

2009

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERÍA

“PROCESO DE MOLDEO POR EXTRUSIÓN
SOPLADO PARA PLÁSTICOS: PUESTA EN
MARCHA Y CARACTERIZACIÓN DE PROCESO
EN UNA MÁQUINA VULCANO”

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL
TÍTULO DE
INGENIERO MECANICO

PRESENTA :

RAFAEL ARTURO DE LA CRUZ SIERRA

MARIANO LOZANO PEREZ

RAUL ANDRES SANTOS ARRATIA

PARA OBTENER EL
TÍTULO DE
INGENIERO INDUSTRIAL
PRESENTA :

ALDO HERNANDEZ LOPEZ

DIRECTORA: MI. MAGDALENA TRUJILLO BARRAGAN

MEXICO, D.F. MAYO DEL 2009



ÍNDICE

ÍNDICE.....	2
INTRODUCCIÓN	5
OBJETIVOS	7
CAPÍTULO 1. LOS PLÁSTICOS	8
1.1 Introducción	8
1.2 Historia.....	8
1.3 Materiales plásticos comunes.....	9
1.3.1 Polietileno (PE)	9
1.3.2 Polietileno de Baja Densidad (PEBD o LDPE)	9
1.3.3 Polietileno de Alta Densidad (PEAD o HDPE).....	10
1.3.4 Polipropileno (PP).....	11
1.3.5 Policloruro de vinilo (PVC)	11
1.3.6 Poliestireno (PS).....	11
1.3.7 Politereftalato de etileno (PET)	12
1.3.8 Policarbonato (PC).....	12
1.4 Métodos de Procesamiento	13
1.4.1 Extrusión	13
1.4.1.1 De Película	14
1.4.1.2 Por soplado	14
1.4.2 Moldeo por inyección	14
1.4.2.1 Inyección soplo	14
1.4.3 Termoformado	15
1.4.4 Moldeo Rotacional.....	15
1.5 Historia del proceso de extrusión soplado	15
1.6 Proceso de extrusión soplado en la actualidad.....	18
CAPÍTULO 2. EL PROCESO DE MOLDEO POR EXTRUSIÓN SOPLADO (EBM)	20
2.1 Introducción	20
2.2 Generalidades	20
2.2.1 Definición y aplicaciones	20
2.2.2 Descripción del proceso.....	21
2.3 Componentes del proceso.....	23
2.3.1 Extrusor	24
2.3.1.1 Tolva	24
2.3.1.1.1Tolva Vibratoria.....	25
2.3.1.1.2Tolva Forzada.....	26
2.3.1.2 Husillo	26
2.3.1.2.1Tipos de Husillos	27
2.3.1.2.2 Plato rompedor y paquete de mallas.....	30
2.3.2 Cabezal	31
2.3.2.1 Tipos de cabezales	32
2.3.2.1.1 Cabezal de Flujo Radial	32



2.3.2.1.2 Cabezal de Flujo Axial.....	32
2.3.2.1.3 Cabezal Acumulador	33
2.3.2.1.4 Cabezal con Programación.....	33
2.3.3 Métodos de soplado	35
2.3.4 Moldes	36
2.3.5 Unidad de cierre	37
2.3.5.1 BATENFELD	38
2.3.5.2 BEKUM	38
2.3.5.3 KAUTEX	38
2.3.5.4 VOITH FISCHER.....	39
2.3.6 Corte de parison	39
2.3.6.1 Jalado (Pulling off)	40
2.3.6.2 Aprisionar (Pinch-off).....	40
2.3.6.3 Corte por cuchillas	41
2.3.6.4 Cuchillas o Alambres calientes.....	41
2.3.7 Equipo auxiliar	41
2.3.7.1 Sistema Hidráulico	41
2.3.7.2 Sistema Eléctrico.....	42
2.3.7.3 Transmisión.....	42
2.3.7.4 Sistema de Enfriamiento.....	42
2.3.7.5 Sistema Neumático	43
2.4 Tipos de maquinaria	43
2.4.1 Máquina tipo “Shuttle”	43
2.4.2 Máquina de Moldes Corredizos.....	44
2.4.3 Máquinas Rotativas	44
2.4.4 Máquinas Co-extrusión.....	44
CAPÍTULO 3: MÁQUINA DE EXTRUSIÓN SOPLADO VULCANO: DESCRIPCIÓN Y PUESTA EN MARCHA	46
3.1 Introducción	46
3.2 Descripción General	46
3.2.1 Extrusor	47
3.2.1.1 Tolva	47
3.2.1.2 Husillo	47
3.2.1.3 Cabezal y Boquilla.	48
3.2.2 Unidad de Cierre.....	50
3.2.2.1 Molde.....	51
3.2.3 Corte de Parison	51
3.2.4 Equipo Auxiliar	52
3.2.4.1 Sistema Mecánico.....	52
3.2.4.2 Sistema Hidráulico	54
3.2.4.3 Sistema de Enfriamiento.....	55
3.2.4.4 Sistema Neumático	56
3.2.4.5 Sistema Eléctrico.....	57
A) Resistencias Eléctricas	57
B) Tablero de Control	57
3.3 Condiciones iniciales	58
3.4 Cronología de la puesta en marcha	62



3.4.1 Descripción de los problemas encontrados durante la puesta en marcha.....	65
CAPÍTULO 4: CARACTERIZACIÓN DE MAQUINA Y PROCESO	67
4.1 Introducción	67
4.2 Análisis Newtoniano	67
4.2.1 Análisis de flujo en el extrusor.....	68
4.3 Caracterización de máquina de extrusión-soplado Vulcano.....	74
4.3.1 Fuerza de cierre de molde	74
4.3.2 Velocidad de giro del husillo.....	74
4.3.2.1 Cálculo de intervalo de velocidades.....	75
4.3.3 Determinación de las curvas características del extrusor.....	76
4.3.4 Cálculo de hinchamiento del parison.....	80
4.3.5 Cálculo de espesor de pared.....	82
4.4 Caracterización del proceso de Extrusión Soplado, mediante el Análisis Newtoniano.....	84
4.4.1 Metodología de experimentación.....	84
4.4.2 Experimentación.....	85
4.4.2.1 Experimento con Polietileno de Alta densidad (HDPE).....	85
A) Experimentación	85
B) Resultados y Análisis	88
4.4.2.2 Experimento dos; Polietileno de baja densidad (LDPE).....	93
A) Experimentación	94
B) Resultados y Análisis	97
4.5 Práctica de laboratorio.....	101
CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y APORTACIONES FUTURAS	103
CONCLUSIONES.....	103
TRABAJOS FUTUROS	104
ANEXO A.....	105
ANEXO B.....	106
ANEXO C.....	107
ANEXO D.....	108
ANEXO E.....	109
ANEXO F.....	115
ANEXO G.....	118
ANEXO H.....	122
PRÁCTICA DE LABORATORIO.....	123
FUENTES CONSULTADAS.....	131
ÍNDICE DE TABLAS, DIAGRAMAS E IMÁGENES.....	132



INTRODUCCIÓN

Como respuesta a la necesidad de nuevos sistemas educativos, la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, emprendió una exhaustiva revisión a los planes de estudio de sus carreras. Así “Ante el cambio del paradigma de la ingeniería en sus diferentes especialidades, las instituciones formadoras de ingenieros deben redefinir su misión y adecuar sus programas educativos. La sociedad en el siglo XXI se caracteriza por un amplio, sostenido y cambiante uso de la tecnología, en un mercado global de enorme competencia e interdependencia, y con una capacidad de comunicación jamás imaginada. Esto implica para los ingenieros el reto de ofrecer a la sociedad, nuevas habilidades que le permitan diseñar, construir, fabricar y operar bienes con mayor valor agregado de tecnología y más eficientes en su función, a los menores costos posibles”.¹

Dichos planes de estudio quedaron aprobados en el año 2005, definiendo las características de la formación profesional al formar “profesionales capaces de integrar, diseñar, planear y organizar, así como, mantener, dirigir y controlar los sistemas productivos en industrias de tipo diverso; las operaciones en empresas de servicios, industriales y comerciales o en instituciones gubernamentales, para optimizar los recursos humanos, materiales y financieros”.²

Las prácticas de laboratorio son una herramienta que pueden ayudar a la consolidación de esta nueva forma de educación, ya que mediante la realización de ellas se refuerzan los conocimientos y se adquiere de experiencia.

Dentro de los Laboratorios de Manufactura de la Facultad de Ingeniería, se cuenta con maquinaria para la realización de prácticas, que sirven también para la realización de proyectos para la industria. Hasta la fecha dentro de las materias de las carreras de Ingeniería Mecánica, Ingeniería Industrial e Ingeniería Mecatrónica, se encuentra considerado el estudio de los diferentes procesos de manufactura existentes.

Así, al estudiar la teoría de los procesos de manufactura más comunes en la industria, se encontró que de forma general existen prácticas apropiadas para dichos procesos, en especial los relacionados con la manufactura de piezas de metal, pero reconociendo la falta de más prácticas orientadas a los procesos de manufactura de plásticos.

Siendo esta falta de prácticas de manufactura de plásticos el eje central, es de gran importancia resaltar la necesidad que se tiene de que los alumnos adquieran experiencia y conocimientos prácticos. Lo cual es fundamental y más aun basándonos en el concepto de educación por competencias.

¹ “Plan y programas de estudio de la licenciatura de ingeniería mecánica”, Facultad de Ingeniería UNAM, Tomo I; México, 2005: p.3.

² Ibid., p.15.



Es de esperarse que la industria del plástico crezca y se especialice, así también el estudio de los plásticos por consecuencia la necesidad de prácticas orientadas hacia los alumnos que estudian en la Facultad de Ingeniería.

El presente trabajo de tesis aborda el tema del Proceso de Extrusión Soplado. En el primer capítulo se mencionan los tipos de materiales más comunes y los diferentes métodos de procesamientos de plásticos, el segundo; profundiza el tema de interés, en el cual se mencionan los componentes y sistemas que definen a una maquina de extrusión soplado, mostrando las variantes que existen en las diversas configuraciones.

Comprendidos los temas antes señalados, se plantea el capítulo tres, donde se detalla la cronología de los eventos que involucran la puesta en marcha, así como las características de la máquina de extrusión soplado Vulcano. Se finaliza con el capítulo 4 en donde se realiza y explica la experimentación, utilizando Polietileno de alta y baja densidad para con ello caracterizar el proceso y elaborar la correspondiente práctica de laboratorio.



OBJETIVOS

- Puesta en marcha de máquina de extrusión soplado Vulcano, para la producción de botellas de plástico.
- Caracterización de máquina de extrusión soplado Vulcano, así como el proceso de presente en ésta.
- Implementación de una práctica de laboratorio para los alumnos de Ingeniería Mecánica e Industrial.



CAPÍTULO 1. LOS PLÁSTICOS

1.1 Introducción

En el presente capítulo se hablará de los plásticos mediante una breve definición de los distintos tipos de plásticos y su procesamiento. Finalizando el capítulo exponiendo la historia del proceso de extrusión soplado y su importancia actualmente.

1.2 Historia

El desarrollo histórico de los plásticos comenzó cuando se descubrió que las resinas naturales podían emplearse para elaborar objetos de uso práctico. Estas resinas como la gutapercha³, y el ámbar, son extraídas de ciertos árboles. Su uso se remonta a la cultura Egipcia, Babilónica, y China. En América se conoció otro material antes de la llegada de Colón, llamado hule o caucho.

El hule y otras resinas presentaban algunos inconvenientes, y por lo tanto, su aplicación resultaba limitada. Sin embargo, después de muchos años de trabajo e investigación se llegaron a obtener resinas semi-sintéticas, esto mediante tratamientos químicos y físicos de resinas naturales.

A mediados del siglo XIX, el inventor inglés Alexander Parkes obtuvo accidentalmente la nitrocelulosa, mediante la reacción de la celulosa con ácido nítrico y sulfúrico, y la llamó "Parkesina". Sin embargo, debido a su inflamabilidad, no tuvo éxito comercial.

Alrededor de 1860, en los Estados Unidos surgió el primer plástico de importancia comercial desarrollado por los hermanos Hyatt quienes trabajaban con algodón tratado con ácido nítrico, siendo un producto muy peligroso que podía utilizarse como explosivo. Aprovechando la idea de Parkes, sustituyeron el aceite de ricino por alcanfor y al producto obtenido le llamaron "Celuloide", el cual hizo posible la producción de varios artículos como peines, bolas de billar y películas fotográficas.

En 1909 el químico Leo Hendrik Baekeland sintetizó un polímero a partir de moléculas de fenol y formaldehído. Este producto podía moldearse a medida que se formaba y resultaba duro al solidificar. No conducía la electricidad, era resistente al agua y a los disolventes y de fácil obtención, el cual fue nombrado baquelita, el primer plástico totalmente sintético de la historia.

Los resultados alcanzados por los primeros plásticos, incentivaron a los químicos y a la industria, a buscar otras moléculas sencillas que pudieran enlazarse para crear polímeros. En la década de los 30's, químicos ingleses descubrieron que el gas etileno polimerizaba

³ Tipo de resina parecida al caucho, translúcida, sólida y flexible, fabricada a base del látex proveniente de árboles del sureste asiático.



bajo la acción del calor, la presión y un catalizador, formando un termoplástico al que llamaron polietileno (PE). Hacia los años 50 aparece el polipropileno (PP).

Al reemplazar en el etileno un átomo de hidrógeno por uno de cloruro se produjo el cloruro de polivinilo (PVC), un plástico duro y resistente al fuego. Otro de los plásticos desarrollados en los años 30's en Alemania fue el poliestireno (PS), un material muy transparente comúnmente utilizado para vasos y popotes. En la presente década, principalmente en lo que tiene que ver con el envasado en botellas y frascos, se ha desarrollado vertiginosamente el uso del tereftalato de polietileno (PET), material que viene desplazando al vidrio y al PVC en el mercado de envases.

1.3 Materiales plásticos comunes

La denominación de los plásticos se basa en los monómeros que se utilizaron en su fabricación, es decir, en sus materias primas. Los nombres químicos de los polímeros con frecuencia son muy largos y difíciles de utilizar. Para aligerar este problema se introdujeron las "siglas" o acrónimos. A continuación se presenta un listado de los materiales más utilizados en la industria, así como sus características principales:

1.3.1 Polietileno (PE)

Son termoplásticos semicristalinos, se destacan en general por una buena resistencia química, alta tenacidad y elongación en la rotura, así como buenas propiedades de aislamiento eléctrico. Pueden ser procesados en prácticamente todos los procesos usuales, son económicos, y por ello, han encontrado una amplia aplicación.

Los polímeros basados en etileno se producen en amplia variedad. Por ello se obtiene un muy variado cuadro de propiedades. El criterio de clasificación más empleado para este plástico es la densidad, la cual afecta en forma directa a muchas de sus propiedades.

1.3.2 Polietileno de Baja Densidad (PEBD o LDPE)

El polietileno de baja densidad tiene una densidad en el intervalo de $0.900-0.940 \text{ [g/cm}^3\text{]}$. Es un material traslúcido, con estructura molecular en su mayor parte amorfa e inodoro, su punto de fusión varía dependiendo del grado de la resina, como promedio en $110 \text{ [}^\circ\text{C]}$, tiene una conductividad térmica baja como la mayoría de los materiales termoplásticos.

La naturaleza no polar del polietileno, le confiere una mayor resistencia a reaccionar con sustancias químicas. A temperaturas menores de $60 \text{ [}^\circ\text{C]}$, resiste a la mayoría de los

solventes, ácidos, bases y sales en cualquier concentración. Por otro lado, a temperaturas mayores es soluble en solventes orgánicos alifáticos, especialmente en los aromáticos y clorados. Es totalmente atóxico, impermeable al agua y relativamente poco permeable al vapor de agua y gases, puede estar en contacto directo con alimentos sin presentar riesgo para los consumidores.

Tiene aplicación dentro del sector de envase y empaque, destacando su utilización en bolsas, botellas, envase industrial, laminaciones, recubrimiento, costales, tapas para botellas y juguetes pequeños.

En la industria eléctrica se utiliza como aislante para cables y conductores, cables de alta frecuencia, material dieléctrico.

1.3.3 Polietileno de Alta Densidad (PEAD o HDPE)

El polietileno de alta densidad tiene una densidad en el intervalo de 0.941–0.965 [g/cm^3], presenta un alto grado de cristalinidad, siendo así una material opaco y de aspecto ceroso, las propiedades de cristalinidad y mayor densidad se relacionan con las moléculas más empacadas, ya que casi no existen ramificaciones.

La rigidez, dureza y resistencia a la tensión de los polietilenos, se incrementa con el grado de cristalinidad, por ello, el PEAD presenta mejores propiedades mecánicas que el PEBD, también presenta fácil procesamiento y buena resistencia al impacto y a la abrasión.

El calor necesario para llegar al punto de fusión, está relacionado con la cristalinidad. El polietileno de alta densidad, muestra un punto de fusión entre 120 y 136 [°C], mayor al del PEBD.

El polietileno de alta densidad cuenta con muchas aplicaciones, en el sector de envase y empaque se utiliza en bolsas para mercancía, bolsas para basura, botella para leche y yogurt, cajas para transporte de botellas, envases para productos químicos, envases para jardinería, detergentes y limpiadores; En el sector automotriz se usa en recipientes para aceite y gasolina, conexiones y tanques para agua, además de tubos y mangueras.

Baja Densidad (LDPE)	0.900 - 0.940 [g/cm^3].
Alta Densidad (HDPE)	0.941 - 0.960 [g/cm^3].
Ultra Alta Densidad (UHDPE)	Mayor a 0.960 [g/cm^3].

1.3.4 Polipropileno (PP)

Es un termoplástico que pertenece a la familia de las poliolefinas. Presenta una estructura semicristalina translúcida. Su elevado punto de fusión de 175 [°C] proporciona resistencia térmica, la cual permite su uso en productos que requieren esterilización o pasteurización por calor como son las jeringas, los envases para alimentos. A diferencia de los polietilenos, éste presenta en su estructura molecular un metilo (CH₃) que ayuda a aumentar las propiedades de dureza y resistencia de este tipo de materiales. Presenta excelente resistencia química, es resistente al alcohol y a algunos aceites; no es resistente a los oxidantes fuertes ni a los hidrocarburos halogenados. Se hincha en hidrocarburos como la gasolina o el benceno

Existen dos tipos de polipropileno: homopolímero y copolímero.

- Los homopolímeros tienden a ser frágiles a bajas temperaturas pero tienen elevada resistencia a las altas temperaturas.
- Los copolímeros son más tenaces, presentan buena resistencia a bajas temperaturas, es más flexible y más resistente al impacto que el homopolímero. Un ejemplo es el caucho etileno-propileno (EPR), donde la buena tenacidad se la proporciona el caucho.

1.3.5 Policloruro de vinilo (PVC)

Es un polímero termoplástico. Se presenta como un material blanco que comienza a reblandecer alrededor de los 80 [°C] (bajo fatiga mecánica lo hace de 50 [°C] a 60 [°C]) y es procesable sobre 140 [°C]. Por encima de esta temperatura comenzarán a desprenderse partículas de HCl y a degradarse. Tiene muy buena resistencia eléctrica y a la llama. Lo podemos encontrar de dos formas:

- PVC duro, este se utiliza principalmente en la elaboración de tubos para la industria, también se extruyen diversos perfiles para ventanas y de varios tipos, además de hojas y planchas, éstas se pueden embutir y los perfiles se conforman termoplásticamente.
- PVC flexible, el cual se obtiene con el aumento de aditivos plastificantes, se utiliza principalmente para el recubrimiento de conductores eléctricos, fabricación de juguetes y la elaboración de piel sintética entre otros.

1.3.6 Poliestireno (PS)

El poliestireno es una resina sintética utilizada para artículos donde se requiere gran transparencia, sin embargo, por su alta fragilidad, se los ha utilizado para la producción de artículos moldeados, mediante un proceso de copolimerización del estireno con

componentes elásticos. Es un sólido transparente ligero, cuyo peso específico es de 1.054 a 1.070. Su resistencia a la tensión es de 211 a 600 $[kg/cm^2]$, a la compresión de 884 a 1,196 $[kg/cm^2]$, y su resistencia dieléctrica de 18000 a 24000 voltios por milímetro.

Algunas de sus características más notables son su gran resistencia al agua y su gran estabilidad dimensional, también presenta tenacidad y resistencia a bajas temperaturas. Su superficie es brillante, teniendo buenas propiedades de aislación eléctrica, por el contrario no tiene resistencia a hidrocarburos clorados.

1.3.7 Politereftalato de etileno (PET)

También conocido como polietileno de tereftalato. Es un material sintético termoplástico de poliéster saturado lineal. Se encuentran en dos formas; semicristalino y amorfo en colores blanco y transparente respectivamente, tiene buenas propiedades de aislación eléctrica, baja absorción de agua, además de ser resistente a ácidos diluidos, sales neutras y ácidas, alcoholes, éter, aceites y grasas. No es resistente contra álcalis, vapores sobrecalentados, cetonas, fenoles, ésteres, ácidos oxidantes e hidrocarburos.

El PET se procesa principalmente por inyección, en cambio por extrusión se obtienen productos semi-acabados y principalmente láminas transparentes. Las características más importantes que hacen del PET un material envidiable, son: excelente resistencia a la deformación plástica, a la fatiga, a los agentes químicos y buenas propiedades dieléctricas.

Los usos típicos son: fibras textiles, cuerdas para neumáticos. Líneas para cañas de pescar, botellas, frascos. Piezas moldeadas técnicas, películas, películas fotográficas, películas magnéticas para cintas de sonido y TV, film para conservación de alimentos, películas de aislamiento eléctrico, fibras químicas de alta resistencia, usos industriales, películas radiográficas, cintas adhesivas, productos farmacéuticos o médicos.

1.3.8 Policarbonato (PC)

El policarbonato es un grupo de termoplásticos fácil de trabajar, moldear y termoformar, y son utilizados ampliamente en la manufactura moderna. El nombre "policarbonato" se basa en que se trata de polímeros que presentan grupos funcionales unidos por grupos carbonato en una larga cadena molecular. Algunas de sus propiedades son:

- ✓ densidad de 1.20 $[g/cm^3]$
- ✓ rango de uso desde -100 $[^{\circ}C]$ a +135 $[^{\circ}C]$

- ✓ punto de fusión cercano a 250 [°C]
- ✓ índice de refracción igual a 1.585 ± 0.001
- ✓ índice de transmisión lumínica del $90\% \pm 1\%$
- ✓ característica de incombustibilidad

El policarbonato empieza a ser muy común tanto en los hogares, en laboratorios como en la industria debido a sus tres principales cualidades: gran resistencia a los impactos y a la temperatura así como a sus propiedades ópticas. El policarbonato es usado en una gran variedad de campos:

- Óptica: usado para crear lentes para todo tipo de gafas.
- Electrónica: se utilizan como materia prima para cd's, dvd's y algunos componentes de los ordenadores.
- Seguridad: cristales antibalas y escudos anti-disturbios de la policía.
- Diseño y arquitectura: cubrimiento de espacios y aplicaciones de diseño.

1.4 Métodos de Procesamiento

Para dar forma a los productos de plástico, desde los 50's se pensó en la posibilidad de dar forma a estos materiales a través de presión y calor. Dado que es un material viscoso y elástico al mismo tiempo, se requiere de fuerzas de empuje del material para que tomen la forma del molde preestablecido, y esto se logra con ayuda de la presión, mientras que la temperatura nos ayuda a controlar la viscosidad para un buen manejo del flujo a través de todo el recorrido que este conlleva. Por lo anterior, a continuación se describirán algunos procesos de fabricación donde se manejan estos materiales, para posteriormente definir el proceso que nos compete.

1.4.1 Extrusión

El proceso de extrusión se define de manera general, como la conversión de un plástico en forma de gránulos o pellets a un material fundido uniforme, el cual es forzado a pasar a través de un "dado" o "boquilla" para posteriormente ser enfriado y así obtener el producto deseado. Los polímeros más usados en la elaboración de estos productos incluyen a la mayoría de los materiales termoplásticos, como los mencionados en los párrafos anteriores.



1.4.1.1 De Película

Este proceso utiliza el principio de la extrusión transversal, la única variación es el dado, ya que la salida del producto es hacia arriba. El material una vez fundido se jala desde la salida del dado con ayuda de un mecanismo de rodillos, los cuales regulan el espesor de la película al incrementar o disminuir la velocidad. La forma de enfriar el material se lleva a cabo con aire frío que proviene de un anillo que se encuentra alrededor del dado.

1.4.1.2 Por soplado

El moldeo por soplado es un proceso a través del cual se produce objetos de plástico huecos, como botellas. Se lleva a cabo en dos pasos, la extrusión del polímero fundido a través de un dado para la obtención de un perfil tubular llamado parison y el inflado de éste tubo dentro de un molde, del cual toma la forma final.

1.4.2 Moldeo por inyección

Es un proceso intermitente, consiste básicamente en transportar el material que se encuentra en forma de pellets o polvo a través del cilindro y transformarlo con aplicación de calor a un estado líquido para posteriormente ser inyectado dentro de la cavidad del molde. Debido a que el molde se encuentra a una temperatura menor, se solidifica en su interior y se expulsa la pieza moldeada, finalizando el ciclo de inyección.

1.4.2.1 Inyección soplo

El moldeo por inyección soplo es la segunda etapa del proceso de elaboración de un contenedor de plástico completamente terminado, en la primera etapa el plástico es inyectado en la cavidad de un molde en donde se produce una preforma, esta ya tiene la forma final del cuello de el producto y la geometría del parison, el plástico es inyectado alrededor del punzón de inyección dentro de la preforma, con condiciones de temperatura controladas en esta etapa, el punzón traslada la preforma al interior del molde de soplado y el aire es introducido por el punzón y la preforma toma la forma del molde, por último es llevada la pieza a la estación de salida.



El moldeo por inyección soplado nos ofrece diversas ventajas, en éste el producto está libre de rebaba con una adecuada presión de cierre de molde y no se requiere de un proceso secundario para tener el producto terminado, esto nos permite después de la estación de eyección mandarlos en una línea de producción a etiquetado o decorado y llenado en un proceso continuo.

1.4.3 Termoformado

Es el proceso de fabricación de piezas en la que se parte de una lámina de material plástico previamente obtenida y que por la acción del calor proporcionado por un arreglo de resistencias o un horno, se eleva la temperatura de la lámina para que este en condiciones de ser deformada. Posteriormente con la generación de vacío se hace adherir la lámina al molde dentro del cual se enfría y toma la forma deseada.

1.4.4 Moldeo Rotacional

Este procedimiento consiste en centrifugar un polvo fino termoplástico dentro de un molde cerrado y calentado. Así, se obtienen cuerpos huecos en pequeñas series. El moldeo rotacional es utilizado en la fabricación de recipientes, balones, cubas, contenedores y kayaks.

1.5 Historia del proceso de extrusión soplado

El origen de la industria del moldeo por soplado es incierto, su inicio se remonta a la cultura Egipcia y Babilónica donde encontramos vestigios de pequeños utensilios soplados, el principio básico nos refiere al científico y matemático Arquímedes quien vivió en los años 287-212 a.C., quien desarrolló un tornillo que lleva su nombre. Este invento se basa en un tornillo que se hace girar dentro de un cilindro hueco, situado sobre un plano inclinado y que permite elevar el agua situada por debajo del eje de giro. Desde su invención hasta ahora se ha utilizado para el bombeo de fluidos. Hoy en día este principio con algunas variantes se utiliza para bombear una mezcla plástica a través de un dado.

El extrusor actual consiste esencialmente de un cilindro horizontal en el cual está girando un tornillo de Arquímedes modificado. Esto significa que está provisto de un orificio al fondo del cilindro para permitir la alimentación de un compuesto dentro de él, al extremo opuesto se encuentra el cabezal y el dado. El cilindro está cubierto con una chaqueta para permitir la circulación de la transferencia de calor mediante aceite o vapor.



La primera máquina que se asemeja al proceso de extrusión soplado fue patentada el 1º de febrero de 1888 en los Estados Unidos de Norte América por William B. Carpenter bajo el nombre de “Proceso y aparato para hacer formas huecas de material de celulosa o material plástico” en la cual se describe el proceso destacando el uso de vapor de agua para reblandecer el tubo o preforma y el sistema de refrigeración de moldes. Siendo una clara muestra del inicio del proceso de soplado y una diferencia de cómo lo conocemos en nuestros días.

En el año de 1937, Enoch T. Ferngren y William Kopitke diseñaron la primera máquina para producir artículos de plásticos soplados, la cual el año de 1942 fue vendida a la empresa Plax Corporation que aunado al descubrimiento del Polietileno de Baja Densidad el proceso de extrusión soplado empezó su crecimiento.

En los años 50's el desarrollo de los envases colapsables (squeeze) tuvo un gran éxito con las botellas de Polietileno de Baja Densidad. Una de las industrias que tuvo mayor impacto fue la industria de la leche, ya que reemplazó sustancialmente los envases de vidrio por Polietileno de Alta Densidad en recipientes de 1 galón; sin embargo, no contaban con la problemática de los requerimientos finales del cuello y rosca de los envases. Debido a esta problemática la empresa UNILOY y DOW CHEMICAL se unen para fabricar una máquina capaz de resolver estos problemas y introducen al mercado una máquina de husillo recíprocante, esta máquina era utilizada para Polietileno de Alta Densidad y otras resinas que tuvieran un índice de fluidez de 0.7.

Simultáneamente con este desarrollo en Europa existían investigaciones para obtener botellas de Cloruro de Polivinilo que requerían un material transparente y resistente para la venta de agua mineral, aceite comestible y vinagre. En Alemania la empresa KAUTEX WERKE introduce el primer equipo comercial de soplado, esta máquina tenía un diseño de extrusión continua con moldes que se elevaban y atrapaban al parison para soplarlo en la parte inferior del molde.

En los años 60's se inicia comercialmente la producción de botellas de Cloruro de Polivinilo (PVC) por el método de extrusión soplado, lo que provoca un gran auge en la producción de artículos de plástico.

En esta década la empresa PHILLIPS 66 CO, desarrolla el proceso ORBIT, este proceso consistía en dos etapas: Primero se obtenía un tubo o parison de polipropileno que se cortaba y enfriaba, luego los tubos cortados eran introducidos a un molde en donde se recalentaban y orientaban biaxialmente.

En 1970 la FDA (Food Drug Administration), hace una publicación acerca de la peligrosidad de los monómeros de Acrilonitrilo y Cloruro de Vinilo clasificándolos como agentes cancerígenos, por lo que el PVC se restringe su uso para empaques de alimentos y bebidas. Debido a este acontecimiento se inician investigaciones para sustituir a este



material; esta sustitución implicaba encontrar un material de excelentes propiedades de barrera y de bajo costo; sin tener éxito, por lo que la opción fue realizar la coextrusión. De esta manera la empresa TOYO SEIKAN se une con KURRAY, fabricante de etil vinil alcohol (EVOH) y surge el primer cabezal de coextrusión sople de tres capas Etil Vinil Alcohol/Adhesivo/Polietileno (EVOH/TL/PE).

El segundo cabezal, lo fabrica la empresa TOPPAN PRINTING ya que se encuentra con dificultades para realizar impresiones en envases de Polipropileno, así que fabrica un cabezal de pasos múltiples con sistema de mangas, que separan el flujo de cada material, uniéndolos a la salida. En 1975 le otorga la licencia a la empresa BEKUM para fabricar cabezales para tres capas.

En 1977 la empresa MITSU desarrolla una máquina de coextrusión sople con biorientación que obtenía una botella parcialmente moldeada que era enfriada y posteriormente recalentada para estirarla y moldearla biaxialmente.

Otro desarrollo en este año fue la introducción al mercado del primer proceso de extrusión sople por EASTMAN CHEMICAL: el Polietileno Tereftalato (PET-G) desarrollado para satisfacer la necesidad de un poliéster transparente y extruible para envases.

En los años 80' la empresa BEKUM empieza a fabricar sus propios equipos y desarrollo de tecnología. En Inglaterra la empresa METALBOX modifica un cabezal de TOYO SEIKAN de 3 capas a 5 capas: Polietileno/Adhesivo /Alcohol Polivinílico/ Adhesivo/Polietileno (PE/TL/EVOH/TL/PE), aumentando con ello el uso de EVOH haciéndolo más práctico como material de barrera.

En 1984 la empresa HOLMIA PLAST, desarrolla una botella coextruida Policarbonato siendo aparentemente irrompible, así como ligero y reusable. La estructura de esta extrusión de (PC/TL/EVOH/TL/PC) cubría los requerimientos del mercado farmacéutico, de comestibles y de cosméticos con la posibilidad de envasar alimentos o sustancias ácidas o básicas, con envases de gran transparencia, buena conservación de alimentos de estructura rígida o compresible.

En 1992 la empresa EASTMAN CHEMICAL lanza al mercado el primer poliéster PET en grado extrusión sople, permitiendo a los transformadores de este proceso utilizar un material que era exclusivo del proceso de inyección sople y con las mismas características de transparencia, barrera y resistencia mecánica.



1.6 Proceso de extrusión soplado en la actualidad

El moldeo por soplado consume alrededor del 15% de todos los plásticos del mercado, los cuales en orden de importancia son: Polietileno de Alta Densidad (PEAD), Polietileno Tereftalato (PET), Policloruro de Vinilo (PVC), Polietileno de Baja Densidad (PEBD), Policarbonato (PC).

La mayoría de los productos moldeados por soplado se han orientado a los tamaños convencionales desde 100 [ml] hasta 5 galones. Actualmente ha crecido el interés para la manufactura de piezas de gran tamaño como son contenedores de 15, 30 y 55 galones que compiten con los tanques de acero especiales para el transporte de líquido. Se puede clasificar al mercado respecto al volumen, los productos moldeados por soplado también se pueden clasificar en tres grupos: menos de cinco litros, que representa el 83% del mercado; de cinco a veinte litros con un impacto de 13% y más de 20 litros, con un 4%.

Investigaciones realizadas por Instituto Mexicano del Plástico Industrial (IMPI), muestran que existen alrededor de 125 empresas productoras de maquinaria para soplado en todo el mundo; de ellas 35 están en China, 17 en Alemania, 14 en Italia y las demás atomizadas por el resto del planeta, contándose en México sólo con dos.

En México, la empresa BEUTELSPACHER es el productor de sistemas de estirado soplado, y en Saltillo, FORMA PLASTIC produce equipos de extrusión soplado. Ambos atienden un sector de empresas que ocupan pequeños volúmenes de producción de envases.

Actualmente los grandes productores de maquinaria de soplado presentan una creciente tendencia hacia el desarrollo de maquinaria con sistemas eléctricos (no como los convencionales con mecanismos hidráulicos) para producir envases que ofrecen exactitud superior, capacidad de repetición, velocidad, limpieza, rendimiento energético, además de que no hacen ruido en su operación.

La fabricación de botellas a partir de material espumado por gas es uno de los avances más recientes y sofisticados, lo cual ocasiona que las botellas sean 30% más ligeras. Así mismo, las máquinas de soplado tienden a fabricarse cada vez más grandes en capacidad de producción pero utilizando el mismo espacio de tal manera que permitan mejorar la eficiencia y moldear botellas más sofisticadas. El auto control en estas mismas ha sido la tendencia de grandes productores alrededor del mundo, el auto-diagnóstico permite determinar cuándo necesita mantenimiento, o indica alguna falla en específico.

Dentro del grupo de artículos soplados, hoy por hoy, y en todo el mundo, el segmento del envase es el más importante, ya que representa entre el 65% y el 70% del consumo.

Las industrias que desarrollan maquinaria de moldeo por soplado se ha enfrentado a retos que hoy en día son determinantes en la generación de capital como son la rapidez en la



producción y la máxima eficiencia. BEKUM introdujo un sistema de ahorro de energía eléctrica en su serie EBlow. La máquina fue diseñada para ciclos cortos de producción alta precisión y bajos requerimientos de mantenimiento. Esta máquina produce un recipiente de 200 ml utilizando cuatro cavidades en un proceso de soplado en tandem, el cual produce dos contenedores de un sólo parison incrementando al 100% la producción.

En Octubre del 2007 la empresa UNILOY MILACRON patento un sistema de compensación de espesores (TCS), el cual modifica el espesor del parison en posiciones específicas durante el proceso de extrusión. El sistema evita el típico problema de diversos espesores de pared causados por los diferentes coeficientes de estiramiento del parison en la parte superior e inferior del contenedor. Esta nueva tecnología modifica dinámicamente el espacio entre el mandril y el dado durante el proceso para lograr la reducción de peso neto de hasta el 10% y la reducción del tiempo de ciclo de hasta un 18% comparado con las máquinas anteriores.

El Proceso de Extrusión Soplado a través de los años y de acuerdo a las necesidades de la industria ha sufrido diversas modificaciones en la maquinaria para así resolver problemas específicos y hacer más eficiente el proceso. Sin embargo, la maquinaria de extrusión soplado con mayor presencia en el mercado es la continua, convencional o "shuttle" debido a su versatilidad y gran difusión, este tipo de máquina se explicara en el capítulos posteriores.



CAPÍTULO 2. EL PROCESO DE MOLDEO POR EXTRUSIÓN SOPLADO (EBM)

2.1 Introducción

En el presente capítulo se abordará el tema de extrusión soplado, comenzando por describir las características generales del proceso, sus componentes y las diferentes variantes que existen. Con esto asentar las bases para continuar con el siguiente capítulo.

2.2 Generalidades

2.2.1 Definición y aplicaciones

El proceso de extrusión soplado es uno de los procesos más utilizados para la formación de productos huecos, por lo cual generalmente se tiende a definirlo como un proceso de moldeo que sirve para la producción de componentes termoplásticos huecos. Debido a que la definición anterior no enmarca las características del proceso con respecto a otros (ejemplo: roto-moldeo), una definición alternativa es necesaria para esclarecer y dar exactitud a éste.

La definición para el proceso de moldeo por extrusión soplado es: aquel proceso de transformación primario discontinuo de un material que es fundido y forzado a pasar por un orificio, el cual le conferirá una forma intermedia (parison) necesaria para que posteriormente ésta sea aprisionada entre placas (molde) y ser inflada con la finalidad de que tome la forma existente en el interior de las placas.

Los procesos de transformación primarios son aquellos en los cuales el material es moldeado a través de un proceso térmico pasando a un estado fundido pastoso, y es moldeado para que finalmente sea solidificado. Los procesos secundarios preceden a los anteriores como en el caso del termo-formado o el soplado.

El proceso de extrusión soplado es único para la producción de recipientes de cuello angosto, con y sin cuerda, con asas huecas integradas al cuerpo. Una de las ventajas del proceso es la fácil operación y la diversidad de capacidades volumétricas, que van desde 2 [ml] hasta 10.000 [l]. Con respecto al moldeo por inyección el soplado ofrece grandes ventajas económicas y técnicas dentro de las que se encuentran el moldeo de formas irregulares, de difícil desmolde, bajos esfuerzo internos, variación de espesor, menos costos de producción y mantenimiento.

Comparativamente con el proceso de inyección soplado, el proceso de extrusión soplado ocupa presiones de trabajo de 0.2 a 1.0 [MPa] (30 a 150 [psi]), mientras que el de inyección soplado utiliza presiones de 13.8 a 138 [MPa] (2,000 a 20,000 [psi]). Lo anterior repercute en que a menores esfuerzos internos, los artículos soplados obtienen mejores características físicas y mecánicas.

Contrariamente a las facilidades que ofrece el proceso de extrusión, se presenta el inconveniente de sufrir variaciones por ser de producción intermitente. Se requiere de especial atención en el control de las dimensiones de la cuerda y cuello, así como operaciones de post moldeo, monitoreo continuo del peso de las piezas, el volumen, el espesor de pared, las fugas potenciales y calidad del cuello.

El plástico más usado para el proceso de extrusión soplado es el Polietileno de alta densidad (PEHD). Las aplicaciones del proceso por sector de mercado son:

- **Sector del envase:** producción de recipientes pequeños de diversas formas, como recipientes para agua carbonatada, condimentos, garrafas para líquidos o garrafones de agua potable.
- **Sector industrial:** dentro de este sector la producción se centra en la fabricación de envases de altos volúmenes que resistan ataques químicos, algunos ejemplos son los recipientes para reactivos y sustancias corrosivas, tarimas y bidones.
- **Sector de consumo:** dentro del rubro de los juguetes, como muñecos, carros montables y en recipientes para productos de limpieza, en portafolios, hieleras, sillas para bebé y domos.
- **Sector automotriz:** la rama automotriz ha sido una de las más beneficiadas con el proceso de extrusión soplado, puesto que mediante este proceso se pueden obtener recipientes para aceites y lubricantes, tanques de gasolina, fuelles y accesorios para automóviles, parachoques de automóviles, asientos, conexiones y conductos para gasolina, aire y agua.
- **Sector cosmético-farmacéutico:** en este sector también se aprovecharon las ventajas del proceso para producir envases asépticos libres de cualquier tipo de contaminación del tipo ampollas, muestras médicas, medicamentos, pastillas, jarabes, soluciones y suspensiones, recipientes grandes de suero y cremas.

2.2.2 Descripción del proceso

Los procesos de moldeo por soplado se basan en pasos comunes, parten siempre de tener un proceso de extrusión, en el cual el material se le da una forma cilíndrica intermedia llamada parison. Ésta es transferida a un temperatura controlada dentro del molde de inflado y por la acción del cierre del molde es sellado e inflado mediante la introducción de aire proveniente de una espiga, así el parison es deformado hasta tomar

la configuración del molde, en este paso, adquiere estabilidad debido a la pérdida de calor, principalmente por conducción en las paredes del molde. Paso seguido del enfriamiento, el molde es abierto, la pieza es expulsada y el ciclo es repetido. Ver Diagrama 2.1.

Es necesario tomar en cuenta el tiempo que tarda en formarse el parison, desde que sale del dado de extrusión hasta que se forma con la longitud necesaria, dado que al enfriarse alguna porción del extrudido perderá sus propiedades para ser moldeado. Durante la etapa en la cual el parison es expandido hacia las paredes éste sufre reducciones de espesor debido al aumento del área superficial.

Como en todo sistema existen variables que determinan el resultado del mismo. En el caso del ciclo de extrusión soplado se debe de poner especial atención en el tiempo de enfriamiento, ya que generalmente abarca gran parte del tiempo del ciclo, pudiendo tomar hasta dos terceras partes del tiempo del proceso.

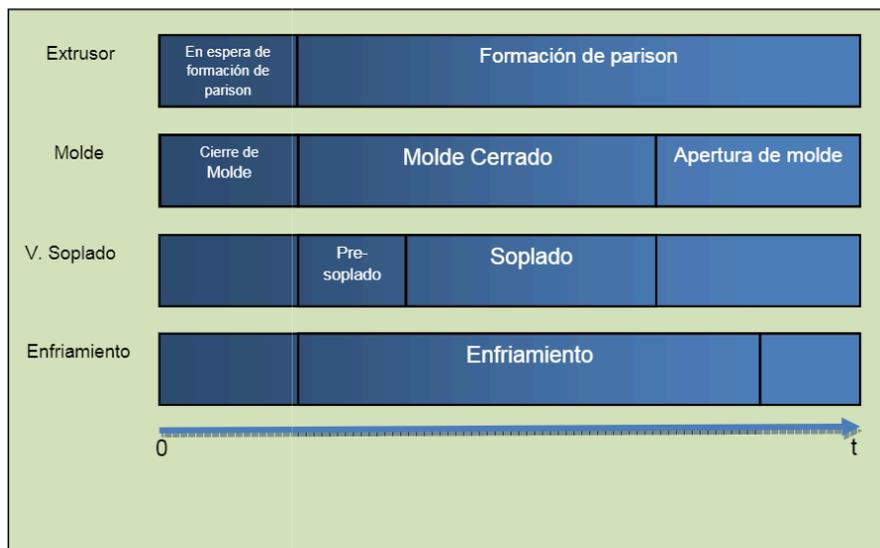


Diagrama 2.1: Tiempo de moldeo; diagrama de la distribución de tiempo por etapa.

El rendimiento económicamente óptimo es logrado sólo cuando el extrusor opera de manera continua. La extrusión intermitente no es muy popular no sólo por razones económicas, sino porque aumenta el riesgo de zonas de estancamiento donde el material se descompone. Este tipo de proceso se escoge cuando se requieren dos estaciones para los extrusores donde se alimenta un cabezal de acumulación capaz de producir más rápido el parison.

La tecnología de la extrusión-soplado se ha extendido a moldeo por co-extrusión soplado de multicapas, que han crecido de gran manera en nuevos mercados como el de los empaques para productos alimenticios, farmacéuticos y especialmente químicos.

2.3 Componentes del proceso

De forma general todo proceso de extrusión soplado se compone por el siguiente equipo.

- Extrusor.
- Cabezal de extrusión.
- Molde y unidad de cierre.
- Válvula de soplado y equipo auxiliar.

Las características de cada uno de estos componentes tienen gran importancia, esto debido a que cada uno de ellos determina de cierta manera el resultado; es decir la pieza o producto de plástico. A continuación se nombran las características generales de estos componentes. Estos trabajan en conjunto de forma cíclica, el diagrama conceptual de cualquier ciclo de extrusión soplado es el siguiente:



Diagrama 2.2: Etapas de un ciclo de extrusión soplado

2.3.1 Extrusor

El extrusor es el sistema que transporta el material a través de las zonas de calentamiento, en donde el plástico se funde y homogeniza, mezclando el material así como los aditivos, colorantes y el material reciclado. Para evitar la formación de burbujas que se pudieran presentar en el producto final, en el extrusor se cuenta con zonas de descompresión donde se encuentran válvulas de venteo que sirven para purgar el aire.

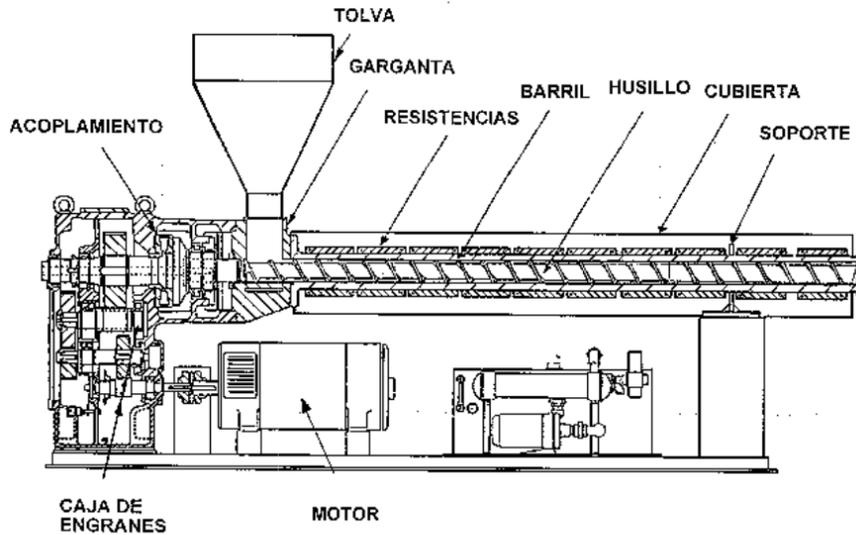


Diagrama 2.3: Partes del extrusor. Empaques Plásticos de México SA de CV

2.3.1.1 Tolva

La forma más común de la tolva de alimentación usada en máquinas de extrusión es la del tipo cónico. El material suministrado al husillo cae por su propio peso, por lo que este tipo de tolva se le conoce como de alimentación por gravedad.

La tolva puede estar cubierta por una tapa para mantener el material libre de polvo y de humedad, provista de una ventanilla que permita ver el nivel del material. En la base normalmente se instala una compuerta por medio de la cual se pueda detener o regular el suministro del material; en algunas máquinas se instala una unidad de precalentamiento o secado que sopla aire caliente a través del material, para eliminar la humedad antes de alimentar al husillo.

La tolva debe diseñarse para permitir un buen flujo del material por lo que se prefieren los diseños circulares a los cuadrados, ya que estos tienen una transición gradual en la zona cónica de la tolva. Aún cuando están bien diseñadas, siempre existe el peligro de que el material forme puentes produciendo una alimentación discontinua y en algunos casos detener completamente el material.

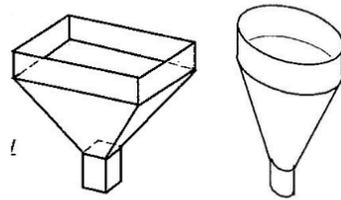


Diagrama 2.4: Diseño típico de tolva. Centro Catalán del plástico

2.3.1.1.1 Tolva Vibratoria

Se instala para evitar los estancamientos de material. Como resultado de la vibración, el material se mueve a lo largo de la plataforma, cayendo en el extremo de la abertura de alimentación. Variando la amplitud de las vibraciones se puede ajustar la velocidad de alimentación, de tal manera que se mantiene la altura constante del material.

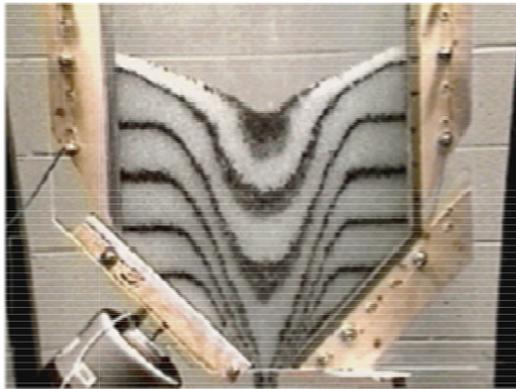


Imagen 2.1: Tolva vibratoria

2.3.1.1.2 Tolva Forzada

Su mecanismo de alimentación es un tornillo de Arquímedes. Actúa como un transportador y dosificador del material en el cual se varía la frecuencia de oscilación de acuerdo a la velocidad del husillo.

2.3.1.2 Husillo

El husillo es una pieza fundamental en el proceso de extrusión; es el elemento que ha recibido más atención en cuanto a diseño. Su función es transportar el material plástico desde la tolva hacia la boquilla a velocidad constante, en dicho transporte, el termoplástico se funde y se homogeniza.

Uno de los parámetros más importantes es la relación de compresión, ésta se define como: la relación entre el volumen entre dos filetes en la zona cercana a la tolva y el de la zona final.

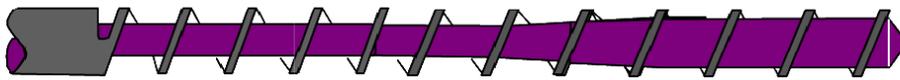


Diagrama 2.5: Husillo universal

Existen diferentes tipos de husillos, cada uno de estos se diseña para usarse con determinados materiales. En la siguiente figura se ejemplifican los más comunes.

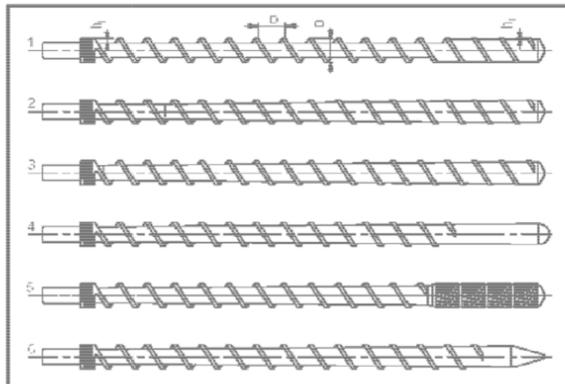


Diagrama 2.6: Husillos más comunes, Anguila delgado, pág.55

2.3.1.2.1 Tipos de Husillos

- **Husillo tipo Poliamida:** Profundidad de canal constante. Cuatro vueltas en la sección de dosificación.
- **Husillo tipo Polietileno:** Canal de profundidad decreciente: las dos primeras vueltas en la sección de alimentación tienen profundidad constante.
- **Husillo usos generales:** Canal de profundidad decreciente. Se emplea con boquillas no muy angostas.
- **Husillo con cabeza plastificadora:** Proporciona escaso trabajo mecánico.
- **Husillo tipo estireno:** Cabeza plastificadora.
- **Husillo tipo Saran:** Con punta cónica y profundidad decreciente del canal.

El husillo puede considerarse dividido en tres secciones: alimentación, compresión y dosificación. Estas zonas están bien definidas en cuanto al comportamiento del polímero se refiere, pero la transición de una a otra solo se percibe observando detalladamente:

- Zona de alimentación. En esta zona se precalienta y transporta el polímero aun en estado de un sólido granulado. La profundidad de canal es constante y la longitud en esta zona es tal que permite una buena alimentación en dirección hacia adelante, esto es en dirección hacia la boquilla del extrusor.
- Zona de compresión o transición. La segunda zona tiene una profundidad de canal decreciente. En esta zona se llevan a cabo tres procesos:
 1. Se expulsa el aire atrapado entre gránulos.
 2. Se mejora la transferencia de calor desde las paredes del barril, conforme el material se vuelve menos espeso.
 3. Ocurre un cambio de densidad debido a la fusión del material.

La zona de compresión se diseña de forma ideal para cada tipo de polímero. Si el polímero funde de forma abrupta se requiere de una zona de compresión muy corta, comúnmente de la longitud de una vuelta de la espiral del tornillo, ejemplos de estos tipos de polímero son el nylon y otros polímeros semicristalinos como el polipropileno y el acetal.

De forma contraria existen polímeros que necesitan una zona de compresión de mayor tamaño, por ejemplo el cloruro de polivinilo, ya que este funde de forma lenta.

- Zona de dosificación. La función de esta zona es la de proporcionar al dado un material homogéneo a temperatura y presión constantes, por lo cual mantiene una profundidad de canal constante.

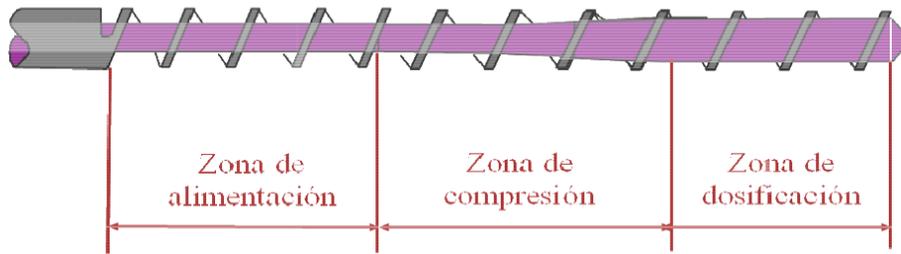


Diagrama 2.7: Zonas características del husillo. Anguita delgado, pág. 54

En la zona de alimentación generalmente se cuenta con un intercambiador de calor integrado en la garganta de la tolva, con la finalidad de prevenir de forma prematura la fusión del material, lo cual podría ocasionar tapones formados por material fundido y zona de atascamiento de los pellets.

El aumento de la temperatura del barril se puede llevar a cabo de dos formas, la primera de ellas es mediante la aplicación de bandas calefactoras las cuales se utilizan de forma única para calentar, también puede utilizarse conductos térmicos los cuales tienen canales con la finalidad de regular la temperatura, esto es que pueden proporcionar calor o enfriar el cilindro, utilizando como medio de regulación agua o aceite.

Dentro del proceso de extrusión es importante definir perfiles de temperatura, dado que hay que garantizar la fusión del material, dependiendo de las condiciones óptimas de procesamiento; o sea, estos perfiles varían dependiendo de varios factores, dentro de los que se encuentra el grado de la resina usada, la productividad del extrusor, el número de zonas de control, el tiempo del ciclo, además de tener por experiencia que la variación de 5 [°C] entre cada zona repercute en todo el proceso.

Zona (°C)	1	2	3	Cabezal	Dado	Molde
ABS	185	195	205	205	200	75
HDPE	185	190	195	200	190	10
LDPE	140	150	160	150	150	20
LLDPE	160	170	180	170	170	20
PC	285	280	275	265	265	70
PP-H	190	200	205	210	220	30
PP-C	180	180	190	190	200	30
PVC-R	165	175	185	180	185	20

Tabla 2.1: Perfil de temperaturas para distintos polímeros. Enciclopedia del Plástico Industrial

Las máquinas de extrusión soplado utilizan diversos sistemas de plastificación, como extrusores monohusillo de baja velocidad y longitud 20D-25D, cilindros lisos con husillo de compresión, sistemas para la alimentación de polvo con cilindros ranurados enfriados y con baja compresión, extrusores reciprocantes de diseño convencional o modificados para la alimentación de polvos, extrusores monohusillo de alta velocidad, extrusores de doble husillo y extrusores Ram⁴.

El extrusor de tornillo simple consta de un eje circular con uno o dos “hilos” en forma de espiral en toda su longitud. Dicho eje se encuentra insertado en el interior de una camisa cilíndrica o barril dejando un “claro” o “ajuste” entre piezas necesario para que el eje pueda rotar. El eje tiene un diámetro que va variando de tal manera que el canal en espiral varía en profundidad. Generalmente la profundidad del canal disminuye desde el extremo de alimentación hasta el extremo del dado, dicha modificación da como consecuencia un aumento en la presión a lo largo de la camisa cilíndrica. Así este momento de presión impulsa al material fundido a pasar a través del dado.

De forma generalizada se recomienda una alta relación de compresión para las poliolefinas⁵, husillos de alto esfuerzo cortante y una corta sección de dosificación, necesario para garantizar la homogeneidad del material fundido y producir un parison sin defectos. En cambio para plásticos de ingeniería se suele incrementar la temperatura del fundido, ya que son más sensitivos al cortante que las poliolefinas, este aumento de temperatura puede causarse incrementando la velocidad de husillo. Con la finalidad poder controlar la temperatura de mejor manera durante el proceso, es recomendable utilizar un husillo de bajo cortante con relaciones de compresión de 2:1 a 2.5:1 y una relación Largo /Diámetro (L/D) de 20:1 a 24:1.

HUSILLOS PARA TERMOPLÁSTICOS			
MATERIAL	RELACIÓN L/D	RELACION DE COMPRESIÓN	ÁNGULO DE INCLINACIÓN
ABS	24:01:00	2.7 A 3	17.7°
PC	25:01:00	2.2:1	/
LDPE	20:1 A 24:1	3:1 A 4:1	17.7°
LLDPE	20:1 Y 24:1	3:1 A 4:1	/
HDPE	20:1	3:1	/
PP	24:1	3:1	17.7°

Tabla 2.2: Características de los husillos para distintos materiales. Enciclopedia del Plástico Industrial.

⁴ Tipo de extrusión, en el que se empleaba un pistón reciprocante para materiales con muy bajo índice de fluidez, actualmente en desuso. <http://www.plasticodigital.com/?c=117&a=1152>

⁵ Las poliolefinas son todos aquellos polímeros obtenidos mediante la polimerización de olefinas. El término de la Unión Internacional de Química Pura y Aplicada (IUPAC) para olefinas es “alquenos”, por lo cual a las poliolefinas también se les puede denominar polialquenos. Entre las poliolefinas se encuentran Polietileno de Baja Densidad (LDPE), Polietileno de Alta Densidad (HDPE), Polietileno Lineal de Baja Densidad (LLDPE), Polipropileno (PP) y Caucho Etileno-Propileno (EPR).

Un extrusor para Polietileno de Alta Densidad tiene las siguientes características:

- El husillo tiene una relación de largo entre diámetro (L/D) con valores de 20:1 a 30:1.
- Relación de compresión de 3:1 a 4:1.
- Paso constante entre álabes, equivalente al diámetro del husillo; este tipo de denomina “paso cuadrado”.
- Dispositivo mezclador al final del husillo, con la finalidad de promover e intensificar la homogeneidad del material fluido.

2.3.1.2.2 Plato rompedor y paquete de mallas

Aunque la zona final de un extrusor es la del dado, entre el husillo y éste último, se encuentra el porta mallas el cual consiste comúnmente en un rompedor de flujo y un conjunto de mallas de alambre situadas del lado del tornillo.

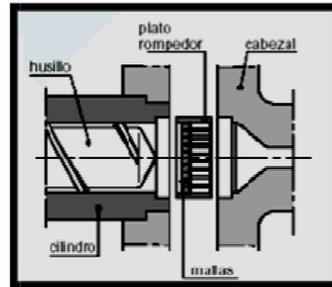


Diagrama 2.8: Ubicación Plato Rompedor y Paquete de Mallas. Centro Catalán del Plástico

El ensamble de la placa rompedora y el juego de mallas tienen tres funciones:

1. Evitar el paso de material extraño reduciendo los defectos en el producto al tener que remover partículas no deseadas, como pueden ser polímero no fundido, así como partículas de metal.
2. Crear un frente de presión cuando se opone una resistencia al bombeo de la zona anterior. Este frente de presión suplente la fuerza impulsora para vencer la resistencia del dado.
3. Eliminar la memoria de giro del material fundido. Los polímeros son materiales constituidos por moléculas de cadenas largas, que se encuentran enrollados o enmarañados aun cuando están fundidos. Cuando un material visco elástico se somete a un tratamiento mecánico prolongado como lo es el paso por un tornillo, se

produce un alineamiento de las cadenas lo cual produce al enfriarse una tendencia a recuperar elásticamente este alineamiento como una configuración energética óptima. Las piezas que son realizadas en máquinas de extrusión sin rompedor de flujo han presentado defectos por torceduras en distintas direcciones.

Existen diferentes tipos de placas rompedoras, su uso depende de la viscosidad del material:



Imagen 2.2: Placas Rompedoras. Centro Catalán del Plástico

La velocidad de producción depende en gran medida de la presión del fundido y, por supuesto del grado de contaminación que obtura el paso de malla por retención de impurezas. Esta disminución de producción es más fácil de detectar no tanto por la disminución de la producción en sí misma como por el aumento del consumo energético.

2.3.2 Cabezal

El cabezal de la extrusora es la pieza situada entre el husillo y la boquilla. El cabezal se puede quitar y poner de la máquina con gran facilidad, lo que permite la sustitución o reparación del plato rompedor y el paquete de mallas. Debido a esto, el cabezal se une directamente al cilindro o cañón por medio de tornillos y tuercas atornilladas directamente en la brida.

El perfil interno del cabezal debe de facilitar lo más posible el flujo del material hacia la boquilla. Se deben de evitar ángulos excesivamente convergentes.

2.3.2.1 Tipos de cabezales

2.3.2.1.1 Cabezal de Flujo Radial

El funcionamiento de este cabezal inicia cuando el plástico fundido entra lateralmente y se divide rodeando a un mandril; posteriormente se une para entrar a un área de alta contrapresión la cual asegura la soldadura del material fundido. Debido a su forma de alimentación y distribución este diseño fue impuesto para la transformación de PE. Este cabezal tiene una gran problemática en el cambio de color, ya que durante éste quedan residuos del color anterior. Existen dos variantes de este tipo de cabezal; de distribución anular y distribución curva.

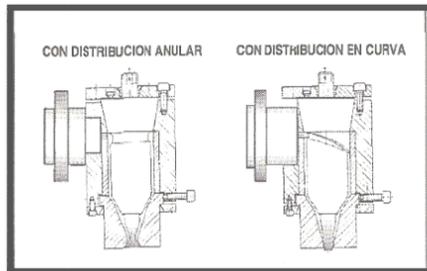


Diagrama 2.9: Cabezal Flujo Radial. Enciclopedia del Plástico.

2.3.2.1.2 Cabezal de Flujo Axial

Está constituido por un torpedo central, generalmente acoplado con un dispositivo llamado “patas de araña”, el cual dirige el flujo y crea la presión para lograr que el material se homogenice. Este cabezal recibe su nombre ya que la masa fundida proveniente de la extrusora pasa por un codo el cual cambia su dirección enfrentándolo al vértice del cono del torpedo de manera axial. Este tipo de cabezal es recomendado para PVC; en ocasiones, se utiliza también para PE porque ofrece la capacidad de cambios rápidos de calor; sin embargo es necesaria la compensación de las patas de araña para asegurar un parison liso y libre de soldaduras.

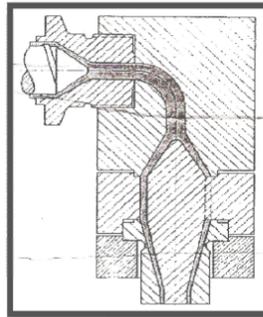


Diagrama 2.10: Cabezal Flujo Radial.

2.3.2.1.3 Cabezal Acumulador

Este tipo de cabezal es considerado en la categoría de extrusión soplado intermitente, donde el plástico fundido es almacenado en un dispositivo, para posteriormente formar el parison con alta velocidad y de esta manera evitar su estiramiento natural. Generalmente se utiliza para la fabricación de cuerpos huecos de más de 5 litros y principalmente cuando se requiere una distribución del espesor de pared.

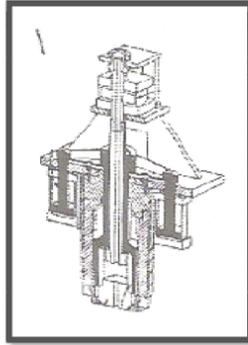


Diagrama 2.11: Cabezal Acumulador. Enciclopedia del Plástico.

2.3.2.1.4 Cabezal con Programación

La variación del espesor en el caso de formas irregulares y complicadas obedece a que durante el soplado, algunas zonas de la pared del parison experimentan mayor elongación que otras, produciendo paredes más delgadas y débiles, o muy gruesas, donde se desperdicia material. Esta diferencia de espesores en el parison puede lograrse por medio de un dado que incremente o reduzca la apertura por donde se extruye la resina. Esto es logrado con el movimiento ascendente y descendente del mandril del dado de extrusión.

En el caso de contenedores de altas especificaciones, es necesario el uso del cabezal con programación pero con sistemas computarizados los cuales manejan de 5 a 50 puntos de control, lo que permite adecuarse al diseño de la pieza.

Los sistemas actuales recurren a mecanismos más sofisticados de control de espesor, SFDR (Static Flexible Deformable Ring), anillo estático deformable y el PWDS (Programable Wall Thickness Distribution System), sistema de programación de pared.

Una de las partes que tienen en común todos los cabezales es la boquilla. Se sitúa al final del extrusor, dentro del cabezal y tiene como función dar la forma deseada al plástico

fundido. Su diseño se adapta progresivamente al perfil final evitando en todo momento zonas en las que el material pueda quedar retenido y pueda llegar a degradarse térmicamente. Se ha de favorecer un aumento uniforme de la velocidad del fundido, así como las variaciones bruscas de dirección.

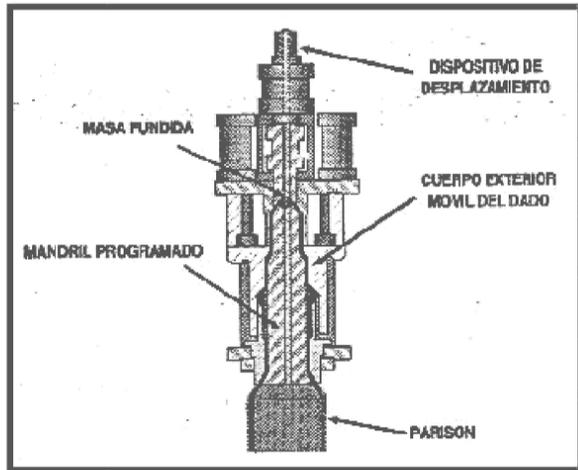
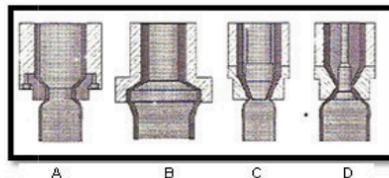


Diagrama 2.12: Cabezal Flujo Radial. Procesamiento de los Plásticos.

Las boquillas se pueden clasificar y ser llamadas en función de la forma del producto. Tipos de Boquillas:



- A.-Cilíndrica
- B.-Ensanchedora
- C.-Forma de Plato
- D.-Forma de Tulipan

Diagrama 2.13: Diseño de Boquillas. Enciclopedia del Plástico Industrial.

La boquilla cilíndrica se conoce como clásica para parison y es la más utilizada en la maquinaria de extrusión soplado, se caracteriza porque la boquilla y el mandril se encuentran a la misma posición. Sin embargo, actualmente en los nuevos sistemas de

extrusión soplado se recurre a boquillas en forma de plato y tulipan ya que estas permiten variar el espesor del parison y así desarrollar productos más complejos.

2.3.3 Métodos de soplado

El soplado del parison es un punto de suma importancia para obtener un producto de calidad ya que del adecuado suministro de aire dependerá el formado del producto y copiado fiel de las formas, bordes del molde, letras y diseños superficiales. En la siguiente tabla se describen los intervalos de operación del soplado con respecto a algunos materiales.

Plástico	Presión [Psi]
LDPE	20-60
HDPE	60-100
PVC	75-100
PC	70-150
PP	75-100
ABS	50-150
POM	100-150

Tabla 2.3: Presión de Soplado para Termoplásticos. Enciclopedia del Plástico Industrial

De manera general, el aire utilizado para el soplado cumple tres funciones; la primera es expandir el parison contra las paredes del molde, la segunda es ejercer presión en el parison expandido copiando la forma del molde y la última ayudar al enfriamiento del producto.

Existen diferentes configuraciones o formas para llevar a cabo el soplado las cuales fueron diseñadas por las principales empresas de fabricación de maquinaria de soplado

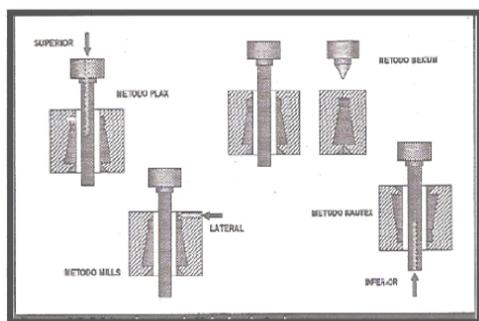


Diagrama 2.14: Válvulas de Soplado. Enciclopedia del Plástico Industrial.

En la figura anterior, se observa los diseños de diferentes válvulas de soplado, en particular, el diseño lateral suele causar algunos problemas ya que los pequeños orificios crean un efecto venturi, que consiste en la generación de pequeños vacíos en el tubo provocando su colapso; otro problema registrado con la velocidad del aire, cuando es muy alta provoca que el parison sea arrastrado a la parte inferior del molde.

En función de la presión de soplado existe también el riesgo de que si la presión es muy alta, puede reventarse o explotar el parison o si es demasiado baja se obtendrán piezas carentes de detalles superficiales bien definidos.

Se debe considerar que el diámetro del orificio de soplado no sea tan pequeño, ya que de ser así el tiempo de soplado será muy grande y la presión del aire insuficiente. En la siguiente tabla se presenta una guía de selección de diámetro de orificio de soplado.

Diámetro Orificio	Capacidad
[mm]	[l]
1.6	Hasta 1
6.4	1-4
12.7	4-20

Tabla 2.4: Diámetro de Orificio para Soplado. Enciclopedia del Plástico Industrial.

2.3.4 Moldes

El molde es la herramienta en donde sucede el aprisionamiento del parison, el soplado y el enfriamiento.

Para el diseño de un molde y selección del material más adecuado se debe de tomar en cuenta las características del acabado, la posición de la línea de separación, las contracciones del material y por último la durabilidad. Los moldes se clasifican en moldes para corridas largas de producción y operación continua y moldes para corridas cortas de producción y prototipos.

Los materiales para la construcción de moldes de soplado pueden ser diversos, los de hierro y acero se utilizan para moldes de alta producción y grandes esfuerzos mecánicos, así como, elementos de sujeción, guía, ajuste y corte, los metales no ferrosos como el aluminio y aleaciones tienen baja densidad, alta conductividad térmica, resistencia química y a la intemperie, pero son de baja resistencia mecánica a severos esfuerzos de

compresión, estos tipos de materiales se utilizan generalmente para corridas de producción corta.

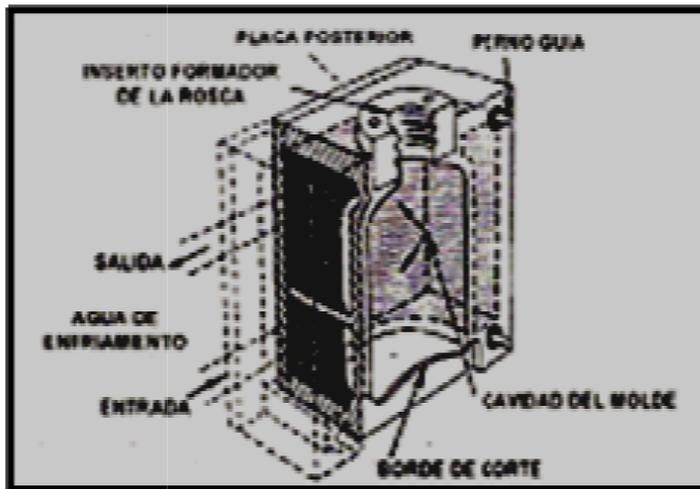


Diagrama 2.15: Partes del Molde Enciclopedia del Plástico Industrial

2.3.5 Unidad de cierre

El sistema de sujeción de molde y la unidad de cierre deben de ser capaces de que el molde abra y cierre perfectamente, soportar el peso del molde y mantenerlo alineado durante el proceso así como soportar la presión de soplado.

La mayoría de las máquinas de soplado consisten en prensas de cierre horizontales que son accionadas por sistemas hidráulicos, mecánicos o combinados; sin embargo, también existen de cierre vertical. Los medios de cierre generalmente son hidráulicos.

El área de las platinas debe de ser mayor con el fin de ejercer una presión uniforme a lo largo de ella, dirigir correctamente los moldes y poder utilizar una variedad de moldes de diversos tamaños. En el proceso de extrusión soplado existen cuatro tipos comerciales de unidades de cierre, las cuales fueron diseñadas por los principales fabricantes de maquinaria:

2.3.5.1 BATENFELD

Utiliza unidades de cierre con cuatro barras guía ampliamente espaciadas y las platinas son accionadas por un sistema de rodilleras, lo cual garantiza un movimiento de cerrado sincronizado.

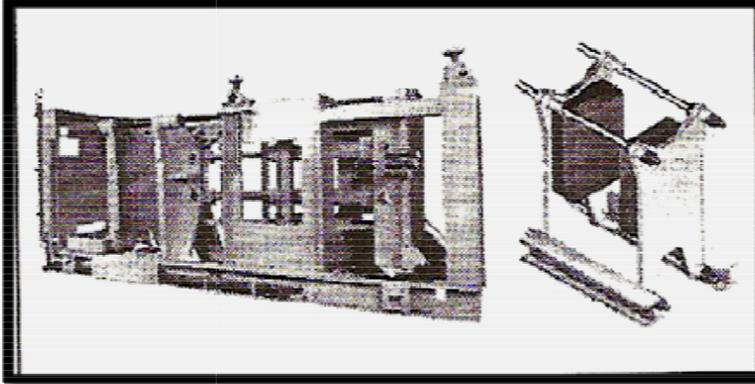


Imagen 2.3: Unidad de Cierre con Barras Guía. Enciclopedia del Plástico Industrial.

2.3.5.2 BEKUM

Diseño de un sistema de platinas sin barras guía, movidas por un bastidor de cuatro transportadores accionado hidráulicamente y controlado por sistemas de piñones y cremalleras para asegurar el cerrado sincronizado.

2.3.5.3 KAUTEX

Proporciona unidades de cierre en forma de "U" que incluye un bastidor cerrado inclinado para absorber la fuerza de prensado; este bastidor cuenta con una unidad de cierre sin barras guía y con bloques de cadena para sincronizar la operación.

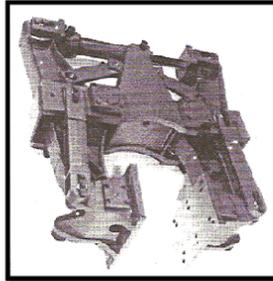


Imagen 2.4: Unidad de Cierre en "U". Enciclopedia del Plástico Industrial

2.3.5.4 VOITH FISCHER.

Su diseño incluye la forma en "U" sin barras guía con sistema de guía y prensado independiente, de movimiento en ambas platinas y operación sincronizada mediante engranes y cremalleras.

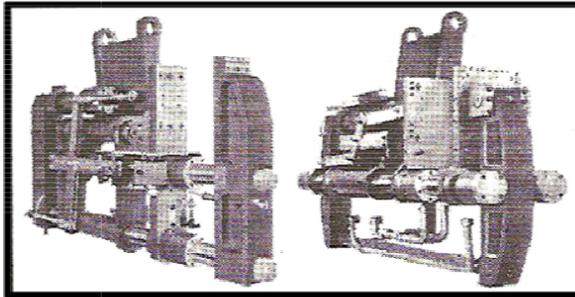


Imagen 2.5: Unidad de Cierre en "U" sin barras guía

2.3.6 Corte de parison

Una vez que el parison ha sido formado y aprisionado por el molde, existe un mecanismo que corta el parison y permite el paso de la boquilla de soplado. Comercialmente existen cuatro formas de corte de parison:

- Jalado (Pulling off).
- Prendido (Pinching off).
- Corte por cuchillas.
- Cuchillas o alambres calientes.

2.3.6.1 Jalado (Pulling off)

Este método se utiliza principalmente cuando el arreglo del molde es rotativo vertical; consiste en cortar el parison mediante el aprisionamiento de este con el molde. Cuenta con las desventajas de que con plásticos de baja viscosidad puede formarse una película cuando se jala o estira el parison. El jalado puede ocasionar malformación del cuello que podría causar problemas con la inserción del mandril de calibración.

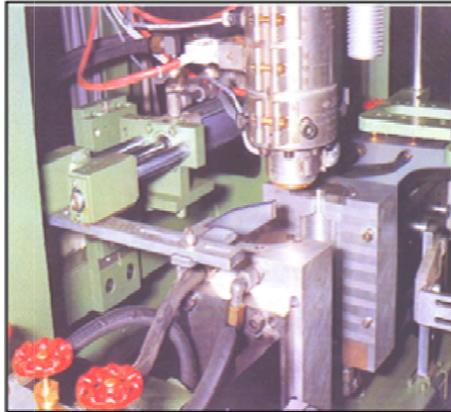


Imagen 2.6: Sistema de corte Jalado

2.3.6.2 Aprisionar (Pinch-off)

Este sistema de corte de parison se utiliza cuando los moldes de soplado se localizan fuera del área de extrusión. Consta de un brazo en uno de sus extremos provisto de un mecanismo tipo mandíbula el cual aprisiona al parison y lo transporta al área de soplado.

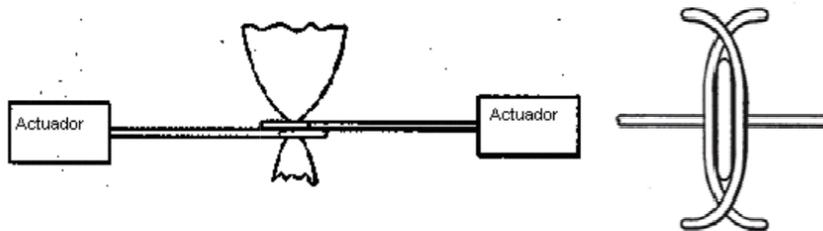


Diagrama 2.16: Sistema de Corte por Aprisionamiento. United State Patent 4919880.

2.3.6.3 Corte por cuchillas

En este método, el parison puede ser cortado por medio de una cuchilla o navaja al salir del dado. Generalmente operan a una velocidad de 1 m/s con el fin de no afectar el borde del parison al cortarlo; para evitar esto se utiliza un flujo de aire interno que contrarresta la distorsión transversal, proporcionando un parison abierto, sin distorsión y homogéneo.

2.3.6.4 Cuchillas o Alambres calientes

Estas cuchillas son hechas con filo continuo, tienen sección transversal en forma de espada y son resistentes al calor. Las cuchillas o hilos son calentados al rojo vivo por medio de resistencias eléctricas con suministros de energía bajos (6-24 [V]). Es común en estas cuchillas el afilado y el reemplazo inmediato. Al trabajar con PVC si no se tiene controlada la temperatura de la resistencia es posible la degradación térmica en la zona de corte y en el caso del Acetal se recomienda una temperatura baja para evitar la ignición del parison.

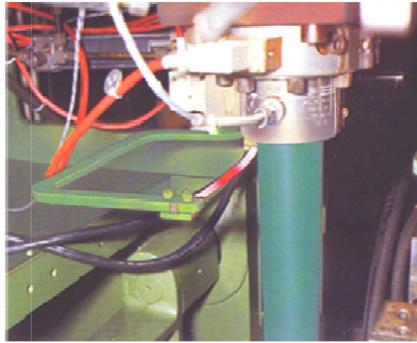


Imagen 2.7: Sistema de corte por cuchillas calientes

2.3.7 Equipo auxiliar

Dentro de una máquina de extrusión soplado, existen una serie de equipos que ayudan a que se lleve a cabo el proceso. A continuación se describen cada uno de ellos.

2.3.7.1 Sistema Hidráulico

El sistema hidráulico de una máquina de extrusión, tiene la función de transmitir energía del motor eléctrico a través de una bomba y un medio no compresible como el aceite hidráulico.



Para la transmisión de la energía se requieren de varios componentes como bombas, válvulas accesorios hidráulicos, tubería y tanques o depósitos.

2.3.7.2 Sistema Eléctrico

Para operar satisfactoriamente una máquina de extrusión soplado y seguir una secuencia de pasos tales como: el cierre de molde, tiempo del proceso de extrusión, tiempo de enfriamiento, tiempo de soplado y en general controlar toda la secuencia de pasos; es importante entender los circuitos eléctricos.

El sistema eléctrico se encarga del control y del accionamiento de la máquina. Su propósito es detectar un cambio, programar la secuencia de pasos y proporcionar orden para que se ejecuten ciertas funciones. La posición de los componentes de la máquina se determina por medio de interruptores límite, los cambios de temperatura por termopares y los tiempos de ciclo por temporizadores. Después de detectar un cambio, éste se analiza y el sistema de control transmite una señal que se puede ver reflejada en el movimiento de un sistema mecánico.

2.3.7.3 Transmisión

El motor del extrusor proporciona la fuerza motriz que requiere el husillo, pero a una velocidad mayor de la necesaria para procesar el material y con un torque relativamente bajo con respecto a lo que la velocidad del plástico demanda. Los motores eléctricos con que están equipadas giran a 1000 [rpm] o más y generalmente, en las extrusoras el tornillo gira a velocidades de entre 10 y 120 [rpm].

Como el proceso requiere de bajas velocidades entre 20 y 35 [rpm], por citar un ejemplo, es común emplear un sistema llamado reductor de velocidad o caja de engranes usándose reducciones de 6:1 hasta 30:1, con ello, incrementamos proporcionalmente el torque del eje motriz del husillo. La misión del reductor es transmitir al tornillo la potencia del motor y disminuir la velocidad de rotación.

2.3.7.4 Sistema de Enfriamiento

El equipo utilizado para enfriar o mantener la máquina de extrusión es sumamente importante para conseguir una operación satisfactoria y obtener un producto de calidad. Una de sus principales funciones es proporcionarle al molde la temperatura adecuada para así evitar grandes choques térmicos que provocan que el material pierda sus propiedades, de igual manera, que no se consiga obtener la forma final deseada. Otra

función es extraer el calor del aceite del sistema hidráulico mediante un intercambiador de calor para así evitar que se pierda la viscosidad y pueda ejercer la presión necesaria.

2.3.7.5 Sistema Neumático

Este sistema es el que proporciona la presión dentro del molde para darle forma al parison, generalmente el aire es suministrado con la ayuda de un compresor, un conjunto de válvulas, manómetros y un filtro.

2.4 Tipos de maquinaria

Como se ya se ha mencionado, existen diversos tipos de máquinas de extrusión soplado, las cuales se diseñan de acuerdo a la capacidad de producción, al tipo de molde y al tamaño de la pieza. La maquinaria más importante en la industria es:

- Máquinas tipo “Shuttle ”
- Máquinas de moldes corredizos
- Máquinas rotativas
- Máquinas coextrusión

2.4.1 Máquina tipo “Shuttle”

Este tipo de configuración permite una extrusión continua, la característica principal es que el cabezal de extrusión está centrado y los moldes localizados lateralmente, por lo que estos se mueven alternativamente hacia el cabezal para tomar el parison y regresar a su posición inicial para soplar el artículo y expulsarlo. Consta de una sola prensa la cual se sincroniza para los dos moldes.

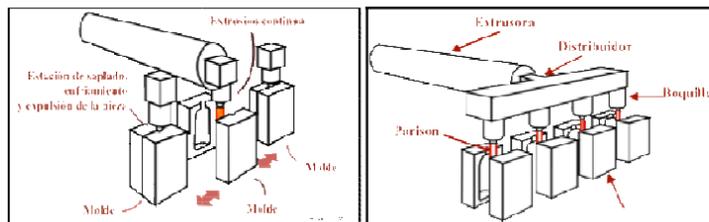


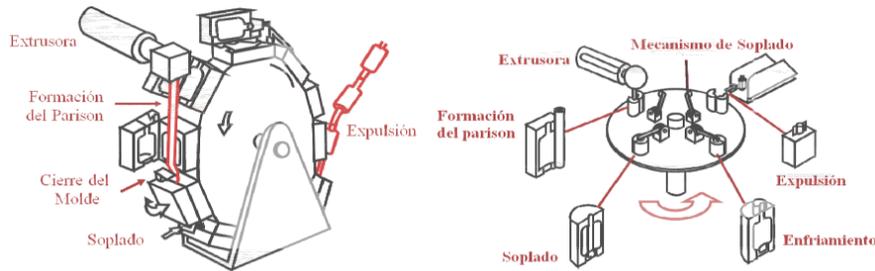
Diagrama 2.17 y 2.18: Máquinas tipo Shuttle.

2.4.2 Máquina de Moldes Corredizos

También conocidas como máquinas "long stroke", su configuración es muy similar a las máquinas tipo shuttle con la diferencia principal en el tamaño del molde, que pueden tener hasta 20 cavidades y para su desplazamiento se utilizan rieles deslizantes. Este diseño es adecuado para altas producciones.

2.4.3 Máquinas Rotativas

Existen dos tipos de configuraciones verticales y horizontales, ambas constan de un carrusel con moldes montados que al girar pasan de una estación a otra realizando el ciclo de extrusión. Para poder aumentar la producción es necesario incrementar el número de moldes y regular la velocidad de rotación. Una diferencia entre las dos variantes, es que en el arreglo vertical no se corta el parison y el tubo formado es continuo hasta la etapa de expulsión logrando que los envases producidos presenten mayor calidad.



Diagramas 2.19 y 2.20: Máquinas rotativas.

2.4.4 Máquinas Co-extrusión

En este tipo de maquinaria permite la combinación de materiales formando dos o más capas, con la ayuda de un sólo dado. El principio de co-extrusión de tres capas consiste en aplicar una capa fina de barrera sobre un material de soporte (PE generalmente) unidos entre sí por un adhesivo.

La principal razón para utilizar una coextrusión es mejorar la impermeabilidad del producto, pero también se utiliza para el ahorro de material el cual es remplazado por material reciclado; el cual se coloca entre capas de material virgen. Este tipo de

maquinaria produce envases que generalmente contienen productos químicos alimenticios y farmacéuticos.

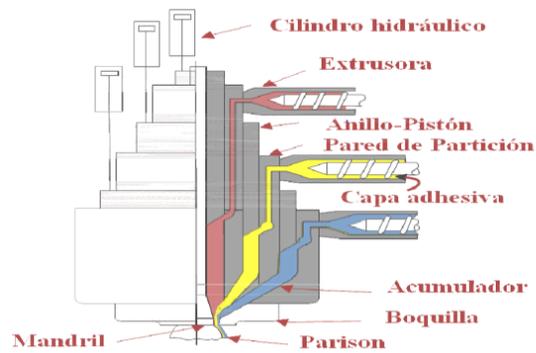


Diagrama 2.21: Máquina de co-extrusión. E. G. Fisher Extrusión de Plásticos.

CAPÍTULO 3: MÁQUINA DE EXTRUSIÓN SOPLADO VULCANO: DESCRIPCIÓN Y PUESTA EN MARCHA

3.1 Introducción

Dentro del presente capítulo se realizará una descripción detallada de cada elemento que constituye el objeto de estudio, haciendo énfasis en sus características principales, tales como: intervalos de operación y dimensiones. Posteriormente, se dará a conocer el estado inicial de la máquina de extrusión soplado Vulcano para poder analizar y jerarquizar la importancia de los deterioros existentes y así, a través del seguimiento de un plan de trabajo, llevar a cabo, la puesta en marcha de la máquina.

3.2 Descripción General

La máquina de extrusión soplado Vulcano se puede englobar en cinco sistemas o componentes principales, que a su vez cada uno de ellos cuenta con diversos elementos que ayudan a llevar a cabo el proceso (ver Imagen 3.1). A continuación se describirán dichos sistemas.

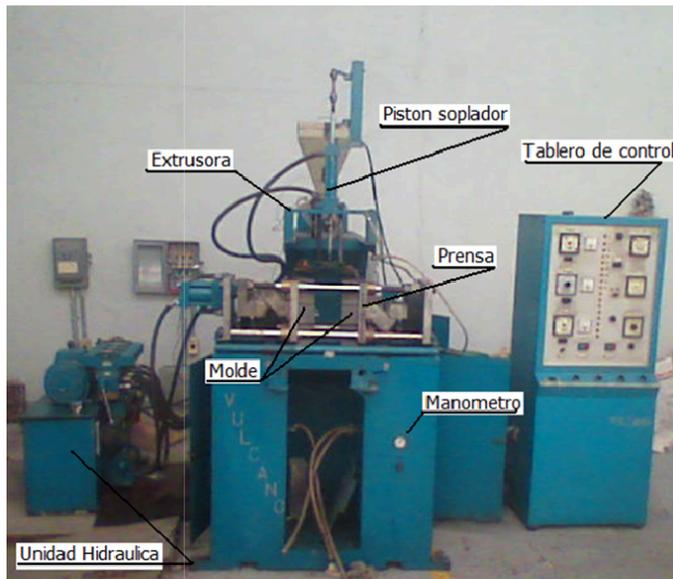


Imagen 3.1: Máquina Extrusora Vulcano, Vista Frontal.

3.2.1 Extrusor

Dentro de este sistema se pueden considerar los siguientes elementos: tolva (alimentación de la materia prima), husillo, (transporte del material) y cabezal (salida del material fundido).

3.2.1.1 Tolva

Se cuenta con una tolva cónica rectangular del tipo de alimentación por gravedad, la cual está provista de una mirilla y una compuerta para regular el paso de la materia prima. Tiene una capacidad de almacenamiento de $0.02759 \text{ [m}^3\text{]}$ (27.59 [l]), ver Imagen 3.2 y Diagrama D3 del anexo B.



Imagen 3.2: Tolva

3.2.1.2 Husillo

La máquina está equipada con un husillo del tipo de propósitos generales, ya que presenta un canal de profundidad decreciente. De igual manera este tipo de husillo denominado "paso cuadrado" por tener paso constante equivalente al diámetro del husillo. A continuación se describen las características principales, ver Diagrama 3.1, Tabla 3.1 y Diagrama D1 del anexo B.

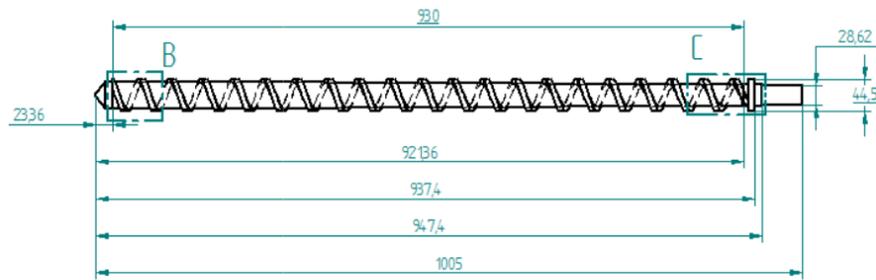


Diagrama 3.1: Características del husillo.

Longitud (largo) L	930 [mm]
Diámetro del husillo D	44.5 [mm]
Paso de hélice	44.5 [mm]
Tipo de compresión	Creciente
Angulo de hélice	17°
Espesor de hélice (filete)	8.25 [mm]
Relación L/D = 930/44.5	21:1
Diámetro de la recámara	43.2 [mm]

Tabla 3.1: Características principales del husillo.

3.2.1.3 Cabezal y Boquilla.

A este tipo de cabezal se le conoce como: de "flujo axial", este se constituye por un torpedo central acoplado con un dispositivo llamado patas de araña. Este cabezal cuenta con mecanismo de cuatro tornillos que ayuda a centrar el mandril para obtener un parison de espesores constantes. Ver Diagramas D4 y D5 del anexo B.

La boquilla es del tipo cilíndrica con diámetros interno de 2.51 [mm] y externo de 2.75 [mm] y longitud 15 [mm]; ver Imágenes 3.3, 3.4 y 3.5



Imagen 3.3: Cabezal, Vista Inferior.

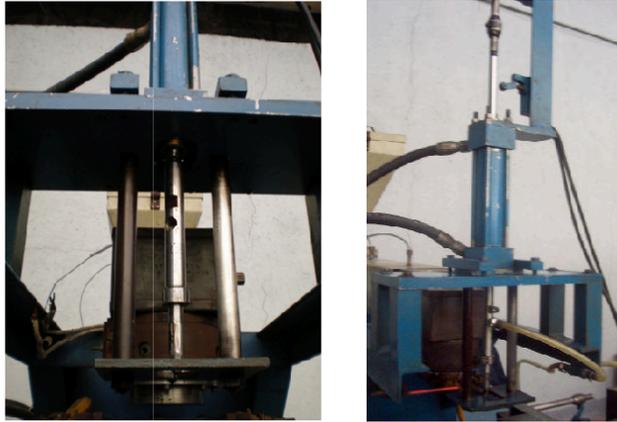


Imagen 3.4: Cabezal Vista Posterior.



Imagen 3.5: Boquilla y Distribuidor.

La configuración en la cual está colocada la espiga de soplado es conocida como soplado superior, ésta fue desarrollada por la empresa Plax Corp en la década de los 40. El diámetro del orificio de soplado es de 4 [mm] se encuentra dentro del intervalo de productos menores de un litro. Con presión de aire de 6 a 7 [kg/cm²]. La espiga de soplado se encuentra acoplada a un pistón de doble efecto que realiza un desplazamiento vertical de 150 [mm]; en la parte superior acciona el interruptor límite "7" y en la parte inferior es donde se lleva a cabo el soplado del producto, ver Imágenes 3.6 y 3.7.



Imágenes 3.6 y 3.7: Espiga de Soplado.

3.2.2 Unidad de Cierre

La prensa con la que está equipada la maquina Vulcano es de cierre horizontal, se puede considerar como del tipo Battenfeld ya que se acciona mediante un pistón hidráulico acoplado a un sistema mecánico del tipo de rodillera; sin embargo, ésta sólo cuenta con tres barras guía y las tipo Battenfeld con cuatro. La unidad está diseñada sólo para ser utilizada con un molde de espesor de 140 [mm]; ya que el mecanismo de rodillera aplica su máxima fuerza de cierre cuando ésta se encuentra completamente extendidas. Las dimensiones de las platinas son largo 250.5 [mm] y ancho 250.5 [mm] con un área de trabajo de 160 [mm] de ancho y 280 [mm] de largo, ver Imagen 3.8 y Diagrama D2 del anexo B.

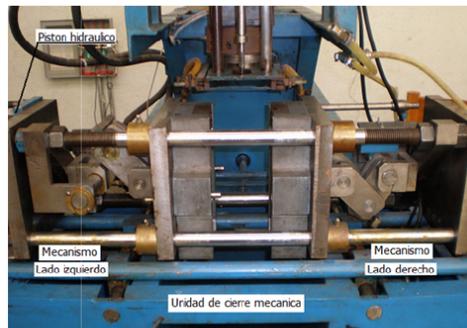


Imagen 3.8: Unidad de Cierre.

3.2.2.1 Molde.

El molde está diseñado para corridas de producción larga, cuenta con un sistema de enfriamiento que regula la temperatura en la superficie, también está equipado con una cavidad para insertos formadores de rosca, utiliza dos pernos guía para asegurar el correcto cierre de molde. Sus dimensiones características son: largo 280 [mm], ancho 180 [mm], espesor 70 [mm], cavidad de un litro, ver Imagen 3.9.

El molde se asegura a la platina mediante dos tornillos; sin embargo ésta cuenta con un arreglo de barrenos para poder sujetar diferentes tipos de moldes.

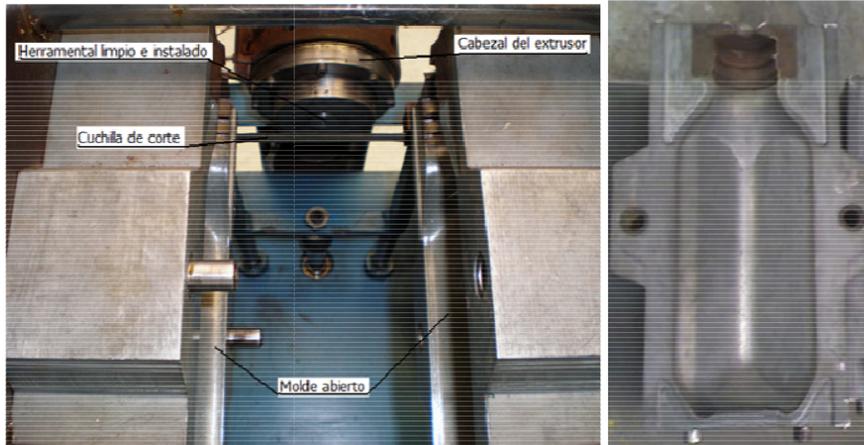


Imagen 3.9: Molde.

3.2.3 Corte de Parison

La forma mediante la cual se realiza el corte del parison es por medio de una cuchilla caliente, ésta se encuentra conectada en los extremos a un cable calibre TW-1/0 AWG de cobre a 220 [V]. La cuchilla tiene una longitud de 150 [mm], esta acoplada a un pistón de doble efecto que tiene una carrera de 100 [mm]. La temperatura alcanzada en la cuchilla es de 400 [°C]. Ver Imagen 3.10.

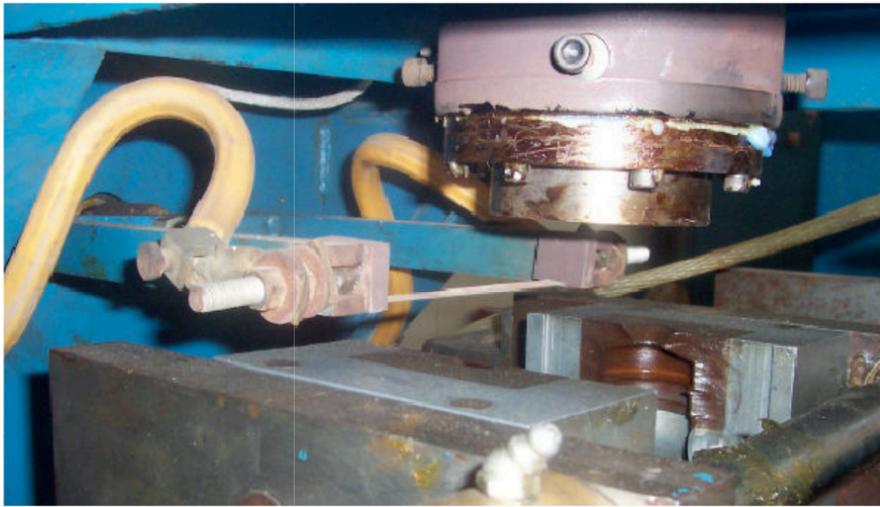


Imagen 3.10: Sistema de corte de parison.

3.2.4 Equipo Auxiliar

La máquina de extrusión soplado Vulcano está equipada con múltiples sistemas que ayudan a llevar a cabo el proceso. A continuación se describen cada uno de ellos.

3.2.4.1 Sistema Mecánico

El sistema motriz cuenta con un motor de 5 [HP] 220/440 [V] con velocidad de 1800 [rpm], se encuentra acoplado a un polea variable de intervalo de operación de 100 – 250 [mm]; este mecanismo se acciona mediante el desplazamiento del motor con la ayuda de un tornillo sin fin; ver Imagen 3.11.

El motor y la polea están conectados por medio de una banda a un reductor de velocidad con relación de reducción de 20:1. La transmisión al husillo se lleva a cabo mediante catarinas y cadena silenciosa. En la Tabla 3.2 se mencionan las características principales de este sistema y en el Diagrama A1 del anexo A se muestra la configuración del sistema.

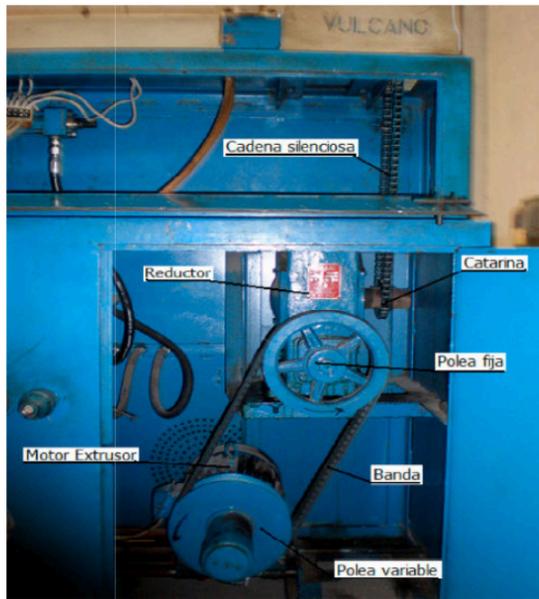


Imagen 3.11: Sistema Mecánico.

Velocidad del motor	1,800	[rpm]
Diámetro. Polea del motor variable	4-10	[in]
Diámetro. Polea del reductor	10	[in]
Relación del reductor	20:1	
Catarina reductor	20	Dientes
Catarina husillo	30	Dientes
Relación catarinas	20/30	
Intervalo de Velocidades del Husillo	23-57	[rpm]

Tabla 3.2: Características principales.

3.2.4.2 Sistema Hidráulico

El sistema hidráulico se compone de un tanque con capacidad de 100 [l] ($0.1 \text{ [m}^3\text{]}$), dentro del cual se almacena aceite hidráulico Mobil 68. Dicho aceite pasa por un filtro que se encuentra sumergido en el interior del tanque, el flujo es creado por la acción de una bomba de engranes la cual eleva la presión del fluido a 600-900 [psi] y lo entrega a una cruceta, donde se divide el flujo en tres direcciones; la primera de ellas conduce a una válvula de alivio de 12 [GPM] ($0.000755 \text{ [m}^3\text{/s]}$); cuya función es graduar la presión del fluido de tal forma que al abrir en su totalidad se obtiene la presión mínima y al cerrarla se obtiene la presión máxima 1500 [psi] (10.34 [MPa]), anexa a esta válvula se encuentra un manómetro de intervalo de operación 0 -3000 [psi] (0 - 20.68 [MPa]).

La segunda línea conduce a las electroválvulas de tipo 4/3 (cuatro vías, tres posiciones), las cuales se alimentan de forma paralela, al accionarse de forma alternada, éstas válvulas controlan el flujo dirigiéndolo a los diferentes pistones hidráulicos. El aceite que pasa por las válvulas posteriormente es redirigido hacia un intercambiador de calor horizontal del tipo aceite-agua, a la salida de éste el aceite se hace pasar nuevamente por un filtro, para su reingreso al tanque.

Por último, la tercera salida de la cruceta se dirige a una válvula de retorno la cual se activa por un solenoide, ésta permanece cerrada durante la operación de los pistones y se abre para liberar la presión cuando estos no están en funcionamiento, regresando de nuevo el aceite al tanque. Dicho sistema se ilustra en la Imagen 3.12 y en el Diagrama A2 del anexo A.

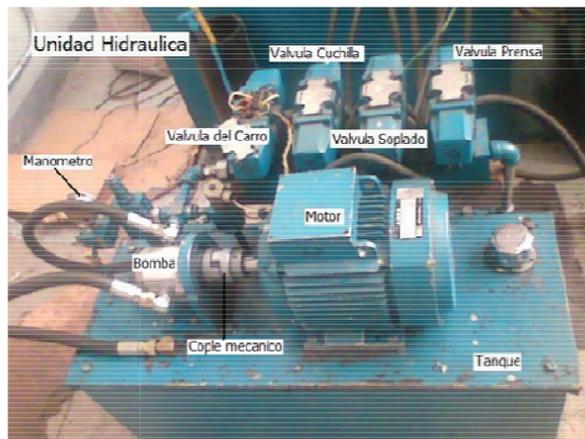


Imagen 3.12: Unidad Hidráulica.

3.2.4.3 Sistema de Enfriamiento

El sistema de enfriamiento se encuentra constituido por un equipo Friomold (ver figura 3.15), el cual suministra agua y refrigerante al sistema de enfriamiento de la máquina, la línea de entrada de la máquina conduce en primera instancia a una conexión "Te", que divide el flujo en dos, uno de los flujos pasa a través de una válvula y por el molde derecho, el flujo restante es conducido a una cruceta; la cual nuevamente vuelve a dividirlo en tres direcciones, las que corresponden en primera instancia al enfriamiento del molde izquierdo, al intercambiador del calor del sistema hidráulico (Imágenes 3.13 y 3.14) y finalmente al intercambiador de calor situado en el interior del cañón del extrusor en la etapa de alimentación (Imagen 3.16). Este sistema queda ejemplificado en el Diagrama A3 del anexo A.



Imágenes 3.13 y 3.14: Molde e intercambiador de calor tipo agua-aceite



Imagen 3.15: Sistema de refrigeración Friomold



Imagen 3.16: Enfriamiento en zona de alimentación.

3.2.4.4 Sistema Neumático.

El aire proveniente de la red de aire del laboratorio es conducido a través de un filtro deshumidificador instalado en la máquina, al salir de éste el aire es separado mediante la utilización de una conexión “Te”, la cual divide el flujo en dos, uno de los flujos se dirige a una válvula la cual se cierra o se abre según sea necesario con la finalidad de alimentar un manómetro con rango de 0 a 11 [kg/cm²]. La segunda derivación del fluido conduce a las electroválvulas que se encuentran conectadas como se muestra en el Diagrama A4 del Anexo A y en la Imagen 3.17.

El sistema dispone de dos válvulas debido a que una de ellas se activa antes de la etapa de soplado, con la finalidad de limpiar los ductos antes de realizar el soplado del parison.



Imagen 3.17: Sistema Neumático

3.2.4.5 Sistema Eléctrico.

El sistema eléctrico lo dividimos en dos: Resistencias Eléctricas y Tablero de Control. En el primer sistema se regula la temperatura de las tres zonas características del husillo y la temperatura del cabezal para así mantener un perfil de temperaturas adecuado para cada material y proceso.

En el tablero de control se ejecutan todas las órdenes que son transformadas en señales para cada uno de los elementos y así poder llevar a cabo el ciclo. A continuación se describen dichos sistemas.

A) Resistencias Eléctricas

El sistema eléctrico está constituido por seis resistencias, las dos primeras forman un circuito en paralelo con una resistencia equivalente de 1800 [W], las siguientes dos resistencias del cañón se encuentran conectadas de la misma manera. En el cabezal disponemos de dos resistencias una de 1750 [W] y otra de 600 [W] conectadas en paralelo todas a 220 [V]. Para regular la temperatura de cada par de resistencias del sistema se cuenta con un pirómetro de intervalo de operación de 0 - 420 [°C] (0 - 693.15 [K]); además de estar equipado con tres amperímetros; dos de ellos tienen un intervalo de operación de 0–20 [A] y el tercero es de 0 – 30 [A]. Como se muestra en la imagen 3.18 y en el Diagrama A5 del anexo A.



Imagen 3.18: Resistencias eléctricas en el cabezal y cañón.

B) Tablero de Control

El tablero o panel de control (Imagen 3.19) es donde se encuentran la instrumentación y los elementos eléctricos tales como: el interruptor principal, los pirómetros, los amperímetros, los temporizadores y los diodos luminosos indicadores del ciclo, además del interruptor del motor de la unidad hidráulica y del motor del extrusor. En la parte

inferior se localizan los interruptores para realizar el ciclo de forma manual. Ver Diagrama A6 de anexo A.

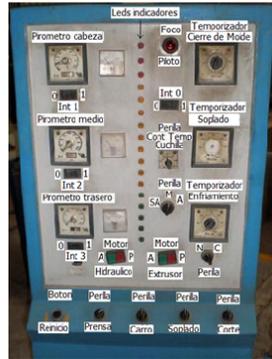


Imagen 3.19: Tablero de control.

3.3 Condiciones iniciales

La primera acción que se tomó fue la revisión general y la identificación de las partes que componen el equipo. Durante la revisión se encontró que la unidad de Cierre de Molde estaba inmovilizada por falta de uso y presencia de oxidación (Imagen 3.20), la conexión eléctrica entre el Panel de Control y el Extrusor se encontraba con los cables trozados además de no existir cable de alimentación principal, ver Imagen 3.21.



Imagen 3.20: condiciones iniciales, prensa.



Imagen 3.21: Condiciones iniciales, cables de conexión al tablero.

El sistema de enfriamiento no operaba (Imagen 3.22) y los ductos presentaban una obstrucción debido al sarro que se acumuló en la entrada y salida del sistema de enfriamiento del molde, zona de carga de materia prima e intercambiador de calor.



Imagen 3.22: Condiciones iniciales, sistema de enfriamiento.

El Sistema de soplado era otro elemento del equipo el cual no se encontraba en funcionamiento y no contaba con una instalación para su operación (Imagen 3.23). Además en la camisa del husillo las resistencias eléctricas tenían un mal funcionamiento debido a la falta de mantenimiento y la presencia de óxido (Imagen 3.24).



Imagen 3.23: Condiciones iniciales S. Neumático



Imagen 3.24: Condiciones iniciales del Cañón del Extrusor

El Pistón Hidráulico de la unidad de soplado no contaba con el buje de bronce que sirve como guía de la flecha que soporta a la espiga de inyección del aire (Imagen 3.25). Además de que el resto de los pistones se encontraban inmóviles debido a la degradación del aceite por la falta de uso y que contenía escorias, además de las malas condiciones de almacenamiento de la máquina (Imagen 3.26).



Imagen 3.25: Espiga de Soplado



Imagen 3.26: Pistón de la Espiga de Soplado

El sellado del tanque de almacenamiento se encontraba degradado, y en general el tanque estaba lleno de polvo y escorias, ver Imagen 3.27.



Imagen 3.27: imagen inicial de la Unidad Hidráulica

También se encontró material plástico degradado dentro del cañón, cabezal, y pegado al husillo (Imagen 3.28). Además al momento de inspeccionar el cabezal se encontró que el distribuidor de flujo se encontraba roto.



Imagen 3.28: Imagen inicial del cabezal con material degradado

3.4 Cronología de la puesta en marcha

Una vez identificados los problemas físicos que atañen a nuestra máquina, a continuación se presentan las actividades que se siguieron para su puesta en marcha; en este apartado se incluyen las pruebas de ajuste de la máquina.

Se comenzó por desmontar y dar mantenimiento mecánico a la prensa y al carro que la soporta, para esto fue necesario realizar un inventario de las partes que la integran y realizar un respaldo fotográfico, ver Imagen 3.29.



Imagen 3.29: Ejemplos de fotografías iniciales

Luego, se siguió con el análisis de los componentes del sistema eléctrico para identificar cada una de las partes que lo integran y así conocer su funcionamiento.

Una vez comprendido el funcionamiento de cada parte se empezó a realizar el diagrama eléctrico. Teniendo terminado este diagrama lo siguiente que se hizo fue la conexión del panel de control con la máquina y se conectó el conductor de corriente principal. Con esto también se corroboró que el diagrama estuviera perfectamente estructurado.

Posteriormente se realizó la sustitución del distribuidor de flujo ya que se encontraba en malas condiciones (Imagen 3.30); se seleccionó un acero para trabajo en caliente que cumpliera con la condición de bajas deformaciones a altas presiones y temperaturas (150 – 250) [°C] (423.15 – 523.15) [K] y un posible uso continuo. Después de analizar las diferentes opciones de materiales se eligió un acero H-13 (ver anexo D) por ser un material de larga duración a altas temperaturas y de fácil maquinado entre los aceros para herramientas existentes. Una vez seleccionado el acero se hizo un plano de la pieza tomando en cuenta los ajustes necesarios para obtener un ensamble adecuado. Además, se planeó la secuencia de pasos a seguir para realizar la manufactura en el menor tiempo posible y aprovechando mejor el material, se eligieron las herramientas de corte para realizar el desbaste (buriles de carburo de tungsteno WC+ Co con punta izquierda y de 1/4 [in] (6.35 [mm]), machuelo de 3/4 [in] (19.05 [mm]) con paso estándar).



Imagen 3.30: Distribuidor de flujo original y el fabricado en los talleres de Ingeniería Mecánica

Después de la elaboración del diagrama eléctrico y del la re-conexión de los conductores del panel de control se hicieron las pruebas iniciales las cuales permitieron observar algunos problemas adicionales que se tenían en la máquina.

Siguiendo el diagrama eléctrico se inició nuevamente con el arranque de la máquina intentando manipular el ciclo manualmente. Con esto se encontró que los interruptores límite estaban en malas condiciones, los pistones tenían un movimiento forzado y uno de ellos presentaba una fuga de aceite.

También se advierte en el manómetro de la unidad hidráulica una caída de presión ya que la bomba presento una fuga de aceite.

En el panel de control dos pirómetros estaban dañados, así como dos temporizadores que controlan el tiempo de enfriamiento y el tiempo de cierre de molde.

Para solucionar estos conflictos se realizó el mantenimiento a los interruptores límite (Limit Switch) y se sincronizaron para que el ciclo se desarrollara de manera completa.

Posteriormente se les dio mantenimiento a los pistones hidráulicos, se les cambiaron los retenes ya que estos presentaban desgaste y degradación, por consecuencia fugas de aceite.

Después se tuvieron que cambiar dos pirómetros los cuales estaban dañados, recurriendo a la compra de estos.

En el caso de los temporizadores se tuvo que conocer su funcionamiento eléctrico para poder repararlos ya que estos presentaban fallas menores.

Al inspeccionar la bomba se observa que los empaques están degradados y debido a esto existe una importante fuga de aceite y de presión. Para solucionarlo se reemplazó por completo la bomba, por ser ésta obsoleta, esto cuidando las características de flujo y presión. Debido a su geometría y posición de las entradas y salidas de tuberías tuvieron que realizarse adecuaciones para la colocación de la bomba.

Para solucionar lo anterior se tomó la decisión de instalar mangueras de alta presión y así tener holgura para la adaptación de la nueva bomba, ver Imagen 3.31.



Imagen 3.31: Configuración antes y después de la intervención.

Terminadas las reparaciones anteriores se realizarán nuevas pruebas de arranque para verificar que la presión fuera la adecuada, los pistones tuvieran un movimiento libre y los Limits Switch funcionaran correctamente.

El siguiente paso fue iniciar un manual de operación del Anexo E, indicando el funcionamiento de cada uno de los interruptores que componen al panel de control, cómo controlar los tiempos de apertura y cierre de molde, el tiempo de enfriamiento y el tiempo de recorrido de la prensa.

En las siguientes tablas se hace un resumen de las actividades presentadas, los problemas encontrados y sus soluciones.

3.4.1 Descripción de los problemas encontrados durante la puesta en marcha.

PROBLEMA	CAUSA DEL PROBLEMA	CONSECUENCIA RESULTANTE
1 PANEL DE CONTROL SEPARADO DE LA MÁQUINA	DESMONTADO ERRÓNEO DE LA ANTIGUA UBICACIÓN	DESCONOCIMIENTO DE LAS CONEXIONES ELÉCTRICAS ENTRE EL PANEL Y LA MÁQUINA DE EXTRUSIÓN SOPLADO
2 UNIDAD HIDRÁULICA SEPARADA	DESMONTADO ERRÓNEO DE LA ANTIGUA UBICACIÓN	DESCONOCIMIENTO DE LA CONFIGURACIÓN ORIGINAL DEL SISTEMA HIDRÁULICO
3 CORROSIÓN EN MECANISMOS	GRAN TIEMPO DE ALMACENAJE EN CONDICIONES HÚMEDAS, FALTA DE MANTENIMIENTO Y DE USO	INMOVILIDAD DE LOS MECANISMOS PRESENTES EN LA MÁQUINA (PRENSA, CARRETE, PISTONES ACTUADORES)
4 CABEZAL REPLETO DE MATERIAL	FALTA DE PURGA AL FINALIZAR SU USO	MATERIAL ENVEJECIDO Y DEGRADADO DE DIFÍCIL FUNDICIÓN, IMPOSIBILITANDO LA PUESTA EN MARCHA DEL HUSILLO.
5 FALTA DE CONEXIONES EN EL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO	TRASLADO INCOMPLETO	SISTEMA DE ENFRIAMIENTO INCOMPLETO, SIN UNIDAD DE ENFRIAMIENTO, NI CONEXIÓN ENTRE LAS PARTES LO CUAL OCASIONA NO CONTAR CON ENFRIAMIENTO DE ACEITE NI DEL MOLDE
6 MOLDE CON MALOS ACABADOS SUPERFICIALES Y QUE NO EMBONA PARA CERRAR	GRAN TIEMPO DE ALMACENAJE EN CONDICIONES HÚMEDAS, FALTA DE MANTENIMIENTO Y DE USO	MOLDE NO APTO PARA EL PROCESO DE SOPLADO, MALOS ACABADOS SUPERFICIALES EN PIEZAS
7 TANQUE DE LA UNIDAD HIDRÁULICA SUCIO Y ACEITE CON ESCORIA	NULO MANTENIMIENTO, FALTA DE USO ASÍ COMO LA CORROSIÓN NATURAL DEL TANQUE	ACEITE Y TANQUE NO APTO PARA EL PROCESO



PROBLEMA		CAUSA DEL PROBLEMA	CONSECUENCIA RESULTANTE
1.1	INTERRUPTORES LIMITE, MAL POSICIONADOS Y PEGADOS	FALTA DE MANTENIMIENTO, POLVO Y ACEITE EN MECANISMO	INTERRUPCIÓN DEL CICLO
1.2	MAL CONTROL DE LA TEMPERATURA DEBIDO A LOS TERMOPARES	FALLA EN LOS COMPONENTES INTERNOS	CONTROL NULO DE LA TEMPERATURA DEL PROCESO
2.1	PÉRDIDA DE PRESIÓN	ABERTURA DE LA VÁLVULA DE RETORNO (VÁLVULA DESCONECTADA)	AUSENCIA DE PRESIÓN EN LAS ELECTROVÁLVULAS
2.2	PRESIÓN INSUFICIENTE	RETTENES DESGASTADOS, MAL ALINEAMIENTO DE LA BOMBA	FUGA DE ACEITE EN LA BOMBA.
4.1	TORNILLOS DEGOLLADOS EN EL CABEZAL	PUESTA EN MARCHA CON MATERIAL FRÍO	MALA SUJECIÓN DE LAS PARTES DEL CABEZAL.
4.2	DISTRIBUIDOR ROTO	PUESTA EN MARCHA CON MATERIAL FRÍO	MALA DISTRIBUCIÓN DE MATERIAL EN LA BOQUILLA
5.1	FALTA DE FLUJO EN COMPONENTES DEL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO	SARRO Y ESCORIA EXCESIVA EN LOS DUCTOS	MAL ENFRIAMIENTO
S/N	ESPIGA DE SOPLADO DESALINEADA Y CON FUGAS DE ACEITE	FALTA DE SOPORTE DE BRONCE	PÉRDIDA DE LA PRESIÓN DEL ACEITE EN EL PISTÓN DE SOPLADO



CAPÍTULO 4: CARACTERIZACIÓN DE MAQUINA Y PROCESO

4.1 Introducción

En el presente capítulo se expondrá la teoría que fundamenta del proceso de extrusión soplado (Análisis Newtoniano), caracterizando en primera instancia la máquina, para abordar posteriormente la metodología utilizada para la caracterización del proceso. Se finalizará el capítulo enmarcando las características buscadas en la práctica de laboratorio.

4.2 Análisis Newtoniano

El mecanismo de fusión se realiza debido a que mientras el polímero se transporta a lo largo del tornillo se funde una delgada película a lo largo del barril, dicha fusión se debe a dos factores; el primero de ellos se debe al calor que se conduce desde los calentadores del barril, el segundo factor es la fricción entre el polímero y el husillo. Éste desprende la película fundida al girar, así el polímero fundido se mueve de la cara frontal del hilo hacia el núcleo y luego barre los gránulos de nuevo para establecer un movimiento rotatorio enfrente del borde de conducción del hilo, este proceso continua hasta que el polímero se encuentra totalmente fundido.

En el transporte del polímero a través de la camisa cilíndrica se debe comprender que pueden existir dos casos, primeramente que si el polímero se adhiere únicamente al tornillo y se desliza sobre el barril; no existiría transporte longitudinal del polímero. Si el polímero resiste la rotación del barril y se desliza sobre el tornillo, entonces el polímero si es transportado axialmente como en un tornillo de Arquímedes.

En la práctica existe fricción tanto en el tornillo como en las paredes del barril y esto conduce al mecanismo de transporte principal, el flujo de arrastre. Al flujo de arrastre se le opone un flujo de presión producido por el gradiente de presión que hay a lo largo del extrusor, ya que se está transportando un flujo de una zona de baja presión a otra de alta presión, hay que comprender que en la realidad no existe flujo resultante debido a la presión, únicamente es una oposición.

El último componente es el flujo de fuga, ya que existe un espacio entre el tornillo y el barril a través del cual se puede fugar el material, este es también un flujo impulsado por presión que desde luego también se opone al flujo de arrastre. Por lo tanto el flujo total es el balance de estos componentes.

$$\text{Flujo Total} = (\text{Flujo de Arrastre}) - (\text{Flujo de Presión}) - (\text{Flujo de Fuga})$$

En las máquinas de alta velocidad prácticamente el calentamiento proviene del esfuerzo de corte al que se somete al material fundido viscoso. Una relación común es que el 70% del calor sea por fricción y un 30% por conducción.

4.2.1 Análisis de flujo en el extrusor.

Flujo de arrastre

Para analizar el flujo de arrastre se debe de considerar de forma análoga un problema de flujo entre placas paralelas. En dicho problema se encuentran dos placas una fija y una móvil, entre ellas se encuentra un fluido que con velocidad "V".

Para un flujo entre placas paralelas mostrado en la Figura 4.1, el gasto volumétrico esta dado por la expresión:

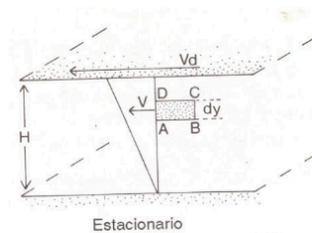


Figura 4.1: Flujo entre placas paralelas.

$$dQ = AV = VTdy$$

donde:

- dQ =Flujo volumétrico [m^3/s]
- A = Área [m^2]
- V =Velocidad [m/s]
- T = Ancho del canal[m]
- dy =Altura del canal [m]

Suponiendo que el gradiente de velocidad es lineal la velocidad estaría dada por:

$$v = \frac{V_d y}{H}$$

Así el gasto volumétrico, sustituyendo la velocidad nos queda:

$$dQ = \frac{TV_d y dy}{H}$$

Si se integra para la profundidad “H”, el flujo de arrastre es igual a:

$$Q = \frac{1}{2} THV_d$$

Ahora trasladando esta situación al flujo que existe en el tornillo de un extrusor de la Figura 4.2. Se puede considerar que el barril es la placa estacionaria y el tornillo es la placa móvil. Así “H” es la profundidad del canal, “T” es la distancia perpendicular entre hilos y “N” son las revoluciones por minuto. El movimiento de material fundido puede expresarse como función del ángulo de hilo “φ”.

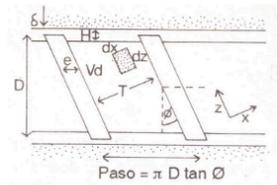


Figura 4.2: Flujo dentro del Extrusor.

$$V_d = \pi DN \cos \varphi$$

$$T = (\pi D \tan \varphi - e) \cos \varphi$$

Combinando las ecuaciones anteriores la solución del problema de placas paralelas encontramos que el gasto volumétrico es igual a:

$$Q_d = \frac{1}{2} (\pi D \tan \varphi - e) \cos \varphi * H * \pi DN \cos \varphi$$

$$Q_d = \frac{1}{2} (\pi D \tan \varphi - e) (\pi DN (\cos \varphi)^2) H$$

Como “e” es pequeño en comparación con el paso del tornillo:

$$Q_d = \frac{1}{2} \pi^2 D^2 N \sin \varphi \cos \varphi H \quad (\text{Ec.2})$$

Esta última expresión brinda una aproximación a la cantidad de fluido de arrastre en el tornillo. Así se puede observar que el arrastre depende fundamentalmente del volumen en el canal y de la velocidad de rotación del tornillo, ya que su diámetro y el ángulo de la hélice son constantes.

Flujo de presión

Para encontrar el flujo de presión se puede considerar nuevamente el problema de flujo entre placas planas y paralelas. En la figura 4.3 se muestra un elemento de fluido viscoso en un gradiente de presión. Las fuerzas que actúan sobre el elemento son por unidad de ancho.

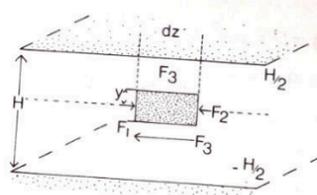


Figura 4.3: Fuerzas que actúan sobre el elemento diferencial.

Así la fuerza “ F_1 ” está compuesta por:

$$F_1 = \left(P + \frac{\partial P}{\partial z} dz \right) 2y$$

Donde la parcial de la presión con respecto de a “ z ” es el incremento debido al gradiente de presión a lo largo del elemento de longitud “ dz ”. La fuerza “ F_2 ” es igual a:

$$F_2 = P2y$$

La fuerza debida a la reacción viscosa del elemento es igual al esfuerzo cortante por “ dz ”, esto se expresa de la siguiente manera:

$$F_3 = \tau dz$$

En un estado de flujo estacionario dichas fuerzas se encuentran en equilibrio, por lo tanto:

$$F_1 = F_2 + 2F_3$$

Sustituyendo y reduciendo la ecuación anterior, el esfuerzo cortante es igual a:

$$\left(P + \frac{\partial P}{\partial z} dz \right) 2y = P2y + 2\tau dz$$

$$P2y + 2y \frac{\partial P}{\partial z} dz = P2y + 2\tau dz$$

$$2y \frac{\partial P}{\partial z} dz = 2\tau dz$$

$$2y \frac{\partial P}{\partial z} = 2\tau$$

$$\tau = y \frac{\partial P}{\partial z}$$

Suponiendo al polímero como si fuera un fluido newtoniano, se tiene que el esfuerzo cortante es igual a:

$$\tau = \mu \frac{dV}{dy}$$

Sustituyendo esta última ecuación en la ecuación anterior y considerando que la presión solo varía en dirección "z", es decir en dirección longitudinal, se tiene que:

$$\mu \frac{dV}{dy} = y \frac{\partial P}{\partial z}$$

$$\frac{dV}{dy} = \frac{1}{\mu} \left(\frac{dP}{dz} \right) y$$

Integrando para encontrar la velocidad se tiene que:

$$\int_0^V dV = \frac{1}{\mu} \left(\frac{dP}{dz} \right) \int_{\frac{H}{2}}^y y dy$$

$$V = \frac{1}{\mu} \left(\frac{dP}{dz} \right) \left(\frac{y^2}{2} - \frac{H^2}{8} \right)$$

Regresando en el diagrama se puede observar que la variación del flujo volumétrico esta dado por:

$$dQ = VTdy$$

T= ancho de canal

V= velocidad

Al sustituir la velocidad en la ecuación de gasto volumétrico anterior se tienen que:

$$dQ = \frac{1}{\mu} \left(\frac{dP}{dz} \right) \left(\frac{y^2}{2} - \frac{H^2}{8} \right) T dy$$

Para 2y

$$Q_P = 2 \int_0^{\frac{H}{2}} \frac{1}{\mu} \left(\frac{dP}{dz} \right) T \left(\frac{y^2}{2} - \frac{H^2}{8} \right) dy$$
$$Q_P = \left(\frac{1}{12\mu} \right) \left(\frac{dP}{dz} \right) TH^3$$

Aplicando la expresión obtenida para el canal de un tornillo de un extrusor. Se encontró que el ancho del canal es igual a:

$$T = \pi D \tan \varphi \cos \varphi$$

Ahora

$$\text{sen} \varphi = \frac{dl}{dz}$$
$$\therefore \frac{dP}{dz} = \left(\frac{dP}{dl} \right) \text{sen} \varphi$$

Al sustituir el gradiente de presión anterior en la ecuación de gasto volumétrico:

$$Q_P = \frac{\pi D H^3 \text{sen}^2 \varphi}{12\mu} \left(\frac{dP}{dl} \right) \quad (\text{Ec. 3})$$

Esta ecuación muestra al flujo de presión, como una función del gradiente de presión que existe en la longitud del tornillo, así como también del diámetro del tornillo y de la profundidad del canal.

Flujo de fuga

El flujo de fuga es otro componente debido a la presión. Éste se forma en el espacio formado entre el tornillo y el barril, en comparación con el flujo de arrastre, el flujo de fugas es despreciable, aunque toma un valor más significativo en máquinas viejas en las cuales el desgaste es importante.

Para calcular el flujo de fuga, se puede considerar como el caso particular de flujo de presión, ya que dicho flujo de fuga se realiza debido a la diferencia de presión en el tronillo.

En este caso la profundidad de la ranura es igual a " $\delta=H$ ", y el ancho de canal:

$$T = \frac{\pi D}{\cos \varphi}$$

El flujo de fuga puede calcularse empleando la siguiente expresión:

$$Q_F = \left(\frac{1}{12\mu}\right) \left(\frac{dP}{dz}\right) \frac{\pi D}{\cos\varphi} \delta^3$$

$$Q_F = \left(\frac{1}{12\mu}\right) \left(\frac{dP}{dl}\right) \frac{\pi D \operatorname{sen}\varphi}{\cos\varphi} \delta^3$$

$$Q_F = \left(\frac{1}{12\mu}\right) \left(\frac{dP}{dl}\right) \pi D \tan\varphi \delta^3 \quad (\text{Ec. 4})$$

El gasto volumétrico total en el extrusor es igual a el flujo de arrastre menos el flujo de presión y menos el flujo de fuga. La ecuación general del flujo total es igual a:

$$Q_T = \frac{1}{2} \pi^2 D^2 N \operatorname{sen}\varphi \cos\varphi H - \frac{\pi D H^3 \operatorname{sen}^2\varphi}{12\mu} \left(\frac{dP}{dl}\right) - \left(\frac{1}{12\mu}\right) \left(\frac{dP}{dl}\right) \pi D \tan\varphi \delta^3$$

$$Q_T = \frac{1}{2} \pi^2 D^2 N \operatorname{sen}\varphi \cos\varphi H - \left(\frac{dP}{dl}\right) \left(\frac{1}{12\mu}\right) (\pi D H^3 \operatorname{sen}^2\varphi + \pi D \tan\varphi \delta^3) \quad (\text{Ec. 5})$$

Hasta el momento los análisis de flujo se han realizado considerando el fluido como un fluido newtoniano lo cual en el caso del flujo de arrastre nos conduce a obtener un valor constante de $\frac{1}{2}$. La realidad nos indica que los polímeros no son fluidos newtonianos, por lo cual el valor del coeficiente no puede ser el mismo, para cada tipo de polímero ya que a una temperatura dada existe un diferente coeficiente de fricción, por esta razón la ecuación de flujo nos queda.

$$Q_T = F \pi^2 D^2 N \operatorname{sen}\varphi \cos\varphi H - \left(\frac{dP}{dl}\right) \left(\frac{1}{12\mu}\right) (\pi D H^3 \operatorname{sen}^2\varphi + \pi D \tan\varphi \delta^3) \quad (\text{Ec.6})$$

Donde "F" toma distintos valores dependiendo del tipo de material a procesar y a las condiciones de temperatura. La Tabla 4.1 muestra los distintos coeficientes para los distintos materiales.

Polímero	Coefficiente de Fricción
PTFE	0.04-0.15
LDPE	0.30-0.80
HDPE	0.08-0.20
PP	0.67
PS	0.33-0.50
PMMA	0.25-0.50
Nylon	0.15-0.40
PVC	0.20-0.90
SBR	0.50-3
NR	0.50-3

Tabla 4.1: Coeficiente de Fricción de diversos Polímeros; Hall C. "Polymer Materials", ed. Macmillan, London, 1981.

4.3 Caracterización de máquina de extrusión-soplado Vulcano.

4.3.1 Fuerza de cierre de molde

Para calcular la fuerza de cierre requerida para que el molde durante el soplado no se abra, debe considerarse el área proyectada del artículo y la presión de soplado a la que estará sometida la cavidad multiplicada por el número de cavidades que tenga el molde. De manera matemática, fuerza requerida será:

$$F = \alpha A_p P_s \quad (\text{Ec. 1})$$

Donde:

F; Fuerza de cierre, [lb] [kg]
A_p; Área proyectada, [in²] [cm²]
P_s; Presión de soplado, [lb/ in²] [kg/ cm²]
α; Factor de seguridad, 1.25

Para el caso de la máquina en estudio tenemos los siguientes datos:

A_p = 200.74 [cm²]
P_s = 6 [kg/cm²]
α; Factor de seguridad, 1.25

Por lo que tenemos:

$$F_{\text{cierre}} = 1.25 * 200.74 * 6$$

$$F_{\text{cierre}} = 1505.55 \text{ [kg]}$$

La presión o fuerza de cierre siempre debe de ser mayor a la que se calculó; con el fin de garantizar un cerrado eficiente y seguro, en este caso y por experiencia en manuales y literatura se utilizó un factor de seguridad de 1.25. Si después de los cálculos existiese una gran cantidad de rebaba generada por el soplado, puede deberse a dos factores principalmente; requiere mayor fuerza de cierre o la presión de soplado es muy alta.

4.3.2 Velocidad de giro del husillo

Para calcular la velocidad de giro del husillo, es necesario conocer la configuración del sistema mecánico (Ver anexo A1). Éste consta de una polea de diámetro variable de intervalo de operación 4 - 10 [in] (100 – 254 [mm]). Con la que obtendremos las revoluciones máximas y mínimas que podremos manipular en la máquina. Con la ayuda de expresiones matemáticas se obtendrá el intervalo de velocidades.

4.3.2.1 Cálculo de intervalo de velocidades

Para obtener la velocidad máxima del husillo se fija en 10 [in] (254 [mm]) la polea variable del motor para así obtener una relación de reducción entre poleas de 1:1. De acuerdo con los datos de placa del motor en la flecha se obtendrá una velocidad angular de 1723 [rpm] la cual se transmite directamente a la entrada del reductor sin cambios debido a la relación de reducción.

$$(1723[rpm]) \frac{254[mm]}{254[mm]} = 1723[rpm]$$

La velocidad angular a la salida del reductor es de 1:20 obteniendo así 86.15 [rpm]

$$(1723[rpm]) \left(\frac{1}{20} \right) = 86.15[rpm]$$

A la salida del reductor, la flecha se encuentra acoplada a un engrane tipo estrella (catarina) con 20 dientes que a su vez está conectado por medio de una cadena a otro engrane tipo estrella de 30 dientes, obteniendo una relación de reducción de 0.667, para finalmente obtener la velocidad angular en el husillo de 57.43 [rpm].

$$(86.15[rpm]) \left(\frac{20}{30} \right) = 57.43[rpm]$$

De manera similar se realiza el cálculo para obtener las rpm mínimas en el husillo lo único que hay que variar es el diámetro de la polea hasta fijarla en 4 [in] (100 [mm]).

En las siguientes Tablas 4.2 y 4.3 se exponen las variables más importantes para poder calcular la velocidad máxima y mínima del husillo.

Velocidad del motor	1,723.00	rpm
Diam. Polea del motor	10	in
Diam. Polea del reductor	10	in
Relación de poleas	1.00	
Vel. entrada reductor	1,723.00	rpm
Relación del reductor	20.00	
Vel. salida reductor	86.15	rpm
Catarina reductor	20	dientes
Catarina husillo	30	dientes
relación catarinas	0.667	
Velocidad máxima Husillo	57.43	rpm

Tabla 4.2: Datos para cálculo de velocidad máxima del husillo.

Velocidad del motor	1,723.00	rpm
Diam. Polea del motor	4	in
Diam. Polea del reductor	10	in
Relación de poleas	0.40	
Vel. entrada reductor	689.20	rpm
Relación del reductor	20.00	
Vel. salida reductor	34.46	rpm
Catarina reductor	20	dientes
Catarina husillo	30	dientes
relación catarinas	0.667	
Velocidad mínima Husillo	22.97	rpm

Tabla 4.3: Datos para cálculo de velocidad máxima del husillo.

4.3.3 Determinación de las curvas características del extrusor

El producto de extrusión se logra cuando se obliga a un material fundido a pasar a través del dado, el cual le confiere una geometría determinada. Por ello resulta importante comprender la interrelación que existe entre el extrusor y su dado.

Como se mencionó en el análisis de flujo anterior (Ec. 5), el gasto que entrega el extrusor se compone básicamente de tres partes:

$$Q_T = \frac{1}{2} \pi^2 D^2 N \sin \varphi \cos \varphi H - \frac{\pi D H^3 \sin^2 \varphi}{12 \mu} \left(\frac{dP}{dl} \right) - \left(\frac{1}{12 \mu} \right) \left(\frac{dP}{dl} \right) \pi D \tan \varphi \delta^3$$

Al observar los términos que componen esta ecuación y su interpretación física, se pueden realizar diferentes consideraciones, las que facilitan la búsqueda de la curva característica del extrusor. En primera instancia se puede observar que el tercer término del lado derecho de la igualdad, está en función, principalmente, del ajuste que existe entre el cañón y el husillo. Por lo cual para un extrusor nuevo o con pocas horas de uso puede ser despreciado, la ecuación resultante es de gran importancia ya que muestra claramente que el gasto dependerá del flujo de arrastre y del flujo debido a la presión.

$$Q_T = \frac{1}{2} \pi^2 D^2 N \sin \varphi \cos \varphi H - \frac{\pi D H^3 \sin^2 \varphi}{12 \mu} \left(\frac{dP}{dl} \right) \quad (\text{Ec. 7})$$

Si se considera que la presión no se acumula, es decir, si no existiera placa rompedora o dado (extrusor sin cabezal) se puede determinar que el flujo es máximo y totalmente

causado por arrastre. La siguiente expresión sirve para calcular el caudal máximo dentro del extrusor.

$$Q_T = Q_{max} = \frac{1}{2} \pi^2 D^2 N \sin \varphi \cos \varphi H \quad (\text{Ec. 8})$$

En la Tabla 4.4 se muestran los valores utilizados para la obtención del gasto, usando HDPE (PADMEX 56035), ver hoja de datos en el anexo H.

Datos	Unidades	Valores
Velocidad de giro del husillo ; N	[rpm]	[22-57]
Altura de canal ; H	[m]	0.0029
Ángulo del husillo ;	[°]	17
Largo del husillo ; L	[m]	0.93
Viscosidad ; μ	[Pa*s]	150
Diámetro ; D	[m]	0.0445

Tabla 4.4: Datos necesarios para la obtención del gasto.

Si las revoluciones mínimas para la máquina son de 22 [rpm], su gasto será de $Q = 2.628$ [g/s], por el contrario cuando la máquina opera a las máximas revoluciones se tiene que $N = 57$ [rpm] y por consiguiente $Q = 6.808$ [g/s].

Lo anterior representa los puntos en los cuales las curvas características cruzaran el eje de las ordenadas; es decir, cuando no existe presión debido al cabezal. Se puede entender que la presión máxima aparecerá cuando el flujo de arrastre sea igual al flujo debido a la contrapresión $Q = 0$ y por lo tanto se considera que $P = P_{max}$ y que:

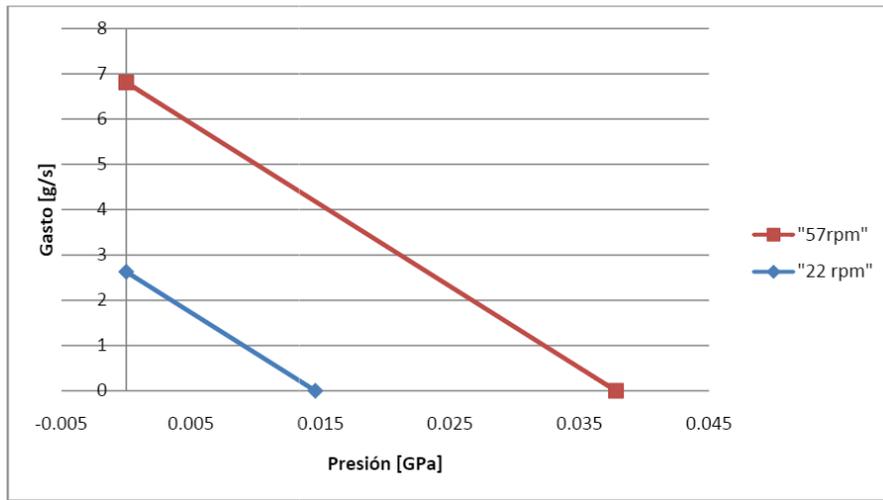
$$\frac{1}{2} \pi^2 D^2 N \sin \varphi \cos \varphi H = \frac{\pi D H^3 \sin^2 \varphi}{12 \mu} \left(\frac{dP}{dl} \right)$$

Por lo tanto

$$P_{max} = \frac{6 \pi D l N \mu}{H^2 \tan \varphi} \quad (\text{Ec.9})$$

Calculando nuevamente para las mismas revoluciones por minuto se tiene que a la $N = 22$ [rpm] presión máxima es de $P_{max} = 16.69$ [MPa] así mismo para $N = 57$ [rpm], la $P_{max} = 43.23$ [MPa].

Estos segundos puntos cruzan en el eje de las abscisas y representan los puntos finales de las rectas características, tal y como se observa en la siguiente gráfica.



Gráfica 4.1: Curva característica del Extrusor

En la gráfica anterior encontramos el intervalo de revoluciones por minuto a las cuales la máquina trabaja. También en ella están representados los valores máximos de presión a los cuales el dado está sometido.

Valores Característicos del Extrusor			
22 [rpm]		57 [rpm]	
Presión P [Mpa]	Gasto Q [g/s]	Presión P [Mpa]	Gasto Q [g/s]
0	2.78	0	7.20
16.69	0	43.23	0

Tabla 4.5: Valores teóricos del gasto del extrusor.

Considerando que se requiere una presión para forzar a pasar el material fundido por el dado, se puede encontrar una función que relacione la presión con el gasto a través del dado, la cual se denomina curva característica del dado y que es opuesta en forma a la curva característica del extrusor, ver Figura 4.3.

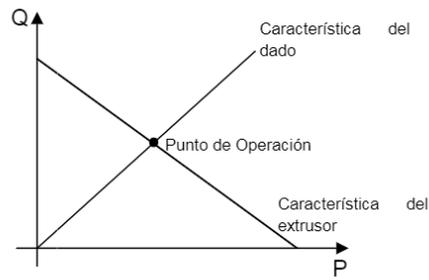


Figura 4.3: Representación de curvas características del extrusor.

En general para cualquier dado, se puede aplicar la siguiente ecuación:

$$Q=K(\Delta P/\eta) \quad (\text{Ec. 10})$$

Donde

K=constante del dado [m³]

ΔP=presión [Pa]

η = Viscosidad [Pa s]

Para dados de perfil anular K es igual:

$$\frac{\pi R_0^4}{8L} \left[1 - R^4 - \frac{(1 - R^2)^2}{\ln(1/R)} \right]$$

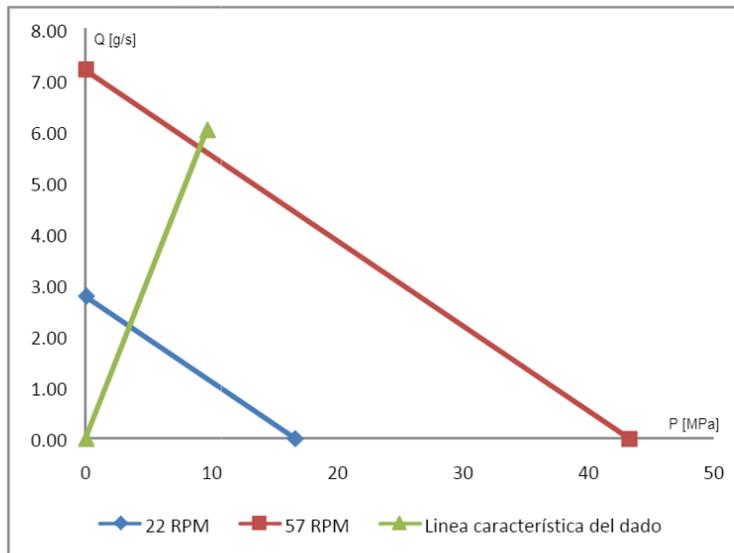
En donde:

R₀: radio exterior

R_i: radio interior

R=R_i/R₀

Debido a que la máquina no cuenta con un manómetro para censar la presión dentro del cabezal, el cálculo de la curva característica del dado se lleva a cabo de manera experimental.



Gráfica 4.2: Curvas características del extrusor.

4.3.4 Cálculo de hinchamiento del parison.

El hinchamiento del parison se debe principalmente al diseño de la boquilla, a las propiedades del material fundido y en general a las condiciones del proceso. Físicamente, este efecto sucede por la relajación que sufre el material al salir del dado, que anteriormente fue forzado a plastificarse, adquiriendo una ligera expansión en el diámetro del parison, ver Figura 4.4.

El hinchamiento se determina por la relación entre la geometría de la boquilla y la geometría del parison inmediatamente a la salida de la boquilla.

$$\% \text{ Hinchamiento del parison} = \left(\frac{C - A}{A} \right) (100\%) \quad (\text{Ec. 11})$$

$$\% \text{ Hinchamiento en el boquilla} = \left(\frac{D - F}{F} \right) (100\%) \quad (\text{Ec. 12})$$

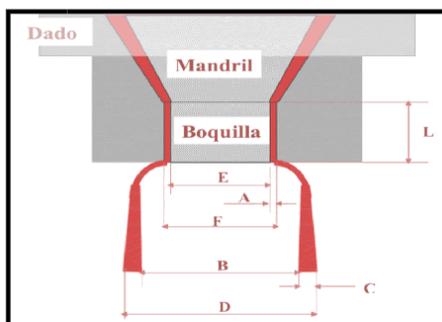


Figura 4.4: Representación del hinchamiento del Parison.

Se hicieron las mediciones de hinchamiento para dos materiales de la marca, PADMEX 56035 y PX20020X correspondientes al HDPE y LDPE respectivamente. A continuación se muestran los valores recabados, ver Tabla 4.6.

HDPE	
Referencia	Medición [mm]
A	1.07
B	28.64
C	1.83
D	32.3
E	25.38
F	27.52

LDPE	
Referencia	Medición [mm]
A	1.07
B	35.4
C	3.1
D	41.6
E	25.38
F	27.52

Tabla 4.6: Valores necesarios para el cálculo de Hinchamiento.

Aplicando las ecuaciones 11 y 12 respectivamente se obtuvieron los porcentajes de hinchamiento que adquiere el material al formar el parison; dichos valores se expresan en la siguiente tabla:

Hinchamiento	HDPE	LDPE
Parison [%]	71	190
Boquilla [%]	17	51

Tabla 4.6A: Porcentaje de Hinchamiento.

4.3.5 Cálculo de espesor de pared.

Para poder calcular el espesor de pared de una botella elaborada por el proceso de extrusión soplado es necesario conocer las dimensiones del dado y la magnitud del hinchamiento que hay en él. Se muestra una sección transversal de un parison que emerge del dado, ver Figura 4.5.

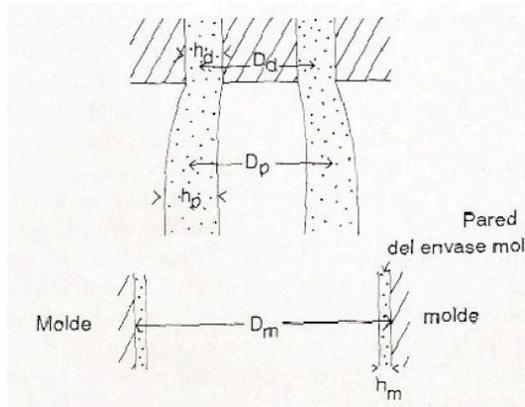


Figura 4.5: Descripción del dado y parison.

Para encontrar la expresión que determine el espesor de pared de la pieza moldeada es necesario establecer las variables.

D_d ; Diámetro del dado (medio).

D_p ; Diámetro del parison.

D_m ; Diámetro del molde.

h_d ; Ancho de anillo del dado.

h_p ; Espesor del parison.

h_m ; Espesor de pared de la pieza moldeada.

Se desea encontrar el espesor de pared de la pieza moldeada (h_m)

Se nombra como " B_T " al hinchamiento del espesor del parison y se calcula como:

$$B_T = \frac{h_p}{h_d}$$

De igual manera se nombra " B_p " al hinchamiento del parison:

$$B_p = \frac{D_p}{D_d} \quad D_p = D_d B_p$$

Y de manera geométrica se propone $B_t = B_p^2$, es decir que el hinchamiento del espesor es igual al cuadrado del hinchamiento del parison.

En consecuencia:

$$\frac{h_p}{h_d} = \left(\frac{D_p}{D_d}\right)^2 \quad h_p = h_d (B_p)^2$$

Si el parison se infla hasta el diámetro del molde D_m ; ya que el volumen es constante, y no hay estiramiento hacia abajo, se puede concluir que:

Volumen del parison= Volumen en la botella

$$\pi D_p h_p = \pi D_m h_m$$

Despejando y sustituyendo

$$h_m = \frac{D_p h_p}{D_m} = \frac{D_p (h_d B_p^2)}{D_m} = \frac{B_p D_d (h_d B_p^2)}{D_m}$$

$$h_m = \frac{D_d h_d B_p^3}{D_m} \quad (\text{Ec. 13})$$

Al conocer las dimensiones del dado; el diámetro del molde, el diámetro del parison, se puede encontrar el espesor de pared de la pieza moldeada.

A continuación se presenta los datos con los que se obtuvo el espesor mínimo de la pieza moldeada, Tabla 4.7 y 4.8:

HDPE		
D_d	Diámetro del dado (medio)	26.45 [mm]
D_p	Ancho de anillo del dado	32.3 [mm]
D_m	Diámetro del molde	92 [mm]
h_d	Ancho de anillo del dado	1.07 [mm]
h_p	Espesor de forma intermedia	1.83 [mm]

LDPE		
D_d	Diámetro del dado (medio)	26.45 [mm]
D_p	Ancho de anillo del dado	38.5
D_m	Diámetro del molde	92 [mm]
h_d	Ancho de anillo del dado	1.07 [mm]
h_p	Espesor de forma intermed	3.1 [mm]

Tabla 4.7 y 4.8: Datos necesarios para el cálculo de espesor de pared para Polietileno de Alta Densidad y de Baja Densidad.

Es importante señalar que los datos de cálculo (Tabla 4.7 y 4.8) se obtienen con base en la experiencia previa, que se adquirió con el ajuste del proceso.

Utilizando la (Ec. 13) se obtiene el espesor de pared de la pieza moldeada que se tomará como referencia para poder determinar si la botella cumple el espesor mínimo en el cierre del molde (zona considerada crítica), para cada caso. En la siguiente tabla se exponen dichos valores respectivamente.

	HDPE	LDPE
h_m [mm]	0.56	0.95

Tabla 4.9: Espesor de Pared mínimo de la pieza moldeada.

4.4 Caracterización del proceso de Extrusión Soplado, mediante el Análisis Newtoniano.

4.4.1 Metodología de experimentación.

Para llevar a cabo la experimentación fue necesario apoyarse en la teoría que involucra el proceso, tener información del material además de los instrumentos de medición.

Los pasos a seguir se llevan a cabo con el fin de caracterizar el proceso; de tal manera que se obtengan a diferentes revoluciones por minuto, botellas de HDPE con el menor peso (con rebaba) y un espesor mínimo de 0.56 [mm] en el punto crítico. De igual manera para el LDPE (espesor mínimo 0.95 [mm]), y para ambos casos el perfil de temperaturas se mantuvo constante. Otro punto importante es la manipulación de los datos obtenidos para poder obtener intervalos de operación del proceso, como se ve a continuación.

1. Se establece el perfil de temperaturas.
2. Se establecen las mínimas revoluciones.
3. Se manipulan los temporizadores (timers) para el control del proceso.
4. Se establece a criterio de la experiencia, un mínimo de 5 botellas, para asegurar la constancia del ciclo. Una vez que se ha logrado estabilizar el proceso se procede a tomar tiempos de ciclo.
5. Cada pieza se pesa, en dos ocasiones; la primera con rebaba y la segunda después de eliminar la rebaba. Al final se miden los espesores en la zona crítica.
6. Para dejar el menor excedente de material, se procede a manipular los timers, siempre y cuando no afecte el producto final.
7. Una vez logrado lo anterior, se procede a cambiar de revoluciones por minuto (rpm) y se repite el proceso para asegurar una repetitividad. De lo contrario, si no es posible llevar a cabo el proceso o los espesores de las botellas son menores de 0.56 [mm] del HDPE, por ejemplo, se procede a disminuir el perfil de temperaturas y se inicia nuevamente la metodología en el paso número tres.

Este procedimiento tiene como limitante principal el ajuste de los timers, debido a que a ciertas revoluciones, la velocidad con la cual se desplaza la prensa o en general el tiempo en el que se lleva a cabo el proceso no es posible disminuirlo en función a la rapidez con la que se forma el parison.

Otro parámetro de referencia que se tomó en cuenta para poder evaluar el producto fabricado, fue la comparación directa de espesores con un producto comercial, para cumplir con algunos estándares industriales, aún desconociendo los parámetros de proceso, del producto comercial.

4.4.2 Experimentación

Para la experimentación se utilizaron dos materiales HDPE “PADMEX 56035” y LDPE “PX 20020X” (ver anexo H), para ambos casos se llevo a cabo la metodología antes mencionada, con auxilio de diversas tablas de datos; para así tomar nota de todos los cambios realizados.

4.4.2.1 Experimento con Polietileno de Alta densidad (HDPE)

A) Experimentación

Para el primer experimento se utilizó el polietileno de alta densidad, el fabricante recomienda un perfil de temperaturas de 160 – 185 [°C] en perfil recto descendente y la temperatura en el cabezal de entre 175 - 195 [°C]; sin embargo, como ya se mencionó partiremos de un perfil probado en esta máquina de extrusión, ya que en la experiencia previa durante el ajuste del proceso se determinó que era adecuado, supeditado al ajuste de la velocidad de giro del husillo. A continuación se muestra el perfil de temperaturas utilizado durante la experimentación, Tabla 4.10.

# EXP.	MATERIAL	HDPE		
		PERFIL DE TEMPERATURA		
	RMP	Z1 ALIMENTACION °C	Z2 MEDIA °C	Z3 CABEZAL °C
1	22	150	170	180
2	22	150	170	180
3	22	150	170	180
4	31	150	170	180
5	31	150	170	180
6	31	150	170	180
7	36	150	170	180
8	36	150	170	180

Tabla 4.10: Perfil de Temperaturas.

Las siguientes dos tablas fueron utilizadas para recabar los datos en los diferentes temporizadores; en la primera (Tabla 4.11), se muestran los valores directamente tomados en la pantalla del mismo, su resolución es de un segundo, aunque, optamos por estimar fracciones menores para poder reportar el experimento con mayor detalle, en la segunda (Tabla 4.12), se exponen los tiempos reales tomados con ayuda de un cronómetro.

# EXP.	RMP	T1 Cierre de Molde [s]	T2 Tiempo de soplado [s]	T3 Tiempo de Enfriamiento [s]	T4 Avance de Prensa [s]	T5 Retroceso de Prensa [s]	TIEMPO CICLO [s]
1	22	5	6	3	6.5	6	26.5
2	22	6	6	1	6.5	6	25.5
3	22	9.5	6	1	6.5	6	29
4	31	6.5	5	1	5	4	21.5
5	31	5.5	4.5	1	4	4	19
6	31	5.5	4	1	4	4	18.5
7	36	5	4	1	3	3	16
8	36	6	4	1	1	0	12

Tabla 4.11: Tiempo en el display del timer, HDPE.

# EXP.	RMP	T1 Cierre de Molde [s]	T2 Tiempo de soplado [s]	T3 Tiempo de Enfriamiento [s]	T4 Avance de Prensa [s]	T5 Retroceso de Prensa [s]	TIEMPO CICLO [s]
1	22	8	9	3	4	4	28
2	22	7.5	9.6	3	3	4	27.1
3	22	9	9	2	2.8	4	26.8
4	31	6	6	2.3	2.4	3.7	20.4
5	31	5.2	5.5	2.7	2.4	2.8	18.6
6	31	4.8	5.5	2.4	2.3	3.3	18.3
7	36	4.5	5	2.7	2.3	2.7	17.2
8	36	4	5	2.7	2.3	2.7	16.7

Tabla 4.12: Tiempo medido con ayuda del cronómetro, HDPE.

En las siguientes tablas (Tablas 4.13, 4.14 y 4.15) se reportan los pesos de cada botella con y sin excedente (rebaba).

22 RPM	E1		E2		E3	
	Con rebaba	Sin rebaba	Con rebaba	Sin rebaba	Con rebaba	Sin rebaba
# de botella	Peso [g]					
1	58	40	48	40	46	38
2	56	40	48	40	48	38
3	52	40	52	42	48	38
4	52	40	52	42	46	38
5	52	40	50	42	46	40
PROMEDIO	54	40	50	41.2	46.8	38.4

Tabla 4.13: Peso promedio en gramos a 22 rpm, HDPE.

31 RPM	E1		E2		E3	
	Con rebaba	Sin rebaba	Con rebaba	Sin rebaba	Con rebaba	Sin rebaba
# de botella	Peso [g]					
1	52	36	50	40	48	40
2	54	40	50	40	48	40
3	54	38	50	40	48	40
4	54	36	50	40	48	40
5	54	36	50	40	48	40
PROMEDIO	53.6	37.2	50	40	48	40

Tabla 4.14: Peso promedio en gramos a 31 rpm, HDPE.

36 RPM	E1		E2	
	Con rebaba	Sin rebaba	Con rebaba	Sin rebaba
# de botella	Peso [g]	Peso [g]	Peso [g]	Peso [g]
1	52	40	48	39
2	52	40	48	40
3	50	40	48	40
4	50	40	48	39
5	52	40	48	39
PROMEDIO	51.2	40	48	39.4

Tabla 4.15: Peso promedio en gramos a 36 rpm, HDPE.

Para cada botella se tomaron cuatro mediciones de espesores en diferentes puntos; tres de ellos en la zona que describimos como crítica (línea de cierre de molde) y el otro en el centro de una de las caras. En la siguiente tabla se exponen el promedio de los datos recabados y en el anexo F se encuentra las mediciones de cada botella.

#B	Espesor de botellas 22 rpm			31 rpm			36 rpm		
		E1	E2	E3	E1	E2	E3	E1	E2
1	ZONA CRITICA	0.594	0.558	0.588	0.664	0.622	0.59	0.585	0.595
	CENTRO	0.78	0.567	0.735	0.685	0.583	0.614	0.665	0.666
2	ZONA CRITICA	0.598	0.582	0.577	0.626	0.655	0.557	0.629	0.631
	CENTRO	0.862	0.695	0.625	0.692	0.741	0.689	0.74	0.697
3	ZONA CRITICA	0.574	0.604	0.611	0.615	0.616	0.543	0.606	0.618
	CENTRO	0.714	0.88	0.761	0.619	0.691	0.72	0.648	0.689
4	ZONA CRITICA	0.624	0.484	0.591	0.598	0.551	0.595	0.598	0.602
	CENTRO	0.736	0.632	0.705	0.636	0.678	0.69	0.65	0.67
5	ZONA CRITICA	0.598	0.665	0.597	0.603	0.661	0.646	0.604	0.606
	CENTRO	0.565	0.835	0.632	0.624	0.732	0.692	0.68	0.68

Tabla 4.16: Espesor promedio en la zona crítica, HDPE.

En la Tabla 4.16 se comparan los valores promedio de los espesores en la zona crítica con una medida del espesor a un costado del centro de la botella.

Como parte de la experimentación fue necesario medir el gasto que se produce en el extrusor, a las mismas velocidades de giro con las que se obtuvo el producto, para así trazar una curva experimental gasto. A continuación se muestran los datos antes mencionados:

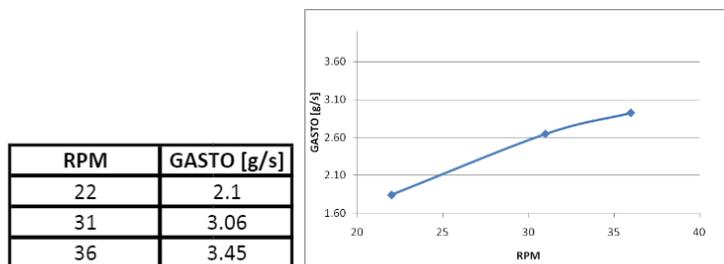


Tabla 4.17: Gasto del extrusor sin cabezal a las rpm del proceso, HDPE.

B) Resultados y Análisis

Al observar las Tablas 4.12, 4.13 y compararlas se observó de que al reducir el tiempo de ciclo disminuimos directamente el excedente; por ejemplo, en el experimento uno E1 a 22 [rpm] se obtuvo un peso con rebaba de 54 [g] y con las variaciones en los temporizadores de Cierre de Molde (T1) y Soplado (T2) se logró obtener para E2 a 22 rpm una botella con un peso de 50 [g] con rebaba.



El menor excedente o rebaba que se obtuvo fue a 31 [rpm] (Tabla 4.14), siendo este de 8 [g]. De igual manera nos percatamos de que el peso promedio de las botellas de polietileno de alta densidad HDPE fuera de 39.5 [g] que comparado con otra botella de la misma capacidad 1 [l], que actualmente está a la venta en la industria, el peso neto de la misma se acercaba a los 40 [g], por lo que indirectamente estamos haciendo una analogía con lo que existe en el mercado.

Al variar los temporizadores, en primera instancia nos dimos cuenta que no son exactos (comparar Tabla 4.11 y 4.12), de igual manera nos dimos cuenta de que el T1 (Cierre de molde) y el T4 (Avance de prensa) están ligados, ya que es posible, ampliar el tiempo de cierre de molde haciendo que el tiempo de avance de prensa sea menor (1 [s] en la pantalla del temporizador), con ello aseguramos que el parison estuviera en la posición para ser prensado por el molde.

Los temporizadores T4 (Avance de prensa) y T5 (Retroseso de prensa) les asignamos un tiempo de 1 [s] (en la carátula), para tener un mayor intervalo de tiempo en los temporizadores T1 (Cierre de molde), T2 (Tiempo de soplado) y T3 (Tiempo de enfriamiento).

De acuerdo a la experimentación (Tabla 4.12) en el E2 a 36 [rpm] ya no fue posible controlar el proceso, se redujeron los tiempos de los temporizadores T4 Y T5 a 1 [s] y el tiempo de cierre de molde se amplió a seis segundos sin poder lograr que el molde aprisionara el parison en la parte inferior y se produjera la botella; por lo tanto, para este experimento el tiempo del ciclo osciló entre 17.2 [s] y 26.8 [s] los tiempos de mayor duración.

Con los datos obtenidos a través de la experimentación y con ayuda de diversas ecuaciones procedimos a calcular el gasto del extrusor Q [g/s], realizando un promedio de los pesos obtenidos con excedente (Tablas 4.13, 4.14, 4.15) y dividiéndolo entre el tiempo de ciclo respectivamente (Tabla 4.12). Con ello se generó la Tabla 4.18 en la cual se muestra de manera resumida los datos más importantes del proceso.

HDPE		Q			
# EXP.	RMP	Masa [g]	TIEMPO [s]	GASTO [g/s]	Gasto PROMEDIO [g/s]
1	22	54	28	1.93	1.84
2	22	50	27.1	1.85	
3	22	46.8	26.8	1.75	
4	31	53.6	20.4	2.63	2.65
5	31	50	18.6	2.69	
6	31	48	18.3	2.62	
7	36	51.2	17.2	2.98	2.93
8	36	48	16.7	2.87	

Tabla 4.18: Cálculo de gasto promedio, HDPE.

Una vez calculados los gastos que se generan en el proceso, se cálculo la presión que genera el material a su paso a través del cabezal, así que se recurrió a la ecuación del gasto de un extrusor (Ec. 5) de la que despejando la presión; obteniendo:

$$P = \frac{L\mu\pi DN\cot\phi}{10H^2} - \frac{12QL\mu}{1000\pi DH^3\text{sen}^2\phi\rho}$$

(Ec. 14)

y al sustituir los valores de la (Tabla 4.4) junto con el gasto promedio respectivamente; se obtuvo los siguientes valores de presión dentro del cabezal:

CALCULO DE PRESION		
Velocidad de Giro; [rpm]	Presión [MPa]	Gasto [g/s]
22	5.63	1.84
31	7.59	2.65
36	9.70	2.93

Tabla 4.19: Cálculo de Presión, HDPE.

Ya que se obtuvieron los valores de presión y gasto de manera experimental (Tabla 4.19) se aplicó la ecuación (Ec. 10) de flujo en el husillo, y se despejó la constante del dato.

$$K = Q\eta/(\Delta P) \quad (\text{Ec. 15})$$

Sustituyendo los valores obtenidos en la tabla anterior (Tabla 4.19); considerando que $\eta=150$ [Pa s] obtenemos:

Velocidad de Giro [rpm]	Constante ; K
22	5.126E-11
31	5.477E-11
36	4.738E-11
PROMEDIO	5.114E-11

Tabla 4.20: Constante experimental del Dado.

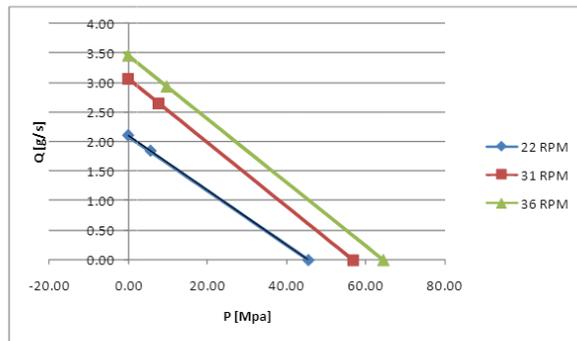
$$K = 5.114 \times 10^{-11} [\text{m}^3]$$

Una vez obtenida la constante del dato, se procedió a graficar los resultados obtenidos

22 RPM		31 RPM		36 RPM	
P [MPa]	Q [g/s]	P [MPa]	Q [g/s]	P [MPa]	Q [g/s]
5.63	1.84	7.59	2.65	9.70	2.93
0	2.1	0	3.06	0	3.45
45.454	0	56.67	0	64.37	0

Tabla 4.21: Resumen de valores de presión y gasto a las rpm del proceso.

Con ayuda de la tabla 4.21 se grafican los valores y con ello se caracterizó el proceso de extrusión soplado. El primer par de puntos representa la presión y el gasto obtenidos durante el proceso; la siguiente pareja de puntos se obtuvieron a las mismas revoluciones pero sin el cabezal ($P=0$) y midiendo el gasto producido, con estos valores se grafica la curva característica del proceso. El último par de puntos es la extrapolación de la recta previamente obtenida para poder conocer la presión máxima.

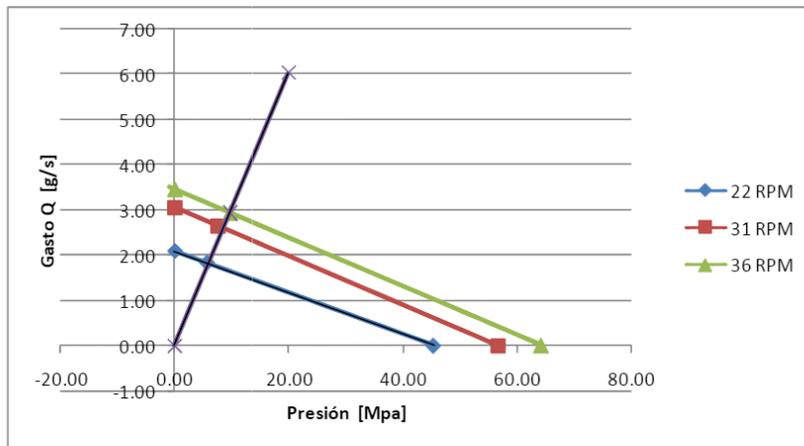


Gráfica 4.3: Curva experimental característica del extrusor a las rpm del proceso, HDPE

Una vez graficado el proceso se trazo la curva característica del dado, el cual se obtuvo al trazar una línea dentro de la gráfica anterior sobre los puntos donde se llevó a cabo el proceso.

LÍNEA CARACTERÍSTICA	
PRESIÓN [MPa]	GASTO [g/s]
0	0
5.63	1.84
7.59	2.65
9.70	2.93

Tabla 4.22: Tabla de datos de la curva característica del dado.



Gráfica 4.4: Curvas experimentales características del Extrusor y Dado, HDPE.

De esta gráfica se obtiene el intervalo de valores a los cuales la máquina de extrusión sopló Vulcano produce botellas; además de la curva característica del dado, que al atravesar las líneas de proceso a diferentes velocidades de giro marcan el punto de operación.

Cabe recordar que la experimentación se llevó a cabo manteniendo el perfil de temperaturas constante. De igual manera no fue posible producir más botellas a mayores revoluciones debido a que la velocidad con la que se forma el parison es mucho mayor a la velocidad con la que se lleva a cabo el ciclo de formación del producto.

4.4.2.2 Experimento dos; Polietileno de baja densidad (LDPE)

Dado que ambos experimentos fueron realizados bajo la misma metodología, no fue necesario calcular la constante característica del dado para este segundo material (Polietileno de Baja Densidad); ya que k es geoméricamente igual, lo único que varía en el proceso son las presiones en el interior del cabezal, esto debido a la diferencia de viscosidad del material ($\mu = 180 [Pa \cdot s]$), lo cual repercute en el gasto. De tal manera que sólo se reportaran los datos obtenidos y su análisis.

A) Experimentación

Se fija la temperatura inicial que recomienda el fabricante 160-190 [°C] en el extrusor y 170-190 [°C] en el cabezal, utilizando el límite inferior como partida y haciendo decrementos en las tres zonas cada 10 grados; en los primeros ciclos, observamos que el material fluía demasiado provocando que el parison se distorsionara por su propio peso; por ello no fue posible controlar el proceso. Posteriormente, se redujeron las temperaturas a 140 [°C] en el cabezal, 130 [°C] en la zona media y 120 [°C] en la zona posterior; de esta manera fue posible obtener el producto con espesores menores a 0.5 [mm]; por lo anterior, se tuvo que asignar nuevamente temperaturas quedando de la siguiente manera: 110 [°C] en cabezal, 100 [°C] en la zona media y 90 [°C] en la zona posterior, con este perfil de temperatura se procedió a realizar el experimento.

A 22 [rpm] no fue posible controlar el proceso, el tiempo de formación del parison fue de 33[s] lo que ocasionaba que por acción de la gravedad éste se deformara. De tal manera que se optó por aumentar la velocidad de giro del husillo y mantener el perfil de temperaturas hasta que se observó que a 32 [rpm] el ciclo se estabilizó. Se realizaron dos pruebas a 32 [rpm] (E1 y E2), debido a que al momento de controlar el proceso se midió un excedente en la botella de 3 [cm], que fue posible reducir a hasta 0.8 [mm] disminuyendo el tiempo del ciclo.

A continuación se muestra la Tabla 4.23 en la que se describe el perfil de temperatura y las velocidades de giro del husillo con las que se realizó el experimento.

MATERIAL		LDPE		
		PERFIL DE TEMPERATURA		
# EXP.	RMP	Z1 ALIMENTACION °C	Z2 MEDIA °C	Z3 CABEZAL °C
1	32	90	100	110
2	32	90	100	110
3	40	90	100	110
4	44	90	100	110
5	52	90	100	110
6	57	90	100	110

Tabla 4.23: Perfil de temperatura, LDPE.

En las siguientes dos tablas se muestran los tiempos de ciclo; en la primera (Tabla 4.24), se expone el tiempo que marca en la pantalla del temporizador y en la segunda (Tabla 4.25) se muestran los tiempos medidos con ayuda del cronómetro.

# EXP.	RMP	T1 Cierre de Molde	T2 Tiempo de soplado	T3 Tiempo de Enfriamiento	T4 Avance de Prensa	T5 Retroseso de Prensa	TIEMPO CICLO [s]
1	32	9	7	6	2	1	25
2	32	8	7	5.5	1	1	22.5
3	40	6	5.5	5.5	2	1	20
4	44	7	4	3	1	1	16
5	52	6.5	4	3	1	1	15.5
6	57	6.8	4	2	1	1	14.8

Tabla 4.24: Tiempo en el display del temporizador en segundos, LDPE.

# EXP.	RMP	T1 Cierre de Molde	T2 Tiempo de soplado	T3 Tiempo de Enfriamiento	T4 Avance de Prensa	T5 Retroseso de Prensa	TIEMPO CICLO [s]
1	32	9.5	8	6.5	2	3	29
2	32	9.4	8	6	1.9	3.4	28.7
3	40	8.3	7.3	6.3	1.6	3	26.5
4	44	5.6	6.5	7.4	1.6	3.1	24.2
5	52	7.3	4.6	4.5	1.3	3	20.7
6	57	7	4.6	4.3	1.4	3	20.3

Tabla 4.25: Tiempo medido con ayuda del cronómetro en segundos, LDPE.

En las siguientes cuatro tablas se describe los pesos medidos con y sin excedente.

32 RPM	E1		E2	
	Con rebaba	Sin rebaba	Con rebaba	Sin rebaba
# de botella	Peso [g]	Peso [g]	Peso [g]	Peso [g]
1	72	58	72	58
2	72	58	72	58
3	72	56	72	56
4	70	58	70	56
5	70	58	72	58
PROMEDIO	71.2	57.6	71.6	57.2

Tabla 4.26: Peso promedio en gramos a 32 rpm, LDPE.

40 RPM	E1	
	Con rebaba	Sin rebaba
# de botella	Peso [g]	Peso [g]
1	74	56
2	74	58
3	74	58
4	74	58
5	74	56
PROMEDIO	74	57.2

Tabla 4.27: Peso promedio en gramos a 40 rpm, LDPE.

44 RPM	E1	
	Con rebaba	Sin rebaba
# de botella	Peso [g]	Peso [g]
1	70	56
2	72	58
3	70	56
4	72	58
5	70	58
PROMEDIO	70.8	57.2

Tabla 4.28: Peso promedio en gramos a 44rpm, LDPE.

52 RPM	E1	
	Con rebaba	Sin rebaba
# de botella	Peso [g]	Peso [g]
1	72	58
2	72	58
3	72	58
4	72	58
5	72	58
PROMEDIO	72	58

Tabla 4.29: Peso promedio en gramos a 52 rpm, LDPE.

En la siguiente tabla se exponen los valores promedio de espesor y en el anexo G se encuentra las mediciones de espesor de cada botella.

#B		32 RPM		40 RPM	44 RPM	52 RPM	57 RPM
		E1	E2	E1	E1	E1	E1
1	PUNTO CRITICO	0.773	0.782	0.768	0.788	0.845	0.844
	CENTRO	1.113	1.125	1.159	0.833	0.869	0.890
2	PUNTO CRITICO	0.770	0.783	0.780	1.008	0.957	0.946
	CENTRO	1.145	1.123	1.284	1.062	0.972	0.960
3	PUNTO CRITICO	0.781	0.790	0.785	0.748	0.931	0.967
	CENTRO	1.053	1.198	1.049	0.882	1.030	1.040
4	PUNTO CRITICO	0.755	0.789	0.800	0.817	0.881	1.136
	CENTRO	0.998	0.996	0.934	0.942	1.050	1.355
5	PUNTO CRITICO	0.786	0.796	0.782	0.728	0.977	1.077
	CENTRO	1.145	0.997	1.144	0.833	1.103	1.135

Tabla 4.30: Espesor promedio en la zona crítica, LDPE.

Como parte de la experimentación fue necesario medir el gasto que se produce en el extrusor a las mismas velocidades de giro con las que se obtuvo el producto, para así trazar una curva experimental del proceso. A continuación se muestran los datos antes mencionados:

Rpm	GASTO [g/s]
32	2.47
40	2.79
44	2.93
52	3.48
57	3.74

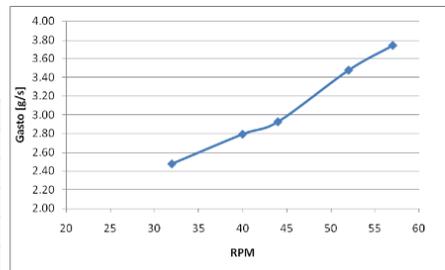


Tabla 4.31: Gasto del extrusor sin cabezal a las rpm del proceso, LDPE.

B) Resultados y Análisis

Al analizar las tablas 4.24 y 4.25 se observa que a medida que se aumentan la velocidad de giro del husillo disminuye el tiempo de ciclo; a demás de que el tiempo de soplado y el tiempo de enfriamiento consumen entre el 45% y 50% del tiempo de ciclo.

Al comparar las tablas 4.25 y 4.30 se observa que el tiempo de soplado influye directamente en el espesor de la botella; por ejemplo, a 32 [rpm] se le asignó un tiempo de soplado de 7 [s] y con ello se obtuvo un espesor promedio en la zona crítica de 0.785 [mm] el cual está por debajo del espesor estimado, y a 57 [rpm] se le estableció un tiempo de soplado de 4 [s] obteniendo un espesor promedio de 0.994 [mm]

Otro punto importante observado es que independientemente de la velocidad de giro del husillo la botella pesa en promedio con excedente 72.8 [g] y sin rebaba se tiene un peso promedio de 54.44 [g]

Para poder calcular el gasto del extrusor se dividió el peso promedio entre el tiempo de ciclo, para ello se utilizaron las Tablas 4.25, 4.26, 4.27, 4.28 y 4.29.

MATERIAL			LDPE		
# EXP.	RMP	Masa [g]	TIEMPO [s]	GASTO [g/s]	Gasto Promedio [g/s]
1	32	71.2	29	2.46	2.47
2	32	71.6	28.7	2.49	
3	40	74	26.5	2.79	2.79
4	44	70.8	24.2	2.93	2.93
5	52	72	20.7	3.48	3.48
6	57	76	20.3	3.74	3.74

Tabla 4.32: Cálculo de gasto promedio, LDPE.

De la tabla 4.32 podemos obtener el gasto que genera el extrusor por cada revolución, obteniendo un promedio de 4.143 [g/rpm]. Una vez calculado el gasto promedio en el extrusor para diferentes velocidades de giro del husillo, aplicamos la (Ec. 14) para obtener la presión e operación.

$$P = \frac{L\mu\pi DN \cot\phi}{10H^2} - \frac{12QL\mu}{1000\pi DH^3 \sin^2\phi\rho}$$

y al sustituir los valores de la Tabla 4.4 junto con el gasto promedio respectivamente; se obtubieron los siguientes valores de presión dentro del cabezal:

VELOCIDAD DE GIRO; [rpm]	PRESIÓN [MPa]	GASTO [g/s]
32	10.6	2.47
40	15.5	2.79
44	18.1	2.93
52	21.3	3.48
57	23.9	3.74

Tabla 4.33: Cálculo de presión LDPE.

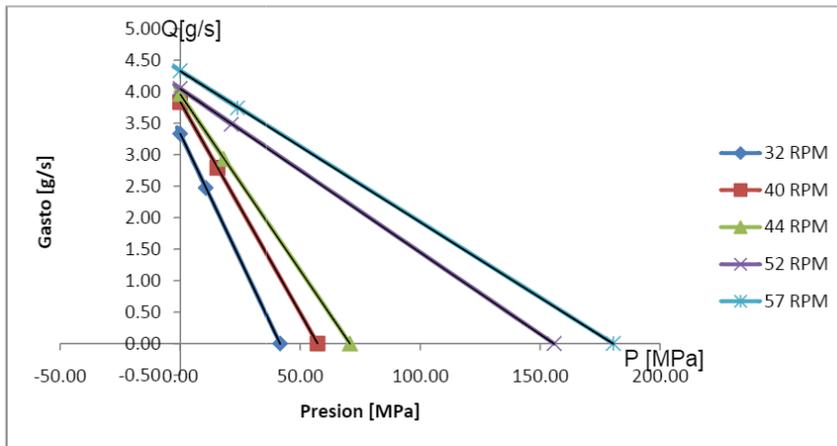
Con ayuda de la Tabla 4.34 se grafica y caracteriza el proceso de extrusión soplado para el LDPE.

32 RPM		40 RPM	
P [MPa]	Q [g/s]	P [MPa]	Q [g/s]
10.63	2.47	15.52	2.79
0	3.33	0	3.83
41.63	0	57.16	0

44 RPM		52 RPM		57 RPM	
P [MPa]	Q [g/s]	P [MPa]	Q [g/s]	P [MPa]	Q [g/s]
18.11	2.93	21.27	3.48	23.88	3.74
0	3.96	0	4.05	0	4.33
70.71	0	155.77	0	180.42	0

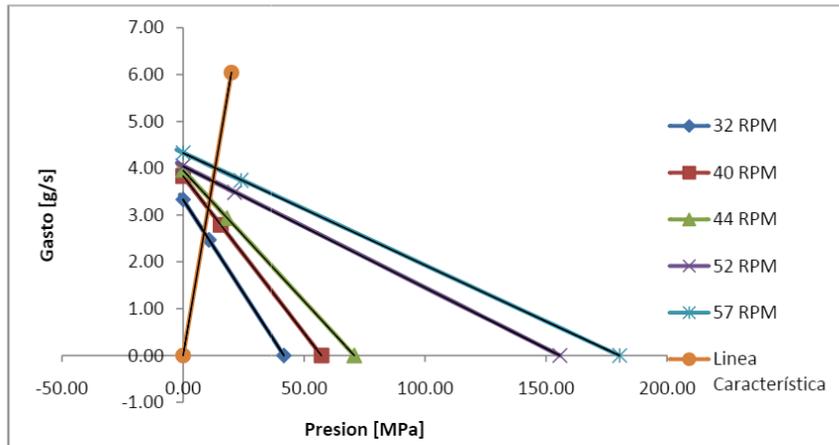
Tabla 4.34: Resumen de valores de presión y gasto a las rpm del proceso, LDPE.

El primer par de puntos representa la presión y el gasto obtenidos durante el proceso; la siguiente pareja de puntos se obtuvieron a las mismas revoluciones pero sin el cabezal (P=0) y midiendo el gasto producido, con estos valores graficamos la curva característica del proceso. El último par de puntos es la extrapolación de la recta previamente obtenida para poder conocer la presión máxima.



Gráfica 4.5: Curva experimental característica del extrusor a las rpm del proceso, LDPE

Una vez graficado el proceso se trazo la curva característica del dado, la cual se obtuvo en el experimento anterior.



Gráfica 4.6: Curvas experimentales características del Extrusor y Dado, LDPE.

De esta gráfica se obtiene el intervalo de valores a los cuales la máquina de extrusión soplo produce botellas para el Polietileno de Baja Densidad (LDPE); además, se destaca la curva característica del dado, que al cruzar las líneas de proceso, marcan el punto de



operación. Como se observa en la gráfica, los valores obtenidos de presión y gasto durante el proceso coinciden con la curva característica del dado.

Para este caso si fue posible producir botellas a la más alta velocidad de giro del husillo debido a que el tiempo con el que se formó el parison permitió tener un mejor control de los temporizadores para poder realizar el ciclo.

4.5 Práctica de laboratorio.

Para que los alumnos de las asignaturas de Materiales No Metálicos, Ingeniería de Materiales, Tecnología de Materiales, Procesos de Manufactura I y II, Procesos de Conformado de Materiales e Ingeniería de Manufactura de los planes de estudio actuales, puedan tener mejor conocimiento en el manejo de los materiales plásticos, se pensó en implementar la práctica que a continuación se describe como parte de un conjunto, de prácticas que se están diseñando en el área de plásticos.

Por ello, se pensó en la práctica de laboratorio como el resultado de la experimentación y que en ella el alumno buscará, aplicará y reforzará los conocimientos adquiridos en clase. Por lo que a continuación se plantea la estructura de la misma:

Objetivos:

- Conocer los elementos que componen una máquina de extrusión soplado.
- Identificar las diferentes etapas y variables que intervienen en el proceso extrusión soplado.
- Obtener las curvas características del proceso y de la máquina de extrusión soplado Vulcano.
- Evaluar de manera cualitativa y cuantitativa el producto obtenido.

Para poder cumplir con los objetivos antes mencionados se llevarán a cabo cuatro actividades:

En primera instancia, se proveerá al alumno del cuestionario previo correspondiente que será resuelto y entregado al profesor el día de la práctica para que en conjunto se comenten, discutan y se resuelvan las dudas que hayan surgido. Con esto el profesor verificará que los alumnos posean los conocimientos teóricos necesarios para la realización de la práctica.

Posteriormente, el profesor describirá los elementos que componen a la máquina de extrusión soplado Vulcano (Actividad 1) y así mismo dará las recomendaciones necesarias para el uso del equipo.



Parte del desarrollo de la práctica es la caracterización de la máquina (Actividad 2). Se obtendrá el intervalo de velocidades de giro del husillo y utilizando la ecuación del gasto de un extrusor se graficarán los resultados para así obtener las curvas características de la máquina.

La Actividad 3 consiste en caracterizar el proceso de extrusión soplado auxiliándose de la metodología que se planteo anteriormente.

Finalmente, la Actividad 4 consiste en evaluar de manera cualitativa y cuantitativa el producto obtenido, se utilizará el micrómetro para medir espesores en la zona crítica y al centro de la botella y con ello se describirá el comportamiento del parison basado en los espesores.

El formato de práctica que se diseño para cumplir con lo anterior queda confinado en los documentos anexos a la Tesis.



CAPÍTULO 5: CONCLUSIONES Y APORTACIONES FUTURAS

Conclusiones

En el presente trabajo, se desarrollaron diversos contenidos y actividades, con finalidad de cumplir los objetivos planteados:

- Puesta en marcha de máquina de extrusión soplado Vulcano, para la producción de botellas de plástico.
- Caracterización de máquina de extrusión soplado Vulcano, así como el proceso de presente en ésta.
- Implementación de una práctica de laboratorio para los alumnos de Ingeniería Mecánica e Industrial.

Mismos que fueron cubiertos de manera satisfactoria. En primera instancia se concluyo, que para poder llevar a cabo la caracterización fue necesario que la máquina se encontrara en condiciones de operación, que permitiera llevar a cabo ciclos continuos de producción.

Actualmente la máquina Vulcano se encuentra en condiciones de operación para la realización de prácticas de laboratorio en el Área de Procesamiento de Plásticos. Así mismo, debido a la puesta en marcha, se cuenta con planos y diagramas que describen los componentes de la máquina, su funcionamiento y la correcta operación de ésta (manual de operación).

Al realizar la caracterización de la máquina se obtuvo el intervalo de velocidades de giro del husillo (22-57 [rpm]). A demás de la curva característica del extrusor mediante un Análisis Newtoniano, obteniendo a 22 [rpm] una presión máxima de 17 [MPa] y a 57 [rpm], presión máxima de 43 [MPa].

Para caracterizar el proceso se elaboró una metodología de experimentación, mediante la cual se obtuvo la familia de curvas que describen el comportamiento a diferentes velocidades de husillo.

Por medio de la comparación entre los valores obtenidos en la caracterización del proceso, contra los obtenidos en la caracterización de la máquina se observó una diferencia en el gasto a 22 [rpm] del 23%. Lo cual demuestra que el modelo Newtoniano es inexacto, debido a las consideraciones que se hacen en el análisis Newtoniano.

La capacidad de producción medida es de 134 botellas por hora hasta 215, dicha producción queda limitada debido a la velocidad de los sistemas mecánicos.



Mediante la implementación de la práctica de laboratorio en el pasado mes de Abril, se verifico el cumplimiento de los objetivos planteados para la práctica. Ya que se observó que los alumnos mostraron interés por el proceso y el manejo de la máquina. Posterior a la impartición de la práctica se confirmó el interés de los alumnos, ya que se dieron asesorías sobre el tema.

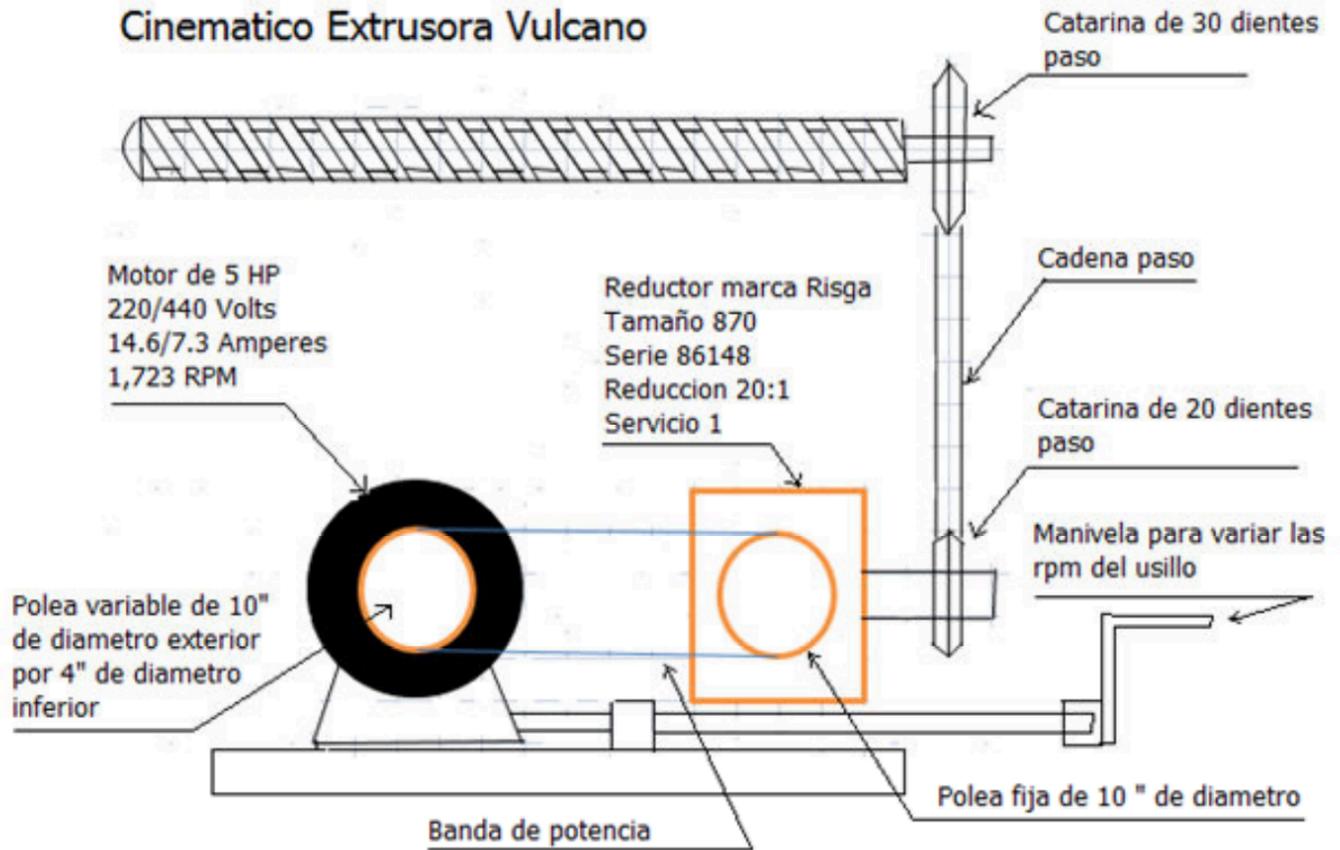
Trabajos Futuros

- Para tener un mejor control del proceso y mayor precisión en el mismo se recomienda remplazar los temporizadores.
- Adecuar las instalaciones del suministro de aire y agua.
- Personalizar la botella con el logotipo del laboratorio de procesamiento de plástico.
- Diseñar un inserto para el molde con el objetivo de que la botella pueda cerrarse por medio de una tapa.
- Diseño de molde de diferente configuración.
- Diseñar molde de tapa de la botella.
- Dotar de Instrumentación a la máquina con la finalidad de conocer más su comportamiento.



ANEXO A

Cinematico Extrusora Vulcano



DIB. RAFAEL DE LA CRUZ SIERRA

REV. M.I. MAGDALENA TRUJILLO BARRAGAN

FECHA:08/01/2009



PROYECTO: PROCESO DE MOLDEO POR EXTRUSION SOPLADO PARA PLÁSTICOS: ANÁLISIS DEL PROCESO EN UNA MÁQUINA VULCANO

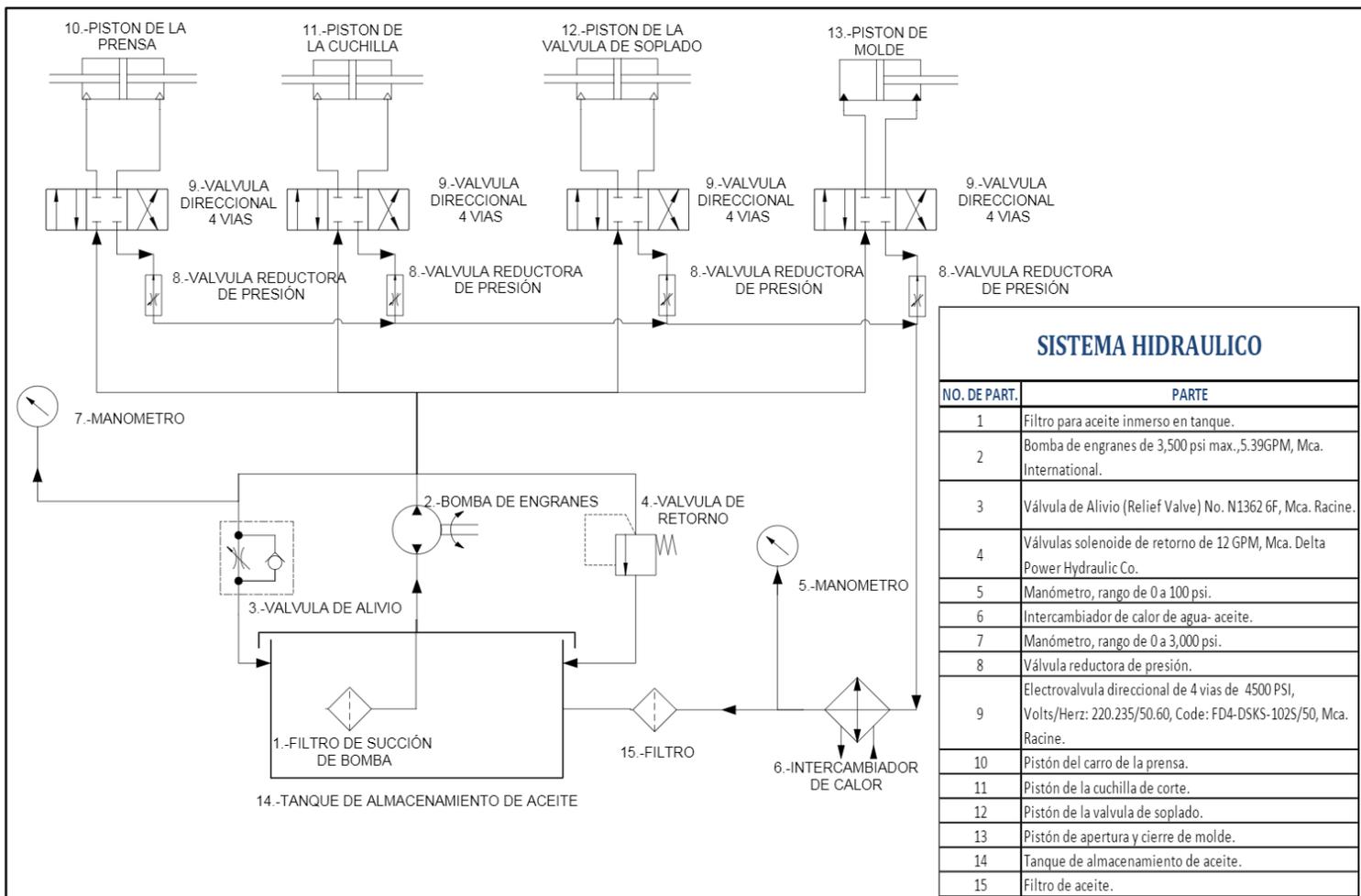
TITULO: SISTEMA MECANICO

LABORATORIO DE INGENIERIA MECANICA

ACOT. EN SIN

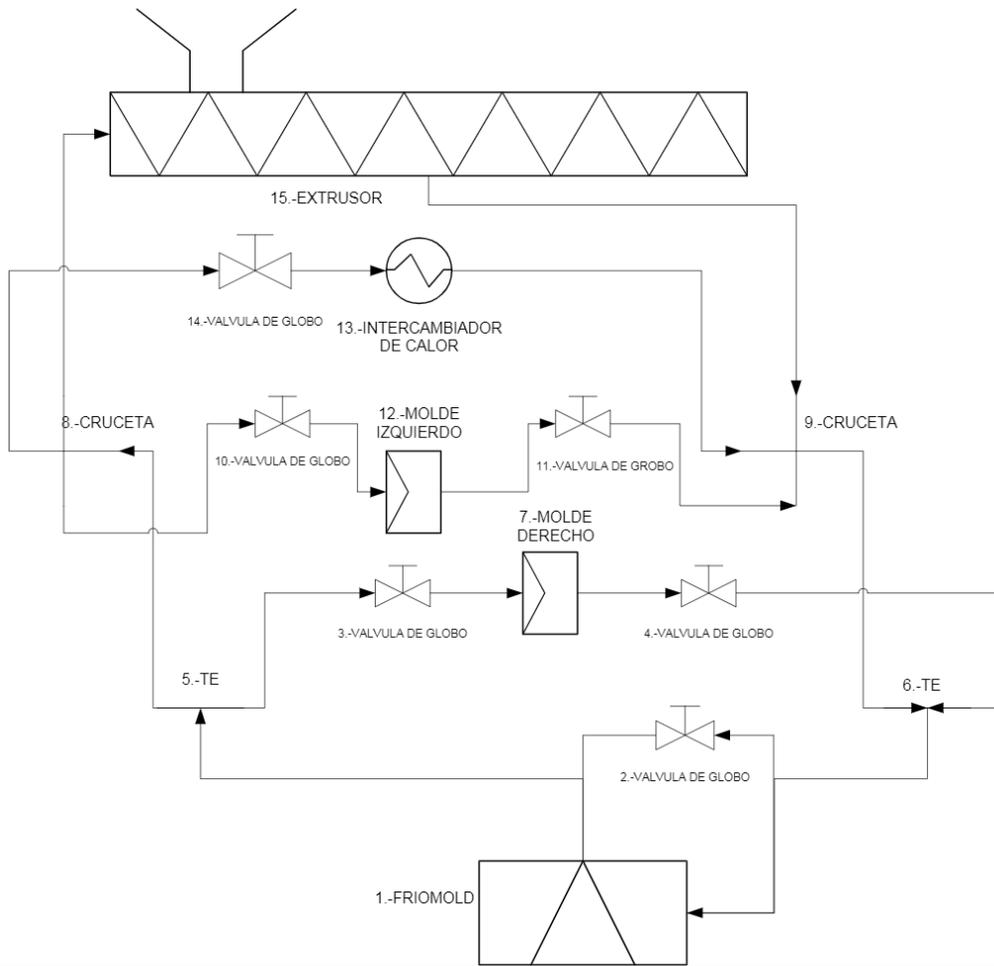
ESC. SIN.

DIB.No. A1



SISTEMA HIDRAULICO	
NO. DE PART.	PARTE
1	Filtro para aceite inmerso en tanque.
2	Bomba de engranes de 3,500 psi max., 5.39GPM, Mca. International.
3	Válvula de Alivio (Relief Valve) No. N1362 6F, Mca. Racine.
4	Válvulas solenoide de retorno de 12 GPM, Mca. Delta Power Hydraulic Co.
5	Manómetro, rango de 0 a 100 psi.
6	Intercambiador de calor de agua- aceite.
7	Manómetro, rango de 0 a 3,000 psi.
8	Válvula reductora de presión.
9	Electrovalvula direccional de 4 vias de 4500 PSI, Volts/Herz: 220.235/50.60, Code: FD4-DSKS-102S/50, Mca. Racine.
10	Pistón del carro de la prensa.
11	Pistón de la cuchilla de corte.
12	Pistón de la valvula de soplado.
13	Pistón de apertura y cierre de molde.
14	Tanque de almacenamiento de aceite.
15	Filtro de aceite.

DIB. RAUL ANDRES SANTOS ARRATIA	<p>INGENIERIA Laboratorio de Procesamiento de Plásticos</p>	PROYECTO: PROCESO DE MOLDEO POR EXTRUSION SOPLADO PARA PLÁSTICOS: ANÁLISIS DEL PROCESO EN UNA MÁQUINA VULCANO		
REV. M.I. MAGDALENA TRUJILLO BARRAGAN		TITULO: SISTEMA HIDRAULICO		
FECHA: 08/01/2009		LABORATORIO DE INGENIERIA MECANICA	ACOT. EN: SIN	ESC. SIN.



SISTEMA DE ENFRIAMIENTO

NO. DE PART.	PORTE
1	Equipo Friomold 220 V, R-22.
2	Válvula de globo de 4.2 cm, extremos roscados.
3	Válvulas de globo de 1.6 cm, extremos roscados.
4	Válvulas de globo de 1.6 cm, extremos roscados.
5	Te reducción 4.2X3.3X1.6 cm, extremos roscados.
6	Té reducción 4.2X3.3X1.6 cm, extremos roscados.
7	Molde Derecho.
8	Cruceta reducción 2X1.6 cm, 2X3.3 cm, extremos roscados.
9	Cruceta reducción 2X1.6 cm, 2X3.3 cm extremos roscados.
10	Válvula de globo de 1.6 cm, extremos roscados.
11	Válvula de globo 1.6 cm, extremos roscados.
12	Molde Izquierdo.
13	Intercambiador de calor agua -aceite , conexión de 3.3 cm.
14	Válvula de globo de 3.3 cm, extremos roscados.
15	Intercambiador de calor de la zona de alimentación del extrusor.

DIB. MARIANO LOZANO PEREZ, ALDO HERNANDEZ LOPEZ

REV. M.I. MAGDALENA TRUJILLO BARRAGAN

FECHA:08/01/2009



PROYECTO : PROCESO DE MOLDEO POR EXTRUSION SOPLADO PARA PLÁSTICOS: ANÁLISIS DEL PROCESO EN UNA MÁQUINA VULCANO

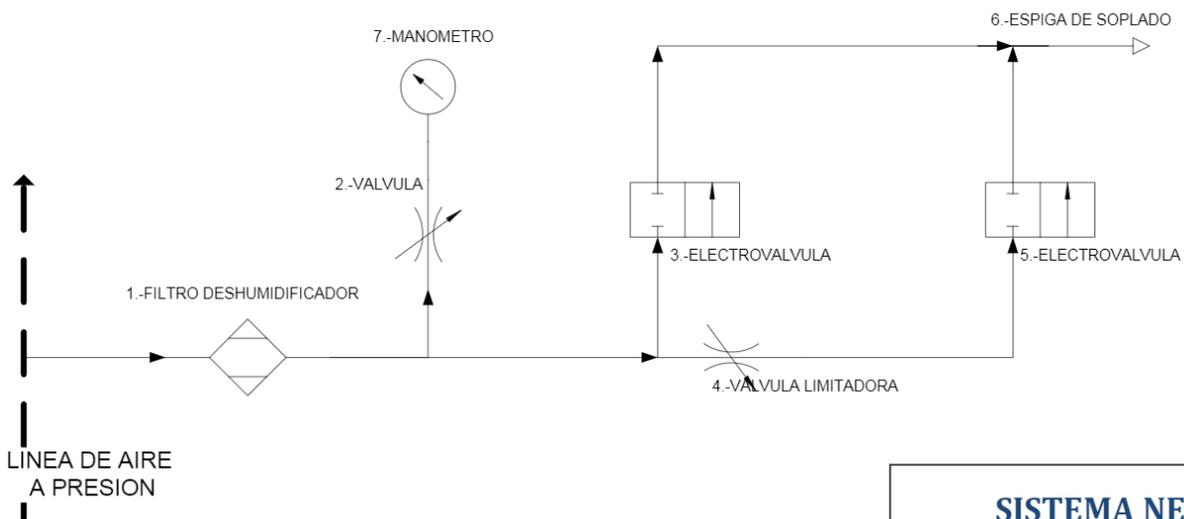
TITULO: SISTEMA DE ENFRIAMIENTO

LABORATORIO DE INGENIERIA MECANICA

ACOT. EN : SIN

ESC. SIN.

DIB No. A3



SISTEMA NEUMATICO

NO. DE PART.	PARTE
1	Filtro deshumidificador de aire.
2	Válvula de globo.
3	Electroválvula de 2 posiciones y una vía, de 0-7 Kg/cm ² , 10.5 W, 220/60 V/Hz.
4	Válvula limitadora
5	Electroválvula de 2 posiciones y una vía, de 0.7-14 Kg/cm ² , 6 W, 220/60 V/Hz.
6	Espiga de soplado.
7	Manómetro de 0 a 11 Kg/cm ²

DIB. RAFAEL DE LA CRUZ SIERRA, RAUL A. SANTOS ARRATIA

REV. M.I. MAGDALENA TRUJILLO BARRAGAN

FECHA: 08/01/2009



PROYECTO : PROCESO DE MOLDEO POR EXTRUSION SOPLADO PARA PLÁSTICOS: ANÁLISIS DEL PROCESO EN UNA MÁQUINA VULCANO

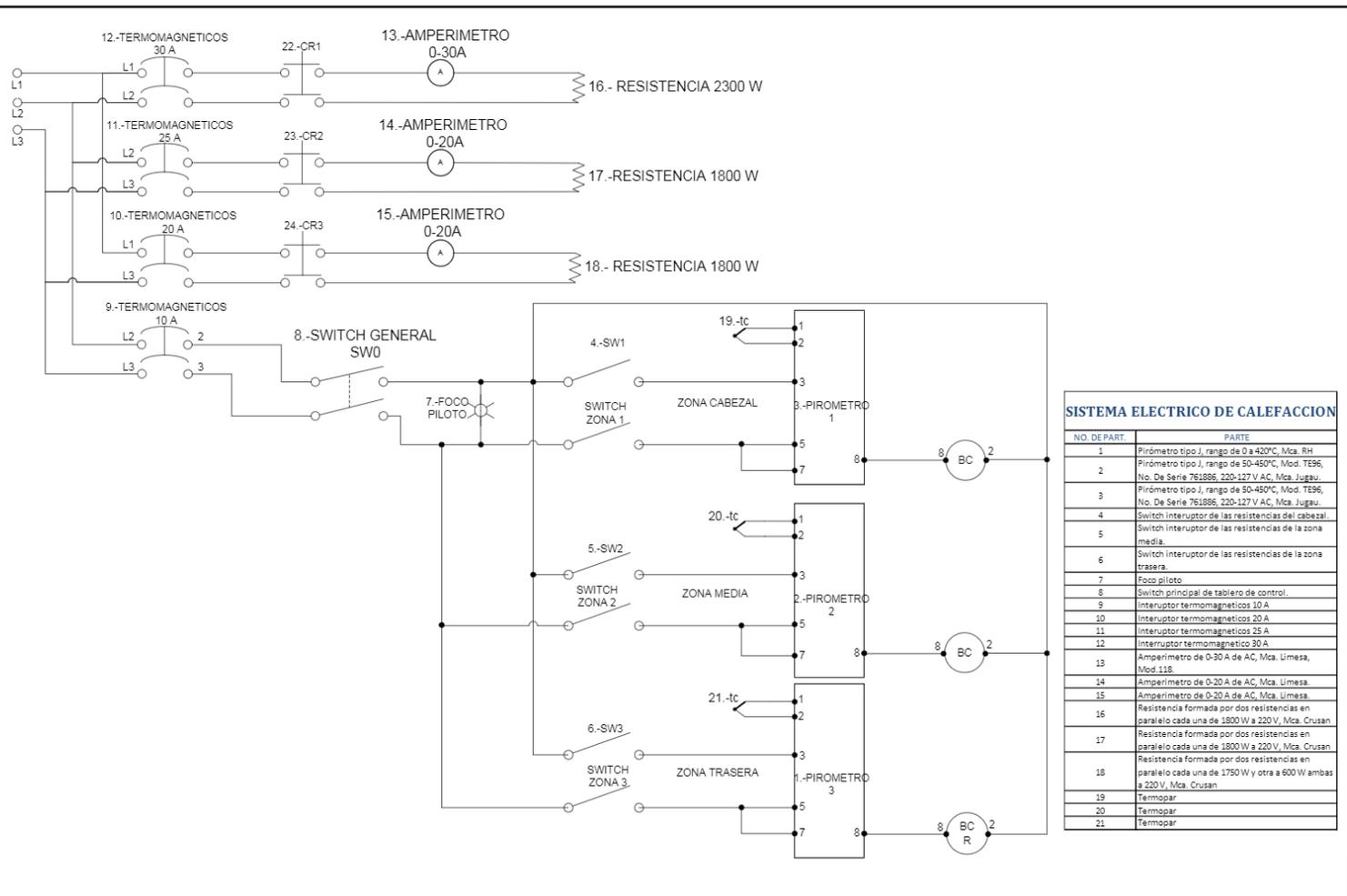
TITULO: SISTEMA NEUMATICO

LABORATORIO DE INGENIERIA MECANICA

ACOT. EN : SIN

ESC. SIN.

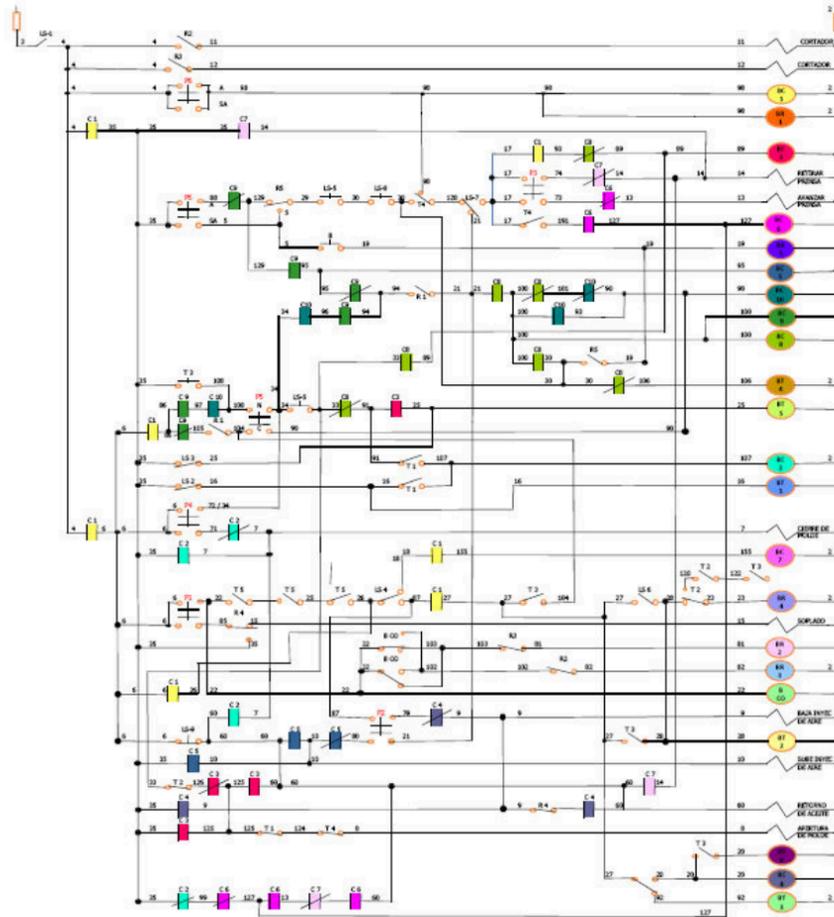
DIB. No. A4



SISTEMA ELECTRICO DE CALEFACCION

NO. DE PART.	PORTE
1	Pirómetro tipo J, rango de 0 a 420°C, Mca. RH
2	Pirómetro tipo J, rango de 50-450°C, Mod. TE96, No. De Serie 761886, 220-127 V AC, Mca. Jugau.
3	Pirómetro tipo J, rango de 50-450°C, Mod. TE96, No. De Serie 761886, 220-127 V AC, Mca. Jugau.
4	Switch interruptor de las resistencias del cabezal.
5	Switch interruptor de las resistencias de la zona media.
6	Switch interruptor de las resistencias de la zona trasera.
7	Foco piloto
8	Switch principal de tablero de control.
9	Interruptor termomagnéticos 10 A
10	Interruptor termomagnéticos 20 A
11	Interruptor termomagnéticos 25 A
12	Interruptor termomagnético 30 A
13	Amperímetro de 0-30 A de AC, Mca. Limesa, Mod. 118.
14	Amperímetro de 0-20 A de AC, Mca. Limesa.
15	Amperímetro de 0-20 A de AC, Mca. Limesa.
16	Resistencia formada por dos resistencias en paralelo cada una de 1800 W a 220 V, Mca. Crusan
17	Resistencia formada por dos resistencias en paralelo cada una de 1800 W a 220 V, Mca. Crusan
18	Resistencia formada por dos resistencias en paralelo cada una de 1750 W y otra a 600 W ambas a 220 V, Mca. Crusan
19	Termopar
20	Termopar
21	Termopar

DIB. RAFAEL DE LA CRUZ SIERRA, RAUL ANDRES SANTOS ARRATIA		PROYECTO : PROCESO DE MOLDEO POR EXTRUSION SOPLADO PARA PLÁSTICOS: ANÁLISIS DEL PROCESO EN UNA MÁQUINA VULCANO		
REV. M.I. MAGDALENA TRUJILLO BARRAGAN		TITULO: SISTEMA ELECTRICO DE CALEFACCION		
FECHA: 09/01/2009	LABORATORIO DE INGENIERIA MECANICA	ACOT. EN: SIN	ESC. SIN.	DIB.No. A5



DIB. ALFREDO CUADROS VILLEGAS

REV. M.I. MAGDALENA TRUJILLO BARRAGAN

FECHA:08/01/2009



PROYECTO : PROCESO DE MOLDEO POR EXTRUSION SOPLADO PARA PLÁSTICOS. ANÁLISIS DEL PROCESO EN UNA MÁQUINA VULCANO

TITULO: DIAGRAMA ELECTRICO DE CONTROL

LABORATORIO DE INGENIERIA MECANICA

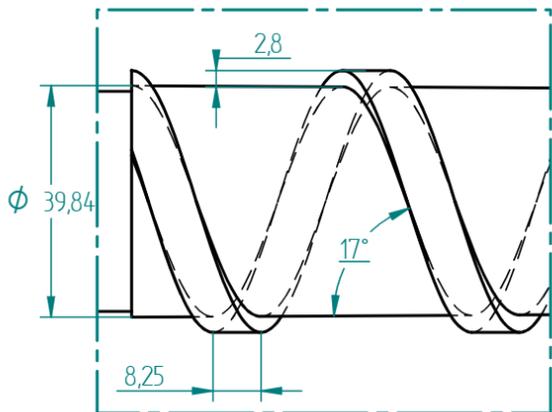
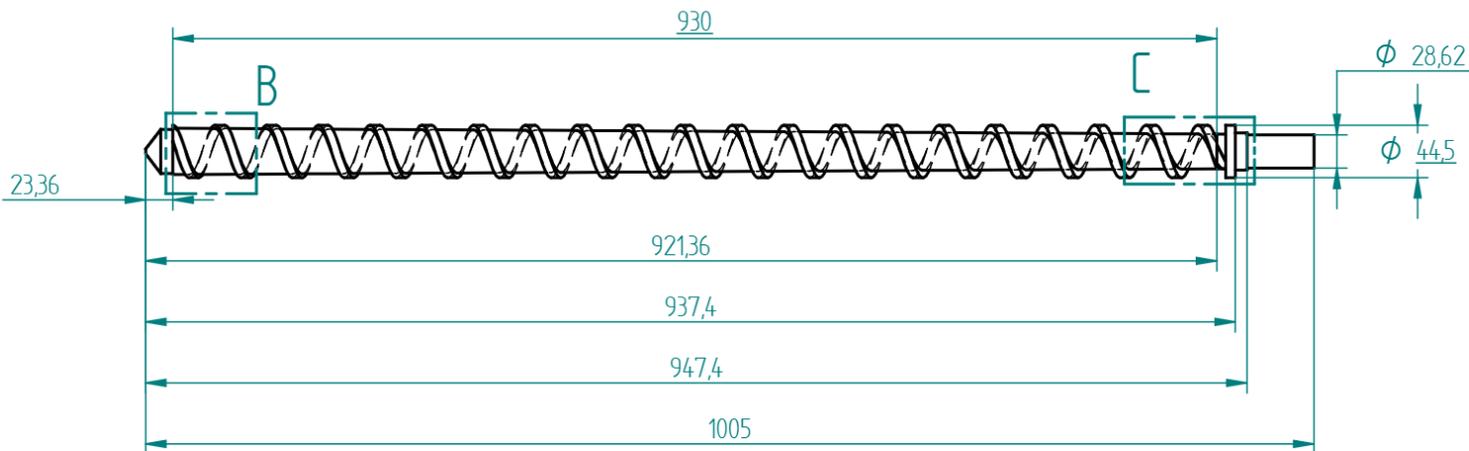
ACOT. EN : SIN

ESC. SIN.

DIB.No. A6

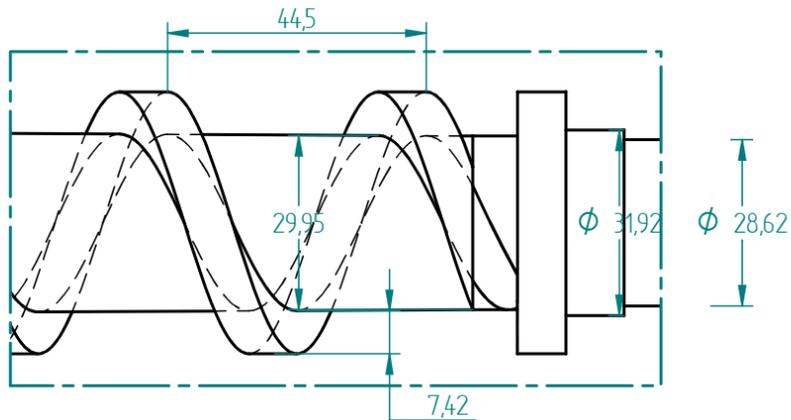


ANEXO B



DETAIL B

1:1



DETAIL C

1:1

DIB. RAFAEL DE LA CRUZ SIERRA

REV. M.I. MAGDALENA TRUJILLO BARRAGAN

FECHA:18/01/2009



PROYECTO : PROCESO DE MOLDEO POR EXTRUSIÓN SOPLADO PARA PLÁSTICOS. ANÁLISIS DEL PROCESO EN UNA MÁQUINA VULCANO

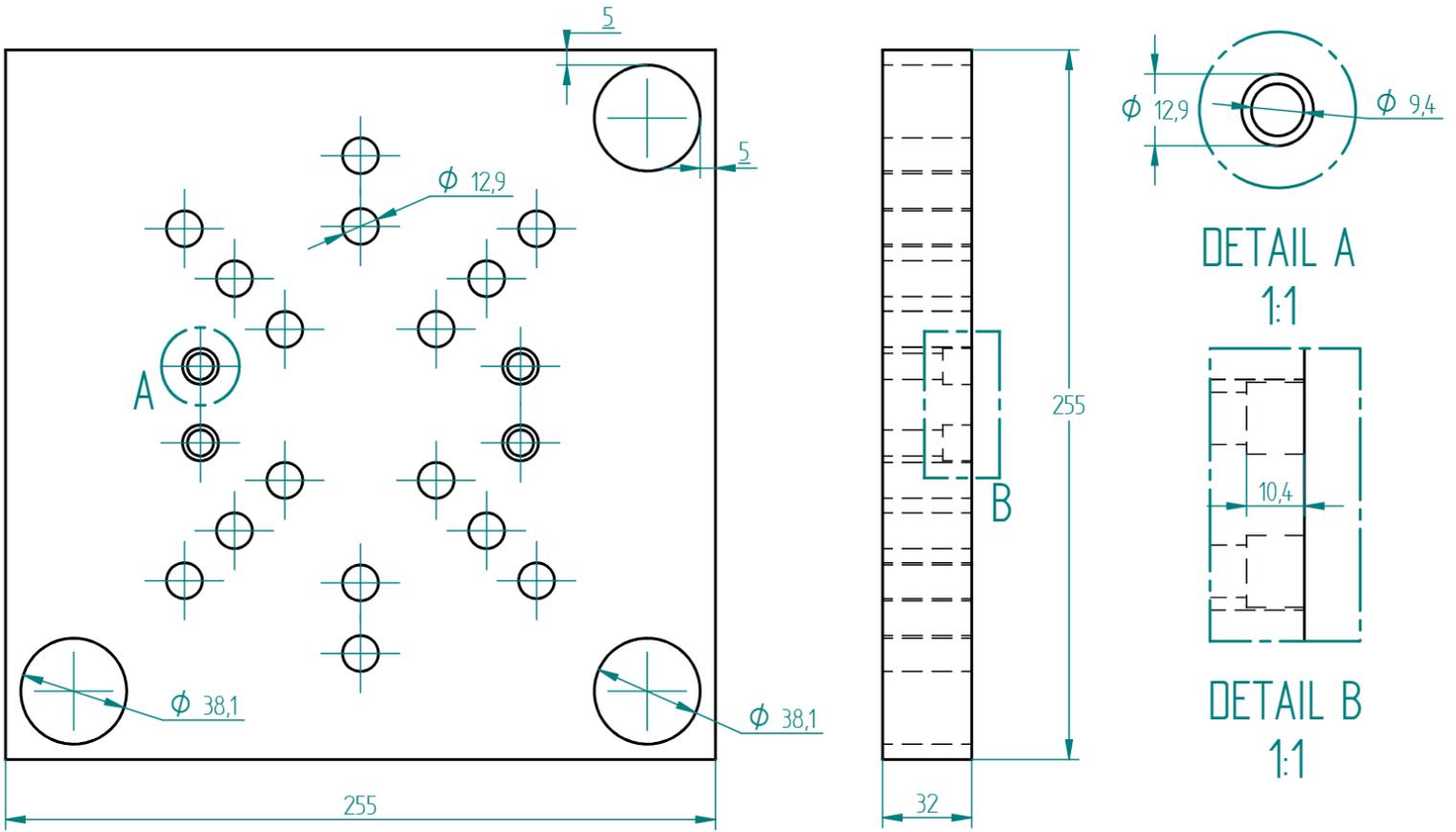
TITULO: HUSILLO

LABORATORIO DE INGENIERIA MECANICA

ACOT. EN :mm

ESC. 1:5

DIB.No. D1



DIB. RAFAEL DE LA CRUZ SIERRA, RAUL ANDRES SANTOS ARRATIA

REV. M.I. MAGDALENA TRUJILLO BARRAGAN

FECHA: 18/01/2009



PROYECTO : PROCESO DE MOLDEO POR EXTRUSIÓN SOPLADO PARA PLÁSTICOS. ANÁLISIS DEL PROCESO EN UNA MÁQUINA VULCANO

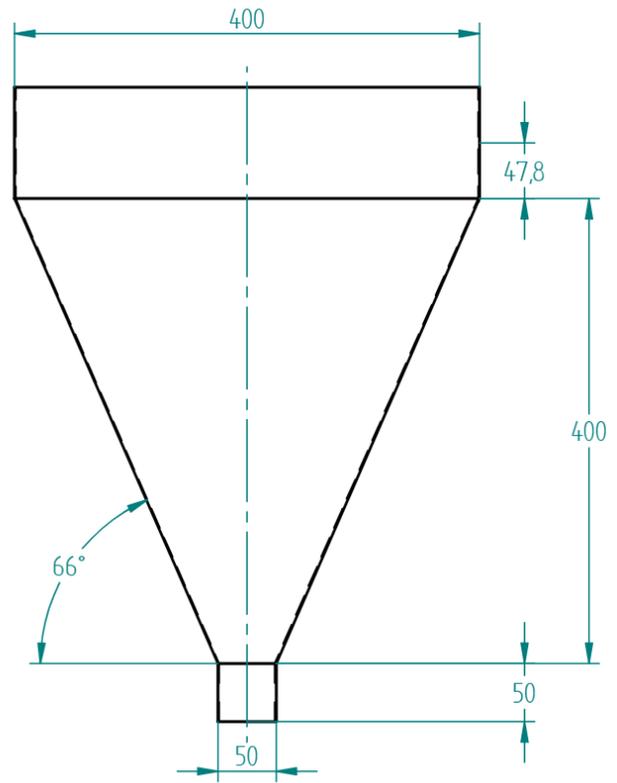
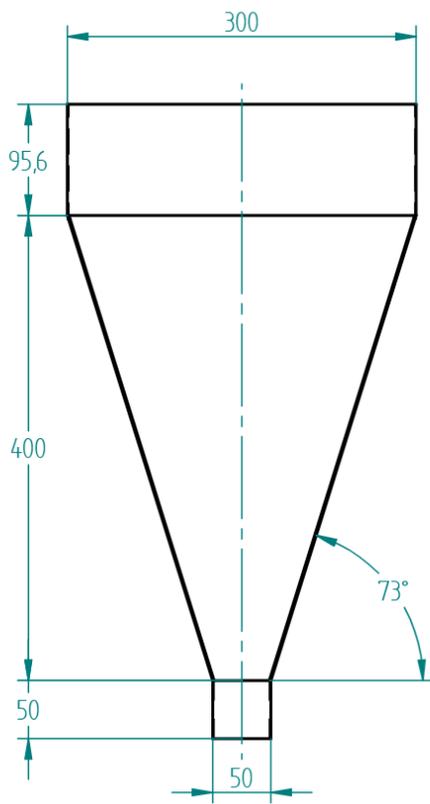
TITULO: PLATINA DE PRENSA

LABORATORIO DE INGENIERIA MECANICA

ACOT. EN :mm

ESC. 1:2

DIB.No. D2



SOLID EDGE ACADEMIC CO

DIB. RAFAEL DE LA CRUZ SIERRA, RAUL ANDRES SANTOS ARRATIA

REV. M.I. MAGDALENA TRUJILLO BARRAGAN

FECHA: 18/01/2009



LABORATORIO DE INGENIERIA MECANICA

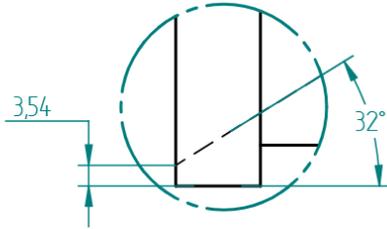
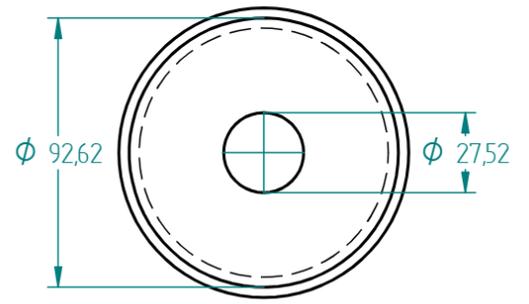
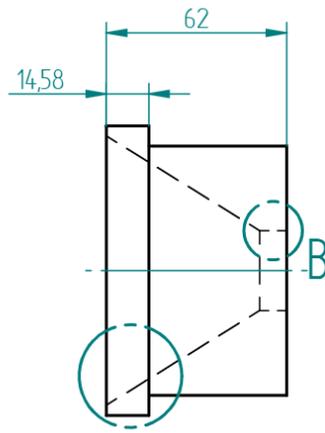
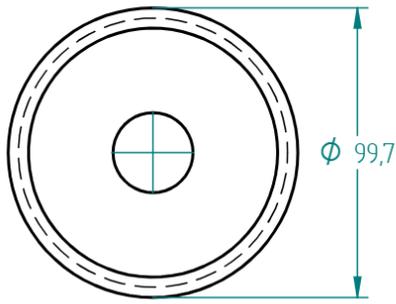
PROYECTO : PROCESO DE MOLDEO POR EXTRUSIÓN SOPLADO PARA PLÁSTICOS. ANÁLISIS DEL PROCESO EN UNA MÁQUINA VULCANO

TITULO: TOLVA

ACOT. EN :mm

ESC. 1:5

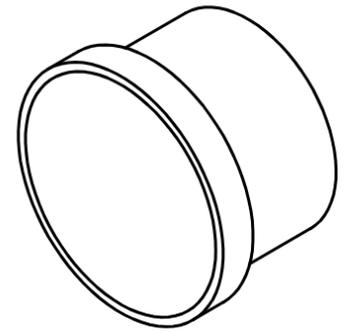
DIB.No. D3



DETAIL A
1:1



DETAIL B
1:1



SOLID EDGE ACADEMIC C

DIB. RAFAEL DE LA CRUZ SIERRA, RAUL ANDRES SANTOS ARRATIA

REV. M.I. MAGDALENA TRUJILLO BARRAGAN

FECHA: 18/01/2009



PROYECTO : PROCESO DE MOLDEO POR EXTRUSIÓN SOPLADO PARA PLÁSTICOS: ANÁLISIS DEL PROCESO EN UNA MÁQUINA VULCANO

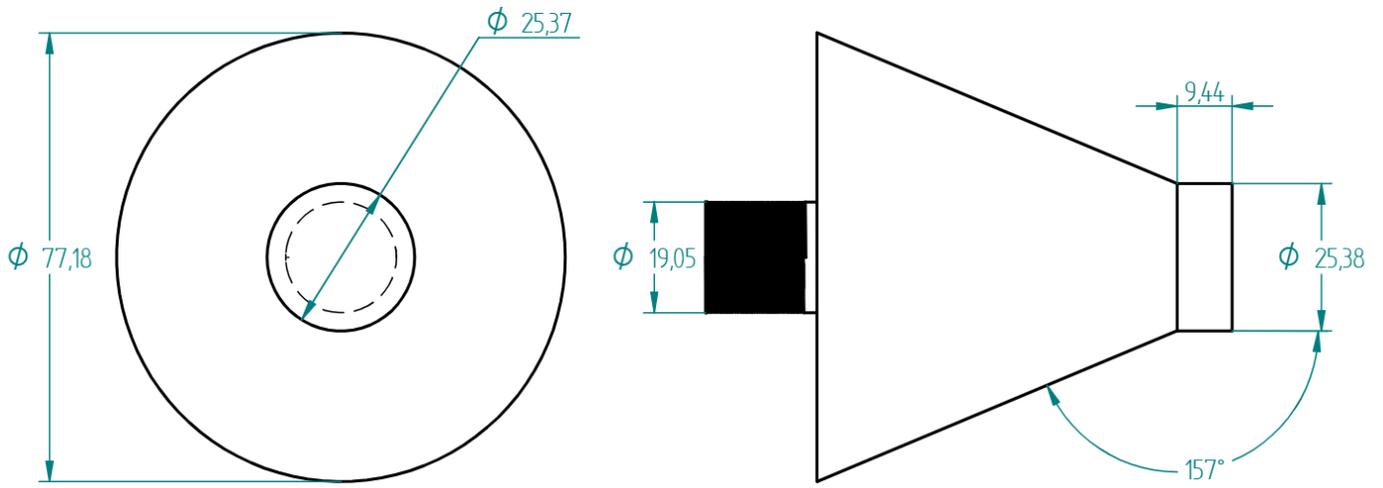
TITULO: DADO DEL CABEZAL

LABORATORIO DE INGENIERIA MECANICA

ACOT. EN :mm

ESC. 1:2

DIB.No. D4



DIB. RAFAEL DE LA CRUZ SIERRA RAUL ANDRES SANTOS ARRATIA

REV. M.I. MAGDALENA TRUJILLO BARRAGAN

FECHA: 18/01/2009



Laboratorio de Procesamiento de Plásticos

PROYECTO : PROCESO DE MOLDEO POR EXTRUSIÓN SOPLADO PARA PLÁSTICOS: ANÁLISIS DEL PROCESO EN UNA MÁQUINA VULCANO

TITULO: MANDRIL

LABORATORIO DE INGENIERIA MECANICA

ACOT. EN :mm

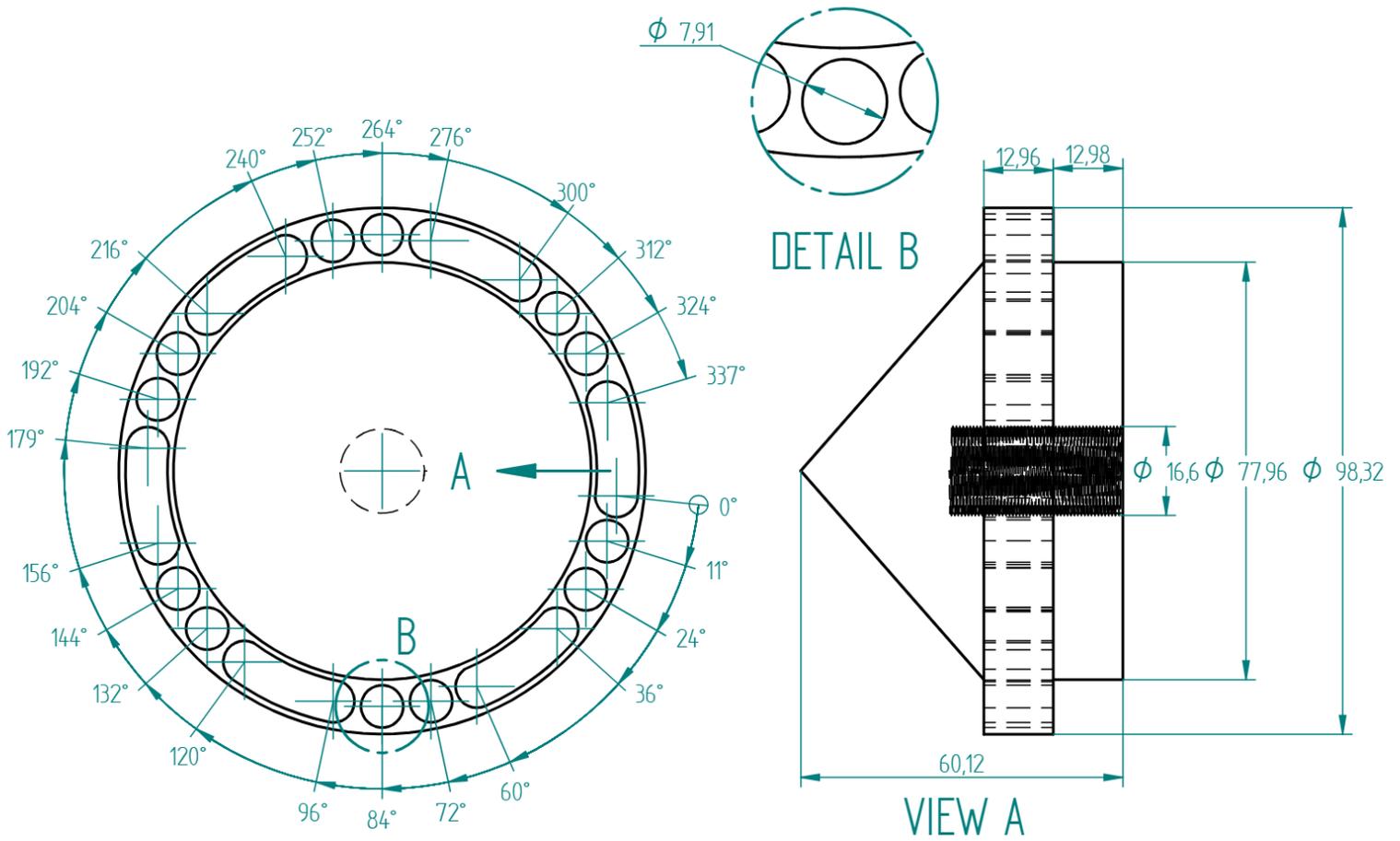
ESC. 1:1

DIB.No. D5

SOLID EDGE ACADEMIA



ANEXO C



DIB. RAFAEL DE LA CRUZ SIERRA, RAUL ANDRES SANTOS ARRATIA

REV. M.I. MAGDALENA TRUJILLO BARRAGAN

FECHA: 18/01/2009



Laboratorio de Procesamiento de Plásticos

PROYECTO : PROCESO DE MOLDEO POR EXTRUSIÓN SOPLADO PARA PLÁSTICOS. ANÁLISIS DEL PROCESO EN UNA MÁQUINA VULCANO

TITULO: DISTRIBUIDOR

LABORATORIO DE INGENIERIA MECANICA

ACOT. EN :mm

ESC. 1:1

DIB.No. P1



ANEXO D

No. 883 Tool Steel

Identification

UNS Number

- T20813

AISI Number

- Type H13

Type Analysis

Carbon	0.41 %	Manganese	0.35 %
Silicon	1.00 %	Chromium	5.35 %
Molybdenum	1.40 %	Vanadium	0.90 %
Iron	Balance		

General Information

Description

No. 883 tool steel is a 5% chromium, hot work tool steel designed particularly for applications requiring extreme toughness combined with good red hardness. It will provide an extra margin of safety in tools subject to hammer blows and those tools containing deep recesses and sharp corners.

While No. 883 die steel has been designed primarily as a hot work tool steel, it has found many applications in cold work tools where extra toughness is required at the sacrifice of some wear resistance.

Applications

No. 883 tool steel has been used for hot working tools requiring the greatest possible toughness. Typical applications have included:

Aluminum extrusion dies
 Bolt dies
 Bulldozer dies
 Die casting dies
 Forging dies
 Forming punches
 Heavy duty compression tools
 Hot forging tools with deep recesses and sharp corners
 Hot piercing punches
 Vastoning dies

If necessary, hot work tools made from this alloy can be water cooled in service without danger of cracking or heat checking.

Because of the extreme toughness of No. 883 tool steel, it could also be considered for cold work applications where other steels have failed by breaking.

Properties

Physical Properties

Specific Gravity	7.77
Density	7750 kg/m ³
Mean Specific Heat	0.4602 kJ/kg/K
Mean Coefficient of Thermal Expansion	
27°C, 93°C	11.0 x 10 ⁻⁶ cm/cm/°C
27°C, 204°C	11.5 x 10 ⁻⁶ cm/cm/°C
27°C, 427°C	12.2 x 10 ⁻⁶ cm/cm/°C
27°C, 538°C	12.4 x 10 ⁻⁶ cm/cm/°C
27°C, 649°C	13.1 x 10 ⁻⁶ cm/cm/°C
27°C, 788°C	13.5 x 10 ⁻⁶ cm/cm/°C
260°C, 649°C	14.0 x 10 ⁻⁶ cm/cm/°C
260°C, 788°C	14.4 x 10 ⁻⁶ cm/cm/°C

427°C, 649°C	14.6 x 10 ⁻⁶ cm/cm/°C
427°C, 788°C	14.8 x 10 ⁻⁶ cm/cm/°C

Mean coefficient of thermal expansion

The following chart contains the average coefficients between room temperature and the specified elevated temperature. The results are from material in the annealed condition and the dimensions are in in/in/° temperature.

Temperature Range		10 ⁻⁴ /°F	10 ⁻⁴ /°C
°F	°C		
80- 200	27- 93	6.1	11.0
80- 400	27-204	6.4	11.5
80- 800	27-427	6.8	12.2
80-1000	27-538	6.9	12.4
80-1200	27-649	7.3	13.1
80-1450	27-788	7.5	13.5
500-1200	260-649	7.8	14.0
500-1450	260-688	8.0	14.4
800-1200	427-649	8.1	14.6
800-1450	427-788	8.2	14.8

Thermal Conductivity

216°C	28.54 W/m/K
349°C	28.39 W/m/K
477°C	28.25 W/m/K
604°C	28.68 W/m/K

Thermal conductivity

Temperature		Btu-in/ft ² /hr/°F	W/m • K
°F	°C		
420	216	198	28.6
660	349	197	28.4
890	477	196	28.3
1120	604	199	28.7

Modulus of Elasticity (E)

21°C	210 x 10 ³ MPa
149°C	192 x 10 ³ MPa
260°C	180 x 10 ³ MPa
343°C	191 x 10 ³ MPa
427°C	188 x 10 ³ MPa
482°C	186 x 10 ³ MPa
538°C	157 x 10 ³ MPa
649°C	114 x 10 ³ MPa

Modulus of elasticity

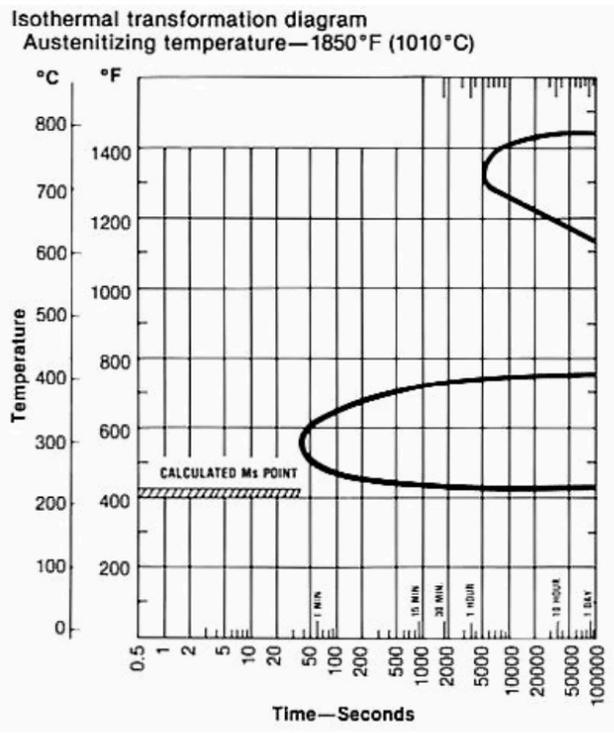
Temperature		psi x 10 ⁴	MPa x 10 ¹
°F	°C		
70	21	30.5	210.3
300	149	27.8	191.7
500	260	26.1	180.0
650	343	27.7	191.0
800	427	27.3	188.2
900	482	27.0	186.2
1000	538	22.7	156.5
1200	649	16.5	113.8

Critical temperature

A _{cl} °F	1505
°C	818

Specific heat

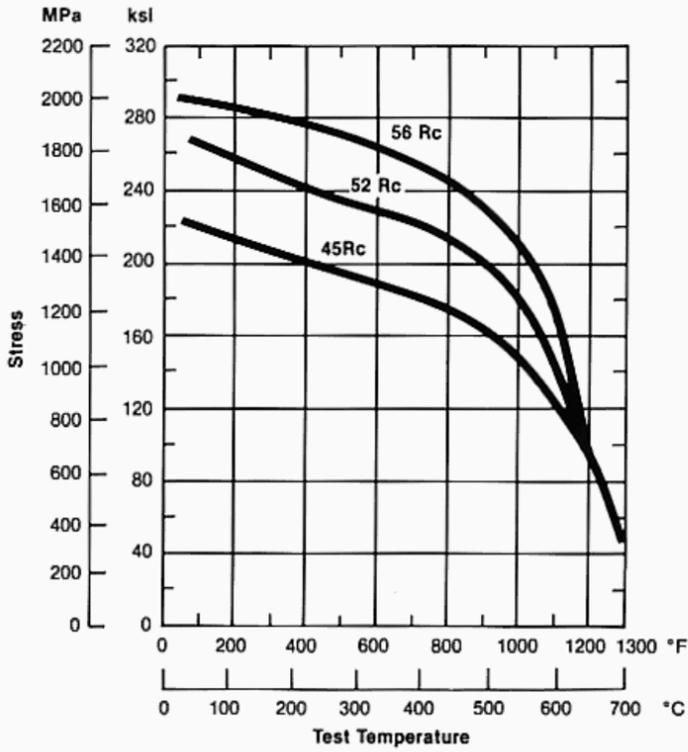
Btu/lb•°F	0.11
kJ/kg•K	0.460



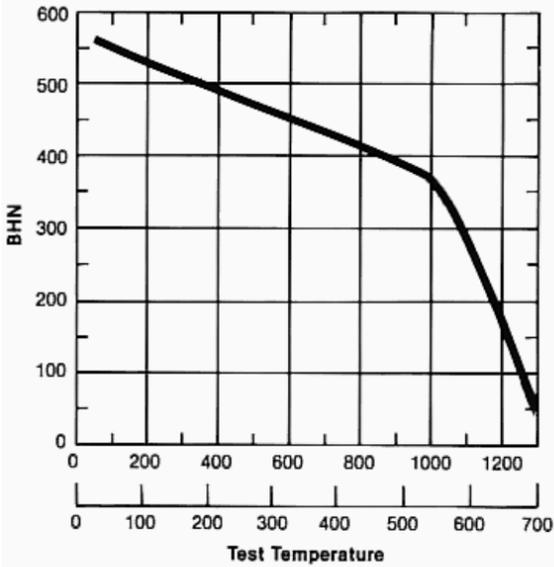
Critical Temperature (AC1)
-- 818.3 °C

Typical Mechanical Properties

Elevated Temperature Tensile Strength



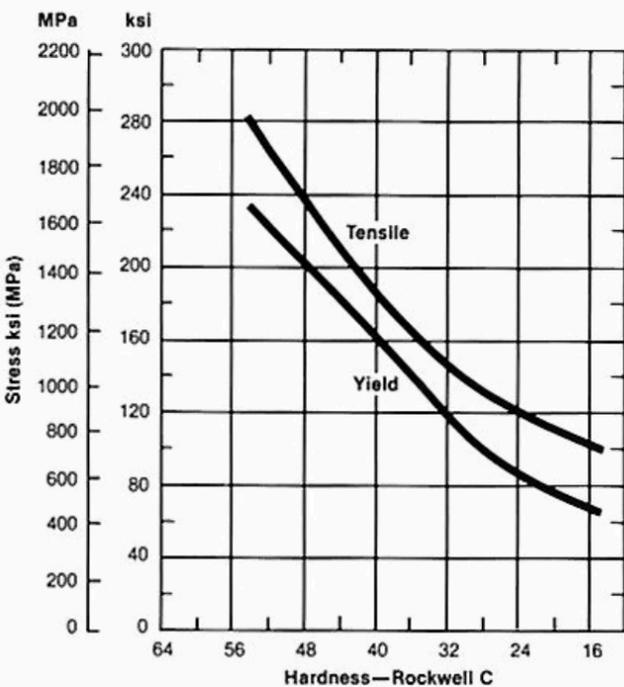
Hot Brinell Hardness

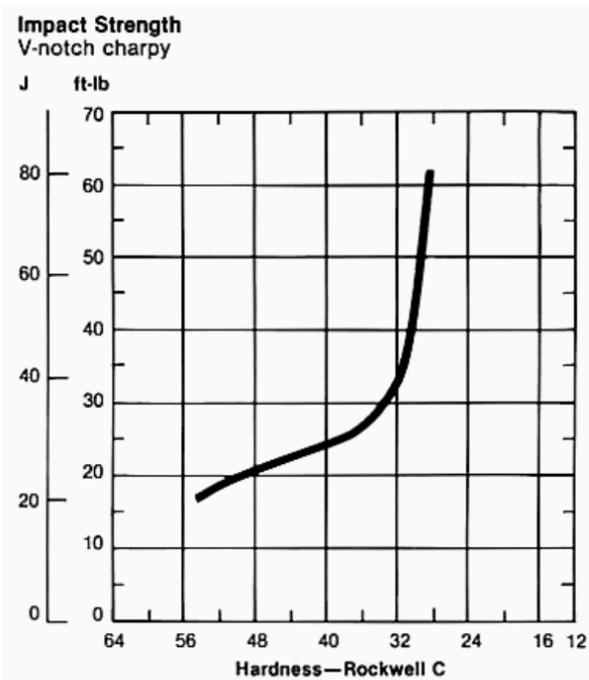


Reduction in Area and Elongation



Tensile and Yield Strength





Heat Treatment

Decarburization

Like other high carbon tool steels, No. 883 tool steel is subject to decarburization during thermal processing. Precautions must be taken to control this condition. Modern furnaces are available which provide environments designed to minimize decarburization.

Normalizing

Normalizing is not recommended for No. 883 tool steel and is not necessary after furnace cooling as indicated above.

Annealing

No. 883 tool steel should be packed in a suitable container, using a neutral packing compound, or placed in a controlled atmosphere furnace.

Heat uniformly to 1150/1600°F (843/871°C), then cool very slowly in the furnace at a rate of not more than 30°F (16.7°C) per hour until the furnace is black. The furnace may then be turned off and allowed to cool naturally. This will produce a maximum hardness of Brinell 241.

Hardening

No. 883 tool steel may be air treated or quenched in oil to harden.

For air treating, heat the furnace to 1850/1875°F (1010/1024°C), then place the tool right in the hot furnace near the thermocouple. Let the tool heat naturally until it uniformly matches the color of the thermocouple. Soak 20 minutes plus an additional 5 minutes per inch of thickness, then air cool.

For oil treating, follow the same procedure, but drop the temperature to 1825/1850°F (996/1010°C).

Control of decarburization can be achieved by using any one of the several modern heat treating furnaces designed for this purpose. If endothermic atmospheres are used, a dew point between 40/55°F (4/13°C) is suggested.

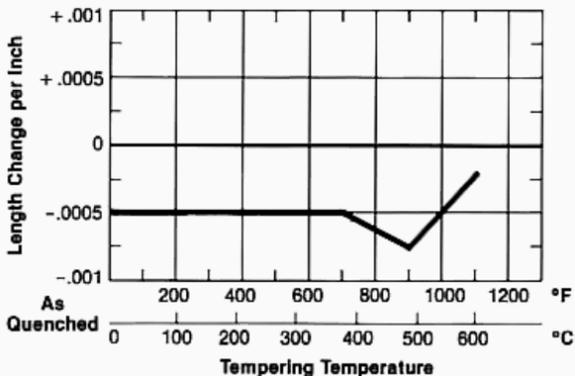
In older type, manually operated exothermic atmosphere furnaces, an oxidizing atmosphere is required. Excess oxygen of about 2 to 4% is preferred. If no atmosphere is available, the tool should be pack hardened or wrapped in stainless steel to protect its surface.

Deformation (Size Change) in Hardening

The accompanying hyperlink entitled "Size Change of No. 883 Tool Steel" shows typical length changes of No. 883 tool steel when it has been properly hardened and tempered. Note that the length change information is presented in inches per inch of original length. The hyperlink shows that this alloy can be expected to shrink slightly when heat treated. Shrinkage of approximately 0.0005 inches/inch occur when tempered at 1000°F (538°C). Tool steels hold size best when quenched from the proper hardening temperature. If overheated, they tend to show shrinkage after tempering.

Size Change of No. 883 Tool Steel

Austenitize—1875 °F (1024 °C), oil quenched and tempered 1 hour at indicated temperature



Stress Relieving

To relieve machining stresses for greater accuracy in hardening, first rough machine, then heat to a temperature of 1200/1250°F (649/677°C), hold for 1 hour at temperature, then slowly cool. Finish machine the parts following this treatment.

Tempering

Note in the hyperlink entitled "Effect of Tempering Temperature on Hardness" below that full hardness is maintained up to a tempering temperature of 1000°F (538°C). There is, therefore, no reason to temper No. 883 tool steel at a lower temperature.

For greater toughness, temper at a higher temperature.

Hot work tools should never be tempered at temperatures lower than the working temperature at which they will be used. It is also very important to preheat tools used in hot working applications.

Effect of Tempering Temperature on Hardness of No. 883 Tool Steel

Air quenched from 1875 °F (1024 °C) or oil quenched from 1850 °F (1010 °C), tempered 1 hour at indicated temperature

Tempering Temperature		Rockwell C Hardness Air or Oil Treated
°F	°C	
As Hardened		51/53
600	316	51/53
800	427	51/53
900	482	51/53
950	510	52/54
1000	538	52/54
1050	566	51/53
1100	593	49/51
1150	621	45/47
1200	649	39/41
1250	677	31/33
1300	704	28/30

Workability

Forging

Heat slowly and uniformly to a temperature of 2000/2075°F (1093°/1135°C), then proceed to forge. Do not work the steel below 1650°F (899°C). Reheat as often as necessary to maintain proper forging temperature.

Small, simple forgings may be cooled slowly in lime. The best practice for large forgings is to place them in a heated furnace at approximately 1450°F (788°C), soak uniformly at this temperature, then shut off the heat and allow the material to cool slowly in the furnace. This is not an anneal. After the forging is cool, it must be annealed as indicated below.

Machinability

The machinability of No. 883 tool steel may be rated between 60 and 65% of Type W-1 tool steel or about 40 to 45% of B1112.

Following are typical feeds and speeds for No. 883 tool steel.

The machinability of No. 883 tool steel may be rated between 60 and 65% of Type W-1 tool steel or about 40 to 45% of B1112.

The following charts contain information on typical speeds and feeds used in machining No. 883 tool steel. All results are for operations performed on material in the annealed condition.

Turning—Single Point and Box Tools

Depth of Cut in.	High-Speed Tools			Carbide			
	Speed, fpm	Feed, ipr	Tool Material	Speed, fpm		Feed, ipr	Tool Material
				Brazed	Throw Away		
.150	75	.015	M-42	300	375	.015	C-6
.025	90	.007		375	425	.007	C-7

Turning—Cut-Off and Form Tools

Speed, fpm	Feed, ipr							Tool Material
	Cut-Off Tool Width, Inches			Form Tool Width, Inches				
	1/16	1/8	1/4	1/2	1	1-1/2	2	
65	.001	.0015	.002	.0015	.001	.001	.0007	M-2
195	.003	.0045	.006	.003	.0025	.0025	.0015	C-6

Drilling

Speed, fpm	Feed, ipr								Tool Material
	Nominal Hole Diameter, Inches								
	1/16	1/8	1/4	1/2	3/4	1	1-1/2	2	
50	.001	.002	.003	.006	.008	.010	.011	.013	M-1;M-10

Reaming

Speed, fpm	High-Speed Tool						Carbide Tool		
	Feed, Inches per Rev.						Tool Material	Speed, fpm	Tool Material
	Reamer Diameter, Inches								
1/8	1/4	1/2	1	1-1/2	2				
55	.003	.005	.008	.012	.015	.018	M-7	175	C-2

Milling—End Peripheral

Depth of Cut In.	High-Speed Tools					Carbide Tools						
	Speed, fpm	Feed—Inches per tooth				Tool Material	Speed, fpm	Feed—Inches per tooth				Tool Material
		Cutter Diameter, Inches						Cutter Diameter, Inches				
		1/4	1/2	3/4	1-2			1/4	1/2	3/4	1-2	
.050	80	.001	.002	.003	.004	M-2;M-7	300	.0015	.0025	.004	.005	C-6

Broaching

Speed, fpm	Chip Load, Inches per tooth	Tool Material
20	.003	M-2; M-7

Sawing—Power Hack Saw

Pitch—Teeth per Inch				Speed	Feed
Material Thickness, Inches					
Under 1/4	1/4-3/4	3/4-2	Over 2	Strokes/Minute	Inches/Stroke
10	6	6	4	140	.006
10	6	6	4	70	.003
10	10	6	4	85	.003
10	10	6	4	55	.005
10	8	6	4	75	.003

Figures used for all metal removal operations covered are average. On certain work, the nature of the part may require adjustment of speeds and feeds. Each job has to be developed for best production results with optimum tool life. Speeds and feeds should be increased or decreased in small steps.

Additional Machinability Notes

Figures used for all metal removal operations covered are average. On certain work, the nature of the part may require adjustment of speeds and feeds. Each job has to be developed for best production results with optimum tool life. Speeds and feeds should be increased or decreased in small steps.

Other Information

Wear Resistance

The wear characteristics shown in the hyperlink entitled "Dry Sand/Rubber Wheel Abrasion Test" were generated using ASTM-G65 Procedure A, which is the ASTM Standard Practice for Conducting Dry Sand/Rubber Wheel Abrasion Tests. The data are presented as a volume loss as required by the ASTM Standard. Note that a lower number means better wear resistance.

Dry Sand/Rubber Wheel Abrasion Test

All specimens air hardened from 1875°F (1024°C) and tempered 1 hour

Tempering Temperature		Rockwell C Hardness	Average Volume Loss ASTM
°F	°C		
As-Hardened		53/54	128.4
1000	538	54/55	136.0
1100	593	51	127.0
1160	627	47	147.7
1200	649	40	186.0

The wear characteristics shown in the chart were generated using ASTM-G65 Procedure A, which is the ASTM Standard Practice for Conducting Dry Sand/Rubber Wheel Abrasion Tests.

The data are presented as a volume loss as required by the ASTM Standard. Note that a lower number means better wear resistance.

Applicable Specifications

- ASTM A681
- QQ-T-570

Forms Manufactured

- Bar-Rounds
- Wire-Shapes
- Billet

Technical Articles

- A New Guide for Selecting Ferrous Alloys, Tungsten Carbides and Ceramics for Tooling
- Forging Difficult Alloys: How to Get Better Results, Consistently

Disclaimer:

The information and data presented herein are typical or average values and are not a guarantee of maximum or minimum values. Applications specifically suggested for material described herein are made solely for the purpose of illustration to enable the reader to make his/her own evaluation and are not intended as warranties, either express or implied, of fitness for these or other purposes. There is no representation that the recipient of this literature will receive updated editions as they become available.

Unless otherwise specified, registered trademarks are property of CRS Holdings Inc., a subsidiary of Carpenter Technology Corporation.
Copyright 2009 CRS Holdings Inc. All rights reserved.

Edition Date: 11/1/2005



ANEXO E



Manual de operación.

MANUAL DE OPERACIÓN

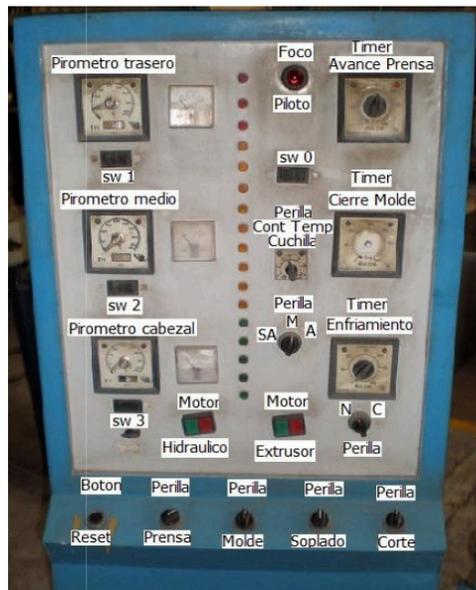
MAQUINA EXTRUSIÓN SOPLADO VULCANO

Medidas de seguridad

IMPORTANTE. Lea todas las instrucciones antes de poner en funcionamiento la máquina.

Este equipo fue diseñado para garantizar su seguridad física. Sin, embargo, LA UTILIZACIÓN INAPROPIADA PODRÍA SER LA CAUSA DE DESCARGAS ELÉCTRICAS O PÉRDIDA DE EXTREMIDADES DEL CUERPO. Para mantener el buen funcionamiento de este equipo y evitar problemas, siga las normas básicas indicadas a continuación cuando lo utilice o repare.

1. Corte la corriente eléctrica y quite la cadena del sistema mecánico antes de cualquier mantenimiento.
2. No se utilice cerca de depósitos de agua.
3. No se utilice sin la protección que cubre el mecanismo de cierre de molde.
4. Utilice siempre bata y zapatos al momento de trabajar en la máquina.
5. Asegúrese de que el nivel de aceite de la unidad hidráulica este en la marca indicada
6. No sobrecargue los toma corrientes ni los cables de extensión porque esto puede provocar un incendio descarga eléctrica.



Referencia de controles de operación



Pirómetro posterior. Con este pirómetro se controla la temperatura en la zona de alimentación en el husillo.

Pirómetro zona media. En este pirómetro se controla la temperatura en la zona de compresión en el husillo.

Pirómetro cabezal. Con este pirómetro se controla la temperatura en el dado o matriz,

SW-0 Interruptor que energiza el panel de control.

SW-1 Interruptor que controla el encendido del pirómetro en el cabezal.

SW-2 Interruptor que controla el encendido del pirómetro en la zona media.

SW-3 Interruptor que controla el encendido del pirómetro en la zona de alimentación.

Perilla M. Ciclo Manual.

A. Ciclo Automático

SA. Ciclo Semiautomático.

Motor Hidráulico. Con este botón se controla el encendido y el paro del sistema Hidráulico.

Motor Extrusor. Con este botón se controla el encendido y el paro del motor eléctrico del extrusor.

Temporizador cierre de molde. Con este temporizador se controla el tiempo que tarda el molde en cerrar.

Temporizador de avance de carro. Controla el tiempo de avance y retroceso de prensa.

Temporizador de enfriamiento. Controla el tiempo de enfriamiento.

Perilla de control de temperatura de cuchilla. Controla la temperatura de la cuchilla de corte.

Perilla prensa. Perilla que controla el movimiento de la prensa en forma manual. (Ciclo Manual).

Perilla molde. Perilla que controla el movimiento del molde en forma manual. (Ciclo Manual)

Perilla soplado. Perilla que controla el movimiento de la espiga de soplado en forma manual. (Ciclo Manual)

Perilla de corte. Perilla que controla el movimiento de la cuchilla de corte en forma manual. (Ciclo Manual)

Botón de reinicio. Reinicia el ciclo cuando se opera en modo semiautomático.

Componentes:

- Extrusor
- Prensa

- Molde
- Espiga de soplado
- Tablero de control
- Unidad hidráulica
- Manómetro de presión de aire



Máquina de Extrusión Soplado Vulcano

Condiciones de operación

1. Verificar existencia de aire en el sistema.
2. Verificar conexiones del sistema de enfriamiento.
3. Puerta de seguridad cerrada.
4. Revisar la existencia de material en la tolva.
5. Verificar apertura de la compuerta de la tolva.

Inicio de operación

1. Conectar interruptor principal (alimentación general de la extrusora).
2. Encender interruptor (**SW-0**) del tablero de control.
3. Encender pirómetros (**SW-1, SW-2, SW-3**) y asignar temperatura.
 - Interruptor (**SW-1**) zona trasera.



- Interruptor 2 (**SW-2**) zona media.
- Interruptor 3 (**SW-3**) zona cabezal.
- 4. Verificar molde abierto y al frente de la máquina.
- 5. Una vez alcanzado el perfil de temperatura, se procede a encender el motor hidráulico y el motor del extrusor.
- 6. Ajustar manualmente operaciones de apertura y cierre de molde, avance y retroceso de la prensa.
- 7. Iniciar el ciclo en modo automático (**Perilla A**) y ajustar tiempos de ciclo.
 - T1; tiempo de cierre del molde.
 - T2; tiempo de soplado.
 - T3; tiempo de enfriamiento.
 - T4; tiempo de retroceso de la prensa (Asignar 1 segundo).
 - T5; tiempo de avance de prensa (Asignar 1 segundo).

Apagado de máquina.

1. Cerrar tolva de alimentación
2. Purgar máquina.
3. Apagar resistencias
 - Interruptor (**SW-1**) zona trasera.
 - Interruptor 2 (**SW-2**) zona media.
 - Interruptor 3 (**SW-3**) zona cabezal.
4. Colocar la prensa al frente con el molde abierto.
5. Apagar motor del extrusor.
6. Apagar motor Unidad Hidráulica.
7. Desconectar interruptor principal.



ANEXO F



#B	Espesor de botellas 22 rpm			
		E1	E2	E3
1	superior	0.549	0.542	0.589
	media	0.588	0.48	0.545
	baja	0.645	0.652	0.629
	CENTRO	0.780	0.567	0.735
2	superior	0.57	0.542	0.63
	media	0.54	0.59	0.462
	baja	0.683	0.615	0.64
	CENTRO	0.862	0.695	0.625
3	superior	0.53	0.595	0.625
	media	0.658	0.598	0.54
	baja	0.535	0.62	0.669
	CENTRO	0.714	0.880	0.761
4	superior	0.58	0.535	0.589
	media	0.582	0.505	0.585
	baja	0.709	0.412	0.6
	CENTRO	0.736	0.632	0.705
5	superior	0.535	0.756	0.473
	media	0.476	0.59	0.473
	baja	0.782	0.65	0.72
	CENTRO	0.565	0.835	0.632

Espesor de botellas a 22 rpm, HDPE.

# B	Espesor de botellas 31 rpm			
		E1	E2	E3
1	superior	0.567	0.568	0.554
	media	0.625	0.512	0.524
	baja	0.8	0.785	0.693
	CENTRO	0.685	0.583	0.614
1	superior	0.537	0.579	0.55
	media	0.545	0.668	0.512
	baja	0.795	0.719	0.61
	CENTRO	0.692	0.741	0.689
3	superior	0.545	0.512	0.505
	media	0.49	0.526	0.514
	baja	0.809	0.81	0.609
	CENTRO	0.619	0.691	0.720
4	superior	0.565	0.51	0.529
	media	0.529	0.512	0.538
	baja	0.7	0.632	0.719
	CENTRO	0.636	0.678	0.690
5	superior	0.568	0.514	0.574
	media	0.518	0.691	0.645
	baja	0.722	0.779	0.72
	CENTRO	0.624	0.732	0.692

Espesor de botellas a 31 rpm, HDPE.



#B	Espesor de botellas 36 rpm		
		E1	E2
1	superior	0.565	0.596
	media	0.5	0.52
	baja	0.689	0.67
	CENTRO	0.665	0.666
2	superior	0.658	0.65
	media	0.594	0.597
	baja	0.634	0.645
	CENTRO	0.740	0.697
3	superior	0.638	0.63
	media	0.52	0.555
	baja	0.66	0.67
	CENTRO	0.648	0.689
4	superior	0.624	0.632
	media	0.515	0.523
	baja	0.654	0.65
	CENTRO	0.650	0.670
5	superior	0.637	0.64
	media	0.524	0.532
	baja	0.65	0.647
	CENTRO	0.680	0.680

Espesor de botellas a 36 rpm, HDPE.



ANEXO G

Espesor de botellas			
32 RPM		E1	E2
1	superior	1.059	1.02
	media	0.932	0.92
	baja	1.103	1.143
2	superior	1.043	1.123
	media	0.972	0.93
	baja	1.142	1.137
3	superior	0.985	1.152
	media	0.805	0.923
	baja	1.01	1.143
4	superior	0.91	0.920
	media	0.897	0.884
	baja	1.029	0.976
5	superior	1.129	0.943
	media	0.944	0.922
	baja	1.21	0.96

Espesor de botellas a 32 rpm, LDPE.

40 RPM		E1
1	superior	0.756
	media	0.745
	baja	0.802
2	superior	0.776
	media	0.765
	baja	0.8
3	superior	0.789
	media	0.76
	baja	0.806
4	superior	0.798
	media	0.78
	baja	0.823
5	superior	0.779
	media	0.757
	baja	0.811

Espesor de botellas a 40 rpm, LDPE.

44 RPM		E1
1	superior	0.745
	media	0.769
	baja	0.85
2	superior	0.973
	media	0.951
	baja	1.1
3	superior	0.7
	media	0.743
	baja	0.8
4	superior	0.739
	media	0.78
	baja	0.932
5	superior	0.65
	media	0.713
	baja	0.821

Espesor de botellas a 44 rpm, LDPE.

52 RPM		E1
1	superior	0.809
	media	0.748
	baja	0.979
2	superior	0.869
	media	0.829
	baja	1.172
3	superior	0.763
	media	0.815
	baja	1.215
4	superior	0.862
	media	0.869
	baja	0.913
5	superior	0.97
	media	0.992
	baja	0.97

Espesor de botellas a 52 rpm, LDPE.



57 RPM		E1
1	superior	0.81
	media	0.772
	baja	0.95
2	superior	0.894
	media	0.842
	baja	1.102
3	superior	0.88
	media	0.889
	baja	1.132
4	superior	1.062
	media	1.042
	baja	1.305
5	superior	1.063
	media	0.842
	baja	1.325

Espesor de botellas a 57 rpm, LDPE.



ANEXO H

PADMEX 56035

ALTA DENSIDAD

Índice de Fluidez 0.35 g/10min Densidad 0.956 g/cm³

Características

Copolímero grado soplado bimodal, con una distribución de peso molecular ancha. Ofrece excelente rigidez, procesabilidad, y resistencia al impacto; así como buena resistencia al agrietamiento por esfuerzo ambiental (ESCR). Contiene aditivo antioxidante y lubricante.

Aplicaciones

- * Botellas para conservar productos químicos y de limpieza.
- * Tubería para drenaje y ductos no presurizados

**Cumplimento FDA y EEC

Parámetro	Unidad	Método de Prueba	Valor Típico **
Índice de fluidez	g/10 min.	ASTM D - 1238	0.35
Densidad	g/cm ³	ASTM D - 1505	0.956
Propiedades de la Placa *			
Resistencia a la Tensión (cedencia)	MPa	ASTM D - 638	34.3
Resistencia a la Tensión (ruptura)	MPa	ASTM D - 638	15
Elongación a la ruptura	%	ASTM D - 638	> 500
Impacto Izod	J/m	ASTM D - 256	125
Módulo de Flexión	MPa	ASTM D - 790	50.4
Módulo de Young	MPa	ASTM D - 790	27.9
Resistencia Ambiental (ESCR) F ₅₀ condición C	h	ASTM D - 1693	> 200
Dureza Shore	Tipo D	ASTM D - 1706	62
Temperatura de Reblandecimiento Vicat	°C	ASTM D - 1525	125
Temperatura de Fusión	°C	ASTM E - 794	130

Condiciones

Temperatura: 160-185°C en perfil recto o descendente
 Temperatura del cabezal: 1175-195°C

Presentación

- * Saco de 25kg.
- * Granel

Los valores típicos reportados son obtenidos en laboratorio bajo los métodos de prueba descritos. Estos parámetros y condiciones de procesado, deben utilizarse sólo como referencia y no constituyen una garantía implícita o explícita para la aplicación propuesta.



PRÁCTICA DE LABORATORIO.



Práctica de laboratorio.

Cuestionario Previo.

1. Definición de extrusión.
2. Definición de extrusión soplado.
3. Definición de parison.
4. Componentes principales de la máquina de extrusión soplado.
5. Tipos de husillos y sus características.
6. Materiales más comunes para el proceso de extrusión soplado.
7. Investigar con el fabricante (PEMEX PETROQUÍMICA), la hoja de datos del polímero: PADMEX 56035.



Práctica de laboratorio.

Proceso de Extrusión Soplado

Objetivos:

El Alumno:

1. Conocerá los elementos que componen una máquina de extrusión soplado.
2. Identificará las diferentes etapas y variables que intervienen en el proceso extrusión soplado.
3. Obtendrá las curvas características del proceso y de la máquina de extrusión soplado Vulcano.
4. Evaluará de manera cualitativa y cuantitativa el producto obtenido.

Introducción.

El moldeo por extrusión soplado es uno de los procesos más utilizados para la formación de productos huecos. Se define como el proceso de transformación primario discontinuo, de un material que es fundido y forzado a pasar por un orificio, el cual le conferirá una forma intermedia (parison) necesaria para que posteriormente esta sea aprisionada entre placas (molde) y ser inflada con la finalidad de que tome la forma existente en el interior de las placas.

El moldeo por soplado consume alrededor del 15% de todos los plásticos del mercado, los cuales en orden de importancia son: Polietileno de Alta Densidad (PEAD), Polietileno Tereftalato (PET), Policloruro de Vinilo (PVC), Polietileno de Baja Densidad (PEBD) y Policarbonato (PC).

Equipo y Material

- a. Polietileno de alta densidad (PADMEX 56035)
- b. 1 Cronómetro digital.
- c. 1 Báscula Digital.
- d. Tacómetro de (10 - 100) rpm y resolución de 1 rpm
- e. Micrómetro [0 - 25] [mm]



Desarrollo

Actividad 1

El profesor verificará que los alumnos posean los conocimientos teóricos necesarios para la realización de la práctica y dará las recomendaciones necesarias para el uso del equipo.

Actividad 2

Medición de velocidad de giro del husillo; con ayuda del tacómetro se obtendrán el intervalo de velocidades de giro del husillo para posteriormente poder caracterizar la máquina de extrusión soplado Vulcano.

Actividad 3

Se realizará el experimento a diferentes velocidades de giro del husillo y se caracterizará el proceso de acuerdo a la siguiente metodología.

- 1) Se establece el perfil de temperaturas.
 - Z1 ; Zona posterior o alimentación 150 °C
 - Z2 ; Zona media 170 °C
 - Z3; Cabezal 180 °C
- 2) Se establecen las mínimas revoluciones.
- 3) Se manipulan los temporizadores (timers) para el control del proceso.
 - T1 ; Tiempo de Cierre de molde.
 - T2 ; Tiempo de Soplado.
 - T3 ; Tiempo de Enfriamiento.
 - T4 ; Tiempo de Retroceso de Prensa.
 - T5 ; Tiempo de Avance.

Nota: Se recomienda mantener los tiempos T4 y T5 a un segundo y mantener el tiempo de soplado T2 constante dentro del intervalo de 4 y 5 segundos

- 4) Se establece un mínimo de 5 botellas, para asegurar la constancia del ciclo. Una vez que se ha logrado estabilizar el proceso se procede a tomar tiempos de ciclo.
- 5) Cada pieza se pesa incluyendo su excedente, luego se elimina la rebaba y se vuelve a pesar. Al final se miden los espesores en la zona crítica.



- 6) Para dejar el menor excedente de material, se procede a manipular los temporizadores, siempre y cuando no afecte el producto final.
- 7) Una vez logrado lo anterior, se procede a cambiar la velocidad de giro del husillo (rpm's) de acuerdo a la tabla 1 y se repite el proceso en el punto 3).

Actividad 4

Utilizando el micrómetro, se medirán espesores en la zona crítica y al centro de la botella

MATERIAL		PERFIL DE TEMPERATURA	
Z1 Alimentación_____	Z2 Media_____	Z3 Cabezal_____	

#EXP	RMP	T1 Cierre de Molde [s]	T2 Tiempo de soplado [s]	T3 Tiempo de Enfriamiento [s]	T4 Avance de Prensa [s]	T5 Retroceso de Prensa [s]	TIEMPO CICLO [s]
1							
2							
3							
1	31						
2							
3							
1	36						
2							
3							

RPM	E1		E2		E3	
	Con rebaba	Sin rebaba	Con rebaba	Sin rebaba	Con rebaba	Sin rebaba
# de botella	Peso [g]					
1						
2						
3						
4						
5						
PROMEDIO						

31 RPM	E1		E2		E3	
	Con rebaba	Sin rebaba	Con rebaba	Sin rebaba	Con rebaba	Sin rebaba
# de botella	Peso [g]					
1						
2						
3						
4						
5						
PROMEDIO						



36 RPM	E1		E2		E3	
	Con rebaba	Sin rebaba	Con rebaba	Sin rebaba	Con rebaba	Sin rebaba
# de botella	Peso [g]					
1						
2						
3						
4						
5						
PROMEDIO						

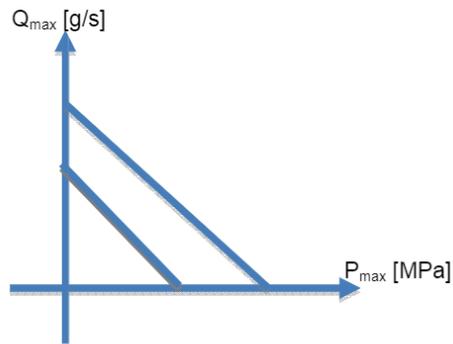
Resultados

Material		Peso con excedente [g]	TIEMPO [s]	GASTO [g/s]	Gasto PROMEDIO [g/s]
# EXP.	RMP				
1					
2					
3					
1					
2					
3					
1					
2					
3					

Ecuaciones:

Actividad 2 : Curva característica de máquina.

$$P_{max} = \frac{6\pi D N \mu}{H^2 \tan \varphi} \quad Q_T = Q_{max} = \frac{1}{2} \pi^2 D^2 N \text{sen} \varphi \text{cos} \varphi H$$



Gasto del extrusor

Actividad 3: Curva característica experimental.

$$Q_E = \frac{1}{2} \pi^2 D^2 N \sin \varphi \cos \varphi H - \frac{\pi D H^3 \sin^2 \varphi P}{12 \mu L}$$

Datos del husillo y Material

Características	Unidades	Valores
Altura de Canal ; H	[m]	0.0029
Ángulo de Husillo ; φ	[°]	17
Largo del husillo ; L	[m]	0.93
Viscosidad	[Pa s]	150
Diámetro	[m]	0.0445

PRESIÓN [MPa]	GASTO PROMEDIO [g/s]	RPM
		31
		36

Gasto sin cabezal



RPM	GASTO [g/s]	PRESIÓN [MPa]
	2.1	
31	3.06	
36	3.45	

Actividad 4: Medición de Espesores

Espesor en botellas		
_____ RPM	superior	
	media	
	inferior	

Espesor en botellas		
32 RPM	superior	
	media	
	inferior	

Espesor en botellas		
36 RPM	superior	
	media	
	inferior	

Análisis de Resultados.

- Interpretación de las curvas del proceso de extrusión soplado.
- Describir las etapas dentro del proceso de soplado. ¿Cuál tuvo mayor duración? ¿Qué relación hay entre ellas?
- Interpretación del comportamiento de los espesores en la botella y en particular en la zona crítica.

Conclusiones.

Bibliografía

ANGUITA DELGADO, Ramón, Extrusión de Plásticos. Madrid, Ed. H. Blume, 1977.

RAMOS DE VALLE, Luis Francisco, Extrusión de Plásticos: principios básicos. México, Ed. Limusa, 1993.

MORTON –JONES, D.H., Procesamiento de Plásticos. México, Ed. Limusa, 1993.

Instituto Mexicano del Plástico Industrial, Enciclopedia del Plástico. México, 2000 Tomo 4.



FUENTES CONSULTADAS.

- SAUGORODNY U.K., Transformación de Plástico.
Barcelona España, Ed. Gustavo Gili S.A., 1973, 468pp.
- MORTON –JONES, D.H., Procesamiento de Plásticos.
México, Ed. Limusa, 1993, 302 pp.
- RICHARDSON-PH.D., Terry L., Industrial Plastic: Theory and Application.
3er. USA, Ed. International Thompson Publishing Company, 1997, 529pp.
- WILKINSON, Arthur N., Polymer Processing and Structure Development.
Gran Bretaña, Ed. Kluwer Academic Publishers, 1998, 577pp.
- BIRLEY-BARRY, Arthur W., Physics of plastics.
Alemania, Ed. Hanser Publishers, 1992, 528 pp.
- ANGUITA DELGADO, Ramón, Extrusión de Plásticos.
Madrid, Ed. H. Blume, 1977.
- RAMOS DE VALLE, Luis Francisco, Extrusión de Plásticos: principios básicos.
México, Ed. Limusa, 1993, 188pp.
- CONDE, Mónica, “Las Formas del Aire”.
En Ambiente Plástico, Septiembre- Octubre 2007, pp. 47-64.
- Instituto Mexicano del Plástico Industrial, Enciclopedia del Plástico.
México, 2000 Tomo 4.

ÍNDICE DE TABLAS, DIAGRAMAS E IMÁGENES.

DIAGRAMA 2.1: TIEMPO DE MOLDEO; DIAGRAMA DE LA DISTRIBUCIÓN DE TIEMPO POR ETAPA.....	22
DIAGRAMA 2.2: ETAPAS DE UN CICLO DE EXTRUSIÓN SOPLO	23
DIAGRAMA 2.3: PARTES DEL EXTRUSOR. EMPAQUES PLÁSTICOS DE MÉXICO SA DE CV	24
DIAGRAMA 2.4: DISEÑO TÍPICO DE TOLVA. CENTRO CATALÁN DEL PLÁSTICO	25
IMAGEN 2.1:TOLVA VIBRATORIA	25
DIAGRAMA 2.5: HUSILLO UNIVERSAL	26
DIAGRAMA 2.6: HUSILLOS MÁS COMUNES, ANGUITA DELGADO, PÁG.55	26
DIAGRAMA 2.7: ZONAS CARACTERÍSTICAS DEL HUSILLO. ANGUITA DELGADO, PÁG. 54	28
TABLA 2.1: PERFIL DE TEMPERATURAS PARA DISTINTOS POLÍMEROS. ENCICLOPEDIA DEL PLÁSTICO INDUSTRIAL	28
TABLA 2.2: CARACTERÍSTICAS DE LOS HUSILLOS PARA DISTINTOS MATERIALES. ENCICLOPEDIA DEL PLÁSTICO INDUSTRIAL	29
DIAGRAMA 2.8: UBICACIÓN PLATO ROMPEDOR Y PAQUETE DE MALLAS. CENTRO CATALÁN DEL PLÁSTICO	30
IMAGEN 2.2: PLACAS ROMPEDORAS. CENTRO CATALÁN DEL PLÁSTICO	31
DIAGRAMA 2.9: CABEZAL FLUJO RADIAL. ENCICLOPEDIA DEL PLÁSTICO.....	32
DIAGRAMA 2.10: CABEZAL FLUJO RADIAL.....	32
DIAGRAMA 2.11: CABEZAL ACUMULADOR. ENCICLOPEDIA DEL PLÁSTICO.....	33
DIAGRAMA 2.12: CABEZAL FLUJO RADIAL. PROCESAMIENTO DE LOS PLÁSTICOS.	34
DIAGRAMA 2.13: DISEÑO DE BOQUILLAS. ENCICLOPEDIA DEL PLÁSTICO INDUSTRIAL.....	34
TABLA 2.3: PRESIÓN DE SOPLADO PARA TERMOPLÁSTICOS. ENCICLOPEDIA DEL PLÁSTICO INDUSTRIAL...	35
DIAGRAMA 2.14: VÁLVULAS DE SOPLADO. ENCICLOPEDIA DEL PLÁSTICO INDUSTRIAL	35
TABLA 2.4: DIÁMETRO DE ORIFICIO PARA SOPLADO. ENCICLOPEDIA DEL PLÁSTICO INDUSTRIAL.....	36
DIAGRAMA 2.15: PARTES DEL MOLDE ENCICLOPEDIA DEL PLÁSTICO INDUSTRIAL.....	37
IMAGEN 2.3: UNIDAD DE CIERRE CON BARRAS GUÍA. ENCICLOPEDIA DEL PLÁSTICO INDUSTRIAL.....	38
IMAGEN 2.4: UNIDAD DE CIERRE EN “U”. ENCICLOPEDIA DEL PLÁSTICO INDUSTRIAL.....	39
IMAGEN 2.5: UNIDAD DE CIERRE EN “U” SIN BARRAS GUÍA.....	39
IMAGEN 2.6: SISTEMA DE CORTE JALADO.....	40



DIAGRAMA 2.16: SISTEMA DE CORTE POR APRISIONAMIENTO. UNITED STATE PATENT 4919880.	40
IMAGEN 2.7: SISTEMA DE CORTE POR CUCHILLAS CALIENTES	41
DIAGRAMA 2.17 Y 2.18: MÁQUINAS TIPO SHUTTLE.	43
DIAGRAMAS 2.19 Y 2.20: MÁQUINAS ROTATIVAS.	44
DIAGRAMA 2.21: MÁQUINA DE CO-EXTRUSIÓN. E. G. FISHER EXTRUSIÓN DE PLÁSTICOS.	45
IMAGEN 3.1: MÁQUINA EXTRUSORA VULCANO, VISTA FRONTAL	46
IMAGEN 3.2: TOLVA.....	47
DIAGRAMA 3.1: CARACTERÍSTICAS DEL HUSILLO.	48
TABLA 3.1: CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES DEL HUSILLO.	48
IMAGEN 3.3: CABEZAL, VISTA INFERIOR.	49
IMAGEN 3.4: CABEZAL VISTA POSTERIOR. IMAGEN 3.5: BOQUILLA Y DISTRIBUIDOR.....	49
IMÁGENES 3.6 Y 3.7: ESPIGA DE SOPLADO.....	50
IMAGEN 3.8: UNIDAD DE CIERRE.	50
IMAGEN 3.9: MOLDE.....	51
IMAGEN 3.10: SISTEMA DE CORTE DE PARISON.	52
IMAGEN 3.11: SISTEMA MECÁNICO.	53
TABLA 3.2: CARACTERÍSTICAS PRINCIPALES.	53
IMAGEN 3.12: UNIDAD HIDRÁULICA.	54
IMÁGENES 3.13 Y 3.14: MOLDE E INTERCAMBIADOR DE CALOR TIPO AGUA-ACEITE	55
IMAGEN 3.15: SISTEMA DE REFRIGERACIÓN FRIMOLD.....	55
IMAGEN 3.16: ENFRIAMIENTO EN ZONA DE ALIMENTACIÓN.....	56
IMAGEN 3.17: SISTEMA NEUMÁTICO.....	56
IMAGEN 3.18: RESISTENCIAS ELÉCTRICAS EN EL CABEZAL Y CAÑÓN.	57
IMAGEN 3.19: TABLERO DE CONTROL.....	58
IMAGEN 3.20: CONDICIONES INICIALES, PRENSA.....	58
IMAGEN 3.21: CONDICIONES INICIALES, CABLES DE CONEXIÓN AL TABLERO.....	59
IMAGEN 3.22: CONDICIONES INICIALES, SISTEMA DE ENFRIAMIENTO.	59
IMAGEN 3.23: CONDICIONES INICIALES S. NEUMÁTICO	60
IMAGEN 3.24: CONDICIONES INICIALES DEL CAÑÓN DEL EXTRUSOR	60
IMAGEN 3.25: ESPIGA DE SOPLADO IMAGEN 3.26: PISTÓN DE LA ESPIGA DE SOPLADO	61



IMAGEN 3.27: IMAGEN INICIAL DE LA UNIDAD HIDRÁULICA	61
IMAGEN 3.28: IMAGEN INICIAL DEL CABEZAL CON MATERIAL DEGRADADO	62
IMAGEN 3.29: EJEMPLOS DE FOTOGRAFÍAS INICIALES	62
IMAGEN 3.30: DISTRIBUIDOR DE FLUJO ORIGINAL Y EL FABRICADO EN LOS TALLERES DE INGENIERÍA MECÁNICA	63
IMAGEN 3.31: CONFIGURACIÓN ANTES Y DESPUÉS DE LA INTERVENCIÓN.	64
FIGURA 4.1: FLUJO ENTRE PLACAS PARALELAS.	68
FIGURA 4.2: FLUJO DENTRO DEL EXTRUSOR.	69
FIGURA 4.3: FUERZAS QUE ACTÚAN SOBRE EL ELEMENTO DIFERENCIAL.	70
TABLA 4.1: COEFICIENTE DE FRICCIÓN DE DIVERSOS POLÍMEROS; HALL C. "POLYMER MATERIALS", ED. MACMILLAN, LONDON, 1981.	73
TABLA 4.2: DATOS PARA CÁLCULO DE VELOCIDAD MÁXIMA DEL HUSILLO.	75
TABLA 4.3: DATOS PARA CÁLCULO DE VELOCIDAD MÁXIMA DEL HUSILLO.	76
TABLA 4.4: DATOS NECESARIOS PARA LA OBTENCIÓN DEL GASTO.	77
GRÁFICA 4.1: CURVA CARACTERÍSTICA DEL EXTRUSOR.....	78
TABLA 4.5: VALORES TEÓRICOS DEL GASTO DEL EXTRUSOR.	78
FIGURA 4.3: REPRESENTACIÓN DE CURVAS CARACTERÍSTICAS DEL EXTRUSOR.....	79
GRÁFICA 4.2: CURVAS CARACTERÍSTICAS DEL EXTRUSOR.	80
FIGURA 4.4: REPRESENTACIÓN DEL HINCHAMIENTO DEL PARISON.	81
TABLA 4.6: VALORES NECESARIOS PARA EL CÁLCULO DE HINCHAMIENTO.	81
TABLA 4.6A: PORCENTAJE DE HINCHAMIENTO.	81
FIGURA 4.5: DESCRIPCIÓN DEL DADO Y PARISON.	82
TABLA 4.7 Y 4.8: DATOS NECESARIOS PARA EL CÁLCULO DE ESPESOR DE PARED PARA POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD Y DE BAJA DENSIDAD.....	83
TABLA 4.9: ESPESOR DE PARED MÍNIMO DE LA PIEZA MOLDEADA.	84
TABLA 4.10: PERFIL DE TEMPERATURAS.	86
TABLA 4.11: TIEMPO EN EL DISPLAY DEL TIMER, HDPE.	86
TABLA 4.12: TIEMPO MEDIDO CON AYUDA DEL CRONÓMETRO, HDPE.	86
TABLA 4.13: PESO PROMEDIO EN GRAMOS A 22 RPM, HDPE.	87
TABLA 4.14: PESO PROMEDIO EN GRAMOS A 31 RPM, HDPE.	87
TABLA 4.15: PESO PROMEDIO EN GRAMOS A 36 RPM, HDPE.	87



TABLA 4.16: ESPESOR PROMEDIO EN LA ZONA CRÍTICA, HDPE.	88
TABLA 4.17: GASTO DEL EXTRUSOR SIN CABEZAL A LAS RPM DEL PROCESO, HDPE.	88
TABLA 4.18: CÁLCULO DE GASTO PROMEDIO, HDPE.	90
TABLA 4.19: CÁLCULO DE PRESIÓN, HDPE.	90
TABLA 4.20: CONSTANTE EXPERIMENTAL DEL DADO.	91
TABLA 4.21: RESUMEN DE VALORES DE PRESIÓN Y GASTO A LAS RPM DEL PROCESO.	91
GRÁFICA 4.3: CURVA EXPERIMENTAL CARACTERÍSTICA DEL EXTRUSOR A LAS RPM DEL PROCESO, HDPE..	92
TABLA 4.22: TABLA DE DATOS DE LA CURVA CARACTERÍSTICA DEL DADO.	92
GRÁFICA 4.4: CURVAS EXPERIMENTALES CARACTERÍSTICAS DEL EXTRUSOR Y DADO, HDPE.....	93
TABLA 4.23: PERFIL DE TEMPERATURA, LDPE.	94
TABLA 4.24: TIEMPO EN EL DISPLAY DEL TEMPORIZADOR EN SEGUNDOS, LDPE.....	95
TABLA 4.25: TIEMPO MEDIDO CON AYUDA DEL CRONÓMETRO EN SEGUNDOS, LDPE.	95
TABLA 4.26: PESO PROMEDIO EN GRAMOS A 32 RPM, LDPE.	95
TABLA 4.27: PESO PROMEDIO EN GRAMOS A 40 RPM, LDPE.	96
TABLA 4.28: PESO PROMEDIO EN GRAMOS A 44RPM, LDPE.	96
TABLA 4.29: PESO PROMEDIO EN GRAMOS A 52 RPM, LDPE.	96
TABLA 4.30: ESPESOR PROMEDIO EN LA ZONA CRÍTICA, LDPE.	97
TABLA 4.31: GASTO DEL EXTRUSOR SIN CABEZAL A LAS RPM DEL PROCESO, LDPE.	97
TABLA 4.32: CÁLCULO DE GASTO PROMEDIO, LDPE.	98
TABLA 4.33: CÁLCULO DE PRESIÓN LDPE.	99
TABLA 4.34: RESUMEN DE VALORES DE PRESIÓN Y GASTO A LAS RPM DEL PROCESO, LDPE.....	99
GRÁFICA 4.5: CURVA EXPERIMENTAL CARACTERÍSTICA DEL EXTRUSOR A LAS RPM DEL PROCESO, LDPE	100
GRÁFICA 4.6: CURVAS EXPERIMENTALES CARACTERÍSTICAS DEL EXTRUSOR Y DADO, LDPE.	100
ESPESOR DE BOTELLAS A 22 RPM, HDPE.	116
ESPESOR DE BOTELLAS A 31 RPM, HDPE.	116
ESPESOR DE BOTELLAS A 36 RPM, HDPE.	117
ESPESOR DE BOTELLAS A 32 RPM, LDPE.	119
ESPESOR DE BOTELLAS A 40 RPM, LDPE.	119
ESPESOR DE BOTELLAS A 44 RPM, LDPE.	120
ESPESOR DE BOTELLAS A 52 RPM, LDPE.	120



ESPESOR DE BOTELLAS A 57 RPM, LDPE 121