender la operación, protegiendo al motor. Una razón más que sugiere el uso de bandas y poleas es que según [9] los rangos de velocidades son acordes a los recomendados para este tipo de transmisión y recomienda el uso de las bandas *3VX* para casos como éste.

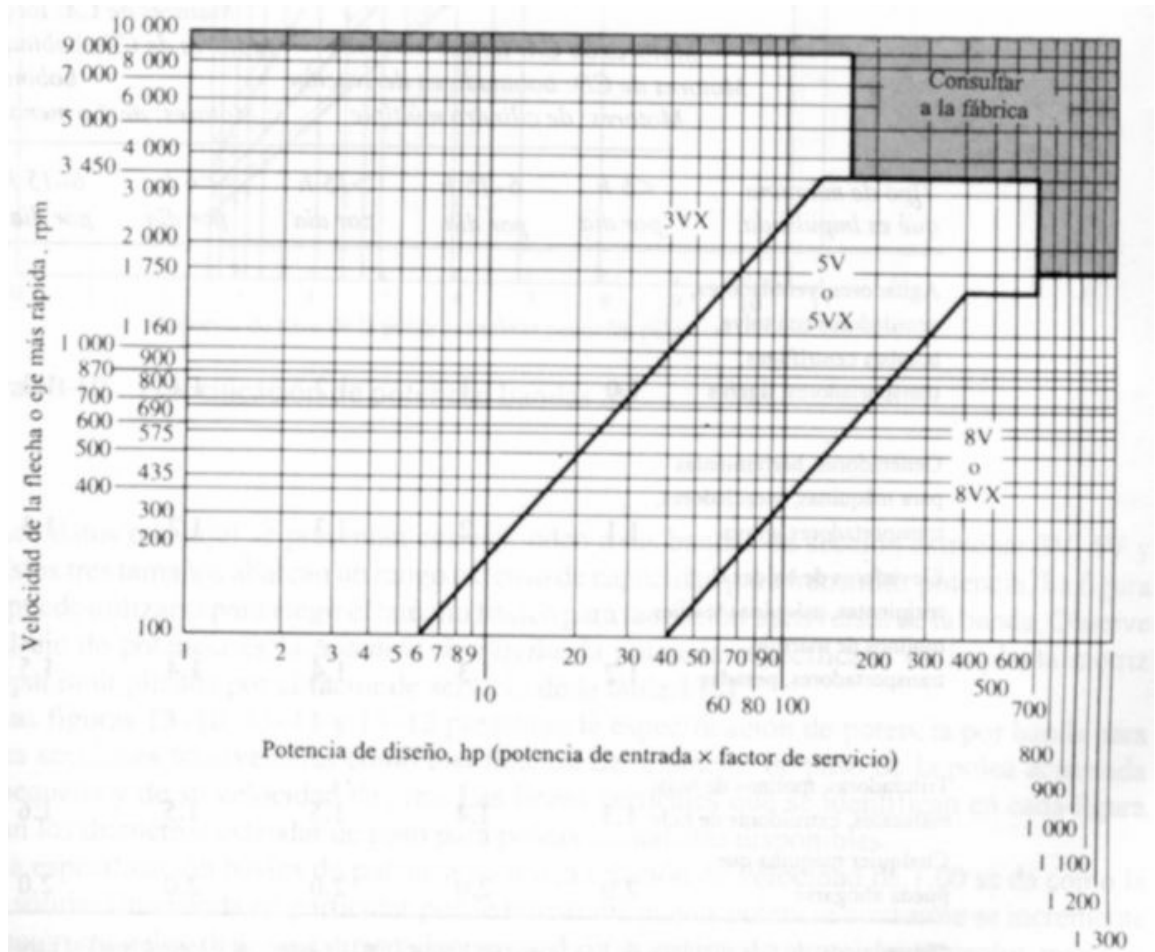


Figura N° 25: Designación de las bandas en función de la potencia y la velocidad de rotación

El mismo autor recomienda que los ángulos de abrazo de las bandas sobre las distintas poleas sean superiores a los  $120^\circ$ . Esta limitación abonada a las posibles dimensiones físicas de las poleas involucradas obligan a que reducir la velocidad de giro desde  $1750 \text{ rpm}$  hasta  $25 \text{ rpm}$  obligan a implementar un tercer eje al reductor; es decir, la transmisión estará compuesta por el árbol del motor (*Árbol<sub>1</sub>*), el árbol intermedio (*Árbol<sub>2</sub>*) y un árbol que reciba la potencia desde la transmisión y se acople axialmente al tornillo dentro del barril (*Árbol<sub>3</sub>*).

Esto implica que la transmisión requerirá de cuatro (4) poleas, a saber, una en el  $\text{Árbol}_1$ , dos en el  $\text{Árbol}_2$  y una en el  $\text{Árbol}_3$ .

El motor seleccionado fue uno perteneciente a una lavadora de ropa doméstica que ofrece  $\frac{1}{2}$  HP a  $1750$  rpm y éste trae consigo una polea acanalada apta para bandas  $3V$ , ya que ofrece la potencia suficiente y está diseñado para trabajar con este tipo de reductores.



*Figura N° 26: Motor empleado*

La polea acoplada al motor será designada como la  $Polea_1$  y su diámetro comercial es de  $2 \frac{1}{4}$  pulgadas.

La misma máquina lavadora de ropa aporta una segunda polea ( $Polea_2$ ), cuyo diámetro comercial es  $6 \frac{3}{4}$  pulgadas.

La relación de diámetros entre estas dos poleas produce una reducción de velocidad de rotación desde  $1750$  hasta  $573$  rpm e incrementa el torque desde  $2,06$  Nm en el  $\text{Árbol}_1$  hasta  $6,21$  Nm en el  $\text{Árbol}_2$ .

Una vez obtenidos estos parámetros de diseño se procede a determinar las condiciones de salida de la transmisión. [7] recomiendan como límite superior de velocidades  $300 \text{ rpm}$ , lo que acota las posibles soluciones.

Se lograron conseguir dos poleas de aluminio, una de ellas (*Polea<sub>3</sub>*) cuyo diámetro comercial es 2 pulgadas compartirá el *Árbol<sub>2</sub>* con la *Polea<sub>2</sub>* y la restante (*Polea<sub>4</sub>*) de 4 pulgadas de diámetro comercial estará destinada a acoplarse al *Árbol<sub>3</sub>*.

Si se colocan las poleas de aluminio en la configuración señalada en el párrafo anterior se obtiene que el *Árbol<sub>3</sub>* completará 248 vueltas cada minuto aportando un torque de  $12,52 \text{ Nm}$ . Estos parámetros indican que el tornillo girará a una velocidad comprendida dentro del rango recomendado por [7] y ofrecerá un par de torsión considerablemente mayor a la configuración que se había propuesto inicialmente de motorizar el sistema con el taladro y el reóstato.

Es necesario recordar que los ángulos de abrazo han de ser mayores a los  $120^\circ$ . Con bandas de mayor longitud se incrementa el valor del ángulo de arrastre; sin embargo, las longitudes no deben exceder las dimensiones físicas de la plancha destinada a sostener el motor y el reductor. Por esta razón se selecciona una longitud comercial de 30 pulgadas para la primera reducción (*Polea<sub>1</sub>* y *Polea<sub>2</sub>*), lo que implica que la distancia entre centros de

$$C = \frac{B + \sqrt{B^2 - 32(D_B - D_A)^2}}{16} \quad (\text{E. 80})$$

y

$$B = 4L - 6,28(D_2 - D_1) \quad (\text{E. 81})$$

siendo  $L$  la longitud de la banda;  $C$ , la distancia entre centros y  $D_i$  el diámetro de la polea “ $i$ ”.  $B$  simplemente indica un cambio de variables.



*Figura N° 27: Árbol 2 montado y desmontado*

Si las longitudes de las bandas de ambas reducciones son de 30 pulgadas, se obtiene que la distancia entre centro de la primera reducción es de 251 milímetros.

Se procede de forma similar para la segunda reducción (Polea<sub>3</sub> y Polea<sub>4</sub>), donde se determina una distancia entre centros de 328 milímetros.



*Figura N° 28 (izquierda): Árbol 3 y Polea 4. Figura N° 29 (derecha): Vista frontal de la transmisión*



Al observar las distancias entre centros en las reducciones y compararlas con las dimensiones físicas de la placa donde se apoyan los árboles de la transmisión, se concluye que será imposible alinear unidireccionalmente los árboles, por lo que se elige la configuración a 90°. Esta disposición permite tensar las bandas más fácilmente que una lineal.

Retornando a la limitante del ángulo de abrazo, se calculan los mencionados arcos mediante la expresión

$$\theta_A = 180 - 2ar \cos en \left( \frac{D_B - D_A}{2L} \right) \quad (E. 82)$$

y

$$\theta_B = 180 + 2ar \cos en \left( \frac{D_B - D_A}{2L} \right) \quad (E. 83)$$

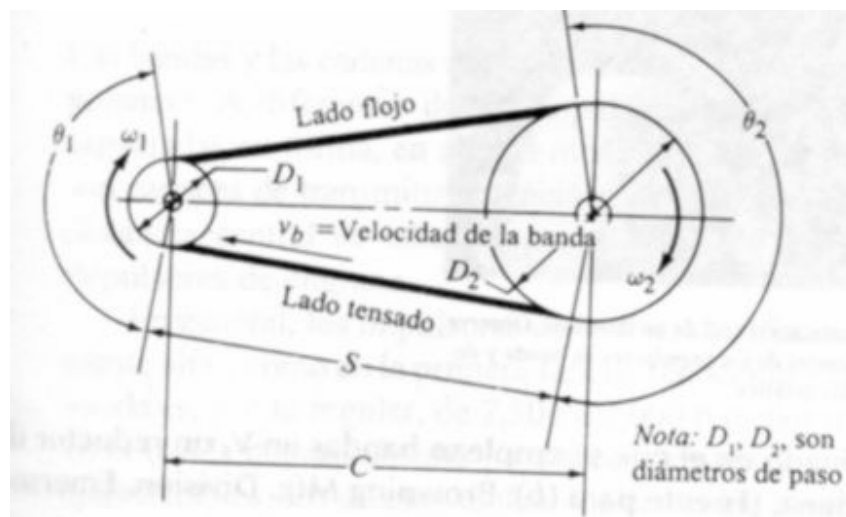


Figura N° 30: Dimensiones físicas de una transmisión por bandas

en donde  $\theta_i$  expresa la medida del ángulo de abrazo de la polea “i”. Es importante considerar que el subíndice *A* se refiere a la polea más pequeña y el *B* a la de mayor tamaño.

Para la primera reducción  $\theta_1 = 157^\circ$  y  $\theta_2 = 203^\circ$ . Para la segunda reducción  $\theta_3 = 171^\circ$  y  $\theta_4 = 189^\circ$ . Todos estos ángulos son mayores a  $120^\circ$  por lo que la posibilidad del deslizamiento se reduce.

Una vez definidos los parámetros de funcionamiento de la transmisión mecánica por poleas resta determinar las dimensiones físicas de cada árbol.

#### **4.1.2.1. Árbol2 (ver plano)**

Requerimientos:

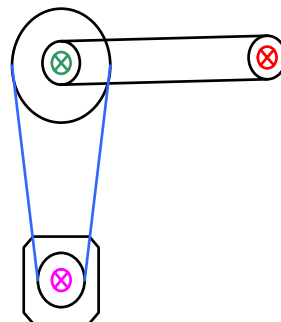
- ❖ (S1) Asiento de la Polea<sub>2</sub>: diámetro de 15 milímetros fresado en un lateral, con longitud 26,5 mm e incluye una cavidad roscara.
- ❖ (S2) Asiento del Rodamiento A: diámetro de 17 mm por una longitud de 27,5 mm.
- ❖ (S3) Longitud muerta de separación: diámetro de 22 mm y longitud de 32 mm.
- ❖ (S4) Asiento del rodamiento B: diámetro de 17 mm por una longitud de 12 mm.
- ❖ (S5) Asiento de la Polea<sub>3</sub>: diámetro de 15 mm en una longitud de 22 mm, 20 de los cuales presentan un chaveteo de 2 mm de profundidad.

Estas dimensiones están dadas por las magnitudes físicas de las poleas, los rodamientos y el apoyo que sostiene el árbol.

El análisis de esfuerzos para diseñar correctamente el árbol y constatar que las dimensiones requeridas por los rodamientos y poleas no se fracturan por fatiga se efectuará mediante la aplicación de tres teorías de fallas, como lo son la de Goodman Modificada para fatiga y Energía de Distorsión para esfuerzos usando los esfuerzos de Von Misses, la teoría del Esfuerzo Cortante Máximo combinada con la Línea de Soderberg conocida como la fórmula del Código Westinghouse y por último, la Relación Elíptica ASME para fatiga y Energía de Distorsión para esfuerzos.

El primer paso para cumplir los requerimientos de estas teorías es establecer un sistema de coordenadas para evaluar las fuerzas cortantes y los momentos flectores en cada plano de coordenadas y una posterior determinación del esfuerzo torsor para determinar el estado de esfuerzos del elemento mecánico.

Si se asume que el  $\text{Árbol}_1$  se encuentra en una dirección perpendicular a la dirección del  $\text{Árbol}_3$  respecto al  $\text{Árbol}_2$ , se le otorga la orientación X a la del  $\text{Árbol}_1$ ; Y, a la del  $\text{Árbol}_3$  y Z a la orientación axial del  $\text{Árbol}_2$ .



*Figura N° 31: Disposición espacial de los tres árboles de transmisión*

De esta manera se obtiene un sistema de ecuaciones de 4 expresiones lineales y 4 incógnitas independientes:

Suma de Fuerzas en la dirección X:

$$\sum F_x = F_2 - A_x + B_y = 0 \quad (\text{E. 84})$$

Suma de Fuerzas en la dirección Y:

$$\sum F_y = A_y - B_y + F_3 = 0 \quad (\text{E. 85})$$

Suma de Momentos Flectores en dirección Y:

$$\sum My(A) = 27mm(F_2) - 51,75mm(B_x) - 60mm(F_2) = 0 \quad (\text{E. 86})$$

El último término de esta expresión se relaciona con un momento provocado por la Polea<sub>2</sub> la cual es inclinada respecto al eje y transmite la potencia *60mm* más debajo de su asiento.

Suma de Momentos Flectores en dirección X:

$$\sum Mx(A) = 68,75mm(F_3) - 51,75mm(B_y) = 0 \quad (\text{E. 87})$$

Donde la fuerza  $F_2$  representa la interacción provocada por la tensión de la banda y se determina mediante el torque  $T_2$  aplicado en el Árbol<sub>2</sub>, mediante la Polea<sub>2</sub>. Análogamente se define la Fuerza  $F_3$ .

$$F_i = T_2 / RP_i \quad (\text{E. 88})$$

Con  $Rpi$  = radio de la polea "i".

Entonces,  $F_2$  será  $73N$  y  $F_3$ ,  $243N$ .

Se sustituye el valor de  $F_2$  en la suma de momentos en Y (E. 86) y en X (E. 87) para obtener las magnitudes de las reacciones  $B_x$  y  $B_y$ , obteniéndose:

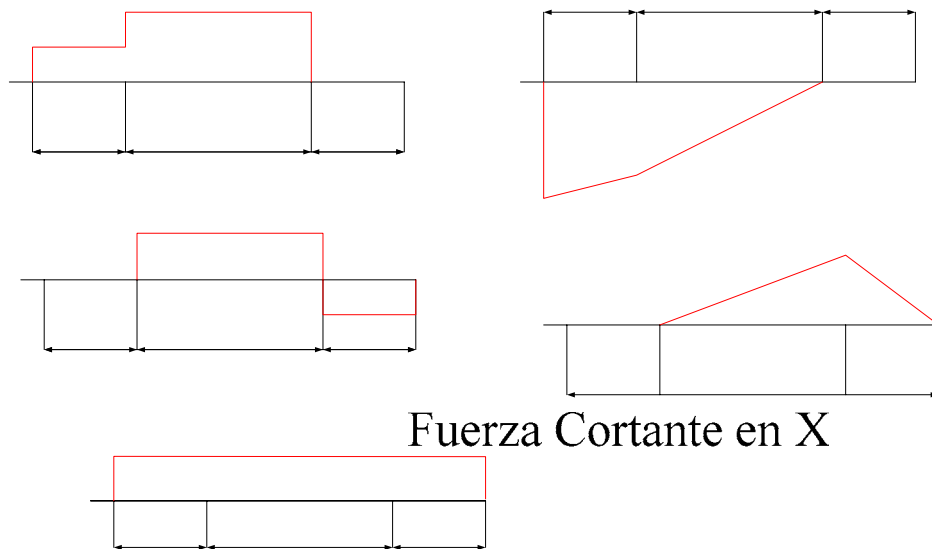
$$B_x = -46,6 N$$

$$B_y = 323 N$$

Se sustituyen estas magnitudes en las sumas de fuerzas en las direcciones X (E. 84) y Y (E. 85), lo que arroja los valores de:

$$A_x = 26,4 N$$

$$A_y = 80 N$$



Árbol 2

Fuerza Cortante en X

Figura N° 32: Diagramas de Fuerza Cortante, Momento Flexor y Par Torsor para el Árbol 2

De los diagramas se obtiene la siguiente tabla en la cual se expresa la sección de estudio, el máximo momento flector en la dirección X, el máximo momento flector en la dirección Y y el máximo momento torsor en Z:

Sección	Flector x	Flector y	Torsor z	Unidades
S1	0	5.34725	6.21	Nm
S2	1.06	6.351	6.21	Nm
S3	3.62	1.7708	6.21	Nm
S4	2.642	0.27927	6.21	51.75
S5	2.673	0	6.21	Nm

Tabla N° 25: Momentos ejercidos sobre el árbol 2

F2      A      B

27      51.75<sup>106</sup>      17

Con esta información se procede a determinar los parámetros necesarios para aplicar las teorías de fallas antes reseñadas.

El primer paso es seleccionar el acero. En caso de calcular los factores de seguridad y resultar inferiores a la unidad, se seleccionará un nuevo acero para obtener un resultado confiable y exitoso. Para este caso se seleccionó AISI 1060 por su disponibilidad normalizado.

Este acero ofrece una resistencia a la fluencia de  $370 \text{ Mpa}$  y una resistencia a la tracción de  $680 \text{ MPa}$ . Para determinar la resistencia a la fatiga en condición de vida infinita se asume una resistencia inicial de casi el 50% del valor del  $S_{ut}$ , para luego ser modificado por los factores de ajuste de cargas  $K_a$ ,  $K_b$ ,  $K_c$ ,  $K_d$  y  $K_e$ .

Cada uno de estos factores expresa correcciones por acabado superficial, tamaño, forma, carga, temperatura y efectos diversos como acumuladores de esfuerzos. Siguiendo el procedimiento de [12], se obtienen los valores para los factores de corrección y se determina la resistencia a la fatiga para una vida infinita de  $144 \text{ MPa}$ .

Ahora se plantean las ecuaciones referentes a la Teoría de Fallas, las cuales difieren en ciertos criterios, provocando que unas sean más conservadores que otras, asociando la seguridad a este carácter conservador del estudio.

La primera Teoría que se planteará será la del criterio de Goodman modificado para fatiga y energía de distorsión para esfuerzo (teoría 1). El segundo criterio es el de la fórmula del código Westinghouse (teoría 2) que involucra la alta seguridad derivada de los estudios y criterios de Soderberg. El último razonamiento aplicado es el de la Relación elíptica del Código ASME (teoría 3). El porqué de la aplicación de estas tres teorías es el comprobar analíticamente que la pieza trabaja en

condiciones seguras, solapando las variables estadísticas que puedan afectar los resultados del estudio.

En consecuencia, para que una pieza mecánica cumpla con la primera teoría se debe cumplir:

$$d = \left\langle \frac{32n}{\pi} \left\{ \left[ \left( \frac{KfMa}{Se} \right)^2 + \frac{3}{4} \left( \frac{KfTa}{Se} \right)^2 \right]^{1/2} + \left[ \left( \frac{Mm}{Sut} \right)^2 + \frac{3}{4} \left( \frac{Tm}{Sut} \right)^2 \right]^{1/2} \right\} \right\rangle^{1/3} \quad (\text{E. 89-a})$$

$$\frac{1}{n} = \frac{32}{\pi d^3} \left\{ \left[ \left( \frac{KfMa}{Se} \right)^2 + \frac{3}{4} \left( \frac{KfTa}{Se} \right)^2 \right]^{1/2} + \left[ \left( \frac{Mm}{Sut} \right)^2 + \frac{3}{4} \left( \frac{Tm}{Sut} \right)^2 \right]^{1/2} \right\} \quad (\text{E. 89-b})$$

Sucede algo similar con la teoría 2:

$$d = \left\{ \frac{32n}{\pi} \left[ \left( \frac{Mm}{Sy} + \frac{KfMa}{Se} \right)^2 + \left( \frac{Tm}{Sy} + \frac{KfTa}{Se} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/3} \quad (\text{E. 90-a})$$

$$\frac{1}{n} = \frac{32}{\pi d^3} \left[ \left( \frac{Mm}{Sy} + \frac{KfMa}{Se} \right)^2 + \left( \frac{Tm}{Sy} + \frac{KfTa}{Se} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{E. 90-b})$$

Y por último, las expresiones correspondientes a la teoría 3.



$$\left\{ \frac{32n}{\pi} \left[ \left( \frac{KfMa}{Se} \right)^2 + \frac{3}{4} \left( \frac{Tm}{Sy} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/3} \quad (\text{E. 91-a})$$

$$\frac{1}{n} = \frac{32}{\pi d^3} \left[ \left( \frac{KfMa}{Se} \right)^2 + \frac{3}{4} \left( \frac{Tm}{Sy} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{E. 91-b})$$

Cuando se calculan los factores de seguridad se presenta la siguiente tabla:

<i>teoría</i>	<i>T1</i>	<i>T2</i>	<i>T3</i>
<i>n1</i>	6,4	11,35	47,88
<i>n2</i>	1,02	1,6	61,50
<i>n3</i>	2,6	7,3	102,99
<i>n4</i>	1,133	3,8	61,5
<i>n5</i>	2,7	2,1	47,88

Tabla N° 26: Factores de seguridad para cada diámetro del Árbol 2

Donde *n* representa el factor de seguridad que garantice que la pieza no falle.

#### 4.1.2.2. Árbol<sub>3</sub> (ver plano)

Requerimientos:

- ❖ (S1) Asiento de la Polea<sub>4</sub>: diámetro de 19,05 mm en una longitud de 26 mm, 24 de los cuales presentan un chaveteo de 2 mm.
- ❖ (S2) Anillo de retención de 22 mm de diámetro por 2 mm de longitud.

- ❖ (S3) Asiento del Rodamiento C: diámetro de 17 mm en 12 mm de longitud.
- ❖ (S4) Longitud muerta de 38 mm de longitud, conservando el diámetro de 17mm.
- ❖ (S5) Asiento del Rodamiento C: longitud de 12 mm y se mantiene el diámetro de 85 mm.
- ❖ (S6) Longitud muerta de extensión para alcanzar el apoyo de 23 mm, manteniendo el diámetro de 17 mm.
- ❖ (S7) Cilindrado interna para empotrar el acople de 12 mm de diámetro con 35 mm de profundidad. El diámetro externo se mantiene en 17 mm.

Estas dimensiones se derivan de las dimensiones físicas de los rodamientos y poleas además de las longitudes muertas requeridas para adaptarles las bocinas y cumplir con la distancia axial requerida para empotrar el acople que moviliza el tornillo.

Este árbol es solicitado únicamente en la dirección en que se encuentra el Árbol<sub>2</sub> y la segunda reducción, lo que en comparación con el árbol anterior, reduce la cantidad cálculos. Sin embargo, se sigue el mismo procedimiento en todo momento:

Es tiempo de proceder a solucionar un sistema de ecuaciones lineales de dos expresiones con dos incógnitas independientes.

Suma de fuerzas horizontales:

$$\sum Fh = F_4 - C - D = 0 \quad (\text{E. 92})$$

Suma de momentos en C:

$$\sum M(C) = 21mmF_4 + 100mmD = 0 \quad (E. 93)$$

Si se determina el valor de  $F_4$  utilizando el mismo procedimiento que con  $F_2$  y  $F_3$ , entonces  $F_4 = 243 \text{ N}$ . Ahora se procede a calcular la reacción  $D$  a partir de la suma de momentos (E. 93).

$D = -51,03 \text{ N}$  lo que se traduce en que  $C = 294 \text{ N}$  mediante E. 92.

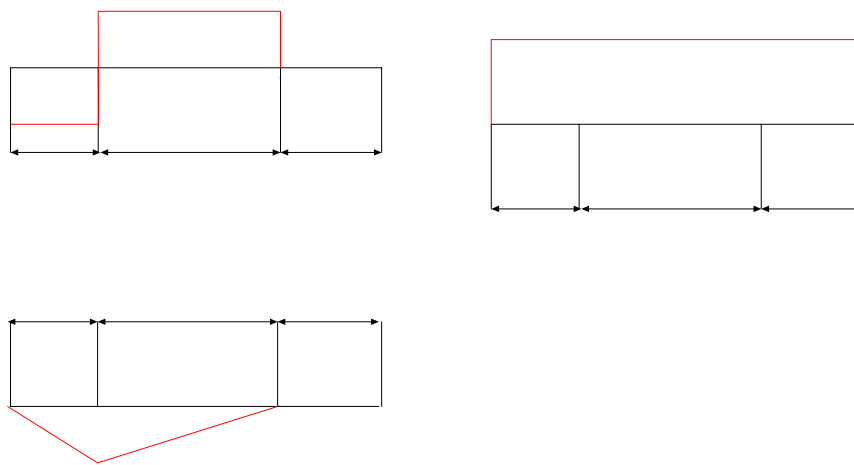


Figura N° 33: Diagramas de Fuerza Cortante, Momento Flector y Par Torsor para el Árbol 3

Ahora es posible tabular los momentos flectores y esfuerzos cortantes

<i>Sección</i>	<i>Flector</i>	<i>Torsor</i>
<i>S1</i>	<i>3,159</i>	<i>12,51</i>
<i>S2</i>	<i>3,645</i>	<i>12,51</i>
<i>S3</i>	<i>7,956</i>	<i>12,51</i>
<i>S5</i>	<i>0,106</i>	<i>12,51</i>

*Tabla N° 27: Momentos ejercidos sobre el Árbol 3*



*Figura N° 34: La transmisión*

Las unidades para esta tabla son Nm, igual que en la tabla semejante descrita en el Árbol<sub>2</sub>. EL material seleccionado y los requerimientos para la operación son similares, por lo que parámetros como el índice de resistencia a la fluencia, a la rotura y a la fatiga van a coincidir con los del caso anterior.

Al igual que con el otro árbol, se evaluará la resistencia del material mediante la aplicación de las mismas tres teorías de falla.

	<i>Teoría 1</i>	<i>Teoría2</i>	<i>Teoría3</i>	<b>Diámetros</b>
<i>n1</i>	2,4	1,2	2,4	19 mm
<i>n2</i>	2,9	1,5	2,9	22 mm
<i>n3</i>	5,7	6,5	5,7	17 mm
<i>n4</i>	7,3	6,4	7,3	17 mm
<i>n5</i>	13,4	5,5	25,4	17 mm

*Tabla N° 28: Factores de seguridad para cada diámetro del Árbol 3*

Esto demuestra que el material y la implementación física del equipo cumplen con tres diversas teorías de fallas, por lo que la pieza debe soportar la carga sin ceder.

#### **4.1.3. Protocolo de pruebas realizadas**

Se inician las pruebas con el Tornillo de Sección Variable:

1. Para poder comenzar las pruebas se procede a vaciar toda la unidad, y comenzar la alimentación nuevamente, para ello se encienden las resistencias durante aproximadamente 30 minutos, para garantizar que el material estuviese fundido completamente, se enciende el motor, y se hace girar el tornillo, sin agregar nuevo material en la tolva de alimentación, y sin colocar el dado al final del barril, de esta manera el plástico sale con suma facilidad.
2. Cuando ya no salga más polímero, se apaga el motor y las resistencias, dejándose enfriar.
3. Se procede de la siguiente manera:
  - ❖ Se coloca el dado, con el torpedo previamente centrado.

- ❖ Se encienden las resistencias 1 y 4.
- ❖ A los diez minutos se enciende la resistencia 2-3 y se enciende el motor durante 5 segundos para garantizar que el material llene completamente la zona de alimentación (En teoría el motor gira aproximadamente a 4 rps, en 5 segundos hay 20 revoluciones, la zona tiene casi seis vueltas, es decir es suficiente tiempo para llenarla y mezclar correctamente la sustancia de trabajo, y a la vez representa un intervalo de tiempo fácil de cuantificar y se da un proceso de mezclado acorde para mantener homogéneas las condiciones de operación).
- ❖ A los diez minutos se le da un nuevo giro de 5 segundos para llenar la zona de fusión.
- ❖ A los cinco minutos, otro giro de cinco segundos para llenar la zona de dosificación.

4. A continuación, se trabaja de la siguiente manera: Se hace girar el tornillo durante un determinado tiempo, se detiene para permitir un “descanso” del motor y luego se hace funcionar nuevamente:

- ❖ A los cinco minutos del último giro se da un giro de cinco segundos, luego, a los cinco minutos, se le dan tres giros de diez segundos cada uno, dejando cinco minutos de descanso entre uno y otro.
- ❖ A los cinco minutos: 1 giro de 15 segundos. En este momento comenzó a salir el material por la punta del molde.
- ❖ A los cinco minutos, 1 giro de 10 segundos.
- ❖ A los cinco minutos, 1 giro de 15 segundos.
- ❖ Al minuto del anterior, un giro de 35 segundos. En este momento el motor se calentó excesivamente, y hubo que detenerlo.

Se observa que el material, al salir, comienza a ensancharse y pierde la forma cilíndrica que trae del dado, esto indica que la temperatura del ambiente que se encuentra a su alrededor al salir del molde no es suficiente para solidificarlo permitiendo que conserve su forma, por lo que se decide tratar de reducir esta temperatura, empleando para ello un recipiente con agua y hielo, colocado a la salida del dado, sin entrar en contacto con éste. A continuación se realizan un conjunto de pruebas con este sistema, para verificar la hipótesis de la menor deformación de la pieza a menor temperatura de salida:

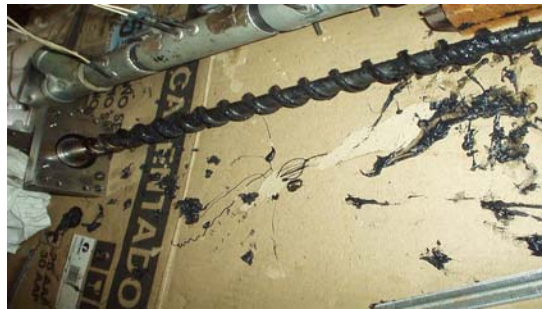
- ❖ Se efectúa una primera prueba (19 minutos después de la última, porque el motor y el molde tenían que enfriarse) con una duración de 10 segundos.
- ❖ Luego de 4 minutos se enciende el motor durante 15 segundos
- ❖ 3 minutos más tarde, otro giro de 15 segundos.
- ❖ 3 minutos después, otro giro de 15 segundos
- ❖ 2 minutos después, giro de 15 segundos.
- ❖ 2 minutos más tarde, giró durante 15 segundos.
- ❖ Finalmente, un último giro de 17 segundos.

En este momento se retira el hielo, ya la pieza tiene un tamaño aceptable para su observación. Luego de esto, aproximadamente 5 minutos después, se efectúan otros giros, sin contabilizar el tiempo, para permitir que la pieza salga completamente del molde y poder retirarla con facilidad.

Finalizadas las pruebas con este tornillo, se procede de la siguiente manera para limpiar el barril, el molde y poder efectuar pruebas con el otro tornillo:

- ❖ Se apagan las resistencias.

- ❖ Se espera tiempo suficiente para que la unidad se enfríe y se procede a desmontarla del mueble, para poder trabajar con más comodidad.
- ❖ Se aflojan los tornillos que unen el barril y el tornillo.
- ❖ Se encienden de nuevo las resistencias. Se espera aproximadamente 20 minutos para garantizar que el polímero estuviese fundido del todo.
- ❖ Luego de esto, se retira el tornillo, y rápidamente se procede a limpiar el molde y el barril, empleando los implementos necesarios para empujar el plástico hacia afuera. De esta manera quedan listos para una nueva prueba.



*Figura N° 35: Tornillo fuera del barril.*

A continuación, se describen las pruebas realizadas para el Tornillo de Paso Variable.

1. En primer lugar se procede a realizar una prueba sin el dado con el objeto de verificar si el tornillo es capaz de fundir e impulsar el polímero a través del barril.
2. Ídem al paso número 4 de la sección anterior.



Para poder establecer una comparación efectiva, se procuró que la sumatoria de los tiempos de funcionamiento con este Tornillo resultara igual a la suma de los tiempos de funcionamiento con el Tornillo anterior.

3. Luego, se trabaja de la siguiente manera: se hace girar el tornillo durante un determinado tiempo, se detiene para permitir un “descanso” del motor, y luego se hace funcionar nuevamente:

- ❖ A los cinco minutos del último giro, se da un giro de cinco segundos, luego, a los cinco minutos, se le dan tres giros de diez segundos cada uno, dejando cinco minutos de descanso entre uno y otro.
- ❖ A los cinco minutos: 1 giro de 15 segundos.
- ❖ A los cinco minutos, 1 giro de 10 segundos.
- ❖ A los cinco minutos 1 giro de 15 segundos. En este momento comienza a salir el material a través del extremo del molde
- ❖ Al minuto del anterior un giro de 35 segundos. Hasta este momento no se había presentado el calentamiento excesivo del motor en ningún momento ni saltos del relé.

4. 19 minutos después se efectúan las pruebas con el hielo:

- ❖ Se efectúa una primera prueba con una duración de 10 segundos.
- ❖ Luego de 4 minutos se encendió el motor durante 15 segundos.
- ❖ 3 minutos más tarde, otro giro de 15 segundos.
- ❖ 3 minutos después, otro giro de 15 segundos.
- ❖ 2 minutos después, giro de 15 segundos.
- ❖ 2 minutos más tarde, giró durante 15 segundos.
- ❖ Finalmente, un último giro de 17 segundos.

5. Se retira el hielo.
6. Se efectúan otros giros, sin contabilizar el tiempo, para permitir que la pieza salga completamente del molde y poder retirarla con facilidad.
7. Finalizadas las pruebas con este tornillo, se procede de la siguiente manera para limpiar el barril, el molde y poder efectuar pruebas con el otro tornillo:
  - ❖ Se apagan las resistencias.
  - ❖ Se espera tiempo suficiente para que la unidad se enfríe y se procede a desmontarla del mueble, para poder trabajar con más comodidad.
  - ❖ Se aflojan los tornillos que unen el barril y el tornillo.
  - ❖ Se encienden de nuevo las resistencias. Se espera aproximadamente 20 minutos para garantizar que el polímero estuviese fundido del todo.
  - ❖ Luego de esto, se retira el tornillo, y rápidamente se procede a limpiar el molde y el barril, empleando los implementos necesarios para empujar el plástico hacia afuera.

De esta manera quedan listos para una nueva prueba.

Finalmente, las pruebas con el tornillo de paso constante y sección constante.

1. Al igual que en los dos casos anteriores, se efectúa una prueba sin el dado, para verificar la capacidad del tornillo de impulsar y permitir la fusión del material.
2. Se procede de la siguiente manera:
  - ❖ Se coloca el dado, con el torpedo previamente centrado.

- ❖ Se encienden las resistencias 1 y 4.
- ❖ A los diez minutos se enciende la resistencia 2-3 y se enciende el motor durante 5 segundos para garantizar que el material llene completamente la zona de alimentación.
- ❖ A los diez minutos se le da un nuevo giro de 5 segundos para llenar la zona de fusión.
- ❖ A los cinco minutos otro giro, de cinco segundos para llenar la zona de dosificación

Hasta este momento el motor no presenta problemas de funcionamiento por sobrecarga.

3. A continuación, se trabaja de la siguiente manera: Se hace girar el tornillo durante un determinado tiempo, se detiene para permitir un “descanso” del motor y luego se hace funcionar nuevamente:

- ❖ A los cinco minutos del último giro se da un giro de diez segundos, luego, a los cinco minutos, se le dan dos giros de diez segundos cada uno, dejando cinco minutos de descanso entre uno y otro.
- ❖ A los cinco minutos: 1 giro de 15 segundos.
- ❖ A los cinco minutos 1 giro de 15 segundos.
- ❖ A los cinco minutos 1 giro de 15 segundos.
- ❖ Al minuto del anterior un giro de 35 segundos.

Con los dos tornillos anteriores, ya para este tiempo había comenzado a salir el material por el extremo del dado, y se procedía a efectuar las pruebas con el hielo. Como con este tornillo aun no salía, y el motor no se había calentado ni daba muestras de estar trabajando forzado, se efectuaron unas pruebas adicionales, para

ratificar el hecho de que el material, en un tiempo incluso mayor que el requerido por los otros dos tornillos, no salió del dado.

4. Finalmente se decide apagar el equipo, ya que el material continúa sin salir del molde.

Cabe destacar el hecho de que con los otros dos tornillos, para facilitar el proceso de limpieza de la unidad, antes de desmontar el conjunto barril-tornillo, se procedió a aflojar el torpedo y retirarlo del dado. Al liberar así la presión acumulada por el material dentro del barril, y hacer girar el motor, el PEBD salía, sin dificultad, líquido. En cambio, con el tornillo de paso y sección constante, al retirar el torpedo y accionar el motor, el material no salió. Se introdujo entonces el dispositivo para limpiar el molde (ver plano nº 3) y se pudo constatar que no había sido impulsado ni siquiera hasta la mitad de la distancia que tendría que haber recorrido para salir por el extremo del molde, y presentaba una consistencia sumamente viscosa (similar a una goma, con mucha elasticidad).



*Figura 36: Molde*

En las siguientes tablas se presenta un resumen de las operaciones efectuadas por cada tornillo y los tiempos empleados por cada uno de ellos:

### TORNILLO DE PASO CONSTANTE Y SECCIÓN VARIABLE

Nº	Tiempo que se mantuvo encendido el motor[seg]	Tiempo transcurrido entre esta prueba y la siguiente[seg]	Observaciones
0	0	600	Encendido de las resistencias 1 y 4. No se acciona el motor.
1	5	600	Se acciona el motor y al mismo tiempo se enciende la resistencia (2-3)
2	5	600	
3	5	300	
4	5	300	
5	10	300	
6	10	300	
7	10	300	
8	15	300	Comienza a salir el material por el extremo del molde
9	10	300	
10	15	60	
11	35	60	

12	10	1140	Se colocó el hielo al comenzar esta prueba.
13	15	300	
14	15	90	
15	15	230	
16	15	170	
17	15	110	
18	15	130	
19	15	120	
20	17	140	Se retira el hielo
21	15	270	
22	15	1150	
23	15	95	
24	193	-	A partir de este momento comienzan a efectuarse pruebas de cierta duración, pero sin ser estrictos con el tiempo entre una y otra, éste sólo depende de la observación del comportamiento del motor y de la estimación del proceso de fundido – mezclado del PEBD. El tiempo de funcionamiento se repartió en 10 puestas en marcha del motor.

*Tabla N° 29: Pruebas del Tornillo SV*

A continuación se presenta una tabla resumen en la que se expresan los resultados de la experimentación efectuada con este Tornillo, donde será posible apreciar los intervalos de tiempo entre cada tipo de prueba; es decir, entre las pruebas controladas de llenado, las pruebas con hielo y las pruebas a descarga libre:

Nº de Prueba	Tiempo de Duración	Nº de Prueba	Tiempo de Duración
0	0	17	15
1	5	18	15
2	5	19	15
3	5	20	17
4	5	21	15
5	10	22	15
6	10	23	15
7	10	24	15
8	15	25	16
9	10	26	17
10	15	27	20
11	35	28	20
12	10	29	20
13	15	30	20
14	15	31	20
15	15	32	20
16	15	33	25

*Tabla N° 30: Duración de cada prueba del Tornillo SV*

De donde se obtienen los siguientes resultados de los tiempos de operación:

- Tiempo total hasta que salió el polímero: 65 segundos (interrumpidos).
- Tiempo de funcionamiento con hielo █: 132 segundos (interrumpidos).
- Tiempo de funcionamiento antes del hielo: 125 segundos (interrumpidos).
- Tiempo antes de las pruebas libres: 302 segundos (interrumpidos).
- Tiempo de las pruebas libres █: 193 segundos (interrumpidos).
- Tiempo para retirar el PEBD después de la implementación de hielo █: 45 segundos (interrumpidos).
- Tiempo total: 495 segundos (interrumpidos).

#### TORNILLO DE PASO VARIABLE Y SECCIÓN CONSTANTE

Nº	Tiempo que se mantuvo encendido el motor[seg]	Tiempo transcurrido entre esta prueba y la siguiente[seg]	Observaciones
0	0	600	Encendido de las resistencias 1 y 4. No se acciona el motor.
1	5	600	Se acciona el motor y al mismo tiempo se enciende la resistencia (2-3)
2	5	300	
3	5	300	
4	5	300	
5	10	300	
6	10	300	
7	10	300	



8	15	300	
9	10	300	
10	15	60	Comienza a salir el material por el extremo del molde
11	35	60	
12	10	1140	Se colocó el hielo al comenzar esta prueba.
13	15	300	
14	15	90	
15	15	230	
16	15	170	
17	15	110	
18	15	130	
19	10	120	
20	17	140	Se retira el hielo
21	15	270	
22	15	1150	
23	15	95	
24	193	-	A partir de este momento comienzan a efectuarse pruebas de cierta duración, pero sin ser estrictos con el tiempo entre una y otra, éste sólo depende de la observación del comportamiento del motor y de la estimación del proceso de fundido – mezclado del PEBD. El tiempo de funcionamiento se repartió en 10 puestas en marcha del motor.

*Tabla N° 31: Pruebas del Tornillo PV*

Se presenta una tabla resumen análoga a la anterior:

Nº de Prueba	Tiempo de Duración	Nº de Prueba	Tiempo de Duración
0	0	17	15
1	5	18	15
2	5	19	10
3	5	20	17
4	5	21	15
5	10	22	15
6	10	23	15
7	10	24	15
8	15	25	16
9	10	26	17
10	15	27	20
11	35	28	20
12	10	29	20
13	15	30	20
14	15	31	20
15	15	32	20
16	15	33	22

*Tabla Nº 32: Duración de cada prueba del Tornillo PV*

De donde se obtienen los siguientes resultados de los tiempos de operación:

- Tiempo total hasta que salió el polímero: 125 segundos (interrumpidos).
- Tiempo de funcionamiento con hielo ■: 132 segundos (interrumpidos).
- Tiempo de funcionamiento antes del hielo: 125 segundos (interrumpidos).
- Tiempo antes de las pruebas libres: 302 segundos (interrumpidos).
- Tiempo de las pruebas libres ■: 193 segundos (interrumpidos).
- Tiempo para retirar el PEBD después de la implementación de hielo ■: 45 segundos (interrumpidos).
- Tiempo total: 495 segundos (interrumpidos).

#### TORNILLO UNIVERSAL

Nº	Tiempo que se mantuvo encendido el motor[seg]	Tiempo transcurrido entre esta prueba y la siguiente[seg]	Observaciones
0	0	600	Encendido de las resistencias 1 y 4. No se acciona el motor.
1	5	600	Se acciona el motor y al mismo tiempo se enciende la resistencia (2-3)
2	5	300	
3	5	300	
4	5	300	

5	10	300	
6	10	300	
7	10	300	
8	15	300	
9	10	300	
10	15	60	
11	35	60	
12	20	60	
13	45	90	
14	80	120	
15	150	60	
16	180	60	La prueba fue detenida por cuando el motor estuvo en operación durante un tiempo mayor al máximo registrado con anterioridad sin obtener resultados, por lo que se asume que este Tornillo es el “económicamente menos productivo”, para esta aplicación.

*Tabla N° 33: Pruebas del Tornillo Universal*

La tabla resumen se presenta para este Tornillo de la siguiente forma:

Nº de Prueba	Tiempo de Duración
0	0
1	5
2	5
3	5
4	5
5	10
6	10
7	15
8	15
9	10
10	15
11	35
12	45
13	60
14	105
15	120

*Tabla N° 34: Duración de cada prueba del Tornillo Universal*

Los tiempos de operación registrados son:

- Tiempo total: 460 segundos (interrumpido).
- Tiempo adicional para procurar que salga el PEBD del molde: 330 segundos (interrumpido).

#### TORNILLO PASO VARIABLE: PRODUCCIÓN CONTINUA

Por último, se reinstaló el Tornillo de Paso Variable, siguiendo el procedimiento ya enunciado para proceder a una muestra de mayores dimensiones.

El procedimiento de llenado del barril y fusión primaria del PEBD fue efectuado de forma similar a la los inicios de las pruebas anteriores. Una vez transcurrido el paso N° 7 de las tablas anteriores, cuando se asumió que el barril estaba totalmente lleno y el polímero comprimido y totalmente fundido en la Zona de Dosificación, se inició la operación continua gradualmente: al principio durante 2 minutos, dejando reposar el motor por cinco minutos y luego dejándolo 10 minutos funcionando, deteniéndolo por dos minutos para una rápida evaluación del sistema para dejarlo operar durante 23 minutos más en forma continua. Durante toda esta actividad el motor no se vio forzado y solo al final de la misma se requirió del uso de ventiladores para refrigerar el motor.

Cabe destacar que durante los últimos 13 minutos de operación continua fue colocado un ventilador en la salida del molde, claro está, procurando que el flujo de aire no enfriara el molde. Este hecho obedece a la necesidad de enfriar lo antes posible el producto final de manera tal de no perder la forma al aplicarse la carga del peso acumulado por la cantidad de material que va fluyendo hacia el exterior.

#### **4.2. Resultados**

TABLA COMPARATIVA RESUMEN DE RESULTADOS

Operación controlada a 248 rpm

Concepto		Paso Constante Sección Variable		Paso Variable Sección Constante			Universal
		No Hielo	Hielo	No Hielo	Hielo	Libre	
Tiempo Operación (segundos)		125	132	125	132	2225	790
Volumen (cm <sup>3</sup> )		16	2	12	2	20	0
Peso de la pieza (gramos)		15		5		15	0
Producción Prueba	kg/hr	0,21		0,07		0,024	-
	cm <sup>3</sup> /hr	460	55	345,6	55	32,6	
Producción Teórica kg/hr		No hay datos		93 (descarga abierta)			
Densidad (g/cm <sup>3</sup> )		0,83		0,36		0,75	-

Tabla N° 35: Resultados y comparación a 248 rpm

## **CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES**

- 1- La Unidad requiere de una transmisión mecánica. La operación manual o por medio de un motor de taladro manual es inadecuada.
- 2- El Tornillo de Sección Variable es el más veloz en cuanto a producción se refiere, aún cuando requiere de mayor potencia.
- 3- El Tornillo de Paso Variable resulta ser más lento en relación al volumen de producción, aún cuando su funcionamiento es más estable que el de Diámetro variable al forzar menos el motor.
- 4- El Tornillo Universal no es apto para esta aplicación. Aún cuando logre producir, la operación será tan lenta que se puede considerar económicamente inadecuada.
- 5- El Tornillo de Paso Variable es ideal para este polímero con el molde en cuestión bajo las condiciones de operación siempre y cuando se disponga de un motor de alta capacidad y los debidos controles que protejan el actuador de las fluctuaciones provocadas por el comportamiento elástico del fluido. El Tornillo Universal no compite con el desenvolvimiento de los otros dos bajo las condiciones de prueba.
- 6- Durante la producción continua del Tornillo Paso de Variable con el molde se concluye que no son necesarias las paradas previstas durante los cálculos de transferencia de calor para que el polímero alcance las condiciones térmicas establecidas, por cuanto el molde produce una alta pérdida energética. Si el tornillo gira a 248 rpm, en el interior del barril se efectúa un proceso de



mezclado, lo cual homogeniza las condiciones del polímero dentro de cada zona.

- 7- Aún cuando las tres Zonas de la Unidad se encuentran claramente definidas con condiciones de operación estables predichas, la fusión se inicia superficialmente en la zona de alimentación, debido al proceso de mezclado que ocurre en el barril descrito en el ítem anterior. No obstante, al sacar los tornillos del barril, se comprueba que la fusión como tal hasta una consistencia líquida se da en la Etapa de Fusión como se había previsto y en la sección de Dosificación se verifica un proceso de compresión del material termoplástico que se descarga en el molde.
- 8- El colocar hielo adyacente a la salida del molde absorbe calor por convección natural y produce enfriamiento. Sin embargo, se recurre al ventilador por representar un proceso más controlado. Esta refrigeración produce mejores resultados a nivel de acabado superficial y consistencia.
- 9- La transmisión mecánica por poleas empleadas se comportó adecuadamente. Se comprobó que la velocidad de 248 rpm y un torque de 1,4 Nm pueden ser empleados en la producción con este prototipo de PEBD.
- 10- Se confirma que el proceso de limpieza debe ser hecho “en caliente”, ya que de lo contrario se dificultarían en gran medida estas tareas.
- 11- Resulta necesario tratar de utilizar sólo un tipo de elementos de sujeción roscados en la medida de lo posible para acelerar el montaje y desmontaje. Los tornillos *Allen* no son adecuados.

- 12- Las resistencias eléctricas son insuficientes para la descarga libre, aún cuando son capaces de funcionar adecuadamente al descargar con el molde.
- 13- Los anclajes de la Unidad deben ser mejorados a fin de evitar o reducir las vibraciones ocasionadas por la transmisión. Estas vibraciones afectan el acabado superficial de las piezas conformadas.
- 14- El aislante térmico resulta innecesario, a este nivel experimental, por cuanto la pérdida de calor por convección natural de las resistencias resulta poco representativa.

## **CAPÍTULO 6: RECOMENDACIONES**

1. Antes de poner a operar el equipo con cualquier Tornillo se deben encender las resistencias en el orden especificado en las pruebas, manteniendo meticulosamente los intervalos de tiempo de calentamiento para asegurar que el polímero se funda al atravesar cada zona del barril.
2. No se recomienda el uso de Tornillos *Allen* para este tipo de máquinas por lo complicado que resulta el montaje y desmontaje de las piezas
3. El montaje y desmontaje de cada tornillo debe realizarse "en caliente"; es decir, con las resistencias eléctricas encendidas a fin de evitar que el polímero se solidifique dentro del barril dificultando el movimiento del Tornillo.
4. En Operación, se recomienda enfriar el producto tan pronto abandone el molde. Si se enfría el molde se retrasará la producción y si no se enfría la pieza resultante, será poco probable que ésta pueda conservar sus dimensiones físicas.
5. Al momento de producir piezas no se debe detener el equipo hasta no haber culminado con el proceso de inyección. El detener la Unidad puede ocasionar que la pieza final presente contracciones radiales exteriores motivadas al enfriamiento y la solidificación.
6. No se recomienda colocar resistencias eléctricas al Molde
7. No se recomienda ejercer un apriete excesivo en los elementos de sujeción roscados que mantienen las placas donde van apoyados los rodamientos, ya

que las rolineras se ven sometidas a presiones que pueden entorpecer su desempeño.

8. Se recomienda no mantener el motor encendido en operación continua por más de 45 minutos a fin de protegerlo.
9. Resulta útil colocar una goma de suspensión entre el acople del Árbol <sub>3</sub> de la transmisión mecánica y el Tornillo a fin de evitar el contacto metal- metal.
10. Para producir piezas de PEBD se recomienda el uso del Tornillo de Sección Variable, aún cuando éste requiera de potencia extra y de un enfriamiento mayor que el de los otros tornillos a fin de evitar que las piezas a conformar se deformen.
11. Es importante conectar el motor de la máquina a una toma eléctrica distinta a la cual se conectan las resistencias para evitar fluctuaciones en el flujo de corriente que podrían provocar la pérdida de los fusibles de la Unidad.
12. Una vez terminada la operación, es importante retirar el torpedo para provocar la salida de la mayor cantidad posible de polímero residual dentro del molde. Una vez que haya escapado el material confinado, se debe reintroducir el dispositivo limpiador del molde para reducir los espacios ocupados por el PEBD.
13. Se recomienda para pruebas futuras alargar el molde y en especial el torpedo, al igual que probar con moldes distintos, no necesariamente de sección cilíndrica.

14. Es importante fijar el molde y el barril en su extremo inferior a fin de evitar o reducir las vibraciones que produce el motor. De ser posible, colocar el barril horizontalmente. Para lograr esto último se requiere mejorar el sistema de alimentación.
  
15. Refrigerar el motor durante la operación continua es vital para prolongar su vida útil. El efecto de disipación de la convección forzada provocada por el uso de ventiladores es apto para este equipo.

## CAPÍTULO 7: BIBLIOGRAFÍA

1. Anguita Delgado, Ramón. (1977). *Extrusión de Plásticos*. Madrid, España: H. Blume Ediciones.
2. Arias, Fidas G.. (1999). *El proyecto de investigación. Guía para su elaboración*. (Tercera edición). Caracas, Venezuela: Editorial Episteme.
3. Avallone, Eugene A.; Baumeister Theodore. (1995). *Manual del Ingeniero Mecánico*. México, D.F.: Mc Graw Hill.
4. Bachmann, Albert. (1968). *Dibujo Técnico*. (2° ed. En español). Barcelona, España: Editorial Labor S. A.
5. Holman, J. P. (1998). *Transferencia de calor*. Madrid, España: Mc Graw Hill.
6. Incropera, Frank P.; De Witt, David P. (1996). *Fundamentos de Transferencia de Calor*. (Cuarta Edición). México, D.F.: Prentice Hall.
7. Klein I.; Tadmor, Z. (1970). *Engineering Principles of plasticating extrusion*. New York, U.S.A.: Van Nostrand Reinhold.
8. Microsoft. (2002). *Encarta. Biblioteca de consulta 2003*. [Programa de computación] U.S.A.: Autor.
9. Mott, Robert (1995). *Diseño de Elementos de Máquinas*. (Segunda edición). México: Prentice Hall Hispanoamericana S.A.

10. Munns, M. G. (1976). *Plantas de moldeo de plástico por inyección*. Madrid, España: Editorial Index.
11. Saade, Lizbethe y Ordoñez, Hector. (2003). *Diseño, construcción y prueba de un modelo a escala para simular la fabricación de piezas de plástico por inyección*. Trabajo especial de Grado no publicado. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
12. Shigley, Joseph y otros. (1999). *Diseño en ingeniería mecánica*. (Cuarta edición en español). México: Mc Graw Hill interamericana de México.
13. Universidad Simón Bolívar. *Tecnología del Plástico I MC-2513*. Caracas: Autor.

## **CAPÍTULO 8: GLOSARIO**

### **Agitación**

**térmica:** Movimiento que se produce en las moléculas de un determinado material, debido al incremento de la temperatura.

### **Amplitud**

**vibracional:** Máximo desplazamiento de las partículas que vibran.

**Antiestáticas:** Que impiden la formación de electricidad estática.

**Cohesionada:** Unida mediante fuerzas de cohesión.

### **Comportamiento**

**reológico:** Propiedad de ciertos materiales que hace que para su estudio se deban aplicar en conjunto los conocimientos de resistencia de materiales y elasticidad y la mecánica de fluidos. Se basa en la deformación de los cuerpos producto de la aplicación de una carga.

**Cristalizar:** Hacer tomar la forma cristalina, mediante operaciones adecuadas, a ciertas sustancias.

**Estanqueidad:** Calidad de estanco o estancamiento.

**Extrusion:** Proceso mediante el cual se le da forma a una pasta, plástico fundido, metal fundido, etc., haciéndole salir por una abertura especialmente dispuesta.



**Extrusora**

**Elastodinámica:** Extrusor sin tornillo cuyo funcionamiento se basa en el aprovechamiento de las propiedades viscoelásticas de los polímeros fundidos.

**Extrusora**

**Hidrodinámica:** Extrusora en la que el bombeo del polímero fundido y la presión comunicada a éste se producen por el aprovechamiento de las propiedades viscosas del polímero, en lugar de sus propiedades elásticas.

**Fluido**

**newtoniano:** Fluido en el cual la razón de deformación es directamente proporcional al esfuerzo aplicado.

**Fluido no**

**newtoniano:** Todo aquel flujo en el que la razón de deformación no es directamente proporcional al esfuerzo aplicado.

**Flujo turbulento:** Flujo en el cual las velocidades de una determinada partícula se desvían en forma irregular e impredecible del movimiento principal.

**Ignífugas:** Que protegen contra el fuego.

**Inyección:** Procedimiento mediante el cual se introduce a presión un gas, un líquido o una masa fluida, en el interior de un cuerpo o una cavidad.

<b>Ley de Hooke:</b>	Relación que indica que la deformación que sufre un material, es proporcional al esfuerzo aplicado sobre el mismo.
<b>Líquido subenfriado:</b>	Líquido que se encuentra a una temperatura inferior a su temperatura de saturación, a la presión existente.
<b>Opacidad.</b>	Cualidad de opaco.
<b>Pastas:</b>	Masa hecha de una o diversas sustancias machacadas.
<b>Perfil de lecho sólido</b>	Disminución de la cantidad de sólido en la mezcla mientras se funde expresada en forma de fracción.
<b>Plástico de Bingham:</b>	Todo aquel fluido que requiere de un esfuerzo cortante inicial para comenzar a fluir.
<b>Plásticos acrílicos:</b>	Materiales plásticos que se obtienen por polimerización del ácido acrílico o de sus derivados.
<b>Pseudoplásticos:</b>	Materiales cuya viscosidad varía con la velocidad de deformación angular.
<b>Punto de cedencia:</b>	Punto de la curva esfuerzo vs. Deformación, en el cual se produce el paso de la zona elástica a la zona plástica
<b>Resistencia química:</b>	Se refiere en este caso a la capacidad que tiene el material de

resistir ataques producidos por el uso de productos químicos.

**Temperatura de**

**congelación:**

Temperatura en la cual un material pasa del estado líquido al estado sólido.

**Temperatura de**

**fusión:**

Temperatura en la cual un material pasa del estado sólido al estado líquido.

**Tenaz:**

Que opone mucha resistencia a romperse o deformarse como resultado de la aplicación de una carga de impacto.

**Viscosa:**

Pegajosa, glutinosa. Resistencia que ofrecen los fluidos al movimiento relativo entre las partículas.

**Viscosidad:**

Propiedad de los fluidos que caracteriza su resistencia a fluir debido al rozamiento entre sus moléculas.

## **CAPÍTULO 9: APÉNDICES.**

### **9.1. RESEÑA SOBRE MÁQUINAS DE EXTRUSIÓN Y POLÍMEROS**

#### **9.1.1. La Máquina de Extrusión**

En esta sección se describirán los aspectos fundamentales de la máquina de extrusión, ya que a pesar de existir una enorme cantidad de diseños diferentes de este tipo de equipos, los parámetros básicos de funcionamiento son los mismos.

Existen diferentes tipos de extrusoras: las extrusoras de desplazamiento positivo, las elastodinámicas, las hidrodinámicas y las de fricción viscosa. Dentro de este último grupo se encuentran las extrusoras de tornillo, bien sean de un solo tornillo o de tornillos múltiples. A pesar de poder realizar múltiples funciones, la principal es la de transportar el polímero fundido y suministrarle la presión suficiente para que pueda salir por el molde de manera constante y uniforme.

Una máquina de un solo tornillo para la extrusión de un material termoplástico en caliente se compone fundamentalmente de: un motor, preferiblemente de velocidad variable, un mecanismo de transmisión de potencia que permite hacer girar el tornillo en una zona adecuada de velocidades, cojinetes que absorben el empuje del tornillo, una tolva de alimentación de material, un tornillo que gira dentro de un barril o cilindro, que a su vez está equipado con elementos para calentar y enfriar el material a la temperatura necesaria para fundirlo, y finalmente una boquilla por la cual pasará el material empujado por el tornillo cuando tenga una consistencia uniforme.

Aquel equipo que es alimentado por un polímero en estado sólido se le conoce como “extrusor plastificador”, y es un equipo sumamente versátil ya que además de funcionar como una bomba, cumple las funciones de transportador, plastificador, y en algunos casos, cambiador de calor y mezclador.

En la actualidad, la mayoría de los materiales termoplásticos son procesados por extrusión, combinando adecuadamente las boquillas diseñadas para fines específicos y el equipo auxiliar de enfriamiento y arrastre se puede:

1. Fabricar planchas y películas.
2. Preparar compuestos de moldeo.
3. Fabricar filamentos, tubos, varillas y todo tipo de perfiles.
4. Alimentación de calandras y otras aplicaciones.

En el estudio de las extrusoras de tornillo uno de los principales avances ha sido la investigación referente al flujo de fluidos viscosos para obtener un conocimiento científico y poder predecir lo que ocurre en el interior del cilindro de la extrusora. De esta manera se puede calcular las dimensiones del tornillo y predecir el rendimiento del equipo, si se conocen las dimensiones de la boquilla a emplear y las propiedades térmicas, la viscosidad, el comportamiento reológico y densidad aparente del material que será extruido.

Una máquina extrusora puede considerarse también como una bomba para transportar líquidos viscosos, tales como aceites lubricantes, polímeros fundidos y otros. En este caso la máquina no necesita fundir al material, que es un fluido a lo largo de la longitud del tornillo. A este tipo de equipos se le conoce como “extrusor de fundido” (melt extruder).

### **9.1.2. El tornillo de extrusión:**

La función del tornillo es transportar el material plástico desde la tolva de alimentación hacia la boquilla, durante este traslado, el material funde y es alimentado a la boquilla en estado fundido y homogéneo. El tornillo se puede considerar dividido en tres zonas, distribuidas a lo largo de su longitud, en estas zonas el polímero se comporta de maneras diferentes, pero la transición de una a otra zona no es demasiado brusca.

El plástico entra al tornillo a través de la tolva de alimentación, en forma de pequeños gránulos o incluso en forma de polvo. El material al caer en el tornillo, tiende a girar con él, pero la fricción con las paredes del cilindro se lo dificulta. Es de suma importancia que la fricción entre las paredes del cilindro y el material, y entre el material y el tornillo en la zona de alimentación se mantengan en una adecuada proporción. Si la fricción con las paredes del cilindro se hiciera sentir de manera uniforme a través de toda la masa del material, el polímero avanzaría en forma compacta. Adicionalmente, si no existiera fricción entre las paredes del cilindro y el material, éste no avanzaría, sin importar como girase el tornillo. La forma y el tamaño de las partículas alimentadas a la extrusora deben ser tomadas muy en cuenta en máquinas pequeñas, ya que en ocasiones pueden medir casi tanto como la profundidad del canal del tornillo. Tanto la alimentación como el transporte inicial de los gránulos tienen lugar de acuerdo a las teorías del transporte de sólidos secos.

En la zona de fusión, los gránulos son comprimidos y fundidos, formándose una masa con cierto grado de adherencia a las superficies del tornillo y del cilindro. La densidad del material se ve incrementada durante esta transición, por ello esta zona debe ser diseñada tanto para hacer más compacto el material, como para adaptar la variación de tamaño del canal con la velocidad de fusión y el cambio de volumen

que se produce cuando el material pasa del estado sólido al viscoso. Para que ocurra la fusión es necesario que ocurra el calentamiento del material. Una parte del calor necesario para fundir el material es suministrado por medio de resistencias eléctricas colocadas a lo largo del barril, mientras que otra parte del calor se origina debido a la fricción de los granos entre sí y con el tornillo y las paredes del cilindro. Esto se debe a la transformación de parte de la energía mecánica suministrada por el motor al tornillo.

La razón de compresión se puede definir como la razón entre el volumen de una vuelta del canal en la zona de alimentación, y el volumen del canal en la última vuelta antes de la boquilla. El diseño del tornillo en base a la obtención de una determinada relación de compresión puede hacerse de dos maneras: disminuyendo la profundidad del canal a lo largo del tornillo o disminuyendo el paso del filete, manteniendo constante la profundidad del canal.

La Densidad aparente del material aumenta repentinamente cuando pasa del estado sólido granular, al estado fundido caliente, esto ocasiona un cambio volumétrico que debe ser considerado a la hora de diseñar. El volumen del canal del tornillo en el último paso de este en la sección de alimentación puede ser hasta dos o seis veces el volumen de dicho canal en su primer paso de la sección de compresión

La zona de compresión, también conocida como zona de dosificación, es la zona de la que se tiene más conocimiento, en lo que respecta al comportamiento del polímero, ya que en esta zona el material es completamente viscoso y haciendo las debidas suposiciones justificadas, se puede estudiar matemáticamente y comprobar experimentalmente con el fin de calcular el flujo de material a través de esta zona y la potencia necesaria para conseguirlo.

En lo que respecta al diseño del tornillo, cada día es mayor el número de investigaciones que han permitido acabar con la antigua práctica de construir los tornillos por tanteo experimental. A pesar del limitado conocimiento que aun hoy en día se tiene acerca del comportamiento reológico de los materiales termoplásticos en su paso de material sólido a material fundido caliente, se sabe que la densidad aparente del material aumenta repentinamente durante esta transición, por lo que al diseñar el tornillo hay que tener en cuenta este cambio volumétrico del material.

### **9.1.3. Unidad a ser utilizada**

Es un equipo básico, que permite la realización de ensayos a diferentes materiales como plásticos, pastas y otros materiales de comportamiento similar. Se trata de una extrusora de fricción viscosa, de un solo tornillo.

Presenta una configuración similar a la de cualquier equipo de extrusión, es decir, posee como partes fundamentales el barril, el tornillo, la fuente de suministro de calor, el motor eléctrico para poder accionar el tornillo, y un mecanismo que permite la variación de velocidad de rotación del tornillo. La configuración del equipo es vertical, aunque puede operar también ubicándolo adecuadamente en posición horizontal.

En relación a las dimensiones de los equipos que se emplean a nivel industrial, éste equipo se puede considerar pequeño, o para uso de laboratorio y por consiguiente maneja un rango de presiones que a nivel industrial también se considera bajo. Para mayor información acerca de este equipo se recomienda consultar la bibliografía [11].

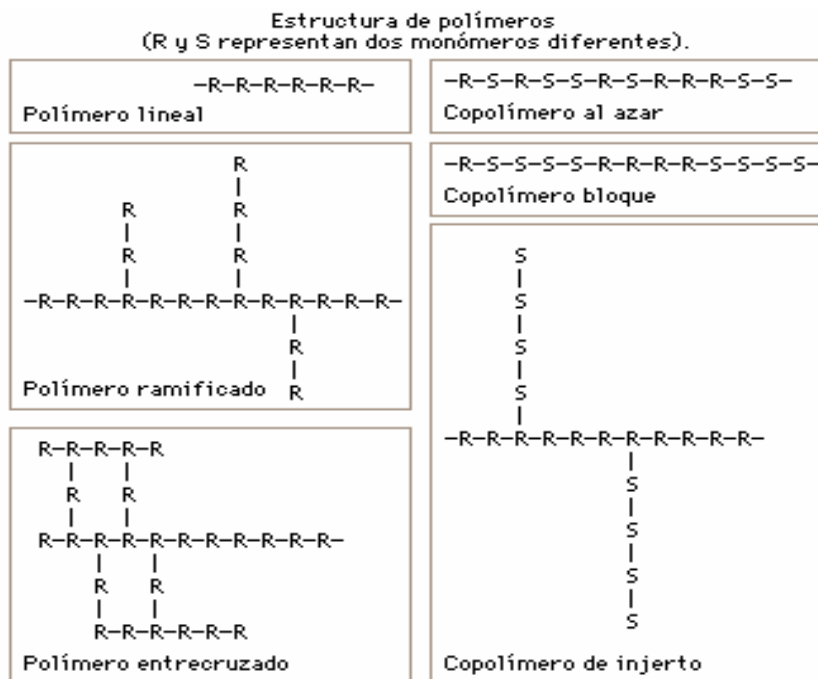


#### **9.1.4. Polímeros**

Se conoce como polímero a aquella sustancia que consiste en grandes moléculas formadas por muchas unidades pequeñas que se repiten, llamadas monómeros. Se llama grado de polimerización al número de unidades que se repiten en una molécula grande. Los homopolímeros son polímeros con un solo tipo de unidad que se repite, mientras que en los copolímeros se repiten varias unidades distintas.

Los polímeros son sustancias orgánicas presentes en la materia viva, como las proteínas, la madera, la quitina, el caucho y las resinas; así como también en muchos materiales sintéticos como los plásticos, las fibras, los adhesivos, el vidrio y la porcelana.

### 9.1.4.1. Estructura de los polímeros



Microsoft ® Encarta ® Biblioteca de Consulta 2003. © 1993-2002 Microsoft Corporation. Reservados todos los derechos.

Figura N° 37: Estructura básica de los polímeros

En la gráfica anterior se presentan diferentes estructuras de polímeros. Los polímeros pueden subdividirse en tres o cuatro grupos estructurales. Las moléculas de los polímeros lineales están formadas por largas cadenas de monómeros unidos por enlaces. Algunos ejemplos son el polietileno, el alcohol polivinílico y el policloruro de vinilo (PVC). Los polímeros ramificados poseen cadenas secundarias unidas a la cadena principal. La ramificación se puede producir por impurezas o por la presencia de monómeros que tienen varios grupos reactivos.

En los polímeros entrecruzados dos o más cadenas están unidas por cadenas secundarias. Si el grado de entrecruzamiento es pequeño, se obtiene una red poco

compacta esencialmente bidimensional, mientras que un grado elevado de entrecruzamiento origina una estructura compacta tridimensional. Las reacciones químicas dan paso al entrecruzamiento. Un ejemplo de estructura entrecruzada bidimensional es el caucho vulcanizado, en el cual los eslabones están formados por átomos de azufre. Existen materiales conocidos como duroplásticos, formados por polímeros entrecruzados con una estructura tan rígida que al calentarse se descomponen o arden en lugar de fundirse.

#### **9.1.4.2. Síntesis de los polímeros**

Para formar moléculas grandes a partir de monómeros pequeños, se emplean dos métodos, o procesos químicos: la polimerización por adición y la polimerización por condensación. En la polimerización por adición, los monómeros se unen sin que las moléculas pierdan átomos. Algunos ejemplos de polímeros de adición son el polietileno, el polipropileno, el poliestireno, el etanoato de polivinilo y el politetrafluoroetileno (teflón); mientras que en la polimerización por condensación, los monómeros se unen con la eliminación simultánea de átomos o grupos de átomos. Algunos polímeros de condensación típicos son las poliamidas, los poliésteres y ciertos poliuretanos.

Adicionalmente, en 1983 se anunció un nuevo método de polimerización por adición llamado polimerización por transferencia de grupo. En el cual un grupo activador dentro de la molécula que inicia el proceso se transfiere al final de la cadena polímera creciente mientras que los monómeros individuales se insertan en el grupo. Este método se ha empleado principalmente para los plásticos acrílicos.

### **9.1.5. Plásticos**

Una de las definiciones de plástico indica que son materiales polímeros orgánicos que tienen comportamiento plástico, es decir, que pueden deformarse hasta conseguir una forma deseada por medio de diferentes métodos como la 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 nylon.

Los plásticos son duraderos y ligeros. 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. Las enormes moléculas de las que están compuestos pueden ser lineales, ramificadas o entrecruzadas, dependiendo del tipo de plástico. Las moléculas lineales y ramificadas son termoplásticas (se ablandan con el calor), mientras que las entrecruzadas son termoestables (no se ablandan con el calor).

#### **9.1.5.1. Historia**

El desarrollo de estas sustancias se inició en 1860, cuando el fabricante estadounidense de bolas de billar Phelan and Collander ofreció una recompensa de 10.000 dólares a quien consiguiera un sustituto aceptable del marfil natural. Una de las personas que optaron al premio fue el inventor estadounidense Wesley Hyatt, quien desarrolló un método de procesamiento a presión de la piroxilina, un nitrato de celulosa de baja nitración tratado previamente con alcanfor y una cantidad mínima de alcohol. Si bien Hyatt no ganó el premio, su producto, patentado con el nombre de celuloide, se utilizó para fabricar diferentes objetos, desde placas dentales a cuellos de camisa. El celuloide tuvo un notable éxito comercial a pesar de ser inflamable y deteriorarse al exponerlo a la luz.

Durante las décadas siguientes aparecieron de forma gradual más tipos de plásticos. Se inventaron los primeros plásticos totalmente sintéticos: un grupo de plásticos termoestables o resinas desarrollado hacia 1906 por el químico estadounidense de origen belga Leo Hendrik Baekeland, y comercializado con el nombre de baquelita. Entre los productos desarrollados durante este periodo están los polímeros naturales alterados, como el rayón, fabricado a partir de la celulosa, del nitrato de celulosa o del etanoato de celulosa.

#### **9.1.5.1.1. El avance de la química de los plásticos**

En 1920 se produjo un acontecimiento que marcaría la pauta en el desarrollo de materiales plásticos. El químico alemán Hermann Staudinger propuso que éstos se componían en realidad de moléculas gigantes o macromoléculas. Los esfuerzos dedicados a probar esta afirmación iniciaron numerosas investigaciones científicas que produjeron enormes avances en esta parte de la química. En las décadas de 1920 y 1930 apareció un buen número de nuevos productos, como el etanoato de celulosa (llamado originalmente acetato de celulosa), utilizado en el moldeo de resinas y fibras, y el policloruro de vinilo (PVC), empleado en tuberías y recubrimientos de vinilo. Otro descubrimiento fundamental en la década de 1930 fue la síntesis del nylon.

Uno de los plásticos más populares desarrollados durante este periodo es el metacrilato de metilo polimerizado, que se comercializó en Gran Bretaña con el nombre de Perspex y como Lucite en Estados Unidos, y que se conoce en español como plexiglás. Este material tiene unas propiedades ópticas excelentes; puede utilizarse para gafas y lentes, o en el alumbrado público o publicitario. Las resinas de poliestireno, comercializadas alrededor de 1937, se caracterizan por su alta resistencia a la alteración química y mecánica a bajas temperaturas y por su escasa absorción de agua. Estas propiedades hacen del poliestireno un material adecuado para

aislamientos y accesorios utilizados a bajas temperaturas, como en instalaciones de refrigeración y en aeronaves destinadas a los vuelos a gran altura. El PTFE (politetrafluoretileno), sintetizado por primera vez en 1938, se comercializó con el nombre de teflón en 1950. Otro descubrimiento fundamental en la década de 1930 fue la síntesis del nylon.

#### **9.1.5.1.2. La segunda guerra mundial**

Durante la II Guerra Mundial, 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. Alemania, por ejemplo, que perdió sus fuentes naturales de látex, inició un gran programa que llevó al desarrollo de un caucho sintético. La entrada de Japón en el conflicto mundial cortó los suministros de caucho natural, seda y muchos metales procedentes de Asia a Estados Unidos. La respuesta estadounidense fue la intensificación del desarrollo y la producción de plásticos. El nylon se convirtió en una de las fuentes principales de fibras textiles, los poliésteres se utilizaron en la fabricación de blindajes y otros materiales bélicos, y se produjeron en grandes cantidades varios tipos de caucho sintético.

#### **9.1.5.1.3. El auge de la posguerra**

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 Nóbel de Química por sus estudios acerca de los polímeros.

#### **9.1.5.2. Clasificación de los plásticos:**

Se puede establecer la siguiente clasificación de los plásticos: por el proceso de polimerización, por la forma en que pueden procesarse y por su naturaleza química.

- Según el proceso de polimerización:

Por el proceso de polimerización, los plásticos se pueden clasificar en polímeros de condensación y polímeros de adición. Las reacciones de condensación producen diferentes longitudes de polímeros y generan pequeñas cantidades de subproductos, como agua, amoníaco y etilenglicol; mientras que las reacciones de adición producen longitudes específicas y no producen ningún subproducto. Algunos polímeros típicos de condensación son el nylon, los poliuretanos y los poliésteres. Entre los polímeros de adición se encuentran el polietileno, el polipropileno, el policloruro de vinilo y el poliestireno. Las masas moleculares medias de los polímeros de adición son generalmente mayores que las de los polímeros de condensación.

- Según la forma en que son procesados:

El plástico se procesa de formas distintas, según sea termoplástico o termoestable. Los termoplásticos, formados por polímeros lineales o ramificados, pueden fundirse. Se ablandan cuando se calientan y se endurecen al enfriarse. Lo mismo ocurre con los plásticos termoestables que están poco entrecruzados. No

obstante, la mayoría de los termoestables ganan en dureza cuando se calientan; el entrecruzado final que los vuelve rígidos se produce cuando se ha dado forma al plástico. Por lo general, los termoplásticos pueden fundirse nuevamente, luego de endurecerse, a diferencia de los termoestables, también conocidos como termorrígidos, que luego de cierto rango de temperaturas se hacen más rígidos y no vuelven a ablandarse.

- Según la naturaleza química:

La naturaleza química de un plástico depende del monómero (la unidad repetitiva) que compone la cadena del polímero. Por ejemplo, las poliolefinas están compuestas de monómeros de olefinas, que son hidrocarburos de cadena abierta con al menos un doble enlace. El polietileno es una poliolefina. Su monómero es el etileno. Otros tipos de polímeros son los acrílicos (como el polimetacrilato), los poliestirenos, los halogenuros de vinilo (como el policloruro de vinilo), los poliésteres, los poliuretanos, las poliamidas (como el nylon), los poliéteres, los acetatos y las resinas fenólicas, celulósicas o de aminas.

### **9.1.5.3. Fabricación**

La fabricación de los plásticos y su manufactura implica cuatro pasos básicos: obtención de las materias primas, síntesis del polímero básico, obtención del polímero como un producto utilizable industrialmente y moldeo o deformación del plástico hasta su forma definitiva.

El plástico se moldea durante su producción, porque una vez endurecido no puede o no debería fundirse y modelarse de nuevo, ya que sus propiedades varían.



Los plásticos se utilizan cada vez más, porque son relativamente duraderos, baratos y versátiles.

## **I. Materias primas**

En un principio, la mayoría de los plásticos se fabricaban a partir de resinas de origen vegetal, como la celulosa (del algodón), el furfural (de la cáscara de la avena), aceites de semillas y derivados del almidón o del carbón. La caseína de la leche era uno de los materiales no vegetales utilizados. A pesar de que la producción del nylon se basaba originalmente en el carbón, el aire y el agua, y de que el nylon se fabrica todavía con semillas de ricino, la mayoría de los plásticos se elaboran hoy con derivados del petróleo. Las materias primas derivadas del petróleo son tan baratas como abundantes. No obstante, dado que las existencias mundiales de petróleo tienen un límite, se están investigando otras fuentes de materias primas, como la gasificación del carbón.

## **II. Síntesis del polímero**

El primer paso en la fabricación de un plástico es la polimerización. Como se comentaba anteriormente, los dos métodos básicos de polimerización son las reacciones de condensación y las de adición. Estos métodos pueden llevarse a cabo de varias maneras. En la polimerización en masa se polimeriza sólo el monómero, por lo general en una fase gaseosa o líquida, si bien se realizan también algunas polimerizaciones en estado sólido. Mediante la polimerización en disolución se forma una emulsión que se coagula seguidamente. En la polimerización por interfase los monómeros se disuelven en dos líquidos inmiscibles y la polimerización tiene lugar en la interfase entre los dos líquidos.

### **III. Aditivos**

Con frecuencia se utilizan aditivos químicos para conseguir una propiedad determinada. Por ejemplo, los antioxidantes protegen el polímero de degradaciones químicas causadas por el oxígeno o el ozono. De una forma parecida, los estabilizadores lo protegen de la intemperie. Los plastificantes producen un polímero más flexible, los lubricantes reducen la fricción y los pigmentos colorean los plásticos. Algunas sustancias ignífugas y antiestáticas se utilizan también como aditivos.

Muchos plásticos se fabrican en forma de material compuesto, lo que implica la adición de algún material de refuerzo (normalmente fibras de vidrio o de carbono) a la matriz de la resina plástica. Muchos materiales compuestos tienen la resistencia y la estabilidad de los metales, pero por lo general son más ligeros. Las espumas plásticas, compuestas de plástico y gas, proporcionan una masa de gran tamaño pero muy ligera.

### **IV. Forma y acabado**

Las técnicas empleadas para conseguir la forma final y el acabado de los plásticos dependen de tres factores: tiempo, temperatura y deformación. La naturaleza de muchos de estos procesos es cíclica, si bien algunos pueden clasificarse como continuos o semicontinuos.

Una de las operaciones más comunes es la extrusión. Una máquina de extrusión consiste en un aparato que bombea el plástico a través de un molde con la forma deseada. Los productos extrusionados, como por ejemplo los tubos, tienen una sección con forma regular. La máquina de extrusión también realiza otras operaciones, como moldeo por soplado o moldeo por inyección.

Otros procesos utilizados son el moldeo por compresión, en el que la presión fuerza al plástico a adoptar una forma concreta, y el moldeo por transferencia, en el que un pistón introduce el plástico fundido a presión en un molde. El calandrado es otra técnica mediante la que se forman láminas de plástico. Algunos plásticos, y en particular los que tienen una elevada resistencia a la temperatura, requieren procesos de fabricación especiales. Por ejemplo, el politetrafluoretileno tiene una viscosidad de fundición tan alta que debe ser prensado para conseguir la forma deseada, y sinterizado, es decir, expuesto a temperaturas extremadamente altas que convierten el plástico en una masa cohesionada sin necesidad de fundirlo.

#### **9.1.5.4. Aplicaciones**

##### ➤ Empaquetado

Una de las aplicaciones principales del plástico es el empaquetado. Se comercializa una buena cantidad de polietileno de baja densidad en forma de rollos de plástico transparente para envoltorios. El polietileno de alta densidad se usa para películas plásticas más gruesas, como la que se emplea en las bolsas de basura. Se utilizan también en el empaquetado: el polipropileno, el poliestireno, el policloruro de vinilo (PVC) y el policloruro de vinilideno. Este último se usa en aplicaciones que requieren estanqueidad, ya que no permite el paso de gases (por ejemplo, el oxígeno) hacia dentro o hacia fuera del paquete. De la misma forma, el polipropileno es una buena barrera contra el vapor de agua; tiene aplicaciones domésticas y se emplea en forma de fibra para fabricar alfombras y sogas.

##### ➤ Construcción

La construcción es otro de los sectores que más utilizan todo tipo de plásticos, incluidos los de empaquetado descritos anteriormente. El polietileno de alta densidad

se usa en tuberías, del mismo modo que el PVC. Éste se emplea también en forma de láminas como material de construcción. Muchos plásticos se utilizan para aislar cables e hilos, y el poliestireno aplicado en forma de espuma sirve para aislar paredes y techos. También se hacen con plástico marcos para puertas, ventanas y techos, molduras y otros artículos.

➤ Otras aplicaciones

Otros sectores industriales, en especial la fabricación de motores, dependen también de estos materiales. Algunos plásticos muy resistentes se utilizan para fabricar piezas de motores, como colectores de toma de aire, tubos de combustible, botes de emisión, bombas de combustible y aparatos electrónicos. Muchas carrocerías de automóviles modernos están hechas con plástico reforzado con fibra de vidrio.

Los plásticos se emplean también para fabricar carcasas para equipos de oficina, dispositivos electrónicos, accesorios pequeños y herramientas. Entre las aplicaciones del plástico en productos de consumo se encuentran los juguetes, las maletas y artículos deportivos.

#### **9.1.5.5. Salud y riesgos para el entorno**

Dado que los plásticos son relativamente inertes, los productos terminados no representan ningún peligro para el fabricante o el usuario. Sin embargo, se ha demostrado que algunos monómeros utilizados en la fabricación de plásticos producen cáncer. De igual forma, el benceno, una materia prima en la fabricación del nylon, es un carcinógeno. Los problemas de la industria del plástico son similares a los de la industria química en general.

La mayoría de los plásticos sintéticos no pueden ser degradados por el entorno. Al contrario que la madera, el papel, las fibras naturales o incluso el metal y el vidrio, no se oxidan ni se descomponen con el tiempo. Se han desarrollado algunos plásticos degradables, pero ninguno ha demostrado ser válido para las condiciones requeridas en la mayoría de los vertederos de basuras. En definitiva, la eliminación de los plásticos representa un problema medioambiental. El método más práctico para solucionar este problema es el reciclaje, que se utiliza, por ejemplo, con las botellas de bebidas gaseosas fabricadas con tereftalato de polietileno. En este caso, el reciclaje es un proceso bastante sencillo. Se están desarrollando soluciones más complejas para el tratamiento de los plásticos mezclados de la basura, que constituyen una parte muy visible, si bien relativamente pequeña, de los residuos sólidos. Pero de cualquier manera, el manejo adecuado de este tipo de desechos sólo se logrará con una adecuada campaña informativa hacia los usuarios y una planificación adecuada para el manejo de los mismos.

#### **9.1.5.6. Algunas propiedades típicas de los plásticos:**

##### **9.1.5.6.1. Comportamiento de los plásticos sometidos a tensión**

Anteriormente se explicó que existen diferentes maneras de clasificar a los materiales plásticos. Otra particularidad de estos materiales es su comportamiento ante la aplicación de una carga constante. Los plásticos no siguen la Ley de Hooke. A 23°C, bajo la acción de una carga constante prolongada en el tiempo continúan deformándose aunque la carga unitaria sea menor a la del punto de cedencia. Esto implica que cuando son sometidos a tensión, la deformación no sólo es producto de la magnitud de la carga aplicada sino del tiempo de aplicación de la misma.

Para los materiales plásticos, se define como módulo de elasticidad la relación entre la tensión en el punto de cedido y la deformación ocurrida en ese punto. A

continuación se presentan las curvas dos ejemplos de curvas tensión vs. deformación para dos tipos de materiales plásticos: uno con comportamiento dúctil y otro con comportamiento rígido.

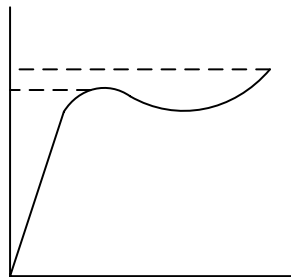


Figura N° 38: Curva esfuerzo vs. Deformación para materiales plásticos con características dúctiles

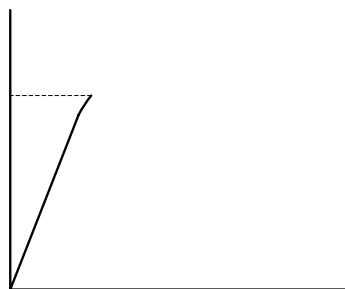


Figura N° 39: Curva esfuerzo vs. Deformación para plásticos con comportamiento frágil

#### 9.1.5.6.2. Temperatura vítrea en los polímeros

Es una propiedad de todos los polímeros, tan importante como la temperatura de fusión o la temperatura de congelación. Debido a la agitación térmica se produce un arreglo continuo de los átomos y las moléculas dentro de un polímero líquido, es por ello que debe existir un “espacio libre” en el líquido, ya que a medida que disminuye la temperatura, se reduce también la agitación térmica y por consiguiente

Tensión Kg / cm<sup>2</sup>

Tens  
Pu  
o  
e

se reduce también la amplitud vibracional y el “espacio libre”. El volumen se reduce de manera continua hasta llegar a la región de líquido subenfriado, por lo que la estructura líquida se retiene. Tal y como ocurre con los líquidos, puede fluir a una temperatura más alta, pero se dificulta a medida que desciende la temperatura y disminuye el espacio intermolecular, debido al aumento de la viscosidad.

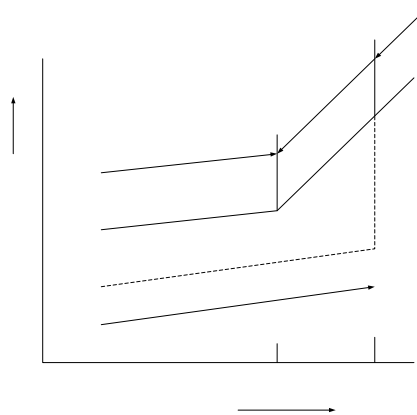


Figura N° 40: Comportamiento del Volumen en función de la temperatura en los polímeros

Si el polímero es enfriado sin cristalizar, alcanza un punto en el cual la agitación térmica no es suficiente para permitir un rearrreglo de las moléculas y se vuelve sumamente rígido, sin llegar a ser cristalino, y bastante quebradizo. Si el rearrreglo de las moléculas no se continúa, cualquier disminución adicional de temperatura implicará únicamente que las vibraciones de las moléculas tendrán menor amplitud. Se produce un cambio en la pendiente de la gráfica anterior. El punto donde cambia la pendiente representa a la temperatura vítrea del polímero, se le llama así porque este es un fenómeno típico de todos los vidrios. Por debajo de esta temperatura, un polímero no cristalino es un vidrio (vidrio orgánico).

### 9.1.5.6.3. Conductividad Térmica

<i>Materiales</i>	<b>k(cal./cm.seg.°C)</b>
PE Baja densidad (0,981gr./cm <sup>3</sup> @ 25°C)	6,0 x 10 <sup>-4</sup>
PE alta densidad (0,951 – 0,958 gr./ cm <sup>3</sup> @ 25°C)	9,5 – 10,9 x 10 <sup>-4</sup>
Acero al carbono	12,4 x 10 <sup>-2</sup>
Acero inoxidable	3,9 x 10 <sup>-2</sup>
Aluminio	52,0 x 10 <sup>-2</sup>
Vidrio	25,8 x 10 <sup>-4</sup>

Tabla N° 36: Conductividad térmica (k) de algunos materiales

Los materiales plásticos no son buenos conductores térmicos, por el contrario, en la mayoría de los casos son utilizados como aislantes. En las tablas anteriores se pueden observar valores para la conductividad térmica de diferentes materiales, lo que permite observar que el valor de la conductividad térmica de los materiales plásticos es muy bajo comparado con otros materiales como el acero, aluminio o el vidrio

### 9.1.6. Polietileno:

Se conoce como polietileno a cada uno de los polímeros del etileno. Se designa como PE. Es uno de los materiales plásticos de mayor producción. Es un material de comportamiento tenaz a temperatura ambiente, pero que tiende a fragilizarse a medida que la temperatura desciende, o cuando se expone a la luz ultravioleta. Según el proceso seguido en su polimerización, se distinguen varios tipos de polietilenos: de baja densidad (PEBD), de alta densidad (PEAD) y lineales de baja densidad (PELBD).



El polietileno de baja densidad es un polímero ramificado que se obtiene por polimerización en masa del etileno mediante radicales libres, a alta presión. Es un sólido más o menos flexible, según el grosor, ligero y buen aislante eléctrico; presenta además una gran resistencia mecánica y química. Se trata de un material plástico que por sus características y bajo coste se utiliza mucho en envasado, revestimiento de cables y en la fabricación de tuberías. A partir del polietileno de baja densidad se obtiene el polietileno reticulado (con enlaces entre cadenas vecinas), rígido y más resistente a la tracción y al cambio de temperatura, que se utiliza para proteger y aislar líneas eléctricas de baja y media tensión. Según la clasificación del código ASTM se consideran polímeros de baja densidad aquellos cuyo valor de densidad está entre 0,910 y 0,940 g/cm<sup>3</sup>.

El proceso de polimerización del polietileno de alta densidad se lleva a cabo a baja presión y con catalizadores en suspensión. Se obtiene así un polímero muy cristalino, de cadena lineal muy poco ramificada. Su resistencia química y térmica, así como su opacidad, impermeabilidad y dureza son superiores a las del polietileno de baja densidad, aunque este último es más resistente al agrietamiento y los impactos. Se emplea en la construcción y también para fabricar prótesis, envases, bombonas para gases, contenedores de agua y combustible, gaveras y bolsas. Para la ASTM un polímero se considera de alta densidad cuando sus valores oscilan entre 0,941 y 0,965 g/cm<sup>3</sup>.

<b><i>Propiedades</i></b>	<b><i>Efecto</i></b>
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

*Tabla N° 37: Efecto del aumento de densidad sobre las propiedades del polietileno*

Grupo	Resinas Polioleofinicas
Material	Polietileno de Baja Densidad
Símbolo ISO	PE Baja Densidad
Especificaciones	DIN 16776 UNI 7054
Estructura Molecular	Semicristalina

*Tabla N° 38 - a: Ficha técnica del polietileno de baja densidad (PEBD)*

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

*Tabla N° 38 - b: Ficha técnica del polietileno de baja densidad (PEBD)*

El polietileno lineal de baja densidad se obtiene polimerizando el etileno con un alqueno (especialmente 1-buteno) a baja presión, en disolución, suspensión o fase gaseosa, en presencia de catalizadores (véase Hidrocarburos). Se trata de un polímero lineal con ramificaciones cortas que hacen que su temperatura de fusión y su resistencia a la tracción y al agrietamiento sean superiores a las del polietileno de baja densidad. Se utiliza en el recubrimiento de cables y en la fabricación de objetos moldeados por extrusión o soplado, tales como botellas, envases, empaques, película para invernadero, material dieléctrico y juguetes.

# MATERIAL SAFETY DATA SHEET

Document	VX MSDS 020
Issued	13/10/99
Revision:	Date: 15/11/99

## COMPANY DETAILS:

Company: Vinidex Pty Limited  
 ABN: 42 000 664 942  
 Telephone Number: (02) 9604 2422  
 Facsimile Number: (02) 9604 1078  
 Emergency Telephone Number: (02) 9604 2422

## IDENTIFICATION

Product Name: Polyethylene (PE) pipe and conduit  
 Tradenames: Aquapol, Cablecon, Sewertech, Minetech, Slurrytech,  
 Other Names: High Density Polyethylene (HDPE), Medium Density Polyethylene (MDPE) and Low Density Polyethylene (LDPE), abb. polythene  
 Manufacturer's Product Code: Various  
 Dangerous Goods Class and Subsidiary Risk: Not classified as hazardous according to criteria of Worksafe Australia  
 Hazchem Code: Non allocated  
 Poisons Schedule Number: Not listed  
 Use: Water supply, irrigation, sewerage, drainage, gas, industrial process piping, telecommunications and electrical conduit

## Physical Description/Properties

Appearance: Plastic pipes or tubes, 12 to 1200 mm diameter, in coils up to 300 m or straight lengths up to 12 m. Colour: black, blue, yellow or white, or black with coloured stripes  
 Boiling Point/Melting Point: Softens 107-130 °C  
 Vapour Pressure: Not applicable  
 Relative density: 0.93 - 0.98  
 Flashpoint: Non allocated  
 Flammability Limits: Non allocated  
 Solubility in Water: Negligible

## Ingredients:

Chemical Name:	CAS Number:	Proportion:
Polyethylene	9002-88-4	96 - 99.5%
Pigments		
Black: Carbon Black	1333-86-4	0 - 3%

White: Rutile titanium dioxide	13463-67-7	0 - 3%
Yellow: Cadmium lithopone yellow		0 - 0.6%
Yellow: Cadmium sulphide yellow, Titanium dioxide, Iron oxide red		0 - 1.5%
Blue: Copper phthalocyanine	147-14-8	0 - 0.5%
Proprietary additives, anti-oxidants		0 - 1%

---

## HEALTH HAZARD INFORMATION

---

### Health Effects

#### General

There are no significant health hazards associated with PE pipe products under normal conditions of use or from mechanical working or forming of the product. All additives are encapsulated within the polymer matrix and should present no hazard under conditions of normal use and good occupational work practice. Peripheral effects may arise from combustion. See section PRECAUTIONS FOR USE. No listed carcinogenic, mutagenic or teratogenic effects.

#### Acute:

- Swallowed:** No known effects/minimal toxicity.
- Eye:** Dust from cutting with abrasive wheel may scratch eye surfaces/cause mechanical irritation to eyes.
- Skin:** Skin contact may result in mechanical injury or abrasion. This is a low risk hazard. Thermal burns may result from exposure to hot material.
- Inhaled:** Inhalation of dust fines may cause irritation of nose and throat.

#### Chronic:

None known.

### First Aid

- Swallowed:** Not applicable to product as supplied. Ingestion of dust requires no specific treatment. Drink water.
- Eye:** Flush with water in order to remove particles.
- Skin:** Wash dust off with soap and water. Molten material will adhere to skin and cause burns. Cool material as quickly as possible with water and see a physician for prompt removal of the adhering material and treatment of the burn. Do not remove material or clothing from skin. Removal may exacerbate the injury.
- Inhaled:** Not applicable to product as supplied. Gaseous combustion products: Remove victim to fresh air.

**First Aid Facilities:** No special requirements.

**Advice to Doctor:** Treat symptomatically

---

## PRECAUTIONS FOR USE

---

**Exposure Standards:** No exposure standard has been published by the National Occupational Health and Safety commission (Worksafe Australia). A limit of 10 mg/m<sup>3</sup> for nuisance dusts is recommended.

<b>Engineering Controls:</b>	Stability – stable Incompatibility – Strong oxidising agents. Polyethylene pipe can be permeated by hydrocarbon liquids or vapours, which may taint water or air within pipes used for potable water or air transmission.
<b>Personal Protection</b>	No special protection required. Gloves are advisable when handling cut ends of pipes. When working with the product, normal safety glasses are recommended, and dust mask if sawing with abrasive wheel or sanding.
<b>Flammability:</b>	Ignitable and will support combustion. Protect from contact with open flame.

---

#### SAFE HANDLING INFORMATION

---

<b>Storage and Transport:</b>	No special requirements. PE pipe products are not considered hazardous for transportation according to Transport of Goods by Road and Rail Acts
<b>Handling</b>	Coils of pipe may have substantial elastic energy. When cutting bands exercise caution to ensure that springing of the pipe, particularly at the ends, cannot cause injury. Injury can be sustained by rolling of pipes. Unpack crates and bundles on a flat surface, and ensure free stacks are adequately chocked. Do not climb on stacks.
<b>Material working</b>	Normal safe practices should be employed when working with the product in order to avoid inhalation of dust created when cutting the material: a well ventilated area and the use of dust masks and eye protection when cutting. When heating for bending or other forming, use hot water or air with appropriate safeguards. Use of an open flame is inadvisable (see below).
<b>Spills and Disposal:</b>	Spillage – not applicable. Disposal – Recycle where possible. Refer to appropriate environmental protection agency/authority. Normally suitable for disposal as general waste land fill.
<b>Fire/Explosion Hazard:</b>	Build up of airborne dusts may cause a dust explosion. By-products of combustion include Carbon Dioxide (asphyxiant) Carbon Monoxide (toxic), plus low levels of aldehydes, acetic Acid. Pigments as listed may become free and present in combustion products or residues at low levels.
<b>Fire Fighting Procedures</b>	Use self-contained breathing apparatus.
<b>Extinguishing Media</b>	Use water, water fog or foam to extinguish fires. Carbon Dioxide or Dry Chemical are suitable, but are not preferred, as lack of cooling capacity may result in re-ignition.

<b>CONTACT POINT</b>	The Technical Manager, Technical Services Group Telephone : (02) 9604 2422
----------------------	---

---

This MSDS summarises at the date of issue our best knowledge of the health and safety hazard information of the product, and in particular how to safely handle and use the product in the workplace. Vinidex Tubemakers Pty Limited cannot anticipate or control all the conditions under which the product may be used, and it remains the responsibility of each user, prior to usage, to review this MSDS in the context of how the user intends to handle and use the product in the workplace.

If clarification or further information is needed to ensure that an appropriate assessment can be made, the user should contact this company.

Our responsibility for product as sold is subject to our standard terms and conditions, a copy of which is sent to our customers and is also available upon request.

*Figura N° 41: Hoja de seguridad del polimero.*



### 9.3. Proceso de fabricación de los Tornillos (FOTOS)



*Figura N° 42 (izquierda): Medidas de las barras brutas mediante Calibrador de Vernier. Figura N° 43 (derecha): Medidas de las barras brutas mediante tornillo micrométrico*



*Figura N° 44 (izquierda): Torno empleado para el conformado de las piezas. Figura N° 45 (derecha): Inicio del Devastado*



*Figura N° 46 (izquierda): Acción de la Herramienta de corte en la torreta mientras se ejerce la lubricación. Figura N° 47 (derecha): Utilización de la Torreta y el Centro-punto.*



*Figura N° 48 (izquierda): Muesca previa al fresado. Figura N° 49 (derecha): Fresado del extremo superior del Tornillo*



*Figura N° 50 (derecha): Montaje para el Roscado. Figura N° 51 (derecha): Roscado*





*Figura N° 52 (izquierda): Roscado de la Zona 3 del Tornillo PV. Figura N° 53 (derecha): Lubricación en el roscado de la Zona 3 del Tornillo PV*

#### **9.4. Equipo en funcionamiento (FOTOS)**



*Figura N° 54 (izquierda): Inicio de la producción continua. Figura N° 55 (derecha): Evolución de la producción continua*



*Figura N° 56 (izquierda): Inicio de deformación lateral por descentrado del torpedo. Figura N° 57 (centro): Formación de codo de 90°. Figura N° 58 (derecha): Final de la producción de codo a 90°*



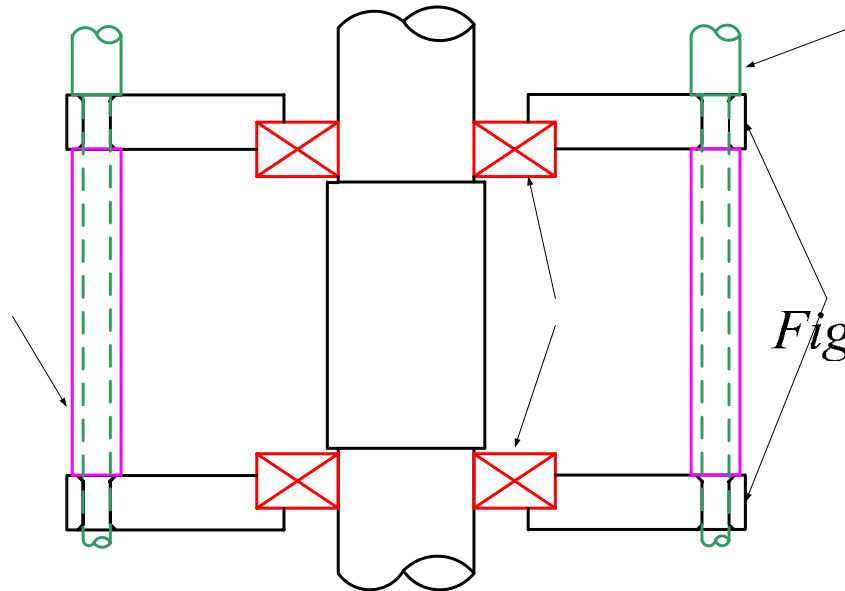
*Figura N° 59 (izquierda): Inicio de producción continua axial. Figura N° 60 (centro): Desarrollo de la producción continua axial. Figura N° 61 (derecha): Efecto del calentamiento gradual del molde durante la producción*



*Figura N° 62: Fin de la producción continua axial*

#### **9.5. Modificaciones efectuadas en base a las recomendaciones 7 y 14 propuestas por el jurado y ejecutadas como actividades adicionales.**

Luego de evaluar los resultados obtenidos con el equipo operando en forma vertical, se procedió a rediseñar el mueble que le servía de base para poder ubicar el barril en forma horizontal y sujetarlo mejor al mueble, de forma tal de reducir las vibraciones. En cuanto al apriete excesivo en las placas de sujeción de los rodamientos, se evaluó el diseño de las mismas y se optó por agregarle cuatro camisas separadoras, que no permiten que las placas sean apretadas en exceso.



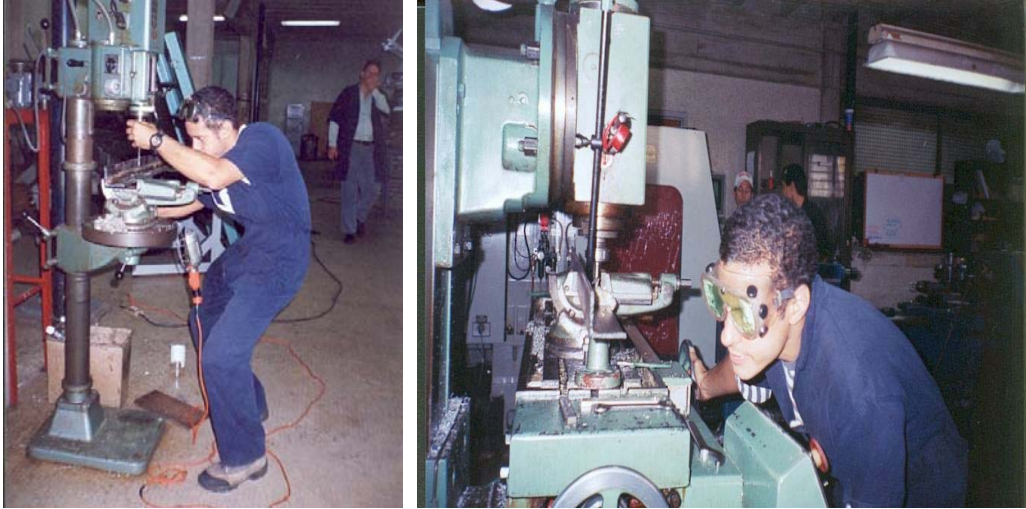
*Fig 63 Representa*

EL mueble de base fue sustituido por dos perfiles angulares enfrentados cada uno de unos 50 mm<sup>(1)</sup> de ala, 5 mm<sup>(1)</sup> de espesor y 800 mm<sup>(1)</sup> de longitud. Estos perfiles angulares fueron perforados con cavidades pasantes de sección circular de distintos diámetros de forma tal que fuera posible introducir tornillos y espárragos según sea el caso. Adicionalmente, se perforaron cuatro correderas horizontales de unos 70 mm<sup>(1)</sup> de desplazamiento de la fresa bailarina que permiten trasladar el apoyo intermedio con el objeto de tensar las bandas N°1 y N°2.

Camisa de  
separación

Tor

(1) medidas aproximadas



*Figuras 64 y 65 : taladrado y fresado de los perfiles angulares.*

Una última perforación en cada perfil a modo de canal fue necesaria para evitar que éstos obstruyeran el giro de los rodamientos del tornillo.

El perfil angular inferior fue fijado a la mesa por medio de tres tornillos y ambos perfiles mantienen su separación gracias a un par de separadores que se encuentran en sus extremos, quienes mantienen su posición gracias a la carga ejercida por cuatro tornillos en cada uno.

Una pequeña ala construida a partir de un segmento de perfil de unos 50 mm<sup>(1)</sup> fue necesario para apoyar una de las bases del motor, la cual quedaría fuera de la máquina de no ser por esta ala debido a que el actuador requiere de una posición particular para funcionar adecuadamente con la banda N°1 para que ésta no haga contacto ni con las otras bases del motor, ni con la columna del apoyo intermedio.

---

(1) medidas aproximadas

Como mesa se utilizó una de las placas horizontales del mueble original, la cual presenta un pequeño sujetador para el molde que evite la flexión del barril, pero que permita las posibles deformaciones axiales producto del calentamiento. De esta forma, la unidad fue ubicada en disposición horizontal, con el motor, el apoyo y el árbol del acople del tornillo fuera de la mesa unidos a los perfiles angulares.

Con esta nueva configuración del equipo, se efectuó una prueba posterior para evaluar el funcionamiento del mismo, empleando únicamente el tornillo de paso variable y sección constante, ya que a pesar de no ser el más apropiado para este material a nivel de rendimiento, en las pruebas ya realizadas se pudo constatar que era el que le ocasionaba menos saltos al relé del motor, y en este caso una de las prioridades era proteger el motor eléctrico; además, con esta nueva configuración del equipo, una de las cosas que más se perseguía era reducir el nivel de vibraciones, para evaluar que efecto tenía la vibración en la calidad del acabado superficial de las piezas obtenidas.

La prueba se efectuó respetando las condiciones de operación y funcionamiento previamente establecidas y descritas, con respecto a los tiempos de calentamiento de las resistencias, y los tiempos de funcionamiento del motor eléctrico. Se obtuvieron los siguientes resultados:

- Las vibraciones del barril se redujeron considerablemente, ya que se apoyaba no solamente en su parte superior, sino también en su extremo inferior y, a su vez, al eliminar el mueble metálico que mantenía la unidad en posición vertical, se obtiene un equipo más portátil que puede ser colocado sobre una mesa suficientemente estable, y de esta manera se evita la vibración que le ocasionaba al mueble el motor eléctrico.





*Figura 66: La máquina vista de frente.*



*Figura 67: Vista lateral del equipo*

- La pieza de polietileno obtenida presentó una mayor longitud que con la configuración vertical al no verse limitada por las dimensiones físicas del equipo. Al poner en práctica las recomendaciones aportadas por el Sr. Hugo Suárez (a ser citado más adelante) como lo son el utilizar bandas transportadoras para movilizar la pieza extruida y la implementación de un sistema de refrigeración que conservara las dimensiones finales, se obtuvo un acabado superficial de mayor calidad.

Dadas las condiciones de operación, fueron sustituidas las bandas transportadoras por la tracción manual y la refrigeración se efectuó por medio de la acción de un ventilador axial portátil.



*Figura 68: pieza en extrusión*

#### **9.5.1. Investigación adicional sobre el arranque y parada de las máquinas de extrusión de polietileno comerciales.**

Producto de visitas a la planta ARGOMIN C.A. ubicada en las adyacencias a Santa Teresa del Tuy, a la microempresa Plásticos H.S. que se encuentra dentro de la población de Santa Teresa y al Sr. Hugo Suárez, empleado de una y propietario de la otra, fue posible recabar la siguiente información:

##### **1.- Procedimiento de Arranque.**

Las unidades extrusoras de polietileno de baja densidad no requieren de un elaborado proceso de arranque. Si la máquina se encuentra vacía, se encienden los



sistemas de control de temperatura y se alimenta a baja velocidad. Una vez la temperatura ha llegado a los rangos de funcionamiento en una forma estable, se les da mayor velocidad.

Si la unidad fue apagada con material en su interior, se procede a arrancar el equipo de forma similar: se encienden los controles de temperaturas y cuando se alcancen las condiciones de operación, se inicia el movimiento del tornillo.

## 2.- Procedimiento de parada.

El polietileno es un material fácil de trabajar. El procedimiento de parada consiste simplemente en detener el motor y apagar el sistema de control de temperaturas. La unidad perfectamente puede quedar llena de material, el cual será fundido cuando se reinicie la operación, por lo que resulta innecesario vaciar la máquina salvo en las paradas previstas para el mantenimiento.

Si se desea vaciar el barril de la unidad, simplemente se retira el plato rompedor y el molde y se procede a la descarga abierta. Una vez descargado todo el material, se puede retirar el tornillo.

El material sacado en el vaciado no se desperdicia por cuanto la planta cuenta con molinos para pulverizarlo y de esta forma poder alimentar la unidad con este material.

El uso de silicón en los tornillos de extrusión sólo se justifica cuando la máquina va a permanecer detenida por largos períodos para evitar que se oxide. Su uso indiscriminado afecta la calidad del producto final.

### 9.5.2. Sugerencias para producir piezas de calidad con la Unidad de extrusión

A partir de la experiencia del Sr. Suárez en este campo y de una evaluación de los procesos que se efectúan tanto en ARGOMIN C.A., como en Plásticos H.S. se obtienen las siguientes consideraciones para un eficiente desempeño de las unidades extrusoras y su consecuente obtención de piezas de una calidad acorde a las exigencias del mercado.

1. Es imprescindible un Plato Rompedor para obtener piezas de mínima rugosidad en el acabado superficial, ya que éste permite redireccionar el flujo evitando la tendencia a girar que trae el flujo en su paso del barril al molde.
2. Las temperaturas deben ser controladas meticulosamente. Es necesario el uso no sólo de resistencias eléctricas o fuentes de calor, sino también fuentes de enfriamiento como lo son ventiladores radiales que bajen rápidamente la temperatura.



*Figura 69 y 70: control de temperatura por resistencias y ventilación*

3. La distribución de temperaturas debe ir de menor a mayor desde la alimentación hasta la descarga, e incluso el molde-boquilla se debe presentar la mayor temperatura (150° C – 160° C).
4. Es necesario el uso de termocuplas o pirómetros que ofrezcan una señal eléctrica analógica o digital de salida y un controlador termostático que funcionen con rangos de variación de 2° C.



*Figura 71: controlador de temperatura por resistencias y ventilación*

5. Las porosidades en las piezas finales se reducen si se coloca un sistema de bandas transportadoras. Este sistema es necesario para controlar el espesor de pared y los diámetros internos y externos de la pieza.



*Figura 72: extrusora con refrigeración y bandas transportadoras*

6. Un sistema de refrigeración es necesario apenas la pieza de polietileno abandona el molde, con el objeto de que ésta mantenga sus dimensiones físicas al enfriarse rápidamente y así seguir en los procesos de corte y clasificación de forma sencilla sin deformar el producto final.
7. Las transmisiones por correas son acordes aún cuando se requiere de motores que ofrezcan elevadas potencias y numerosos reductores para aprovechar el torque. Se recuerda que estas máquinas generan presiones elevadas en la descarga.



*Figura 73: motor y transmisión de la extrusora*