CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

ANÁLISIS DE LÍNEAS DE POS-EXTRUSIÓN PARA LA FABRICACIÓN DE PERFILERÍA Y TUBERÍA

CASO DE ESTUDIO

PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

OPCIÓN: PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE PLÁSTICOS

PRESENTA:

IRIS CANDY YAZMÍN MALES CASTAÑEDA

CENTRO DE INFORMACIÓN

02 SEP 2011

RECIBIDO

SALTILLO, COAHUILA **AGOSTO 2011**

113

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

ANÁLISIS DE LÍNEAS DE POS-EXTRUSIÓN PARA LA FABRICACIÓN DE PERFILERÍA Y TUBERÍA

CASO DE ESTUDIO

PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

OPCIÓN: PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE PLÁSTICOS

PRESENTA:

IRIS CANDY YAZMÍN MALES CASTAÑEDA

ASESOR:

Rafael Aguirre Flores

SALTILLO, COAHUILA **AGOSTO 2011**

CENTRO DE INVESTIGACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

ANÁLISIS DE LINEAS DE POS-EXTRUSIÓN PARA LA FABRICACIÓN DE PERFILERÍA Y TUBERÍA

CASO DE ESTUDIO

PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:

ESPECIALIZACIÓN EN QUÍMICA APLICADA

OPCIÓN: PROCESOS DE TRANSFORMACIÓN DE PLÁSTICOS

PRESENTA:

IRIS CANDY YAZMÍN MALES CASTAÑEDA

EVALUADORES:

Dr. Ramón E. Díaz de León Gómez | **Dr. Eduardo Ramírez Vargas**

SALTILLO, COAHUILA **AGOSTO 2011**

ÍNDICE

PÁGINA

1. **INTRODUCCIÓN** 1
2. **OBJETIVO** 2
3. **JUSTIFICACIÓN** 2
4. **REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA** 3

4.1. Proceso de extrusión 3

4.2. Clases de materia prima 3

4.3. Líneas de extrusión para tubería y perfilería 5

4.3.1. Extrusor 5

4.3.1.1. Sistema motriz 6

4.3.1.2. Sistema de alimentación 7

4.3.1.2.1. Tolva 7

4.3.1.2.2. Garganta de alimentación 9

4.3.1.3. Cilindro o barril 10

4.3.1.4. Husillo 11

4.3.1.5. Sistema de calentamiento y enfriamiento 14

4.3.1.6. Cabezal de extrusión 16

4.3.1.7. Sistema de control 20

4.4. Líneas de pos-extrusión para perfilería y tubería 21

4.4.1. Calibración 22

4.4.1.1. Calibración por fricción 24

4.4.1.2. Calibración externa con vacio 25

4.4.1.3. Calibración externa con aire comprimido..... 28

4.4.1.4. Calibración interna..... 29

4.4.2. Enfriamiento..... 30

4.4.2.1. Enfriamiento de perfiles o sólidos..... 31

4.4.2.2. Enfriamiento para sección tubular por insuflación..... 31

4.4.2.3. Enfriamiento para sección tubular por vacio..... 32

4.4.2.4. Tensionado, enrollado y cortado..... 33

5. ESTADO DEL ARTE O ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO..... 35

6. AREAS DE OPORTUNIDAD..... 46

7. CONCLUSIONES..... 47

ANEXO A..... 48

REFERENCIAS..... 51

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA **PAGINA**

1. Línea de extrusión de tuberías y perfiles..... 5
2. Representación esquemática de un extrusor de husillo simple..... 6
3. Representación esquemática del sistema motriz de un extrusor..... 7
4. Tolvas convencionales..... 8
5. Tolva Crammer o de alimentación forzada..... 9
6. Garganta de alimentación..... 10
7. Sistema cilindro-husillo..... 10
8. Zona de entrada cónica ranurada de un extrusor monohusillo..... 11
9. Representación esquemática de un husillo con sus zonas funcionales..... 12
10. Husillos para diferentes fines..... 13
11. Disposición posible de los husillos en los extrusores de doble husillo..... 14
12. Sistema de calentamiento por bandas calefactoras..... 15
13. Sistema de enfriamiento por agua y por aire en el cilindro de extrusión..... 15
14. Cabezal para tubería y mandril..... 17
15. Dado tipo placa..... 18
16. Dado de placas múltiples..... 18
17. Boquilla anular y cabezal..... 19
18. Plato rompedor y paquete de filtros..... 20
19. Línea de extrusión y pos-extrusión..... 21
20. Secciones funcionales del dado de extrusión y el calibrador..... 22
21. Interdependencias en la calibración..... 23
22. Calibración por fricción..... 25
23. Calibración externa con vacio con un canal de aire frio..... 26
24. Calibración externa de tubería en tanque con vacío..... 27
25. Calibración externa con aire comprimido. 29
26. Calibración interna..... 30

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA **PAGINA**

1. Plásticos comúnmente utilizados en el área de extrusión..... 4
2. Datos del procesamiento de extrusión para algunos plásticos importantes..... 16

4.3 Líneas de extrusión para perfilería y tubería.

Una línea de extrusión se entiende como la totalidad de la instalación de producción para la fabricación de un extruido determinado partiendo de plástico en pellet o en polvo[2,12].

Una línea de extrusión además de un extrusor necesita una serie de equipos auxiliares que en algunos casos son comunes a todas las líneas y en otros son característicos de un producto en concreto como son: el extrusor, el dado, el calibrador, el sistema de enfriamiento, el tren de tiro y el equipo de enrollamiento o de corte (figura 1) [2,12,24].

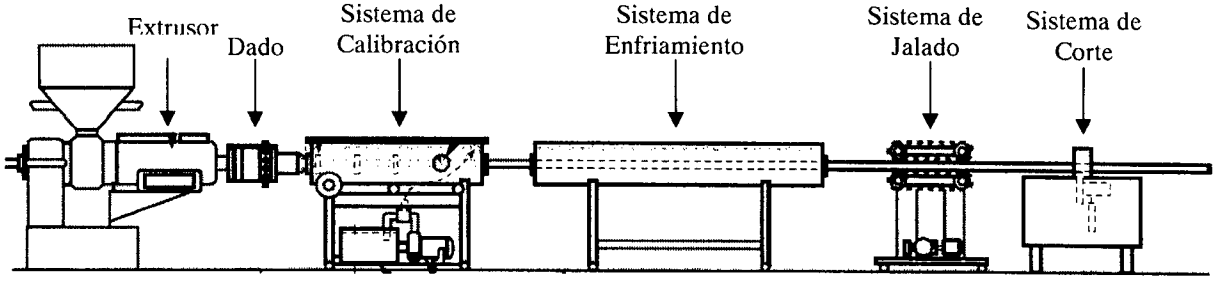

Figura 1. Línea de extrusión de tuberías y perfiles.

Muchas veces se integran otros aparatos y equipos a la línea de extrusión, por ejemplo: medidores de espesor, aparatos para marcado de datos importantes sobre tubos, punzonadores para la fabricación de ranuras en las varillas de las cortinas de enrollar, o aparatos de abocardado para la formación de unión de tuberías de PVC. Además pueden incluir equipos de manipulación del extruido, por ejemplo, brazos con ventosas para el retiro de placas o mesas de volteo para tuberías, así como equipos de apilado[1,17,24].

4.3.1 Extrusor.

Las principales partes que componen un extrusor son: el sistema motriz, el sistema de alimentación, el cilindro y el husillo, el sistema de calentamiento y enfriamiento, y el cabezal del extrusor o dado, como se observa en la figura 2[6,16,24].

un corto tiempo y no fluyan sin forma alguna. En volumen, el termoplástico mas procesado por extrusión es el PVC seguido por el PE y el PP[6,12].

En la tabla 1 se muestra un compendio de los termoplásticos más comúnmente usados en extrusión y proporciona algunos ejemplos de los productos que se pueden fabricar por este proceso[6].

Tabla 1. Plásticos comúnmente utilizados en el área de extrusión[6].

Denominación química.	***Abreviatura***	***Temperatura de procesamiento (°C)***	***Ejemplos de uso (en Extrusión)***
Acetato de celulosa	CA	160-200	Listones perfilados, laminas planas, tubería
Poliestireno (Normal)	PS	170-210	Películas biorientadas, películas espumadas
Copolímero de Estireno-Butadieno	SB	170-220	Placas, perfiles, cerdas
Terpolímero de Acrilonitrilo-Estireno-Butadieno	ABS	170-220	Placas, tubos, perfiles
Polietileno (Baja densidad)	LDPE	130-200	Tubería, placas, películas, recubrimiento de alambre, monofilamentos
Polietileno (alta densidad)	HDPE	140-220	Tubería, placas, películas, recubrimiento de alambre, monofilamentos, cintas
Polipropileno	PP	180-260	Tubería, laminas planas, placas, monofilamentos, cintas
Policloruro de vinilo	PVC rígido	180-200	Tuberías, perfiles, placas
Copolímero de Policloruro de vinilo	PVC	180-210	Tuberías, perfiles, placas
Policloruro de vinilo con plastificante	PVC flexible	150-190	Mangueras, perfiles, revestimiento de alambres y cables, películas
Polimetilmetacrilato	PMMA	160-190	Placas, perfiles, tuberías
Policarbonato	PC	300-340	Placas y perfiles
Poliamida	PA	260-300	Mangueras, recubrimientos de alambre, monofilamentos, tuberías
Poliacetal	POM	170-200	Tuberías y perfiles

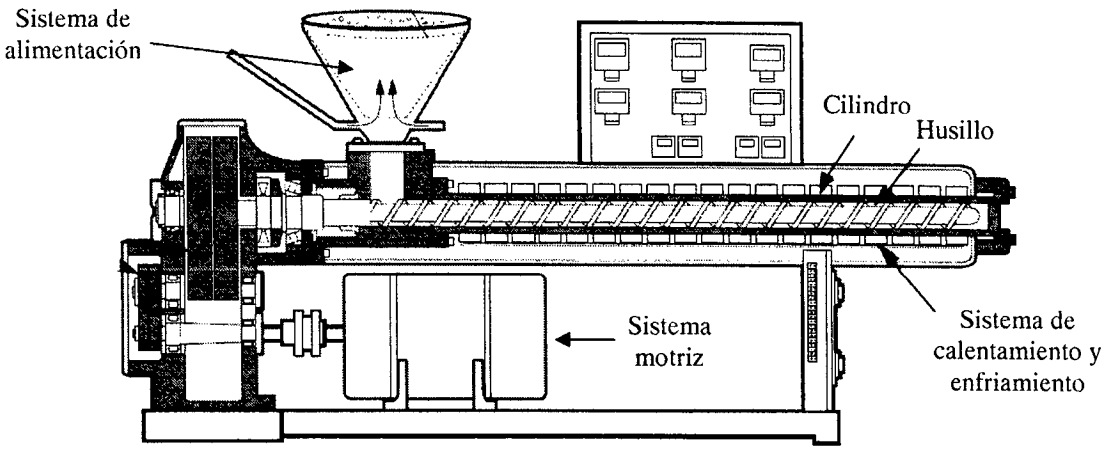

Figura 2. Representación esquemática de un extrusor de husillo simple.

4.3.1.1 Sistema motriz.

Para que el extrusor funcione, necesita un motor, un reductor de velocidad y un cojinete (figura 3). El motor del extrusor proporciona la fuerza que requiere el husillo, por regla general se instalan motores eléctricos, que de acuerdo a su tarea de transportar masas viscoelásticas, deben ser diseñados de forma robusta. Según el diámetro del husillo se colocan motores con diversas potencias por ejemplo de 10 kw para un husillo de 45 mm, o 500 kw para un husillo de 250 mm[5,6,17].

Los extrusores deben operar con diferentes velocidades, en función del tipo de plástico a usar y del dado colocado. Es por ello ventajoso instalar motores que pueden ser regulados de forma continua en su número de revoluciones. Para eso vienen al caso principalmente sistemas de accionamiento motriz eléctrico, además de los motores de corriente continua, también se instalan los de corriente alterna. Ocasionalmente se utiliza el motor hidráulico, cuando por necesidad de otros movimientos adicionales se precisa una instalación hidráulica y el extrusor no fue diseñado muy grande en razón del momento de torsión procurado[5,6,17].

Al motor se le conecta un reductor de velocidad o caja de engranaje, que consiste en una serie de engranajes de diferentes radios que reducen las revoluciones por minuto del sistema, incrementando proporcionalmente el torque del eje motriz del husillo. Estos reductores deben tener un diseño de engranes tal que la fricción, calentamiento y desgaste sean mínimos ante las

altas demandas de la operación constante del extrusor. Los engranes tienen tratamientos térmicos, endurecimiento y acabados superficiales que les permiten elevados desempeños durante el tiempo de vida. Sin embargo, el ruido y calentamiento son factores que no se han eliminado totalmente[5,6,17].

Debido a la presión que se genera al transportar el material hacia la zona del dado, el husillo recibe una tracción en dirección de la caja de engranes y la parte trasera del extrusor. Esta fuerza requiere de un sistema de soporte giratorio que se desempeñe adecuadamente ante cargas elevadas, conocido como sistema de cojinetes de empuje. Existen diversos cojinetes o rodamientos utilizados en el sistema de giro del husillo, cada uno presenta diferentes cualidades que influyen en su costo, desempeño y tiempo de vida útil[5,6,17].

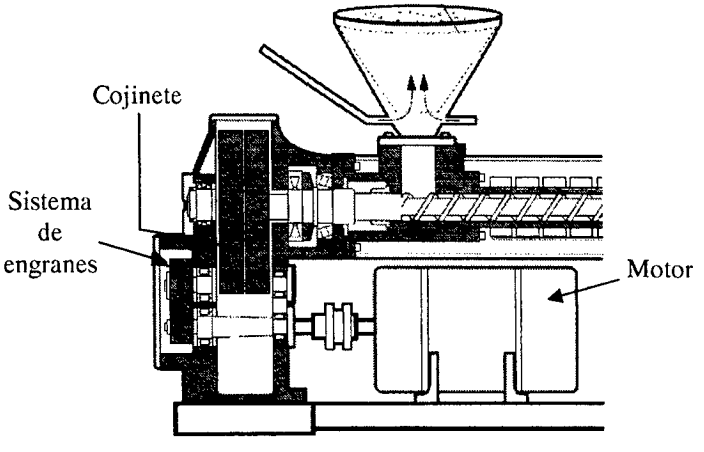

Figura 3. Representación esquemática del sistema motriz de un extrusor.

4.3.1.2 Sistema de alimentación.

El sistema de alimentación de extrusor consta de la tolva de alimentación o las tolvas dosificadoras y la garganta del extrusor.

4.3.1.2.1 Tolva.

La tolva es el depósito utilizado para introducir el polímero en forma de pellets en la máquina de extrusión. Debe tener dimensiones adecuadas para ser completamente funcional, tanto la tolva, la garganta de alimentación y la boquilla de entada deben estar ensambladas

1. INTRODUCCIÓN.

El proceso de extrusión de plásticos es un proceso de transformación considerado de alto volumen, ya que la cantidad de piezas terminales, con mínimos procesos de retrabajo, que pueden ser utilizadas en productos y ensambles de partes plásticas son altas. Un proceso de extrusión convencional puede ser dividido en dos secciones, que son el equipo de extrusión y la línea de pos-extrusión

Con el paso de los años, el proceso a evolucionado en el desarrollo de nuevos sistemas de control y entendimiento de la reología de los materiales plásticos a su paso por el equipo de extrusión, quedando de lado en la mayoría de los estudios, el entendimiento de los fenómenos en el enfriamiento y deformación en las secciones de pos-extrusión.

En la industria, se pueden presentar muchos tipos de sistemas de extrusión como pueden ser película plana, película soplada, recubrimiento de cable, filamento, perfilería y tubería, entre otros. Estos dos últimos procesos, son de los mas complicados de llevar a cabo, por el control de proceso en la etapa de extrusión, la geometría del producto (que puede cambiar si no se realiza el adecuado enfriamiento del producto), la secuencia requerida (por ejemplo, un enfriamiento superficial no muy profundo y después un retiro de calor, similar a un templado del producto), y las velocidades de deformación posibles en los equipos de jalado que se relacionan con las velocidades de producción del equipo extrusor. Además, en la pos-extrusión se tiene la capacidad de controlar no solo la forma del producto en función al control del hinchamiento del material plástico en la salida del dado, sino que también se controla y regula la orientación molecular que define muchas de las propiedades físico-mecánicas de los productos.

Los sistemas de extrusión convencionales, usados en la actual industria plástica, comúnmente utilizan procesos de pos-extrusión que son de una manera fiel "artesanales", sistemas en los que los técnicos responsables de los equipos u operarios ajustan la calidad de estos sistemas con alambres, pedacería de metal o elementos que de ninguna forma volverían a estar en esa posición en un futuro en una segunda ocasión de producción.

2. OBJETIVO.

Realizar un análisis de los procesos de pos-extrusión existentes y definir los conceptos de uso de ellos en función a los materiales plásticos para la manufactura de perfilería y tubería.

3. JUSTIFICACIÓN DEL CASO DE ESTUDIO.

La definición de los procesos de pos-extrusión existentes para la fabricación de productos como perfilería y tubería en función a los tipos de materiales plásticos que se vayan a transformar, amorfos o cristalinos, generaría un conocimiento que permitiría facilitar la toma de decisión entre cuales sistemas son los más adecuados o eficientes para cada material-proceso.

Es sabido que existen, en el caso de procesos de pos-extrusión de perfilería, sistemas sumergidos bajo líquido y sistemas secos, siendo los primeros los más eficientes por la capacidad de extracción de calor que presentan. Éste es un ejemplo de una condición que debería de conocerse, pero que se encuentra aleatoria en función a la complejidad de la forma del perfil y no al gasto del extrusor.

Normalmente en las plantas de extrusión ya se cuenta con sistemas de pos-extrusión y la innovación se da en nuevas formas de productos y nuevos materiales, pero aquí se presenta la pregunta: ¿la tecnología es la adecuada?

El presente caso de estudio se justifica, como la compilación de información de los procesos de pos-extrusión que existen para los distintos tipos de extrusión de perfilería.

4. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

4.1 Proceso de Extrusión

Desde el punto de vista de los plásticos, la extrusión es claramente uno de los procesos más importantes de transformación. En este proceso el polímero es alimentado a través de una tolva al barril, donde por medio del giro del husillo, el plástico es transportado, fundido y plastificado. Posteriormente es forzado a pasar a través de un dado que le da la forma y las dimensiones requeridas para finalmente ser sometido a una etapa de calibración/enfriamiento, que proporciona estabilidad al producto extruido y remueve el calor excedente, evitando así cualquier deformación posterior del producto[1,5-9,12,15-17,24]..

Entre los productos que se pueden manufacturar mediante extrusión se encuentran las tuberías, mangueras, fibras, películas, perfiles, filamentos, etc. La característica principal es que los productos obtenidos deben tener una sección transversal constante en cualquier punto de su longitud como tuberías, perfiles y láminas; o bien periódica como la tubería corrugada, donde quedan excluidos todos aquellos con formas irregulares o no uniformes[1,4,6,8-10,17,24].

El proceso de extrusión también se utiliza para preparar mezclas (concentrados y formulaciones), para pelletizar, para reciclar y hasta para producir polímero utilizando el extrusor como reactor continuo[1,4,6,8-10,17,24].

4.2 Clases de materia prima

Normalmente la materia prima utilizada para este proceso es en forma de pellets, aunque también es posible llevar a cabo este proceso de forma exitosa con polvos u hojuelas compactadas. Esta materia puede clasificarse de muchas maneras, por ejemplo, por el tipo de polímero, por sus propiedades, por su presentación y dimensiones y por su calidad, entre otros[1,4,6].

Básicamente todos los termoplásticos pueden ser extruidos, la única limitante es que deben ser de elevada viscosidad, esto con el fin de que al salir del dado, mantengan su conformación por

perfectamente y diseñadas de manera que proporcionen un flujo constante de material. Esto se consigue más fácilmente con tolvas de sección circular, aunque son más caras y difíciles de construir que las de sección rectangular (figura 4) [1,5,6,9,17].

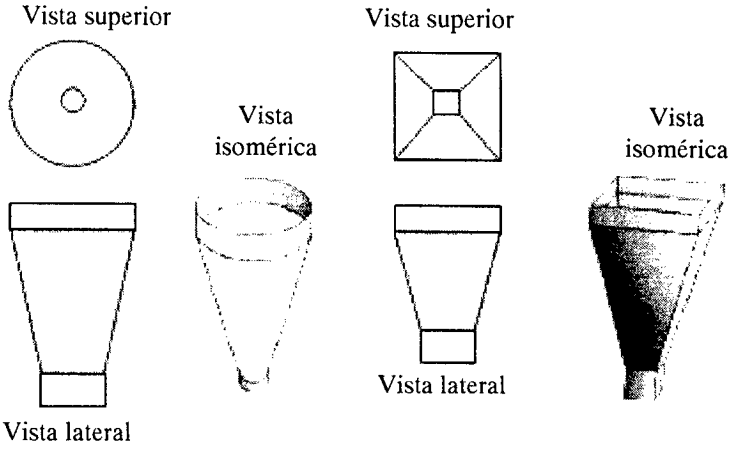

Figura 4. Tolvas convencionales.

Además, algunas operaciones importantes se realizan en este componente, generándose la siguiente clasificación:

- Convencional
- Dosificadora
- Secadora
- Crammer
- Vibratoria

En caso de presentarse aglomeraciones, como en los materiales pulverizados, una tolva con sistema vibratorio puede resolver el problema, rompiendo los puentes formados por la compactación y permitiendo la caída de la materia prima a la garganta de alimentación. Sin embargo, si el material a procesar es problemático aún con la tolva en vibración, puede ser debido a la falta de homogeneidad de las partículas que se van a alimentar, en este caso la tolva de alimentación forzada tipo Crammer (figura 5) es la única que puede impulsar los fragmentos a dirigirse al interior del extrusor, empleando un tornillo para lograr la alimentación[6,17].

Las tolvas de secado son usadas para eliminar la humedad de los plásticos higroscópicos que estén siendo procesados, sustituyendo a equipos de secado independientes de la máquina. Las tolvas gravimétricas con mezclado pueden optimizar el proceso de extrusión, garantizando una alimentación constante al extrusor, con una calidad constante de producto. Otros equipos auxiliares son los dosificadores de aditivos a la tolva y los imanes o magnetos para la obstrucción del paso de metales ferrosos, que puedan dañar el husillo y otras partes internas del extrusor[1,6,17].

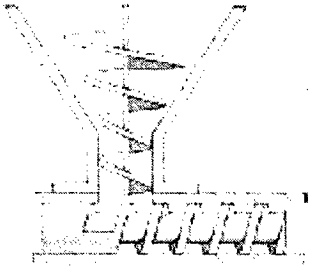

Figura 5. Tolva Crammer o de alimentación forzada.

4.3.1.2.2 Garganta de alimentación.

El cilindro puede estar construido en dos partes, la primera se sitúa debajo de la tolva y se denomina garganta de alimentación. Suele estar provista de un sistema de refrigeración para mantener la temperatura de esta zona lo suficientemente baja, para que los pellets no se adhieran a las paredes internas de la extrusora[1,17].

La garganta de alimentación está conectada con la tolva a través de la boquilla de entrada o de alimentación. Esta boquilla suele tener una longitud de 1.5 veces el diámetro del cilindro y una entrada de 0.7 veces el mismo (figura 6), y suele estar desplazada del eje del tornillo para facilitar la caída del material a la máquina[1,17].

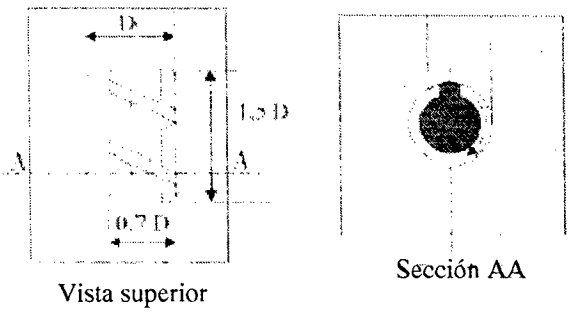

Figura 6. Garganta de alimentación.

4.3.1.3 Cilindro

El cilindro alberga en su interior al husillo (figura 7), y constituye el cuerpo principal de la máquina de extrusión. Según el empleo, los cilindros se pueden realizar en una o dos piezas. La superficie del cilindro debe ser muy rugosa para aumentar las fuerzas de cizalla que soportará el material y permitir así que este fluya a lo largo del extrusor. Para evitar la corrosión y el desgaste mecánico, el cilindro suele construirse de aceros muy resistentes y en algunos casos viene equipado con un revestimiento bimetálico que le confiere una elevada resistencia. Para el procesamiento del PVC flexible y en el caso de los cilindros desgasificadores para PS, SB, ABS Y PMMA se recurre a cilindros de una pieza[1,6,9,15,17].

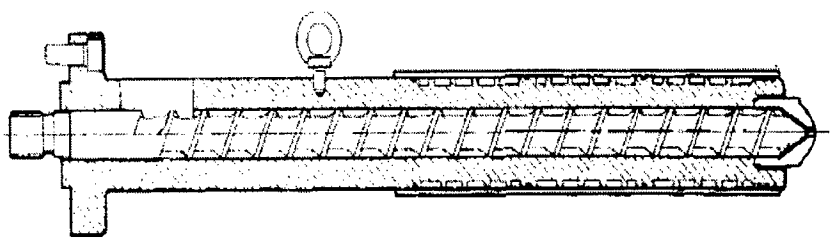

Figura 7. Sistema cilindro-husillo.

La mayoría de los cilindros monohusillo para el procesamiento de poliolefinas son, sin embargo, formados por dos partes: un buje de entrada corto y ranurado de aproximadamente 3D de largo y el tubo liso del cilindro. Con el uso del buje ranurado de entrada (ver figura 8), se hace posible aumentar la capacidad de alimentación del extrusor. Las ranuras pueden tener secciones semicirculares o rectangulares, siendo estas últimas las más preferidas. La función de las ranuras es impedir que el material gire con el tornillo. De esa forma se hace efectivo el

empuje de los flancos sobre los pellets o el polvo, obteniéndose así una alimentación forzada[5,6,17].

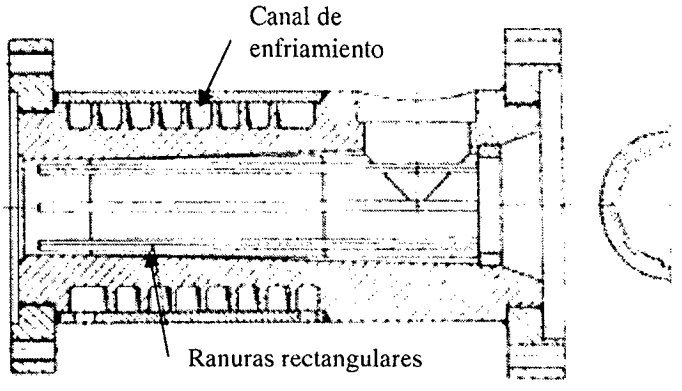

Figura 8. Zona de entrada cónica ranurada de un extrusor monohusillo.

Todo el cilindro está fijado firmemente al bloque de transmisión y posee en la zona de entrada, una abertura en forma de agujero alargado con un largo de 1.2 a 1.6 D, sobre el que se coloca la tolva. Y es capaz de operar normalmente a presiones hasta de 10,000 psi (700 kg/cm^2), aunque algunos están diseñados para soportar hasta 20,000 psi[6].

4.3.1.4 Husillo.

El husillo o tornillo consiste en un cilindro largo rodeado por un filete helicoidal (figura 9). El husillo es una de las partes más importantes ya que contribuye a realizar las funciones de transportar, calentar, fundir y mezclar el material y debe tener giro libre dentro del cilindro. El claro entre el diámetro interno del cilindro y el diámetro externo del husillo es generalmente de 0.003 a 0.005 pulgadas (0.001 pulgadas de claro por pulgada de diámetro del husillo) [1,5,6,9,15].

La estabilidad del proceso y la calidad del producto que se obtiene dependen en gran medida del diseño del husillo. Los parámetros más importantes en el diseño del husillo son su longitud (L), diámetro (D), el ángulo del filete (θ) y canal (w).

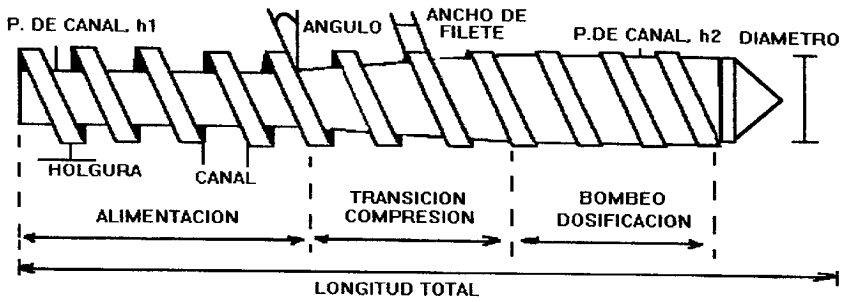

Figura 9. Representación esquemática de un husillo con sus zonas funcionales.

El husillo presenta por lo menos tres zonas funcionales:

- **Alimentación:** Transporte de Sólidos.
- **Transición ó compresión:** Plastificación ó fusión del plástico.
- **Bombeo ó Dosificación:** Transporte de plástico fundido.

La zona de alimentación es la más cercana a la tolva, en la cual la profundidad de canal del husillo es máxima. Tiene como objetivo principal compactar el alimento en una forma solida densa y transportarlo hacia la siguiente zona a una velocidad adecuada. La zona de transición o compresión es la zona intermedia en la cual la profundidad del canal disminuye de modo gradual. Conforme el material sólido va compactándose en esta zona el aire que pudiera quedar atrapado escapa del material vía la tolva de alimentación. En la zona de transición, además, tiene lugar la fusión del material. La zona de dosificación se sitúa al final, en la parte más cercana a la boquilla y tiene una profundidad de canal muy pequeña y constante. En esta zona, el material fundido es homogeneizado y presurizado para forzarlo a atravesar a presión la boquilla de conformado[1,6,9,12].

Hay que tener presente que esta asignación de funciones a cada una de las zonas del extrusor no es estricta; por ejemplo, el transporte, presurización y homogeneización se producen a lo largo de toda el extrusor. Los extrusores actuales pueden operar entre 10 y 500 rpm y según su tamaño, pueden proporcionar caudales de 2000 Kg/h de material[6].

Normalmente el husillo no viene acompañado de ningún sistema de calentamiento o enfriamiento, aunque en algunos casos se emplean husillos huecos por los que se hace circular un fluido refrigerante o calefactor[6].

Los materiales termoplásticos que se usan en el proceso de extrusión difieren notablemente entre sí. La elasticidad, el calor específico, coeficiente de fricción, temperatura de fusión, viscosidad del fundido, etc., cubren un amplio rango de valores, y puesto que todas estas propiedades tienen su importancia en el momento de diseñar el tornillo, es lógico que sea necesario utilizar diferentes tipos de tornillos para trabajar adecuadamente cada material. En la práctica es muy raro que un tornillo determinado sea adecuado para trabajar con materiales muy diversos; de hecho, cada tornillo se diseña o elige para trabajar con una determinada combinación boquilla/material, como se muestra en la figura 10[6,17].

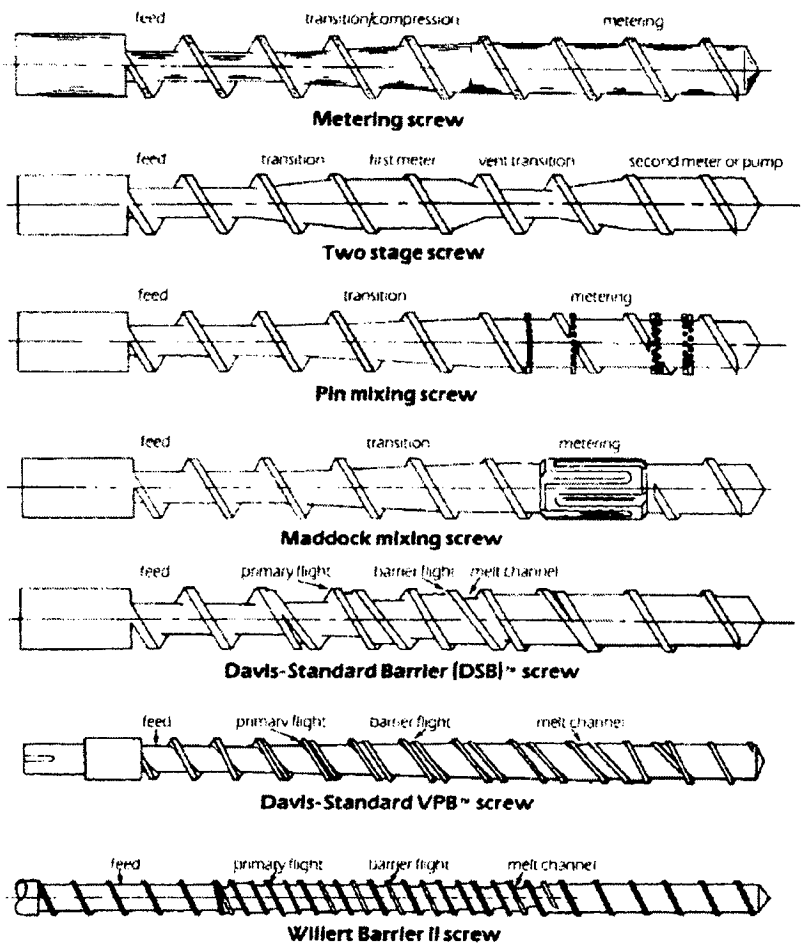

Figura 10. Husillos con diferente partes mezcladoras.

En la figura 11 se muestran algunas de las posibles variables. Los extrusores de doble husillo presentan posibilidades que a menudo superan en gran medida a los de un solo husillo. Entre las ventajas que presentan se incluye una buena capacidad de mezclado y desgasificación, y un buen control del tiempo de residencia y distribución. Algunas desventajas de estos extrusores son su precio, superior al de los de husillo único y el hecho de que sus prestaciones son difíciles de predecir[1,6].

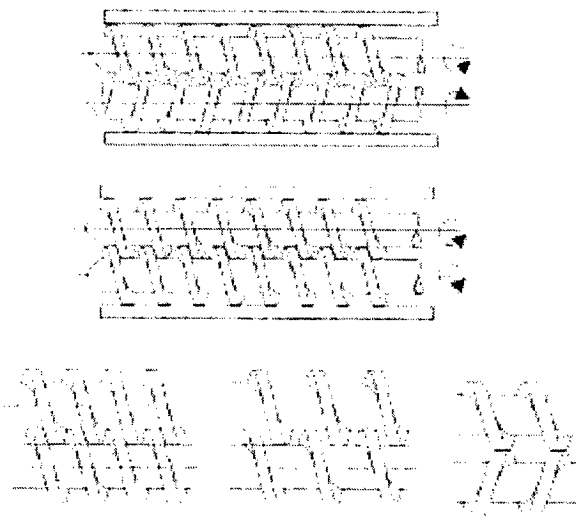

Figura 11. Disposición posible de los husillos en los extrusores de doble husillo; giro contrario y giro en paralelo; diferentes grados de interpenetración de los husillos.

4.3.1.5 Sistema de calentamiento y de enfriamiento.

El cilindro por lo general posee sistemas de transferencia de calor. El calentamiento se puede realizar mediante bandas calefactoras localizadas en toda su longitud, las que se ajustan y controlan la temperatura deseada, cada una independientemente, por medio de controladores de temperatura como se muestra en la figura 12, y también aunque es menos usual, mediante radiación o encamisado con fluidos refrigerantes o calefactores. El cilindro suele dividirse en varias zonas de calefacción, al menos tres, con control independiente en cada una de ellas, lo que permite conseguir un gradiente de temperatura razonable desde la tolva hasta la boquilla[5,6,17].

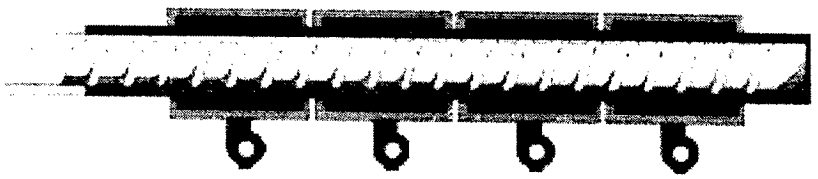

Figura 12. Sistema de calentamiento por bandas calefactoras.

Para los plásticos con un rango de temperaturas de fusión muy estrecho, es inevitable tener que reducir rápidamente eventuales picos de temperatura. Por esta razón son equipados comúnmente con sistemas de enfriamiento para cada zona, con lo que se puede regular exactamente las temperaturas. El enfriamiento en la menor parte de las ocasiones se hace con líquidos, ya que aunque tengan una mayor capacidad para eliminar calor que el aire, la temperatura es más difícil de controlar. Normalmente se usan soplantes como los representados en la figura 13. Hay que tener en cuenta que los sensores de control de temperatura quedan situados en el cilindro, por lo que la temperatura del material será siempre superior a la que indican los controles. La zona que esta inmediata, junto a la tolva, es enfriada permanentemente durante el funcionamiento del extrusor, para evitar una fusión anticipada del plástico en la entrada del cilindro o en el eje del husillo[5,6,17].

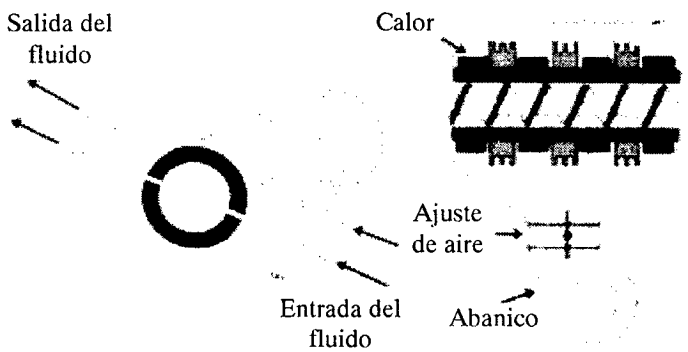

Figura 13. Sistema de enfriamiento por agua y por aire en el cilindro de extrusión.

En la tabla 2 se pueden obtener las temperaturas en el cilindro, así como las presiones en el extremo del husillo, para el procesamiento de las plásticos más importantes para extrusión[6].

Tabla 2. Datos de procesamiento de extrusión para algunos plásticos importantes[6].

Material	*Producto*	*Temperaturas (°C)* *Zona 1*	*Zona 2*	*Zona 3*	*Zona 4*	*Cabezal*	*Matriz*	*Presión (bar)*
ABS	Caños, placas,	175	195	205	205	200	210	150 a 200
	perfiles	170	175	180	185	180	190	200 a 250
SB	Placas,	170	180	195	200	195	205	150 a 250
	Cerdas	175	220	220	230	230	240	250 a 300
PE LD	Caños, cuerpos soplados,	125	125	130	136	130	135	100 a 150
	Películas sopladas,	125	135	135	145	145	145	100 a 170
	Películas planas,	155	165	180	195	195	200	150 a 250
	Forrado de alambres,	160	210	230	240	230	235	250 a 350
	Monofilamentos	160	200	220	240	230	240	250 a 350
PE HD	Caños, cuerpos soplados,	140	160	165	165	165	170	100 a 170
	Placas,	220	190	170	165	165	170	100 a 170
	Películas sopladas,	140	160	170	185	180	185	150 a 200
	Forrado de alambres,	200	210	240	250	240	245	250 a 400
	Monofilamentos	200	210	240	250	240	250	250 a 400
PP	Caños,	180	200	215	225	225	235	150 a 200
	Películas planas	190	220	245	265	265	265	200 a 300
	Monofilamentos,	200	230	250	270	270	270	300 a 400
PVC P (Polvo)	Granulados,	140	150	160	160	155	155	50 a 100
	Forrado de alambres,	210	185	175	155	180	190	150 a 250
PVC P (Gran.)	Mangueras, perfiles,	180	170	160	150	160	160	60 a 120
	Forrado de alambres	230	180	170	150	180	190	150 a 250
PVC U (Polvo)	Granulados,	185	175	165	165	160	160	75 a 150
	Caños, perfiles	190	180	170	165	170	180	100 a 200
PVC U (Gran.)	Caños, Perfiles, placas	155	165	175	180	180	185	100 a 200
PA (Punto de fusión 215 °C)	Mangueras,	275	245	235	225	225	225	150 a 250
	Forrado de alambres,	260	270	280	290	290	300	250 a 300
	Fibras, Monofilamentos,	265	275	290	300	300	300	250 a 350
CA	Películas planas	160	175	195	200	200	205	170 a 200
PMMA	Placas	160	165	170	170	170	180	50 a 100
POM	Caños, perfiles	172	190	205	200	200	200	50 a 100

4.3.1.6 Cabezal del extrusor.

El cabezal del extrusor o dado de extrusión es la pieza situada al final del cilindro, que se encuentra sujetando a la boquilla y por lo general manteniendo el plato rompedor. Generalmente va atornillado al cilindro. El perfil interno del cabezal debe facilitar lo más posible el flujo del material hacia la boquilla. Se pueden distinguir cuatro tipos de cabezal en los equipos para la producción de tubería: el cabezal con mandril-araña, el cabezal mandril en espiral, el cabezal con alimentación lateral y el cabezal o dado con paquete de mallas. Cada uno de estos diseños proporciona diferentes patrones de flujo para el plástico, debiendo seleccionarse el tipo más adecuado para evitar efectos de degradación del polímero o defectos de calidad en el producto[6,9,17].

Básicamente un dado para tubería consta de un cilindro externo y un mandril-araña (figura 14), con una separación entre ellos por donde fluye el plástico. En la salida se encuentra un aro

centrador que tiene la función de regular el espesor del producto, por medio de tornillos en la periferia[5,6,9].

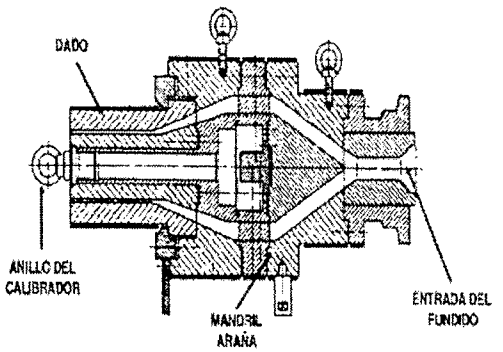

Figura 14. Cabezal para tubería y mandril.

En un corte longitudinal del dado se pueden apreciar los canales de flujo de plástico. El único punto de soporte del mandril central o torpedo son las patas de araña que se ubican muy cerca del punto donde el plástico inicia el flujo en forma de tubo. Los soportes del mandril deben tener la resistencia mecánica para trabajar a una alta presión sin sufrir deflexiones ni movimientos que puedan afectar la apariencia final del tubo[5,6].

Después del paso del material fundido por los soportes del mandril debe existir un canal suficientemente largo para lograr que las líneas de unión que forman las corrientes que se reúnen al pasar las patas de la araña se desvanezcan, evitando así, marcas indeseables en la superficie y zonas frágiles del tubo por mala adhesión de las corrientes[5,6].

El anillo del dado y el mandril deben conservar una posición concéntrica durante toda la operación, para mantener constante el espesor de la tubería en toda la periferia. Por otra parte, los dados para la extrusión de perfiles pueden ser dados de ranura o dados de placa, dados en etapas o de placas múltiples, o dados con sección transversal gradual o desvanecida. Estos tres tipos de dados muestran características que los hacen aptos para servicios diferentes[5,6,17].

- Dados de ranura o dados de placas: son aquellos que se forman de una sola placa en la que se practica una abertura con la forma del perfil deseado. Son recomendados para

proyectos de bajo volumen, donde la precisión dimensional no es una exigencia y preferentemente para resinas con buena resistencia térmica (figura 15) [17].

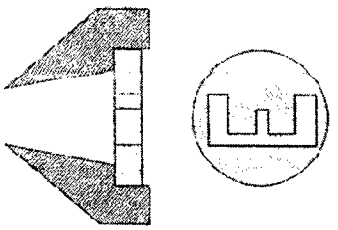

Figura 15. Dado tipo placa.

- Dados en etapas o de placas múltiples: son similares al anterior, pero utilizando varias placas que paulatinamente y en forma escalonada van acoplándose desde una forma circular del flujo del plástico hasta la placa que tiene la figura del perfil. Estos dados permiten el trabajo a mayores velocidades y con mayores características del producto. Además es poco recomendable para el procesamiento de resinas sensibles (figura 16) [17].

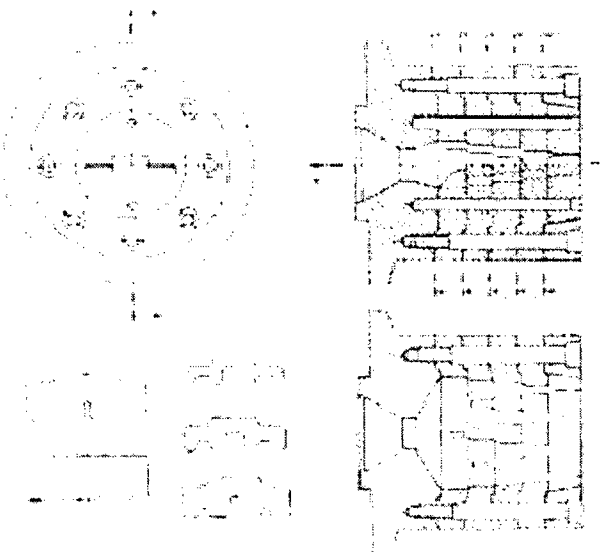

Figura 16. Dado de placas múltiples.

- Dados con sección transversal gradual o desvanecida: se compone de un bloque metálico con un distribuidor que gradualmente proporciona la forma del perfil deseado sin presentar escalonamientos[17].

La función de la boquilla es la de moldear el plástico. Las boquillas se pueden clasificar por la forma del producto, teniendo así boquillas anulares (para la fabricación de tuberías o recubrimientos de materiales cilíndricos), boquillas planas (con las que se obtienen planchas y laminas), boquillas circulares (con las que se obtiene fibras y productos de forma cilíndrica), etc[1,17].

Las dimensiones de la boquilla no son exactamente las mismas que las del producto extruido. Hay varias razones para ello: el estiramiento del material, el enfriamiento y el fenómeno de relajación contribuyen a que el material cambien de tamaño e incluso de forma. Excepto para las boquillas circulares es prácticamente imposible fabricar una boquilla en la que la geometría del canal sea tal que la boquilla puede ser empleada para un numero amplio de materiales y de condiciones de operación. En cualquier caso el diseño de la boquilla debería tener en cuenta en la medida de lo posible una serie de consideraciones como son emplear radios amplios en todas las esquinas, evitar canales estrechos o pequeños y partes profundas[1,7,,17].

La figura 17 muestra un sistema cabezal-boquilla de forma anular. En la figura, el material fluye del cilindro a la boquilla a través del torpedo, situado en el cabezal. La sección transversal de los soportes del torpedo se diseña para proporcionar el flujo de material a velocidad constante[1,7].

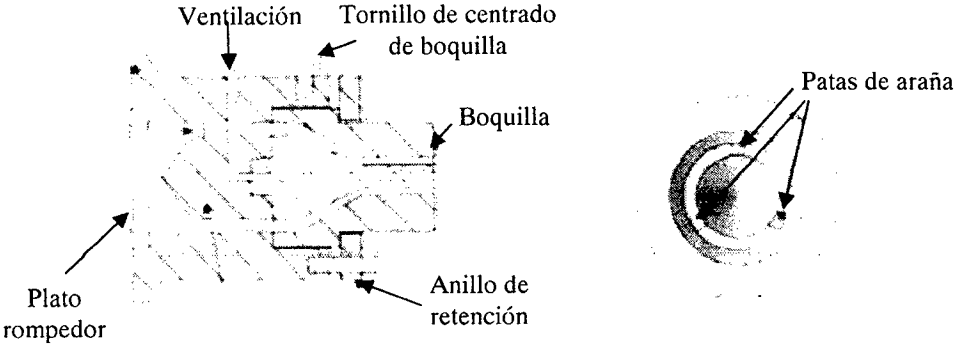

Figura 17. Boquilla anular y cabezal.

El plato rompedor es un elemento muy sencillo y al mismo tiempo muy importante en el proceso de extrusión. Consiste en un disco delgado de metal con una serie de perforaciones circulares por donde entra el material y se separa para volver a unirse después en el otro extremo del plato. Tiene dos funciones básicas, la primera es detener el flujo en espiral que tiene el material plástico a la salida del extrusor y evitar deformaciones en el producto por la inercia helicoidal que el husillo imparte a la masa plástica; y la segunda, es servir de soporte a un paquete de filtros cuyo fin principal es atrapar los contaminantes para que no salgan con el producto extruido (figura 18). Los filtros además mejoran el mezclado y homogenizan el fundido. Los filtros van apilados delante del plato rompedor, situándose primero los de malla más ancha, reduciéndose el tamaño de malla progresivamente. Detrás se sitúa un último filtro también de malla ancha y finalmente el plato rompedor que soporta los filtros[1,17].

Conforme se ensucian las mallas es necesario sustituirlas para evitar una caída de presión excesiva y que disminuya la producción. Por ello, el diseño del plato debe ser tal que pueda ser reemplazado con facilidad[1,17].

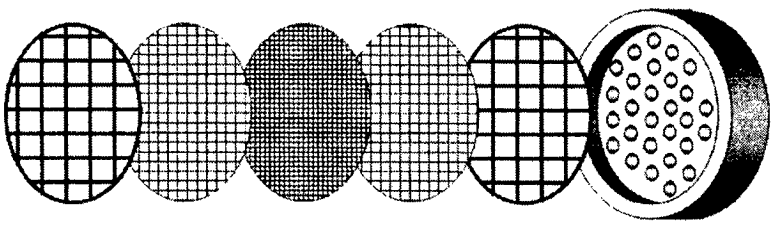

Figura 18. Plato rompedor y paquete de filtros.

La velocidad de producción esta limitada por lo general por la velocidad a la que el material puede ser enfriado, que básicamente depende del diámetro y del espesor de pared de la pieza. Por ejemplo para tubos de diámetro de 2.5 mm y 0.4 mm de espesor de pared la velocidad de extrusión puede ser de 4 ms^{-1}, mientras que para tuberías de 1 mm de diámetro externo y 60 mm de espesor de pared una velocidad de producción típica podría ser de 3 ms^{-1}[5,6,17].

4.3.1.7 Sistema de Control.

Los parámetros principales en extrusión son la temperatura y la presión, además de la velocidad del husillo. La temperatura del barril se mide con termopares a lo largo del barril. La

del plástico normalmente se mide usando un termopar en contacto con el material fundido, a través de orificios perforados en el barril o en el dado. La presión se mide normalmente al final del extrusor o en el dado[17].

4.4 Líneas de pos-extrusión para perfiles y tuberías.

Como se mencionó anteriormente, una línea de extrusión además de un extrusor necesita una serie de equipos auxiliares tales como el calibrador, el sistema de enfriamiento, el tren de tiro y el equipo de enrollamiento o de corte, conocidos como sistemas de pos-extrusión (figura 19)[2,3,6,12,25].

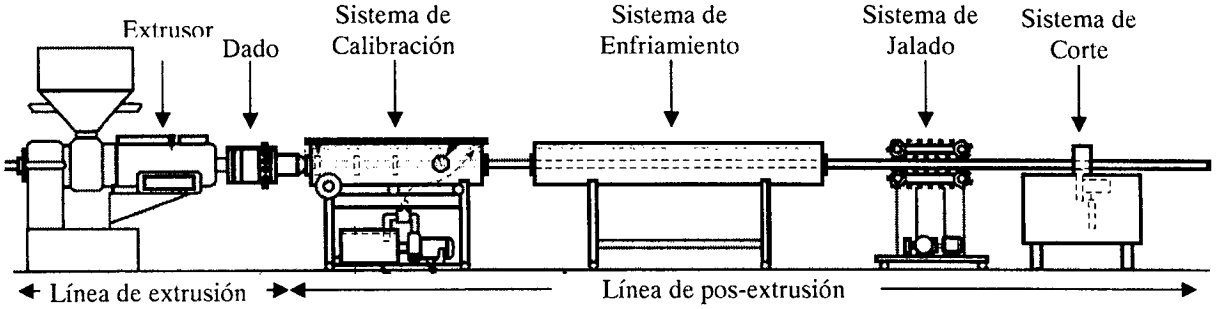

Figura 19. Línea de extrusión y pos-extrusión.

Una vez que la masa fundida sale del dado, entra a una unidad de formación o calibrado, que asegura la exactitud de las dimensiones del producto, y posteriormente entra a una tina de enfriamiento, cuya función es la de remover el calor excedente del producto extruido, evitando así cualquier deformación posterior. Antes de la tina de enfriamiento, no es posible aplicar ningún esfuerzo o presión al producto sin correr el riesgo de provocarle una deformación permanente. En la figura 20, se muestra una esquematización de las secciones funcionales del calibrador[2-4,6,9,11,12,24-29].

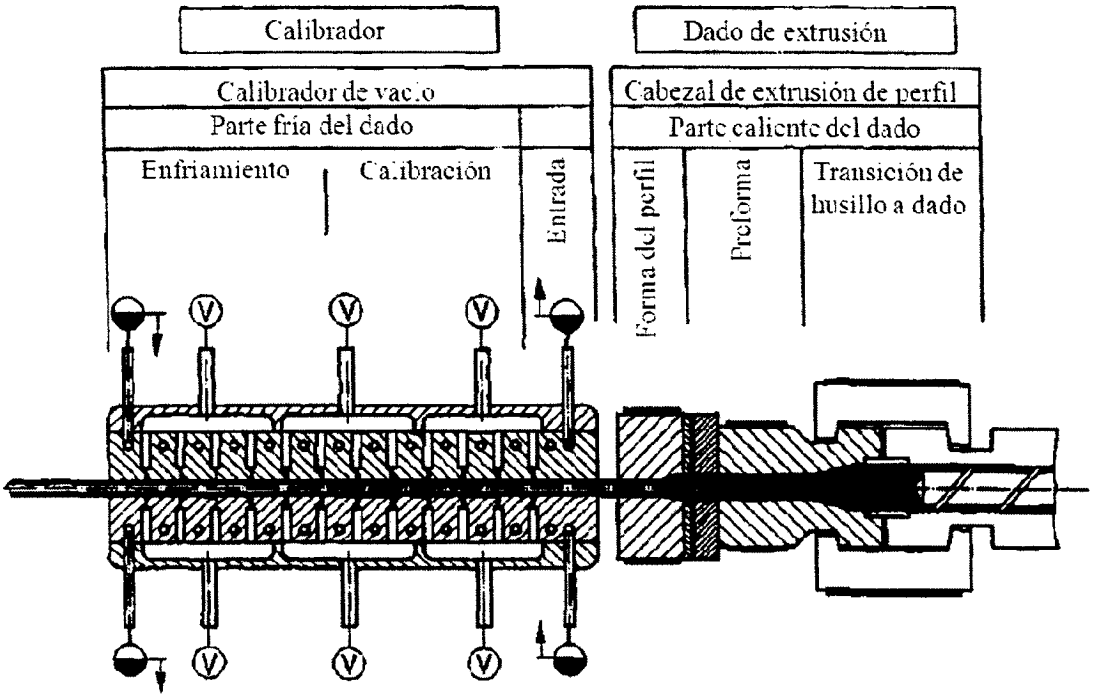

Figura 20. Secciones funcionales del dado de extrusión y el calibrador.

Junto a la tina de enfriamiento, un elemento de tiro aplica una tensión o jalado constante al material para que siempre esté en movimiento. Y por último dependiendo de la flexibilidad del producto, se encuentra una unidad de corte o de enrollado, que sirve para separar el tubo o perfil en largos determinados[2-4,6,9,11,12,24-29].

4.4.1 Calibración.

La calibración casi siempre significa que el extruido es jalado a través de uno o más calibradores, elaborados principalmente a partir de metales (cobre, acero, aluminio). La superficie de calibración, que está en contacto con el extruido es ajustada a su forma. Hay esencialmente dos métodos para la disipación de calor en este proceso: la calibración seca y húmeda[2-4,6-11,17,21-26].

En la calibración en seco, el extruido no tiene contacto directo con el medio de enfriamiento, pero el calor contenido en el fundido es retirado estrictamente por el contacto con la superficie metálica de los canales de enfriamiento del calibrador y por lo tanto de la superficie en el medio de enfriamiento[2,3,9,21,22,26].

En la calibración húmeda, el calor del fundido es transferido al menos parcialmente, dependiendo del método, directamente por convección al refrigerante. La parte restante del calor es quitado por el contacto con el calibrador (o por una película de líquido refrigerante en las paredes). La intensidad de enfriamiento indirecto por el calibrador se ve afectada definitivamente por el contacto térmico entre las superficies del extruido y el calibrador[2,3,9,17,21,22].

En particular, en la entrada de la sección de calibración, donde la temperatura del extruido es relativamente alta y la capacidad de carga del perfil es relativamente baja (ya que sólo una pequeña parte de ella se ha solidificado), las fuerzas de jalado (relativamente baja) conducen a un aumento en el estiramiento longitudinal de la cadena (marcado con un + en la figura 20). Estas deformaciones no podrán relajarse completamente debido al subsecuente enfriamiento, que afecta a la contracción del extruido en un alto grado. Debido a la extensión longitudinal y la contracción térmica las dimensiones del extruido en la dirección perpendicular a la dirección del jalado son reducidas (marcados con un - en la figura 21). Esto conduce generalmente a una reducción de las fuerzas normales en el calibrador y por lo tanto a una reducción de la fricción y el contacto térmico[2,3,11,21,22].

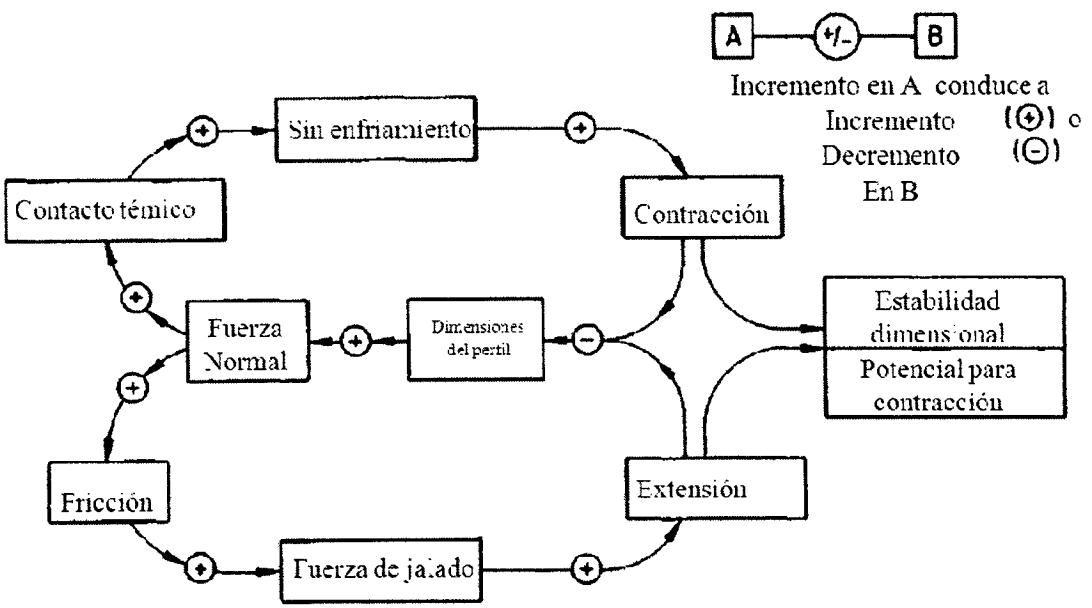

Figura 21. Interdependencias en la calibración.

La reducción en las dimensiones en la dirección transversal (espesor de pared, dimensiones del contorno) es a menudo impedido por el correspondiente sobre-dimensionamiento de la sección de enfriamiento, obteniendo así un producto con dimensiones adecuadas. La línea de calibración también puede ser gradual (calibradores largos) o puede consistir en varios calibradores en serie con cambios de dimensiones graduales para que coincida con las dimensiones del extruido cambiante con el enfriamiento progresivo[3,21,22].

Aun cuando el enfriamiento es muy intenso el extruido debe mantenerse en el calibrador hasta que su estabilidad interna sea lo suficientemente alta como para resistir tensiones externas (gravedad, fuerza de jalado) y tensiones internas, sin un cambio excesivo en sus dimensiones. Finalmente, el tiempo mínimo de calibración obtenido a partir de lo anterior, junto con la longitud máxima de la sección de calibración definen la velocidad alcanzable de la línea[3,11,21,27].

Con el fin de conseguir una velocidad de la línea tan alta como sea posible, la sección de calibración se debe enfriar:

- Con un mínimo de fricción.

- Lo más intensamente posible.

La calibración se ajusta a los requerimientos especiales relativos a la forma del extruido y el material utilizado. Los métodos de calibración usados hoy en dia, se explican a continuación[3,21]:

4.4.1.1 Calibración por fricción.

Los perfiles abiertos, pero también los huecos sencillos, se pasan a través de una serie de placas de contorno calado, las que desde atrás de placa en placa van reduciendo en forma insignificante el contorno interior (figura 22). En esto hay un pequeño inconveniente, es necesario que la velocidad de estirado sea algo superior a la de la salida del extrusor. A fin de enfriar el extruido, las placas calibradoras se colocan muchas veces dentro de un baño de agua, o se les rocía con duchas. Al igual que con todos los procesos de calibración, las velocidades

de línea a las que se puede llegar, depende en gran medida de la geometría de los perfiles. Las velocidades aproximadas para la calibración por fricción son de 0.05 a 0.075 m/seg para el espesor de pared de 1 mm y de 0.08333 a 0.01166 m/seg para el espesor de pared de 4 mm. Las rampas deben ser enfriadas con agua que fluye en contra de la dirección de extrusión. Un perfil abierto se puede sacar solamente de un lado del equipo de calibración por fricción. Con el fin de evitar la posible distorsión del perfil, del lado opuesto de la calibración se enfría con aire ya que el enfriamiento por agua puede ser muy intenso en este caso[3].

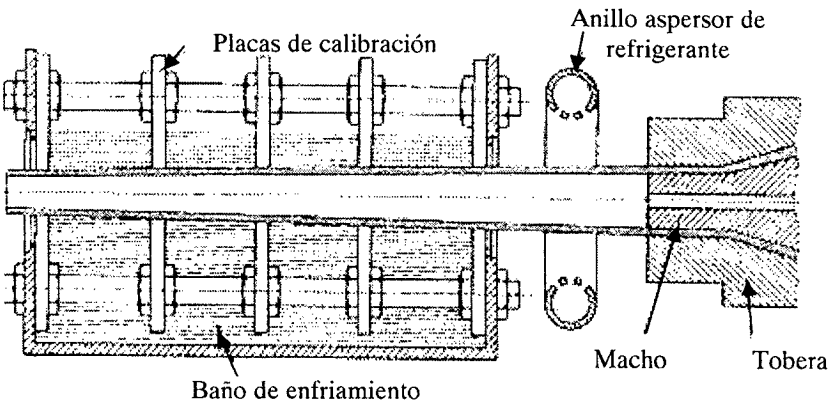

Figura 22. Calibración por fricción.

La calibración externa general significa que las dimensiones externas del perfil de extrusión son fijadas por el equipo de calibración. Este tipo de calibración ha sido universalmente aceptada por una serie de ventajas de procesamiento. Esto es particularmente cierto en la producción masiva de productos, tales como tubería plástica, que están estandarizados en función del diámetro exterior. Las formas más importantes de calibración para estos son: la calibración por vacío y la calibración por aire comprimido con tapón[3,6,7].

4.4.1.2 Calibración externa con vacío.

La calibración externa con vacío (figura 23) es el método más común de calibración. El contacto entre el sistema de calibración y el perfil extruido necesario para su enfriamiento y tamaño, se logra mediante la aplicación de vacío al equipo de calibración. En este proceso, el equipo puede rodear completamente el perfil (calibrado externo cerrado), el vacío es aplicado a través de perforaciones finas o aberturas en la pared circundante, al ingresar el plástico reblandecido en el calibrador, el vacío externo provoca un ligero hinchamiento del tubo hasta

alcanzar firmemente las paredes del calibrador, mientas el agua de enfriamiento elimina el calor de la tubería y la solidifica. El que luego por medio del vacío es aspirado contra las paredes frías del calibrador[3,6,9,11-17,24,28].

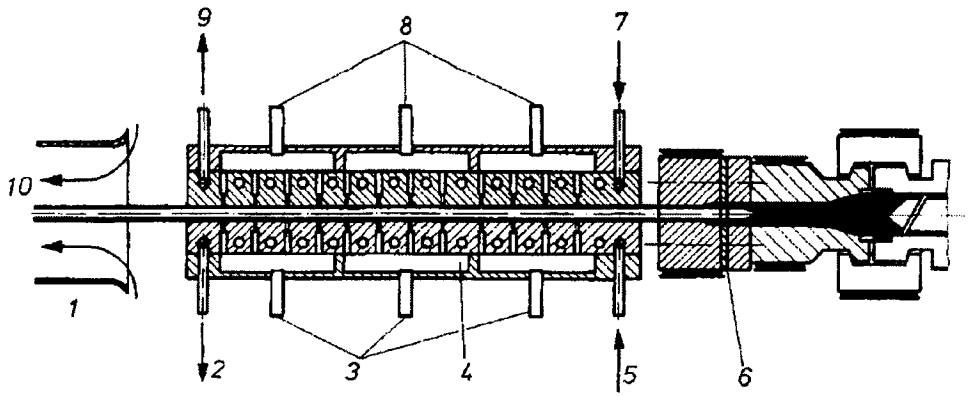

Figura 23. Calibración externa con vacío (vacío cerrado con un canal de aire frio). 1) Canal de aire frío, 2) Salida de agua, 3) Vacío, 4) Dado de calibración de vacío, 5) Entrada de agua, 6) Dado del perfil, 7) Entrada de agua, 8) Vacío, 9) Salida de agua, 10) Aire frío.

El calibrado externo cerrado se utiliza para secciones huecas y tubos pequeños. Para los perfiles, por lo general se disponen varios dispositivos de tamaño, entre las cuales están las secciones de enfriamiento que son dispuestas en serie (por ejemplo, para perfiles de ventana, 3 unidades de calibración, de aproximadamente 400 a 450 mm de largo), las dimensiones de las respectivas unidades de calibración coinciden con la contracción. Con tal disposición un contacto óptimo para el enfriamiento se consigue entre el sistema de calibración y el perfil. El perfil es jalado en la primera sección de calibración. De este modo, se deforma plásticamente y se establece a lo largo de la pared (este sobretiro puede alcanzar del 5 a 30%) y el contorno del perfil deseado, correspondiente a la sección transversal de los equipos de calibración, se forma[3,6,17,24,28].

Con perfiles complicados, no siempre es posible aplicar un vacío uniforme en toda la extensión del perfil, por lo que la calibración se lleva a cabo al igual que la calibración de fricción con el apoyo de vacío más o menos pronunciado. Con el fin de evitar los atascos de los alerones de perfil externo, las ranuras en las que estos se enfrían y parcialmente calibran, son mantenidos deliberadamente de 10 a 30% mas alto en algunos lugares[3,6,17].

Una variante en la calibración en cámara de vacío es la calibración en tanque de vacío (figura 24), el cual en razón de su simplicidad y gran economía se ha introducido para tuberías de diámetros pequeños a grandes (hasta 1200 mm). En un tanque cerrado se colocan un buje de calibración y varios anillos calibradores o un tubo perforado o ranurado (las aberturas mejoran la circulación del agua de enfriamiento). El tanque es llenado por medio de pequeños tubos con agua fría hasta un 80% de su capacidad. Para tuberías de diámetros grandes se disponen duchas alrededor de la tubería, que se encargan del enfriamiento intensivo del extruido. El buje de calibración tiene doble pared y es enfriado independientemente. Por medio de una bomba de vacío se evacúa el aire dentro del tanque. La presión atmosférica dominante en el interior de la tubería se contrapone al vacío del tanque y presiona a la tubería contra el buje calibrador, así como contra los anillos, respectivamente contra el tubo perforado o ranurado[3,6,28].

El equipo de calibración debe ser ajustable axialmente, con el fin de ser capaz de producir el sello a la entrada del perfil de los dos procesos externos de calibración. La distancia entre el dado y el equipo de calibración es de entre 10 y 100 mm. La salida del perfil del tanque vacío se sella con una junta de goma. Alcanzando velocidades de hasta 10 m/min[3,6,17,24,28].

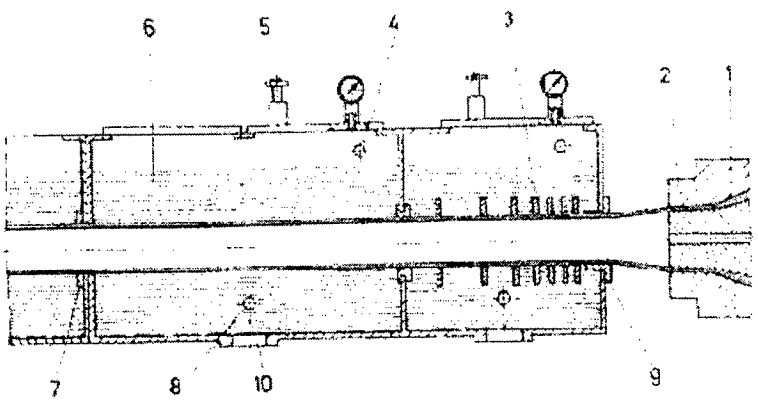

Figura 24. Calibración externa de tubería en tanque al vacío. 1) Macho, 2) Hembra, 3) Anillos calibradores, 4) Conexión de vacío, 5) Tapón, 6) Baño enfriador, 7) Junta, 8) Entrada de agua, 9) Buje calibrador, 10) Salida de agua.

4.4.1.3 Calibración externa con aire.

La calibración por aire comprimido, es mayormente utilizada para tuberías de gran diámetro, sobre todo las de PVC con un diámetro superior a 355 mm y para tubos de poliolefinas con un diámetro entre que 90 y 110 mm[3,6,12].

En este proceso la tubería en estado plástico se presiona contra las paredes de un tubo calibrador por medio de aire comprimido (aproximadamente 0.2 a 1 bar). El aire comprimido se introduce en el tubo a través del mandril del dado de tubería. Los extremos de los tubos más pequeños y las mangueras, son cerrados; para tuberías grandes, se utilizan tapones flotantes que consisten en una serie de sellos de goma circular que son guiados por los rodillos obligándolos a cerrar la pared interior de la tubería de aguas[3,6,12].

Para un trabajo continuo es necesario sellar el interior de la tubería por medio de un tapón asegurado al macho (figura 25). La entrada de aire se produce por una perforación en el macho. Si eventualmente se necesita una calibración interna se utiliza un tapón más largo y enfriado. El tapón flotante está unido por una cuerda o cadena al mandril, asegurándose de que la cuerda o la cadena no se arrastre a lo largo de la pared interna de la tubería[3,6,12].

Con este proceso de calibración, el equipo está bien centrado y con bridas lo más directamente posible al dado de tubería para evitar que la presión interna amplíe o rompa la tubería abierta. Sin embargo, deben tomarse disposiciones para mantener con eficacia el calor del dado de tubería, independiente del sistema de calibración en frío. Esto puede ser logrado por una cámara de aire y una pequeña área de contacto entre estas dos partes de la línea. Es aconsejable instalar un sistema de control de presión de aire con el fin de compensar las pérdidas de aire a través de las fugas, por ejemplo debido a un tapón flotante usado[3,6,12].

El enfriamiento de la cámara de calibración y la tubería se realiza en la conexión de la sección de enfriamiento por agua de circulación, por el goteo de agua o un chorro de agua, siendo este último utilizado cada vez más para las tuberías de gran tamaño[3,6,12].

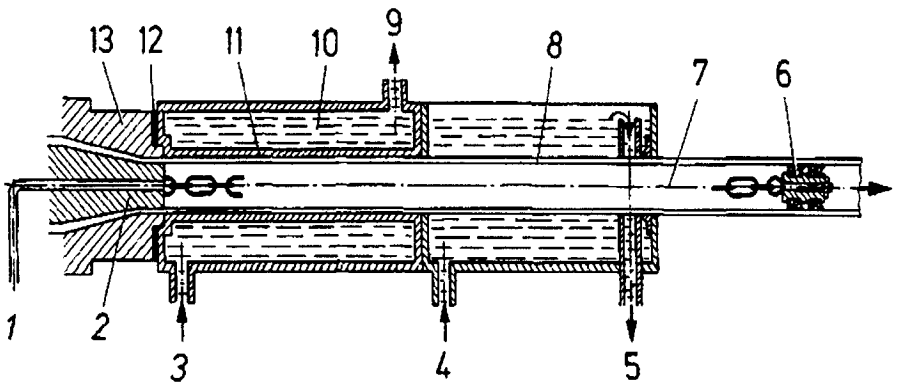

Figura 25. Calibración externa con aire comprimido. 1) Suministro de aire comprimido, 2) Mandril, 3) Entrada de agua, 4) Entrada de agua, 5) Salida de agua, 6) Tapón flotante, 7) Cadena, 8) Tubería plástica, 9) Salida de agua, 10) Agua de enfriamiento, 11) Calibración (dado de calibración), 12) Separación de Calor, 13) Dado de extrusión.

Los perfiles macizos se calibran por medio de toberas de calibración adosadas directamente al dado. Las tuberías corrugadas de PVC rígido para el sector eléctrico o las tubería acanaladas provistas de ranuras que se usan como tuberías de drenaje, exigen un sistema de calibración especial. Los perfiles plásticos rígidos se producen similarmente a las tuberías de diámetro pequeño. Ya que los perfiles de paredes finas se comportan como tuberías, es suficiente con una calibración por cámara de vacío enfriada por agua. En la fabricación de perfiles para ventanas, la calibración normal no es suficiente, por ello se instalan en serie varios bloques de calibración de largos aproximados de 600 a 700 mm[6,17].

4.4.1.4 Calibración interna.

Como su nombre indica, este tipo de calibración fija las dimensiones internas de perfiles extruidos de sección hueca, de forma de sección transversal simple (figura 26). Este proceso encuentra poca aplicación para tubos de extrusión, debido a que el diámetro exterior de los tubos suele ser la base para la clasificación y normalización. Tuberías para sistemas de transporte neumático con tolerancias para el diámetro representa una aplicación para este sistema de calibración y, al mismo tiempo, una excepción[3,6,9,11,12,17].

En este proceso, el mandril del dado de extrusión está unido a un mandril de calibración que puede ser enfriado y sobre el cual el tubo fundido, extruido a partir del dado, se extrae y se enfría al mismo tiempo. (No puede haber un enfriamiento adicional desde el exterior con una pistola de aire o un baño de agua). Los dados en el que la fusión se desvía 90 grados o dados que compensan se utilizan con frecuencia en este proceso, para ser capaz de mantener el mandril de calibración y el sistema de calibración de enfriamiento de forma segura[3,6].

Este proceso es considerablemente menos costoso que los procesos que utilizan un dado de perfil con una sección transversal de salida adecuada. Hacer mandriles de calibración totalmente de bloques de PTFE sin utilizar ningún sistema de enfriamiento también se ha intentado. Si el material se enfría en el mandril de calibración, una considerable asimilación de las fuerzas puede ser necesaria cuando se utiliza el tamaño interno debido a la contracción del material. Con el fin de poder introducir estas fuerzas de recogida en un perfil de paredes delgadas sin deformarla, núcleos de rodillos se utilizan en ocasiones, los cuales están en poder de una barra en el mandril de calibración en el interior del perfil en el punto de ataque de las fuerzas de contacto en el jalado[3,6,17].

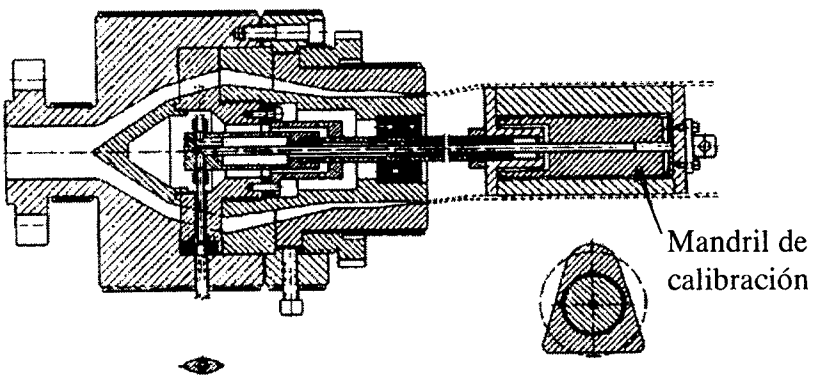

Figura 26. Calibración interna.

4.4.2 Enfriamiento.

Cuando el material fundido sale del extrusor debe enfriarse inmediatamente para que conserve la forma y adquiera la rigidez necesaria. Para ello es necesario un sistema de enfriamiento. Sea cual sea el sistema escogido, el enfriamiento debe ser lo más uniforme posible a lo largo de la sección de la pieza, y en ocasiones también gradual, de modo que no existan gradientes de

temperatura importantes entre puntos cercanos del material. Existen gran variedad de equipos de enfriamiento para plásticos extruídos y en su mayoría difieren unos de otros en el tipo de material que enfrían así como también el tamaño de la sección a enfriar, en el caso de ser perfiles de sección pequeña se tienen los siguientes[3,6,9,11,12,15,17,24,28].

4.4.2.1 Enfriamiento para perfiles o sólidos.

Las unidades de enfriamiento para perfiles pueden ser sólidos o con secciones huecas. Las secciones sólidas requieren de grandes volúmenes de fluido de enfriamiento que generalmente es agua, esto es debido a que la mayoría de perfiles son de paredes gruesas de sección en este caso se deben utilizar canales de enfriamiento o recámaras de enfriamiento a través de los cuales se hace circular un fluido ya sea agua u otro fluido para retirar calor del mismo y de esta manera devolver al perfil a su estado sólido. Cuando es un perfil delgado como podría ser una película de muy poco espesor, resulta más funcional utilizar otro tipo de unidades de enfriamiento como podría ser una calandria u otro intercambiador. Cuando el perfil incluye una sección hueca debiera incluirse un mecanismo que logre sustentar esta sección para que sus paredes no colapsen[15].

Principalmente existen dos tipos de sistemas para mantener la forma de los perfiles que son tubulares, es posible que existan algunos otros medios para hacerlo, pero los descritos a continuación son los de mayor aplicación[15].

4.4.2.2 Enfriamiento para sección tubular por insuflación.

Cuando se tiene una sección cuyas paredes tienden a colapsar debido a que se encuentran plastificadas, se debe utilizar algún mecanismo que permita que estas débiles paredes no colapsen; popularmente se conocen dos formas de lograrlo una de ellas es la insuflación que no es mas que regular una corriente de aire que infla las paredes del tubo extruído. El diámetro de la sección tubular está determinado principalmente por la velocidad de extrusión, la velocidad de jalado y el flujo volumétrico del aire dentro de la sección tubular. Las unidades que utilizan este tipo de sistemas deben tener válvulas neumáticas y manómetros de capacidades congruentes, las cuales permitan regular el flujo del aire dentro del perfil, además de poseer una conexión en el orificio de entrada en el dado macho o núcleo del extrusor[9,15].

4.4.2.3 Unidades de enfriamiento para sección tubular por vacío

Otro de los mecanismos que se pueden utilizar para evitar el colapso de los tubos extruídos es la implementación de un sistema de vacío; este sistema de vacío es posterior al proceso de extrusión, es decir, se extruye la sección y ésta es llevada inmediatamente a un canal cerrado dentro del cual existe una presión negativa o de vacío. El vacío mantiene las paredes de la sección en la posición tal como sale del extrusor en forma circular, esto debido a que la presión es constante en toda el área de la sección. Mientras mayor sea la presión de vacío dentro de la recámara, la sección del perfil puede ser estirada para obtener un diámetro mayor que el extruído[9,15].

La bomba centrífuga para aire es gobernada por un potenciómetro que hace variar sus revoluciones, lo cual tiene como resultado hacer variar la cantidad de aire que es retirado del sistema, consiguiendo así controlar la presión negativa, además de eso al regular esta presión también puede regularse el diámetro de la sección, porque si hay una cantidad mayor de vacío el diámetro aumenta[9,15].

En el caso de productos con forma anular y de láminas, el enfriamiento se suele realizar en un tanque por el que circula agua, en ocasiones a diferente temperatura a lo largo del recorrido del material para lograr un enfriamiento gradual. En otros casos, como en la producción de películas sopladas, la refrigeración se consigue por medio de chorros de aire que circulan a pequeña velocidad para evitar posibles vibraciones de la película. En el caso de planchas, películas y recubrimientos es frecuente que la refrigeración se realice empleando rodillos metálicos fríos, por el interior de los cuales circula un flujo refrigerante. Estos rodillos además pueden realizar la función de imprimir el acabado superficial final a la pieza (pulido, mate, con dibujo) y de actuar de equipo de jalado[9,15].

Otros diseños constan de una cámara con rodillos y múltiples boquillas que esparcen agua constantemente sobre la tubería, misma que se acumula en el fondo para ser extraída, enviada a un sistema de enfriamiento y reciclada a la tina[9,15].

El enfriamiento es más sencillo en las tuberías de diámetro pequeño, porque la remoción de calor es relativamente rápida. En la mayoría de estos casos solamente se requiere de algunas

mangueras para aplicar flujos de agua abundantes durante pequeños tramos. Así mismo, como las tuberías de diámetros pequeños regularmente tienen espesores en general de 1 a 3 mm, el calor se extrae rápidamente de la pared de los tubos[9,15].

En contraste, para tuberías de espesor mayor a 5 milímetros, el enfriamiento es muy complicado, ya que mientras la superficie externa pierde calor, el interior se puede encontrar casi a la temperatura de procesamiento dentro del extrusor. Por esta razón en tuberías de gran diámetro las tinas de enfriamiento son muy largas, para tener el tiempo suficiente en que el calor se elimine de las capas internas. El largo de estas tinas es algo complicado de calcular puesto que intervienen variables como[9,15]:

- Temperatura del agua de enfriamiento
- Plastico procesado (coeficiente de transmicion térmica)
- Temperatura de la masa fundida
- Espesor del producto
- Velocidad de extrusión.

En el caso de los perfiles para ventanas, la tina es frecuentemente suplantada por un túnel de enfriamiento, el que tiene en su interior varias ranuras para aire[9,15].

Luego del enfriamiento el tren de tiro toma la tubería y lo lleva hasta la mesa de volteo. Para realizar el corte de la tubería del largo necesario. Según la delicadeza del perfil, las piezas de la oruga del tren de tiro son recubiertas con gomas de distintas durezas o bien con goma espumada[9,15].

4.4.2.4 Tensionado, enrollado y cortado

El equipo de tensionado y enrollado determina la velocidad lineal a la que el material debe ser extruido. Hasta cierto punto el espesor o la forma del producto extruido depende de la relación entre el caudal de material extruido y la velocidad de recogida. El estiramiento o tensionado provocado por el equipo sirve en ocasiones para mejorar determinadas propiedades mecánicas del producto en la dirección del estirado (fibras). Por lo general, los sistemas de recogida son rodillos, bandas sin fin, cabrestantes, etc[1,9].

El equipo de cortado en longitudes consiste en cuchillas estacionarias si la velocidad de extrusión es suficientemente baja o el material es flexible, o en cuchillas transportables, o en el caso de materiales suficientemente rígidos, de tipo guillotina. Es cada vez más frecuente el cortado por chorros de aire[1,9,12,28,29].

5. ESTADO DEL ARTE O ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO

Louis G. Reifschneider, Milivoje M. Kostic y Srinivasa Rao Vaddiraju[23] (2002), estudiaron el rol del calibrador en la formación de la superficie libre de un perfil extruido con forma de "U" y cuantificaron la transferencia de calor en un calibrador de vacío.

Dichos autores observaron que el perfil en forma de U tendía a reducirse en el núcleo del calibrador. Esta reducción generaba grandes fuerzas de fricción que conducían al movimiento retardado a través del calibrador y un bloqueo en el fundido entrante. Debido a esto, ellos realizaron pruebas de extrusión con HIPS de MFI=2.8, a una temperatura de fusión de 232°C, una temperatura de dado de 232°C y una variación de flujo másico para evaluar los cambios en la transferencia de calor. Los ensayos de extrusión se llevaron a cabo en un Brabender Plasticorder a escala de laboratorio en un extrusor con 0.019 m (0.75 in) y una relación L/D del husillo de 25. La presión del dado en el punto medio de la placa de transición se registró con un transductor de presión de fundido Dynisco PT 4626. El perfil en U se extruyó "boca abajo", por lo que el extruido pasó a través del tanque de enfriamiento. Un esquema de la calibración/enfriamiento se muestra en la figura 1. El calibrador se presentó como un calibrador de vacío en seco con 8 pulgadas de vacío de mercurio (figura 2). Las velocidades de línea de la extrusión fueron controladas por un tirador modelo de Gatto 202-3D.

Para cuantificar la velocidad de enfriamiento del material extruido a su paso por el calibrador, fueron incorporados termopares en las mitades superior e inferior del calibrador con una precisión de 1 mm entre la interfaz calibrador/extruido. Además, tres pirómetros infrarrojos Raytek MID se utilizaron para medir la temperatura del extruído a la entrada y salida del calibrador. Además de la temperatura en la parte inferior de la "U" y en el interior de la "U". Esto cuantifica el enfriamiento realizado por los calibradores superior e inferior, respectivamente. La uniformidad del flujo másico a la salida del dado se determinó midiendo el espesor de la extrusión, sobre la superficie inferior del calibrador con el calibrador superior removido. La superficie inferior del calibrador da la forma de los lados interiores de la "U" y

es de 25.4 mm de ancho y 25.4 mm de alto. Durante la recolección de datos, el calibrador se corrió bajo una presión positiva leve por lo que el extruido se deslizó sobre un colchón de aire.

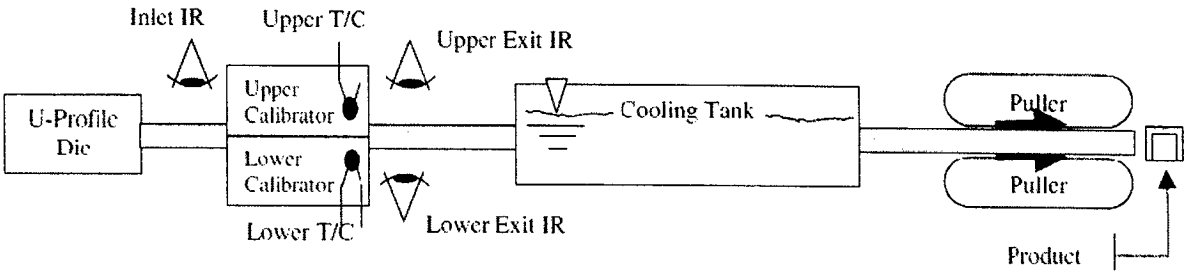

Figure 1. Esquematización del sistema de calibración.

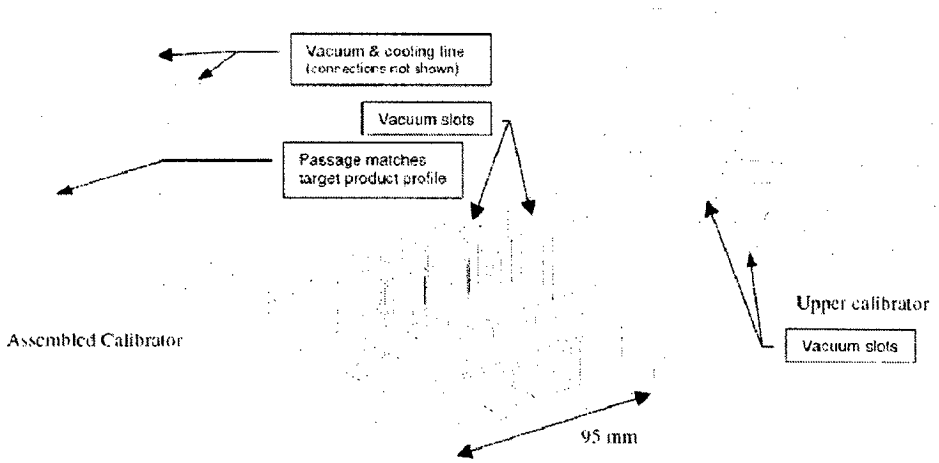

Figura 2. Diseño de calibrador de perfil en U.

En base a este estudio los autores concluyeron que las extrusiones del perfil diseñado por la simulación solo requieren algunos ajustes de prueba y error. La distribución de espesor de pared de un extruido al salir del dado puede ser ajustado por el calibrador. Y que la transferencia de calor depende de la geometría y el grado de alimentación del calibrador. Por tal motivo, el diseño del calibrador sólo se puede hacer para estimar el rendimiento del enfriamiento, mas no predice las tasas absolutas de enfriamiento.

O. S. Carneiro, J. M. Nóbrega, J. A. Covas, P. J. Oliveira, F. T. Pinho[27] **(2002)**, estudiaron un código numérico capaz de modelar la transferencia de calor en los calibradores de perfiles de extrusión.

Los autores utilizaron un código en 3D, basado en el método de volúmenes finitos (FVM)[10], para desarrollar el modelo de los intercambios térmicos que ocurren durante la etapa de calibración/enfriamiento en la extrusión de perfiles, validado y utilizado con el fin de diseñar sistemas de calibración. Este software de simulación tiene como objetivo la optimización del rendimiento térmico de los sistemas de calibración. La motivación para el desarrollo de un software de simulación propia fue la necesidad de cálculos rápidos, requisito especialmente importante cuando se utilizan algoritmos de optimización. El método de volúmenes finitos no es tan exigente en cuanto a recursos computacionales como los métodos basados en elementos finitos, siendo, por tanto, la técnica más adecuada para este propósito. La necesidad de controlar el software de simulación durante el proceso de optimización también justifica su desarrollo.

Solución analítica

El caso que consideraron se ilustra en la figura 1. Se compone de dos placas rectangulares, S_1 y S_2, con una conductividad térmica k_1 y k_2, respectivamente, en contacto a través de una de sus caras.

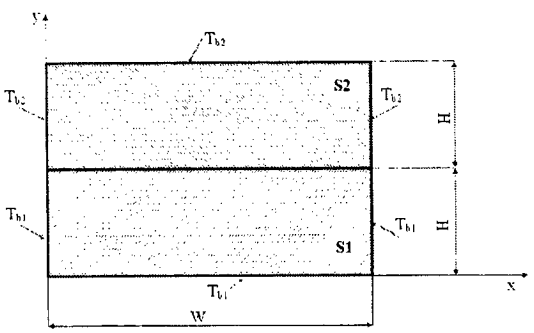

Figura 1. Geometría y condiciones límite para el problema "analítico"

La distribución de la temperatura en cada cara se puede obtener de [23]:

$$T = T_{b1} + \sum_{n=1}^{\infty}\left[\frac{2}{\pi}(T_{b2} - T_{b1})\frac{(-1)^{n+1}+1}{n}\frac{-k_2}{(k_2+k_1)}\sin\left(\frac{n\pi x}{W}\right)\sinh\left(\frac{n\pi y}{W}\right)\right]$$

Para S_1, y de

$$T = T_{b2} + \sum_{n=1}^{\infty}\left[\frac{2}{\pi}(T_{b2} - T_{b1})\frac{(-1)^{n+1}+1}{n}\frac{k_1}{(k_2+k_1)}\sin\left(\frac{n\pi x}{W}\right)\sinh\left(\frac{n\pi(-y+2H)}{W}\right)\right]$$

Para S_2, para un caso de contacto perfecto y por:

$$T = T_{b1} + \sum_{n=1}^{\infty}\left[\frac{2}{\pi}h(T_{b1} - T_{b2})\frac{(-1)^{n+1}+1}{n}\frac{1}{-k_1\frac{n\pi}{W}\cos\left(\frac{n\pi H}{W}\right)-\left(\frac{k_2+k_1}{k_2}\right)\sinh\left(\frac{n\pi H}{W}\right)}\sin\left(\frac{n\pi x}{W}\right)\sinh\left(\frac{n\pi(-y+2H)}{W}\right)\right]$$

For S_1 y de

$$T = T_{b1} + \sum_{n=1}^{\infty}\left[\frac{2}{\pi}h(T_{b1} - T_{b2})\frac{(-1)^{n+1}+1}{n}\frac{1}{k_2\frac{n\pi}{W}\cosh\left(\frac{n\pi H}{W}\right)+\left(\frac{k_2+k_1}{k_1}\right)\sinh\left(\frac{n\pi H}{W}\right)}\sin\left(\frac{n\pi x}{W}\right)\sinh\left(\frac{n\pi(-y+2H)}{W}\right)\right]$$

Para S_2, cuando la interfaz se modela con una condición de contacto límite de resistencia.

La distribución de la temperatura se define por las ecuaciones anteriores.

Influencia de los parámetros de proceso

La disponibilidad del software numérico ofrece la oportunidad de estimar la importancia de algunos parámetros numéricos, geométricos y desempeño sobre el proceso de calibración/enfriamiento. Para ello, se consideró la geometría mostrada en la figura 2. Las condiciones generales se resumen en la tabla 1.

Se estudiaron diversas variaciones del diseño original, con el fin de establecer la influencia de una serie de parámetros en la temperatura media del perfil en la sección final (T) y el valor de la desviación estándar (σ_T), que es una medida del gradiente de temperatura (figura 3).

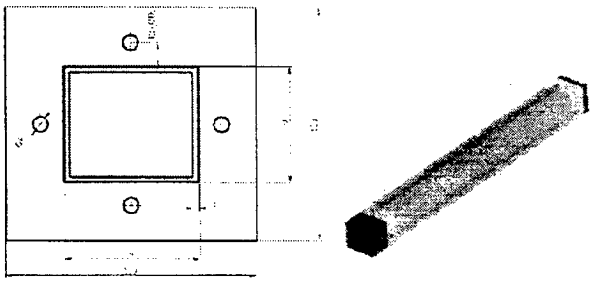

Figura 2. Diseño de referencia para el estudio del enfriamiento de un perfil rectangular hueco.

Tabla 1. Condiciones generales usadas en la simulación.

k_p	0.18 W/mK
k_c	14.0 W/mK
ρ_p	1400 kg/m^3
c_p	1000 J/kgK
Linear extrusion velocity	2 m/min
Profile thickness	3 mm
Cooling channels' diameter	8 mm
Melt inlet temperature	180 °C
Room temperature	20 °C
Cooling fluid temperature	18 °C
Profile/air convection heat transfer coefficient (free convection)	5 W/m^{2}K
Profile/calibrator convection heat transfer coefficient (contact resistance)	500 W/m^{2}K
Inner profile boundary	Insulated
CD	12 mm

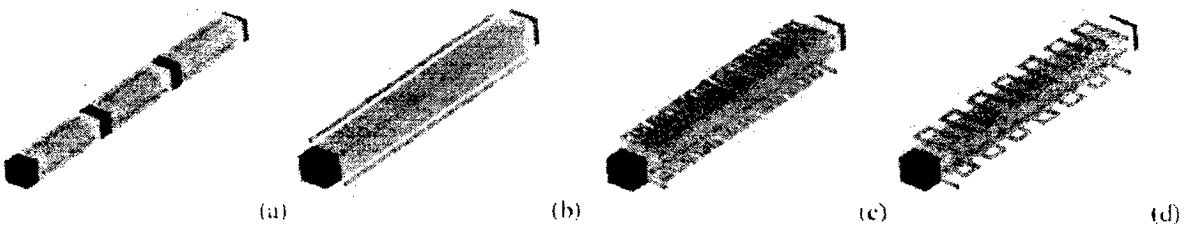

Figura 3. Diseño de sistema de enfriamiento. a) tres calibradores individuales, b) cuatro canales de enfriamiento en las esquinas, c) canales de enfriamiento en forma densa de zig-zag, d) canales de enfriamiento en forma separada de zig-zag.

Para el sistema en cuestión, los cambios en el coeficiente de transmisión térmica (h), diámetro del canal de enfriamiento (dw), distancia del canal de enfriamiento para el perfil (cd) y la temperatura del líquido refrigerante (tw) había casi ningún efecto sobre los resultados considerados.

Conclusiones

El código en 3D FVM desarrollado es capaz de hacer frente a situaciones prácticas, tales como la presencia de varias unidades individuales de enfriamiento y la existencia de una resistencia térmica entre el perfil plástico y el medio de enfriamiento. El efecto sobre el rendimiento del enfriamiento de una serie de parámetros (geométricos, operativos y de materiales) pueden ser muy distintas.

Dada la disponibilidad de una herramienta de modelado como la presentada en este trabajo, que es sensible a los cambios en los parámetros del proceso y es relativamente rápido desde el punto de vista computacional, la próxima etapa de desarrollo consiste en su integración en un algoritmo de diseño automático

J.M. Nóbrega and O.S. Carneiro (2006), estudiaron la optimización del desempeño de enfriamiento de calibradores para perfiles extruidos.

El objetivo de la metodología de optimización (anexo A) es encontrar automáticamente el conjunto de longitudes de las zonas de calibradores/enfriadores resultante en un enfriamiento más rápido y uniforme del perfil plástico extruido. Esta metodología se utilizó para mejorar el rendimiento de enfriamiento del sistema de calibración/enfriamiento, bajo ciertas restricciones específicas, a través de la optimización de las unidades de calibración y las longitudes de las zonas de templado.

Para este propósito el enfriamiento de un perfil rectangular hueco, se ha estudiado, teniendo en cuenta la siguientes condiciones generales: k_p=0.18 W m^{-1} K^{-1}; k_c=14.0 W m^{-1} K^{-1}, ρ_c = 1400 kg m^{-3}; c_p=1000 J kg^{-1} K^{-1}; w=2 m min^{-1}; con una temperatura homogénea del perfil plástico a la salida del dado T_m de 180°C, la temperatura del líquido de enfriamiento T_f de 18°C; hi=500 W M^{-2} K^{-1}. En este ejemplo, los canales de enfriamiento tienen todos el mismo diámetro y longitud y son localizados al centro de la superficie del perfil (figura 1a).

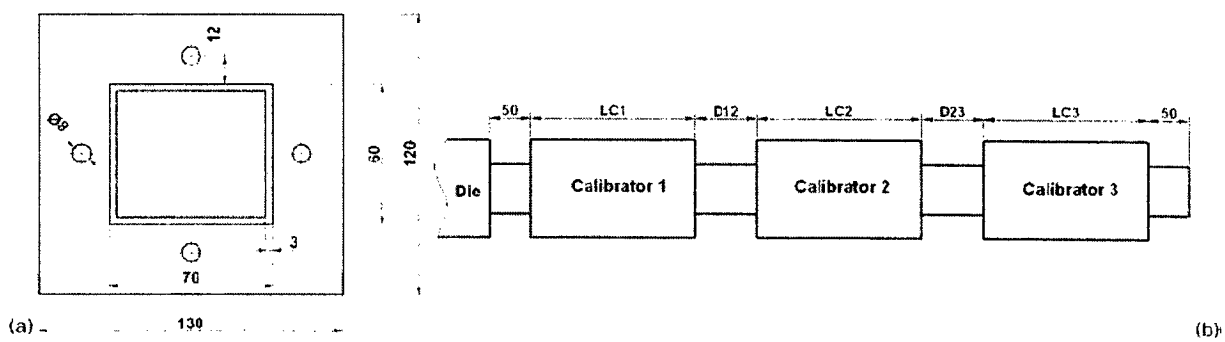

Figura 1. Enfriamiento de un perfil rectangular hueco (dimensiones en mm). a) geometría de sección transversal; b) disposición del sistema de calibración.

Como se muestra en la figura 1b, para este estudio la disposición del sistema de calibración se define por cinco variables. Tres LCi, que definen la longitud de cada calibrador i, además de

dos D*ij*, correspondientes a las longitudes de las zonas de enfriamiento existentes entre los calibradores *i* y *j*.

Los resultados obtenidos mostraron que la metodología desarrollada fue capaz de mejorar el rendimiento del sistema, cuantificados por una función objetivo propuesto. Además de que la metodología podría mejorarse aún más si se permite la modificación automática del número de unidades individuales de enfriamiento empleadas

Li Ren, Rui Yang y WenXiao Zhang[14] (2010), propusieron el diseño de la optimización en sistemas de enfriamiento de un calibrador heterogéneo para la extrusión de perfiles plásticos.

Basado en la teoría de transferencia de calor, que establece que el calor se trasmite de un cuerpo de mayor temperatura a uno de menor temperatura, el proceso de enfriamiento de perfiles de plástico dentro de los calibradores se puede simplificar como una transferencia de calor transitoria en dos dimensiones. El intercambio de calor se produce por convección forzada entre el refrigerante y la superficie del canal de enfriamiento, y por convección natural entre el aire interno de la cavidad de los perfiles y los perfiles y entre el aire del ambiente y el calibrador, y por la conductividad y convección entre los perfiles plásticos y el calibrador. Permitiendo el dominio de la solución individual mediante el método de elementos finitos, la temperatura dentro de cada elemento es expresada de manera explícita por una combinación de la temperatura del nodo y la interpolación de funciones.

A) Formulación del modelo matemático

Durante el proceso de enfriamiento, la uniformidad de la distribución de la temperatura en el perfil plástico, afecta significativamente la calidad de la pieza terminada. La forma del perfil y las condiciones de funcionamiento dependen del diseño del canal de enfriamiento y de la distribución de los materiales al calibrador primario. En este caso, hay dos categorías de variables de diseño en consideración: continuas y discretas. La variable discreta es el número de canales (*nc*) y las variables de diseño continuo incluyen la variable de diseño geométrico $G=[x_1,y_1,r_1,x_2,y_2,r_2,\ldots,x_{nc},y_{nc},r_{nc}]$ y la variable de diseño de materiales $S=[v_1,v_2,\ldots,v_{nm}]$. En este caso, r es el radio del canal de enfriamiento, x/y son las coordenadas horizontales y verticales del centro del canal, nm es el número de nodos ficticios distribuidos en el calibrador, y v es la fracción de volumen de una materia prima en cada nodo ficticio. Las variables de diseño se puede describir como:

$$X=[\,x_1,\ y_1,\ r_1,\ x_2,\ y_2,\ r_2,\ldots,\ x_{nc},\ y_{nc},\ r_{nc},\ nc,\ v_1,\ v_2,\ldots,\ v_{nm}]$$

La relación implícita, de la uniformidad de la distribución de temperatura en las secciones transversales de la salida del calibrador es el objetivo de la optimización del modelo matemático. La función objetivo se define como

$$\min \quad f(X) = \lambda \int_{\Omega_P} \left[\frac{T(X)}{\overline{T}} - 1 \right]^2 d\Omega_P + (1-\lambda)\overline{T}$$

Donde λ es el factor de peso, $\overline{T}$ es la temperatura promedio de perfil de plástico en el calibrador.

Para el problema de diseño en 2D del sistema de enfriamiento, las siguientes restricciones deben ser consideradas:

- El límite superior e inferior de la restricción:

$$\begin{aligned}
&x_{\min} - r_j \le x_j \le x_{\max} - \le r_j \\
&y_{\min} - r_j \le y_j \le y_{\max} - \le r_j \\
&r_{\min} \le r_j \le r_{\max} \qquad j = 1,2,\ldots,nc \\
&nc \le nc_{\max} \\
&0 \le v_i \le 1 \qquad i = 1,2,\ldots,nm
\end{aligned}$$

- Para garantizar la resistencia y rigidez de la calibración, cada canal de enfriamiento se debe mantener a una distancia suficiente de los límites del molde y cada par de canales vecinos deben tener un espacio de seguridad:

$$r_i + r_j - \sqrt{(x_i + x_j)^2 + (y_i + y_j)^2} + \Delta_{const} \le 0 \; i \ne j - dist_i + \delta_{const \le 0}$$

Donde, Δ_{const} es el espacio mínimo permitido entre los dos canales. δ_{const} es el espacio mínimo permitido entre el canal de enfriamiento i y el límite del calibrador.

B) El algoritmo de optimización evolutiva

Un método de optimización evolutiva se presenta al dividir el proceso de optimización en dos sub-procesos: del proceso de optimización de topología y el proceso de optimización de

forma/material. De esta manera, los dos subprocesos se alternan y las soluciones óptimas se alcanzan finalmente.

1) Optimización de la topología.

Para encontrar la topología óptima de calibración (el número de canal de enfriamiento), se introduce un factor de relajación del intervalo, para ajustar las limitaciones del tamaño de los canales y eliminar los canales no válidos y generar un nuevo canal basado en el análisis de sensibilidad de la función objetivo. En consecuencia se realiza el cambio de configuración de topología para el calibrador.

2) Optimización simultanea de forma y materiales.

Está basado en la configuración topológica fija de la calibración heterogénea (*nc*), que se lleva a cabo para obtener el tamaño óptimo, la ubicación de los canales de enfriamiento y la distribución primaria de material en el calibrador.

Como el número de la variable de geometría es pequeño y la sensibilidad puede ser calculada por el método de diferencias finitas, el incremento de la variable de geometría es conseguido por el método de algoritmos genéticos. De este modo, la optimización simultánea de forma y material se ahorra el tiempo de computadora.

Por este motivo los autores concluyen que, teniendo en cuenta la ubicación de los canales de enfriamiento, tamaño, número y distribución de materiales del calibrador, la calibración del sistema de enfriamiento del calibrador heterogéneo puede ser investigada. El método de elemento finito (FEM) y el método de diferencias finitas (FDM) se usa para analizar el proceso de enfriamiento para el perfil de plástico dentro del calibrador.

Un método de optimización evolutiva se presenta para dividir el proceso de optimización en dos sub-procesos: de optimización topología y de optimización de la forma/material.

6. ÁREAS DE OPORTUNIDAD

Debido a la revisión bibliográfica revisada se presentan las siguientes áreas de oportunidad:

1. Generación de modelos de comportamiento de sistemas de enfriamiento para tubería y perfilería en función a distintos materiales plásticos extruídos.
2. Análisis y generación de paquetes de validación para extrusión de perfilería con forma de geometría compleja.
3. Generación de un estado del arte conciso sobre los elementos para el proceso de extrusión de plásticos, esto debido a que la información que se presenta en la literatura es vaga e indirecta a estas herramientas.

7. CONCLUSIONES

En base a la investigación bibliográfica realizada, se concluye que los procesos de pos-extrusión son variables y adaptables a las necesidades de los productos plásticos.

El análisis experimental de dichos procesos sería útil para definir las configuraciones de herramentales necesarios en función del tipo de material polimérico utilizado.

La mayoría de la literatura existente, se enfoca a casos de estudio de simulación para procesos de pos-extrusión, lo que significa que aún está lejos de ser una alternativa útil, debido a que los límites y consideraciones planteados en las simulaciones serian muy diferentes a los aplicados en la realidad para cada caso.

El análisis de los sistemas de enfriamiento, desde un punto de vista de intercambio térmico del material plástico con las distintas zonas de calibración, resulta ser la alternativa más útil para la definición de dimensiones en los productos, pero no en la capacidad de producción.

La literatura obtenida es gráfica y demostrativa en aplicaciones muy puntuales o en casos generales, pero no en la definición de métodos que faciliten el diseño o construcción de herramentales de este tipo.

Sin embargo, no se cuentan con literatura suficiente que facilite la toma de decisión en el caso de generar perfilería sólida en el proceso de extrusión.

Anexo A: Metodología de Optimización.

La integración de las diferentes rutinas necesarias para este propósito se ilustra en la figura 1.

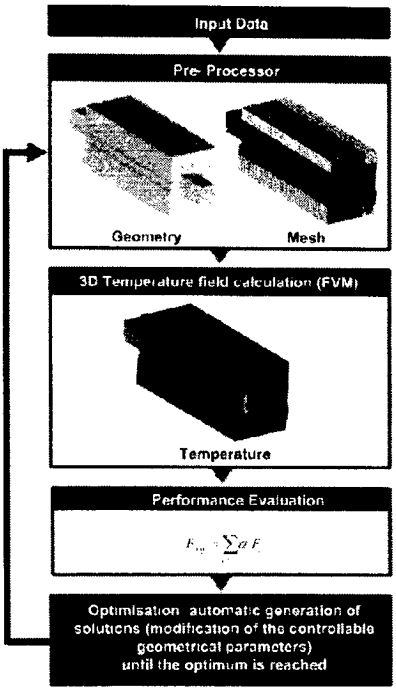

Figura 1. Diagrama de flujo de la metodología de optimización.

El proceso comienza con la introducción de la entrada datos, es decir:

1) Las propiedades termofísicas relevantes de un polímero y el material de construcción del calibrador y el coeficiente de transferencia térmica en la interfaz entre ambos dominios

2) Las condiciones de operación relevantes, es decir, la temperatura de extrusión, el rendimiento de extrusión y la temperatura del líquido de enfriamiento.

3) Los parámetros geométricos, como la geometría y las dimensiones del perfil de extrusión y calibradores de sección-transversal; numero, geometría y diseño de los canales de enfriamiento

4) Las restricciones relacionadas con aspectos prácticos, es decir, el rango de longitudes admisibles para cada calibrador y zona de templado, longitud máxima del sistema de calibración/enfriamiento y el número de calibradores que se utilizarán.

El preprocesador es usado para generar automáticamente la geometría y la correspondiente red computacional para cada conjunto de pruebas de parámetros propuestos por el algoritmo de optimización.

Para el cálculo de temperatura de campo en 3D, el código está basado en el método del volumen finito y es utilizado para calcular numéricamente la distribución de la temperatura dentro del extruído y el calibrador, utilizando la ecuación de conservación de la energía.

Para el plástico extruído la ecuación queda de la siguiente manera:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_p \frac{\partial T_p}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_p \frac{\partial T_p}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k_p \frac{\partial T_p}{\partial z}\right)-\rho_p c_p w \frac{\partial T_p}{\partial z}=0$$

Y para el calibrador queda:

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(k_c \frac{\partial T_c}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(k_c \frac{\partial T_c}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(k_c \frac{\partial T_c}{\partial z}\right)=0$$

Donde T es la temperatura media, w es la velocidad longitudinal (dirección de extrusión), ρ es la densidad del fluido, k es la conductividad térmica y c es el calor específico.

Para evaluar el desempeño, la calidad de cada solución de prueba es evaluado por una función objetivo F_{obj}, que combina dos criterios: la eficiencia de enfriamiento, representada por la temperatura media $\overline{T}$, calculada como:

$$\overline{T}=\frac{\sum_{i=1}^{n_t} T_i A_i}{A_T}$$

y la uniformidad de la temperatura, representada por la desviación estándar de la distribución de temperatura σ_T, calculada como:

$$\sigma_T = \left[\frac{\sum_{i=1}^{n_f} (T_i - \bar{T})^2 A_i}{A_T} \right]^{1/2}$$

Donde n_f es el número de células computacionales de superficie en el límite de salida del perfil extruido, Ti es la temperatura en la superficie, A_i es el área de la superficie y A_T es el área de la sección transversal del perfil extruido. El objetivo es reducir los criterios al mínimo, ya que se espera una baja global del gradiente de temperaturas reduciéndose al mínimo el desarrollo de las tensiones térmicas o favoreciendo su relajación. Los dos parámetros definidos anteriormente se calculan en la sección transversal del polímero extruido, tomado en el final del dominio considerado, y se ven afectados por diferentes pesos (0,75 y 0,25 respectivamente). Por lo tanto, en estas condiciones la función objetivo tiene la forma:

$$F_{obj}\ 0{:}75\ T + 25sT$$

Esta función se define de tal manera que su valor disminuye con el aumento de la eficiencia de refrigeración y la temperatura uniforme.

La optimización es la generación automática de soluciones (modificando los parámetros geométricos controlables), hasta que se alcance el óptimo.

REFERENCIAS

[1] Maribel Beltrán, Antonio Marcilla Gomís. Curso de tecnología de polímeros. Departamento de ingeniería química. Universidad de Alicante. 2009. Pp. 103-139, 154-157

[2] Michaeli, Walter. Extrusion Dies for Plastics and Rubber - Design and Engineering Computations (3rd Edition) Capitulo 1. Hanser Publisher. 2004. pp. 13-17

[3] Michaeli, Walter. Extrusion Dies for Plastics and Rubber - Design and Engineering Computations (3rd Edition) Capitulo 11. Hanser Publishers. 2004. pp. 333-360

[4] Giles, Harold F. Jr.; Wagner, John R. Jr.; Mount, Eldridge, M. III. Extrusion - The Definitive Processing Guide and Handbook Capitulo 1. William Andrew Publishing/Plastics Design Library. 2005. pp. 1-8

[5] Giles, Harold F. Jr.; Wagner, John R. Jr.; Mount, Eldridge, M. III. Extrusion - The Definitive Processing Guide and Handbook Capitulo 3. William Andrew Publishing/Plastics Design Library. 2005. pp. 13-22

[6] Dr. Ing. Otto Schwarz, Dipl. Ing. Friedrich-Wolfhard Ebeling, Dipl. Ing. Brigitte Furth. Procesamiento de los plásticos (1rd Edition) Capitulo 5. Editorial Costa Nogal. 2003. pp.41-60

[7] Stevens M.J., Covas J.A. Extruder Principles and Operation (2nd Edition) Capitulo 5. Chapman & Hall. 1995. pp.73-77

[8] Maria Isabel de Antonio Gomez. Control de un extrusor de perfiles de ETP. Memoria descriptiva. Escuela tecnica superior de ingeniería. Universitat Rovira I Virgili. 2004. pp. 9, 29-34.

[9] César Augusto Medina Rodríguez. Control estadístico del proceso aplicado a la

corrección del flatness durante el almacenaje y embalaje del tubo de extrusión producido en la empresa hospira costa rica. Tesis de licenciatura. Escuela de ciencia e ingeniería de los materiales. Instituto tecnológico de Costa Rica. 2006. pp 14-20.

[10] L. Fradette, P.A. Tanguy, F. Thibault and P. Sheehy, Optimal Design in Profile Extrusion Calibration, Journal of Polymer Engineering vol.14, No. 4, 1995, pp.295-322.

[11] http://plaen.blogspot.com/2011/06/como-dimensionar-y-calibrar-perfiles.html

[12] Giles, Harold F. Jr.; Wagner, John R. Jr.; Mount, Eldridge, M. III, Extrusion - The Definitive Processing Guide and Handbook Capitulo 49, William Andrew Publishing/Plastics Design Library, 2005, pp. 475-485

[13] J.M. Nóbrega and O.S. Carneiro. Optimising cooling performance of calibrators for extruded profiles. Maney Publishing, 2006.

[14] Li Ren, Rui Yang and WenXiao Zhang. Optimization design in cooling system of heterogeneous calibrator for plastic profile extrusion. 2010 International Conference on Artificial Intelligence And Computational Intelligence. pp.468-472.

[15] Iván Raúl Flores Corona. Reacondicionamiento de la recámara de vacío para productos plásticos extruidos. Trabajo de graduación. Facultad de ingeniería. Universidad de San Carlos de Guatemala. 2008,

[16] https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/14493-Los-principios-basicos-de-la-extrusion-de-tubos-y-perfiles.html

[17] Enciclopedia del plastico 2000 tomo 3 capítulo 34. 1999. pp. 41-60

[18] Friedhelm Hensen. Polymer extrusion technology. 1998

[19] Chris Rauwendaal. Polymer extrusion (4th edition). 2001

[20] J.M. Nóbrega, O. S. Carneiro, F. T. Pinho, P. J. Oliveira, J. A. Covas. Thermal Aspects of the Calibration of Extruded Profiles. Maney Publishing.2003.

[21] J. M. Nóbrega, O. S. Carneiro, J. A. Covas. Design of Calibrators for Extruded Profiles. Part I: Modeling the Thermal Interchanges. Maney Publishing. 2004

[22] J. M. Nóbrega, O. S. Carneiro, J. A. Covas, P. J. Oliveira, F. T. Pinho. A numerical heat transfer study of profile calibration. Maney Publishing. 2004

[23] Louis G. Reifschneider, Srinivasa Rao Vaddiraju. Computational design of a u-profile die and calibrator. ANTEC 2004. 246-250

[24] EASTMAN. TENITE Cellulosic Plastic- Extrusion of tubing and profile. Boletín informativo. 2006

[25] http://www.eastman.com/Markets/VMTC/Pages/Profile_Extrusion.aspx

[26] http://www.ceejpublishing.com/Articles/0018.htm

[27] O. S. Carneiro (1), J. M. Nóbrega (1), J.A. Covas (1), P. J. Oliveira (2), F. T. Pinho (3). A study on the thermal performance of calibrators. Maney Publishing. 2002.

[28] Advanced Cooling Technology for Pipe & Profile Extrusion. Technology Bulletin from the extrusion experts at Conair. 2010

[29] Ana Espert Bernia, Álvaro Estrada Luna, Edén León García. EXTRUSIÓN: Informe de Vigilancia Tecnológica 2009