

2.3 PROCESO DE CONFORMADO PARA PLÁSTICOS

El término plástico en su sentido original se aplica a un material que puede hacerse fluir para poder moldearse o modelarse. Esto es cierto en los metales, arcilla y otros materiales, pero el nombre ha llegado a denominar en forma específica un grupo de sólidos orgánicos que pueden hacerse fluir con facilidad mediante calor o presión o ambos en formas y darles un valor comercial.

Los plásticos en su mayor parte son productos de este siglo. Desde la antigüedad se han conocido placas y betunes naturales. El celuloide fue descubierto por Hyatt en 1868 en la búsqueda para encontrar un sustituto del marfil para hacer bolas de billar. La industria moderna del plástico principió con el desarrollo de la baquelita por Baekeland en 1909. Desde entonces, el progreso ha sido rápido con más de 30 familias químicamente distintas de plásticos, cientos de compuestos y miles de productos.

Los plásticos han tenido aceptación creciente ya que ofrecen combinaciones únicas con una amplia variedad de propiedades que se ajustan en forma particular a muchos desarrollos modernos. Los plásticos son de peso ligero; la mayoría pesan menos que el magnesio. Fuera de espumas plásticas especialmente ligeras, la gravedad específica promedio es aproximadamente 1.4. Esto los hace adecuados para guarniciones y accesorios en la aviación comercial y ha ayudado a aligerar muchos implementos manuales. Los plásticos son buenos aisladores eléctricos a frecuencias bajas y altas y tienen usos importantes en la industria eléctrica. También son buenos aisladores del calor. Algunos soportan la intemperie bien y son muy resistentes a la corrosión y el ataque químico.

Las resistencias de los plásticos abarcan una amplia gama. La mayoría de estos materiales están en el extremo bajo del rango, pero algunos tienen resistencias bastante altas. Su principal ventaja estructural es una relación alta de resistencia a peso. La resistencia a la tensión de algunos plásticos es sólo 7 MPa aproximadamente y la mayoría varían de 35 a 140 MPa, pero algunos plásticos reforzados tienen resistencias que llegan hasta 3 GPa. Como ejemplo de la ventaja resistencia-peso, una epoxy reforzada con tela tejida de vidrio con una resistencia a la tensión de 590 MPa y una gravedad específica de 1.85, tiene una relación de resistencia-peso de casi el doble que el acero de aleación tratado térmicamente y solo un poco menos que una aleación de titanio con tratamiento térmico.

La mayoría de las propiedades mecánicas de los plásticos son inferiores a las de los metales. Los plásticos están sujetos a cierta inestabilidad dimensional, con fluencia apreciable y flujo frío en todas las temperaturas, y algunos se hinchan con la humedad. La expansión térmica es grande en comparación con la de los metales. Las temperaturas más altas de trabajo varían desde 65 °C hasta 315 °C aproximadamente. En la mejor condición, la resistencia a la fatiga y la rigidez de los plásticos están bastante abajo de los metales.

La manufactura de los plásticos es económica porque la mayoría de los productos pueden ser acabados por completo mediante moldeo y formado sin operaciones secundarias. Las operaciones de moldeo y formado se ayudan por la facilidad de plegamiento y sensibilidad al calor; por ejemplo, una parte plástica puede hacerse intrincada con más facilidad en un molde que una parte metálica.

Es frecuente que el moldeo deje un buen acabado en la superficie, además puede agregarse lustre más brillante por un simple tratamiento con solvente o pulido. Están disponibles todos los colores. El color

se impregna en un objeto y es más duradero que la pintura. Algunos plásticos ofrecen verdadera transparencia sin la fragilidad del vidrio, los recipientes plásticos han sustituido en gran parte a los de vidrio. Es común el uso de materiales plásticos para revestimiento, protección y decoración.

El volumen total de polímeros (plásticos y hules) excede ahora al de los metales (el tonelaje es todavía mucho menor debido a la densidad de los metales, aunque el volumen es considerablemente mayor).

Aunque para formar plásticos se requiere usualmente el calentamiento, se necesita *menos energía* que para los metales porque las temperaturas de procesamiento son mucho más bajas para los plásticos. A causa de las bajas temperaturas usadas en el procesamiento, el manejo del producto se simplifica durante la producción. Muchos métodos de procesamiento plástico son de una sola operación (por ejemplo, moldeo) por tanto, el manejo de productos se reduce sustancialmente comparado con los metales. No se requiere acabado por pintura o depositación para los plásticos, excepto en circunstancias inusuales.

Los dos tipos de plásticos son termoplásticos y termofijos. La diferencia es que los termofijos durante su calentamiento y conformación sufren un proceso de curado, que causa un cambio químico permanente en su estructura molecular (*encadenamiento transversal*). Una vez que se han curado, no pueden fundirse a través de recalentamiento. Por el contrario los termoplásticos no experimentan el proceso de curado y su estructura química permanece básicamente sin cambio en los recalentamientos, aun cuando se transformen de sólido a líquido. Los termoplásticos son los tipos comerciales más importantes de los dos, comprenden más del 80% del tonelaje total de plásticos.

Empezaremos nuestra exposición de los procesos de conformado de plástico, examinando las propiedades de los polímeros fundidos; porque casi todos los procesos de conformación de termoplásticos comparten el paso común de calentamiento del plástico para hacer que éste fluya.

2.3.1 PROPIEDADES DE LOS POLÍMEROS FUNDIDOS

Para formar un polímero termoplástico, éste debe calentarse hasta que tome una consistencia líquida. Esto es lo que se conoce como un *polímero fundido*, el cual exhibe varias propiedades que se considerarán en esta sección.

Viscosidad Debido a su alto peso molecular, un polímero fundido es un fluido espeso con alta viscosidad. La *viscosidad*, es una propiedad del fluido que relaciona el esfuerzo cortante experimentado durante el flujo del fluido con la velocidad de corte. La viscosidad es importante en el procesamiento de polímeros, debido a que la mayoría de los métodos de conformado involucran el flujo de polímeros fundidos a través de los pequeños canales o aberturas del dado. Las velocidades de flujo son frecuentemente grandes, e implican altas velocidades de corte; y como los esfuerzos cortantes se incrementan con la velocidad de corte, se requieren presiones significativas para realizar estos procesos.

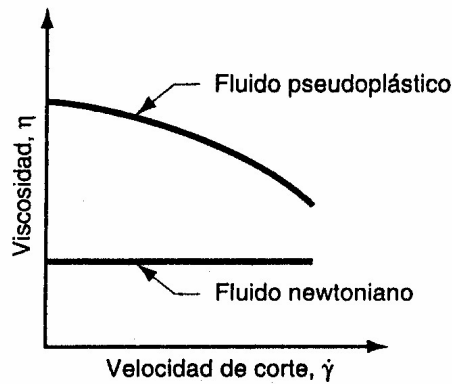


FIGURA 2.27 Relaciones de viscosidad para fluidos newtonianos y un polímero fundido típico.

La figura 2.27 muestra la viscosidad en función de la velocidad de corte para dos tipos de fluidos. Para un fluido *newtoniano* (que incluye a los fluidos más simples como el agua y el aceite) la viscosidad es una constante a una temperatura dada y no cambia con la velocidad de corte. La relación entre el esfuerzo y la deformación cortante es proporcional, siendo la viscosidad la constante de proporcionalidad:

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad \text{o} \quad \eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2.13)$$

Donde:

τ = esfuerzo cortante, N/m²;

η = coeficiente de viscosidad de corte, Ns/m² o Pa·s

$\dot{\gamma}$ = velocidad de corte, seg⁻¹.

Sin embargo para un polímetro fundido la viscosidad decrece con la velocidad de corte, lo cual indica que el fluido se hace más delgado a velocidades de corte más altas. Este comportamiento se llama *pseudoplasticidad* y puede modelarse con una razonable aproximación mediante la expresión:

$$\tau = k(\dot{\gamma})^n \quad (2.14)$$

Donde:

k = una constante correspondiente al coeficiente de viscosidad y

n = índice de comportamiento de flujo.

Para $n=1$ la ecuación se reduce a la ecuación previa (2.13) para un fluido newtoniano y k se vuelve n para un polímetro fundido, los valores de n son menores a 1.

Además del efecto de la velocidad de corte (velocidad de flujo del fluido), la temperatura afecta la viscosidad de un polímetro fundido. Como en la mayoría de los fluidos, su valor decrece al incrementarse la temperatura. Esto se muestra en la figura 2.28 para varios polímeros comunes a una velocidad de

corte de 10 seg^{-1} . Esta velocidad de corte se aproxima a las que se encuentran en las operaciones de moldeo por inyección y operaciones de extrusión a alta velocidad.

De esta manera vemos que la viscosidad de un polímero fundido decrece con valores crecientes de velocidad de corte y temperatura. Nuestra ecuación previa (2.14) puede aplicarse, excepto que k depende de la temperatura como se muestra en la figura 2.28.

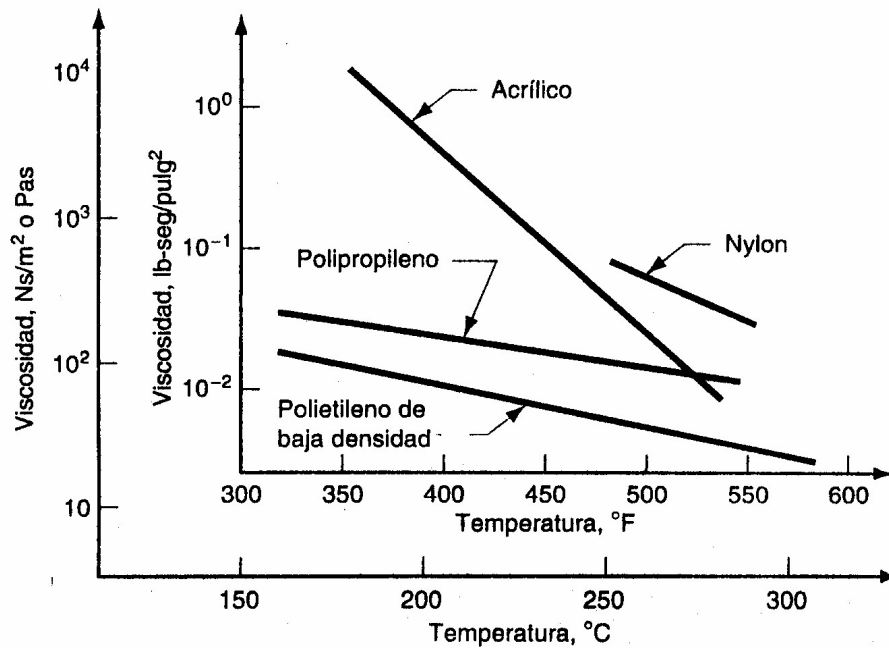


FIGURA 2.28 Viscosidad en función de la temperatura para polímeros seleccionados a una velocidad de corte de 10^3 seg^{-1} .

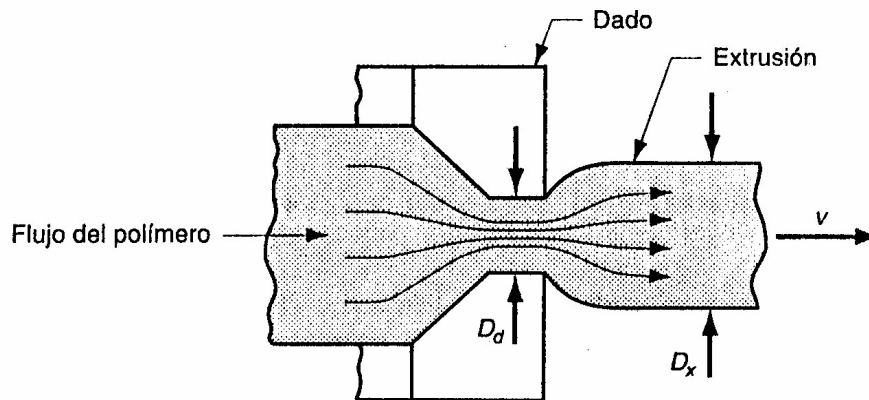


FIGURA 2.29 Dilatación en el dado, una manifestación de la viscoelasticidad en polímeros fundidos, como se muestra aquí al salir del dado de extrusión.

Viscoelasticidad Otra propiedad de los polímeros fundidos es la viscoelasticidad, un buen ejemplo es la *dilatación en el dado* en la extrusión, en la cual, el plástico caliente se expande cuando sale de la

abertura del dado. El fenómeno, ilustrado en la figura 2.29, puede explicarse haciendo notar que el polímero estaba contenido en una sección transversal mucho mas ancha antes de entrar al estrecho canal del dado. En efecto, el material extruido recuerda su antigua forma y tiende a retornar a ella después de dejar el orificio del dado. Técnicamente el esfuerzo de compresión que actúa en el material al entrar a la pequeña abertura del dado no se releva inmediatamente. Cuando el material subsiguiente sale del orificio y se remueve la restricción, los esfuerzos no relevados hacen que la sección transversal se expanda.

La dilatación en el dado puede medirse fácilmente para una sección transversal circular por medio de la relación de dilatación, que se define como:

$$r_s = \frac{D_x}{D_d} \quad (2.15)$$

Donde:

r_s = razón de dilatación,

D_x = diámetro de la sección transversal extruida, mm,

D_d = diámetro del orificio del dado, mm.

La cantidad de dilatación en el dado depende del tiempo que el polímero fundido permanece en el canal del dado. La dilatación en el dado se reduce aumentando el tiempo en el canal, y esto se logra por medio de un canal más largo.

Índice de flujo de la fusión El índice de flujo de la fusión es una medida ampliamente usada que relaciona el flujo y la viscosidad características del polímero. El polímero se calienta en un cilindro a una temperatura T y luego se hace fluir a través de la abertura del dado de un diámetro particular D , bajo una presión especificada. Los parámetros del ensayo están normalizados por organizaciones tales como la ASTM. El *índice de flujo de la fusión* IFF (en inglés *melt flow index*, MFI) se define Como el peso del material que fluye a través del orificio del dado durante un periodo especificado.

El índice de flujo de la fusión mide una propiedad compleja que depende de la temperatura y de la velocidad de corte. No debe usarse para comparar diferentes tipos de polímeros; sin embargo, es apropiado para comparar diferentes grados del mismo polímero, por ejemplo polietileno. Para este propósito, es un medio útil que distingue diferencias en el peso molecular de un polímero. A medida que disminuye el MFI, el peso molecular y el grado de polimerización aumentan. La viscosidad de un polímero fundido no depende solamente de la temperatura y de la velocidad de corte, sino también de su peso molecular.

A continuación se analizaran los procesos de manufactura para plásticos, estos se clasifican en: extrusión, producción de laminas y películas, procesos de recubrimiento, moldeo por inyección, moldeo

por compresión y transferencia, moldeo por soplado y moldeo rotacional, termoformado, procesamiento y formado de espumas de polímeros,

2.3.2 EXTRUSIÓN

La *extrusión* es un proceso de compresión en el cual se fuerza al material a fluir a través del orificio de un dado para generar un producto largo y continuo, cuya forma esta definida por la forma de la sección transversal del orificio. Es un proceso de conformación para polímeros que se usa ampliamente con termoplásticos y elastómeros (rara vez con termofijos) para producir masivamente artículos como tubos, ductos, mangueras, perfiles estructurales (molduras de ventanas y puertas), láminas y películas, filamentos continuos, recubrimientos de alambres y cables eléctricos. Para este tipo de productos, la extrusión se lleva a cabo como un proceso continuo y se corta en las longitudes deseadas.

2.3.2.1 Procesos y Equipos

En la extrusión de polímeros el material en forma de *pelets* se alimenta a un cilindro de extrusión, donde se calienta y se le hace fluir a través del orificio de un dado por medio de un tornillo giratorio (gusano), como se ilustra en la figura 2.30. Los dos componentes principales del extrusor son el cilindro y el tornillo. El dado no es un componente del extrusor, sino una herramienta especial que debe fabricarse con el perfil particular a producir.

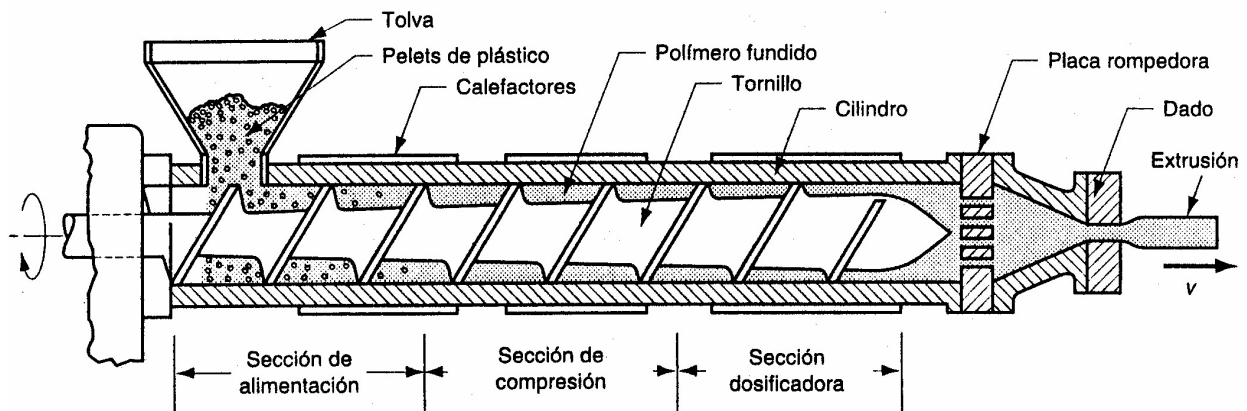


FIGURA 2.30 Componentes y características de un extrusor (de tornillo único) para plásticos y elastómeros. La relación L/D está reducida para mayor claridad del dibujo.

El diámetro interno del cilindro extrusor fluctúa típicamente entre 25 a 150 mm. El cilindro es largo con respecto a su diámetro con una relación L/D usualmente ente 10 y 30. Las relaciones más grandes se usan para materiales termoplásticos, mientras que los valores más bajos de L/D son para elastómeros. La tolva que contiene el material de alimentación se localiza en un extremo del cilindro. Los pelets se alimentan por gravedad sobre el tornillo giratorio, que mueve el material a lo largo del cilindro. Se utilizan

calentadores eléctricos para fundir inicialmente los pelets sólidos; el mezclado y el trabajo mecánico subsiguiente del material generan el calor adicional que mantiene la fusión. En algunos casos, el mezclado y la acción cortante generan el calor suficiente, de manera que no se requiere calentamiento externo. De hecho, en algunos casos el cilindro debe ser enfriado externamente para prevenir el sobrecalentamiento del polímero.

El material se transporta a través del cilindro hacia la abertura del dado por la acción del tornillo extrusor, que gira aproximadamente a 60 rev/min. El tornillo tiene varias funciones y se divide en secciones que corresponden a cada función. Las secciones y las funciones son: 1) *Sección de alimentación*, en la cual el material se mueve desde la puerta de la tolva y se precalienta; 2) *sección de compresión*; donde el polímero adquiere una consistencia líquida, el aire atrapado entre los pelets se extrae de la fusión y el material se comprime y 3) *sección dosificadora*; en la cual se homogeneiza la fusión y se desarrolla suficiente presión para bombearla a través del orificio del dado.

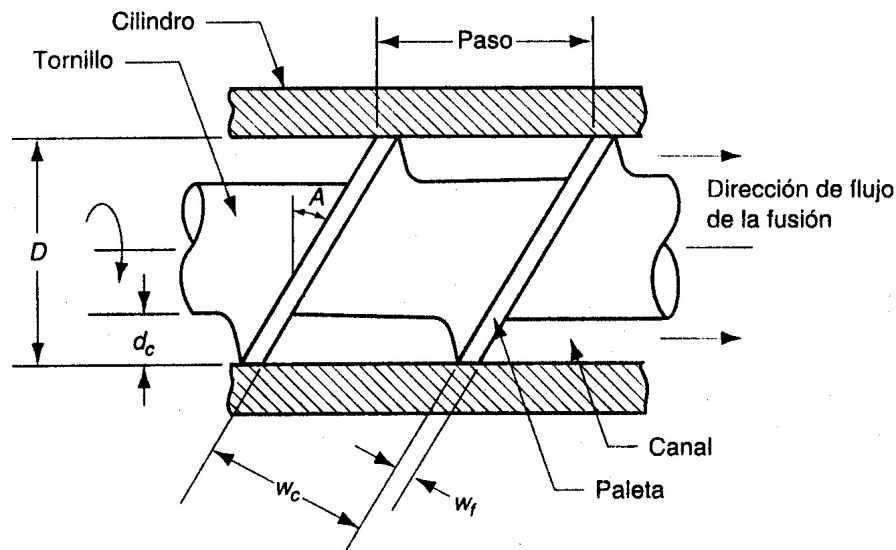


FIGURA 2.31 Detalles de un tornillo extrusor dentro del cilindro.

La operación del tornillo está determinada por su geometría y su velocidad de rotación. La geometría típica de un tornillo extrusor se describe en la figura 2.31. El tornillo consiste en paletas o aspas espirales (roscas) con canales entre ellas, que conducen el polímero fundido. El canal tiene un ancho w_c y una profundidad d_c . Al girar el tornillo, las paletas empujan el material hacia adelante a través del canal desde la tolva hasta el dado. Aunque no se aprecia en el diagrama, el diámetro de la paleta es más pequeño que el del cilindro D con un pequeño claro de aproximadamente 0.05 mm. La función de este claro es limitar la fuga de la fusión hacia atrás, a través del canal conductor. La pared de la paleta tiene un ancho w_f y está hecha de acero endurecido para resistir el desgaste al girar y al rozar contra el interior del cilindro. El tornillo tiene un paso, cuyo valor es generalmente cercano al diámetro D . El ángulo de la paleta A es el ángulo de la hélice del tornillo y puede determinarse mediante la relación:

$$\tan A = \frac{\text{paso}}{\pi D} \quad (2.16)$$

El incremento de presión que se aplica al polímero fundido en las tres secciones del cilindro se determina en gran parte por la profundidad del canal d_c . En la figura 2.30, d_c es relativamente grande en la sección de alimentación para permitir la admisión de grandes cantidades de polímero granular en el cilindro. En la sección de compresión, d_c se reduce gradualmente, aplicando así presión creciente en el polímetro al ser fundido. En la sección dosificadora, d_c es pequeño y la presión alcanza un máximo al restringirse el flujo por el empaque de la pantalla y la placa de sostén. En la figura 2.30, las tres secciones del tornillo se muestran iguales en longitud; esto es apropiado para un polímero que funde gradualmente como el polietileno de baja densidad PEBD (en inglés LDPE). Para otros polímeros, las longitudes óptimas de las secciones son diferentes. Para polímeros cristalinos como el nylon, la fusión ocurre más bien abruptamente en un punto específico de fusión, en consecuencia es apropiada una sección corta de compresión. Los polímeros amorfos como el cloruro de polivinilo funden más lentamente que el LDPE, y la zona de compresión para estos materiales debe tomar casi la longitud entera del tornillo. Aunque el diseño óptimo del tornillo para cada tipo de material es diferente, es una práctica común usar tornillos de propósito general. Estos diseños representan un compromiso entre los diferentes materiales y se evita la necesidad de hacer frecuentes cambios de tornillo, asociados con los paros del equipo.

El avance de los polímeros a lo largo del cilindro conduce finalmente a la zona del dado. Antes de alcanzar el dado, la fusión pasa a través de una malla la cual es una serie de cribas de alambre soportadas por un plato rígido (llamado plato rompedor) que contiene pequeños agujeros axiales. La malla funciona para 1) filtrar contaminantes y terrones duros de la fusión, 2) acumular presión en la sección dosificadora y 3) enderezar el flujo del polímero fundido y borrar su memoria del movimiento circular impuesto por el tornillo. Esta última función se relaciona con la propiedad viscoelástica del polímeros; si el flujo no fuera enderezado hacia la izquierda, el polímero podría recuperar sus giros dentro de la cámara de extrusión, tendiendo a crecer y a distorsionar la extrusión.

Lo que hemos descrito hasta aquí es una máquina convencional de extrusión de tornillo *simple*. Es necesario mencionar los *extrusores de tornillo doble* porque estos ocupan un lugar importante en la industria. En estas máquinas, los tornillos son paralelos dentro del cilindro. Los extrusores de tornillos gemelos parecen especialmente adaptados para el PVC rígido, un polímero difícil de extruir normalmente y para materiales que requieren un mayor mezclado

2.3.2.2 Configuraciones de los dados y productos extruidos

La forma del orificio del dado determina la forma de la sección transversal de la extrusión. Los perfiles comunes del dado y las formas correspondientes de las extrusiones son: 1) perfiles sólidos; 2) perfiles huecos, tubos por ejemplo; 3) láminas y películas; 4) recubrimientos de cables y alambres. Las primeras dos categorías se cubren en la presente sección. En la sección 2.3.3 se examinan métodos de producción de láminas y películas y en la sección 2.3.4 se describe el proceso de recubrimiento.

Perfiles sólidos Los perfiles sólidos incluyen formas regulares, como secciones redondas, cuadradas e irregulares, como los perfiles estructurales, molduras para puertas y ventanas, accesorios automotrices y chapas domésticas. En la figura 2.32 se ilustra una vista lateral de la sección de un dado para producir estas formas sólidas. Al final del tornillo y antes del dado, la fusión de polímero pasa a través de un empaque cernidor y de una placa rompedora para enderezar las líneas de flujo. Luego fluye hacia el interior de la entrada convergente del dado, forma diseñada generalmente para mantener el flujo laminar y evitar los puntos muertos en las esquinas que podrían presentarse cerca del orificio. La fusión fluye entonces a través de la abertura misma del dado.

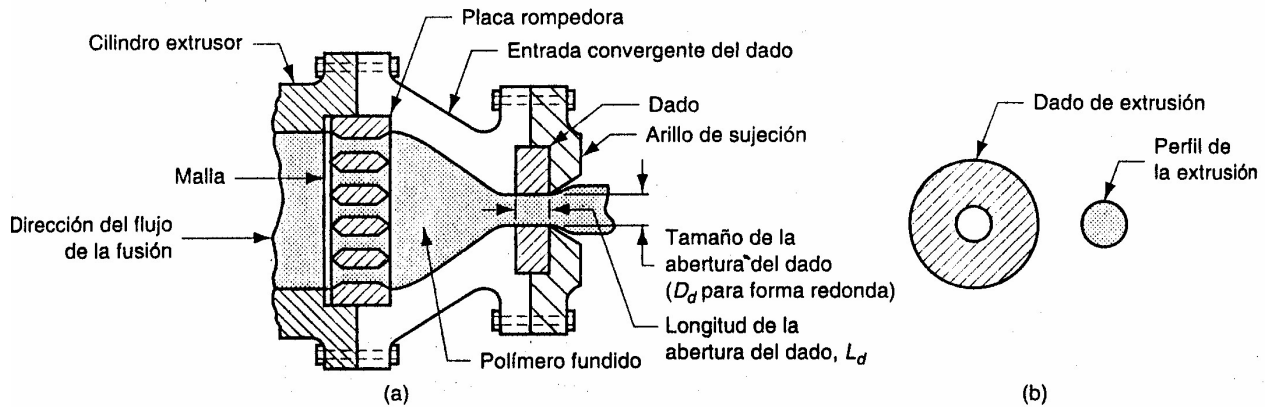


FIGURA 2.32 (a) Vista lateral de la sección de un dado de extrusión para formas sólidas regulares como material redondo; (b) vista frontal del dado con el perfil de la extrusión. La dilatación en el dado es evidente en ambas vistas. Algunos detalles de la construcción del dado están simplificados o se omiten para mayor claridad.

Cuando el material deja el dado todavía está suave. Los polímeros con alta viscosidad de fusión, son los mejores candidatos para la extrusión, ya que durante el enfriado mantienen mejor la forma. El enfriado se realiza por sople de aire, por rociado con agua o pasando la extrusión en una cuba o depósito de agua. Algunas veces se estira la extrusión para compensar la expansión de la dilatación en el dado.

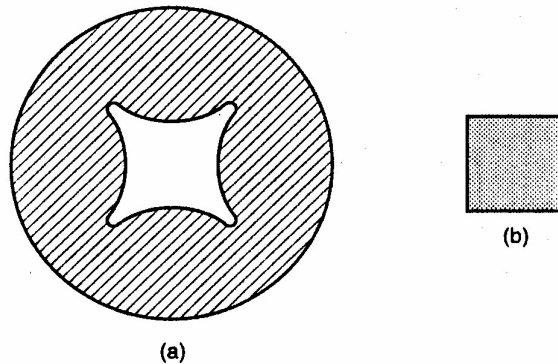


FIGURA 2.33 (a) Sección transversal del dado mostrando el perfil requerido para obtener (b) un perfil cuadrado de extrusión.

Para formas no redondas, la abertura del dado se diseña con una sección ligeramente diferente del perfil deseado, así el efecto de la expansión en el dado provee la corrección de la forma. Esta corrección se ilustra en la figura 2.33 para una sección cuadrada. La forma de la sección del dado depende del material a extruir, ya que los diferentes polímeros exhiben diferentes grados de dilatación en el dado. Se requiere considerable habilidad y juicio para diseñar un dado para secciones transversales complejas.

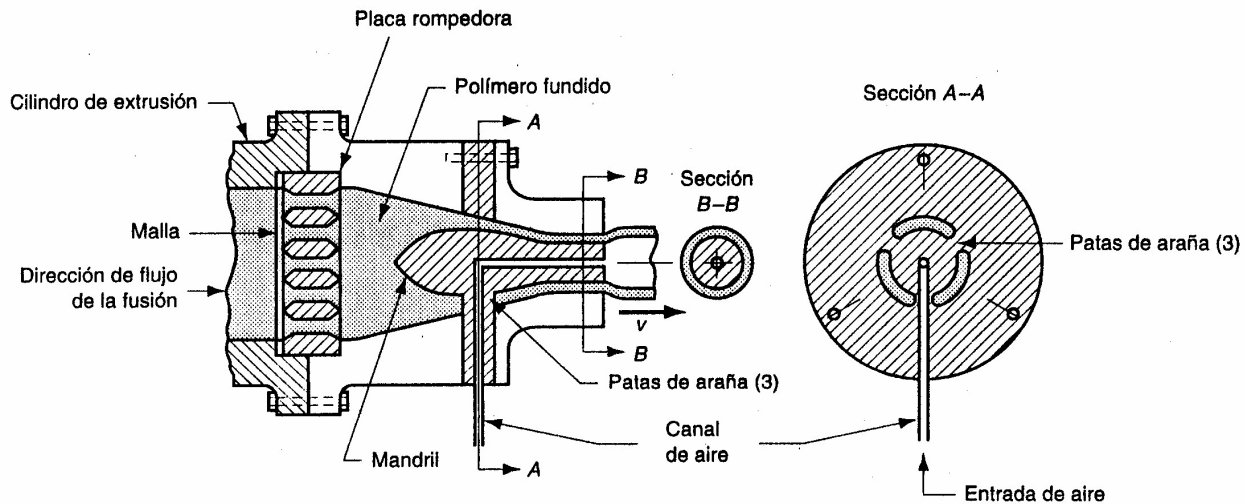


FIGURA 2.34 Vista lateral del corte de un dado de extrusión para formar secciones huecas como ductos y tubos; la sección A-A es una vista frontal que muestra cómo se sujeta el mandril en su lugar; la sección B-B muestra la sección transversal tubular poco antes de salir del dado; la dilatación en el dado causa una dimensión mayor en el diámetro. (Algunos detalles de construcción están simplificados.)

Perfiles huecos La extrusión de perfiles huecos, como tubos, ductos, mangueras y otras secciones similares, requiere un mandril para dar la forma hueca. Una configuración típica del dado se ilustra en la figura 2.34. El mandril se mantiene en su lugar usando una araña, como se muestra en la sección A-A de la figura. El polímero fundido fluye alrededor de las patas que soportan el mandril para volver a reunirse, formando la pared monolítica del tubo. El mandril incluye frecuentemente un canal a través del cual se sopla aire para mantener la forma hueca de la extrusión durante el endurecimiento. Los tubos y ductos se enfrían usando cubas abiertas de agua o jalando la extrusión suave mediante tanques llenos de agua con mangas calibradoras que limitan el diámetro exterior del tubo, mientras se mantiene la presión de aire en el interior.

2.3.2.3 Defectos en la extrusión

Los productos de extrusión pueden sufrir numerosos defectos. Uno de los peores es la *fractura de fusión*, en la cual los esfuerzos que actúan sobre la fusión inmediatamente antes y durante el flujo, a través del dado, son tan altos que causan rupturas que originan una superficie altamente irregular. Como se indica en figura 2.35, la fractura de fusión puede ser causada por una aguda reducción en la entrada

del dado que causa un flujo turbulento y rompe la fusión. Esto contrasta con el flujo laminar uniforme en el dado gradualmente convergente de la figura 2.32.

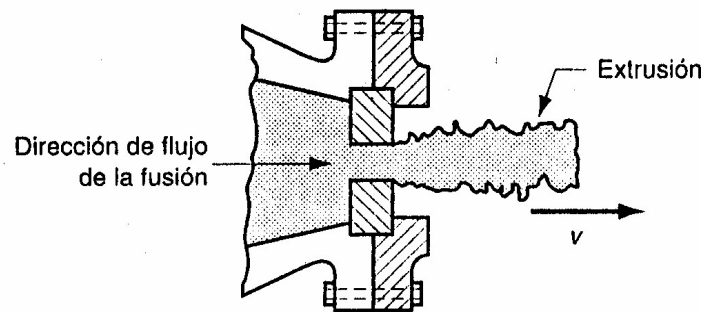


FIGURA 2.35 Fractura de la fusión causada por flujo turbulento en la fusión a través de una aguda reducción a la entrada del dado.

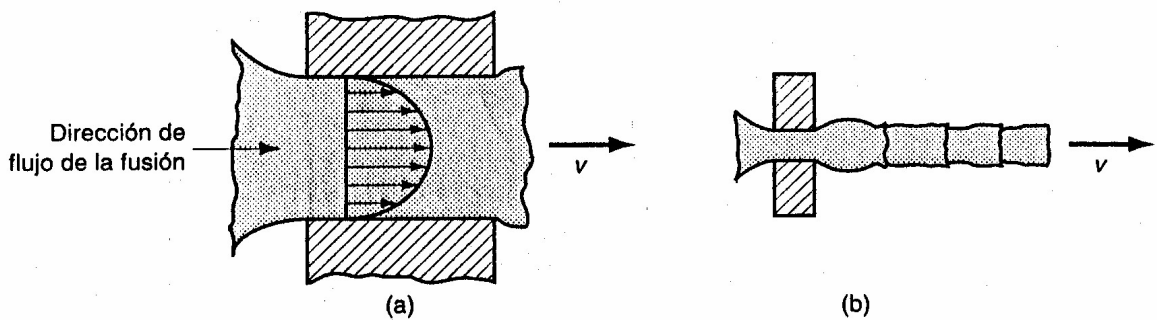


FIGURA 2.36 (a) Perfil de velocidades de la fusión al fluir a través de la abertura del dado, el cual puede conducir al defecto llamado piel de tiburón y (b) formación del tallo de bambú

Un defecto muy común en extrusión es la *piel de tiburón*, en la cual la superficie del producto se arruga al salir del dado. Conforme la fusión atraviesa la abertura del dado, la fricción con la pared produce un perfil diferencial de velocidades a través de la sección transversal (figura 2.36). Esto ocasiona esfuerzos tensiles en la superficie del material que se estira para igualar el movimiento más rápido del núcleo central. Estos esfuerzos causan rupturas menores que arrugan la superficie. Si el gradiente de velocidad se vuelve más grande, se forman marcas prominentes en la superficie que dan la apariencia de un *tallo de bambú* de aquí el nombre de este defecto más severo.