

### 3.2.3. EXTRUSION

La extrusión es un proceso de formado por compresión, en el cual el material de trabajo es forzado a fluir a través de la abertura de un dado para darle forma a su sección transversal. El proceso puede parecerse a apretar un tubo de pasta de dientes. La extrusión data desde 1800. Las ventajas de los procesos modernos incluyen: 1) se puede extruir una gran variedad de formas, especialmente con extrusión en caliente; sin embargo, una limitación es la geometría de la sección transversal que debe ser la misma a lo largo de toda la parte; 2) la estructura del grano y las propiedades de resistencia se mejoran con la extrusión en frío o en caliente; 3) son posibles tolerancias muy estrechas, en especial cuando se usa extrusión en frío; 4) en algunas operaciones de extrusión se genera poco o ningún material de desperdicio.

#### 3.2.3.1. Tipos de extrusión

La extrusión se lleva a cabo de varias maneras. Una forma de clasificar a estas operaciones es atendiendo a su configuración física, se distinguen dos tipos principales: extrusión directa y extrusión indirecta. Otro criterio es la temperatura de trabajo: en frío, en tibio o en caliente. Finalmente el proceso de extrusión puede ser continuo o discreto.

**Extrusión directa versus extrusión indirecta** La extrusión directa (también llamada extrusión hacia adelante) se ilustra en la figura 3.35. Un tocho de metal se carga a un recipiente y un pisón comprime el material forzándolo a fluir a través de una o más aberturas que hay en un dado situado al extremo opuesto del recipiente. Al aproximarse el pisón al dado, una pequeña porción del tocho permanece y no puede forzarse a través de la abertura del dado. Esta porción extra llamada *tope* o *cabeza*, se separa del producto, cortándola justamente después de la salida del dado.

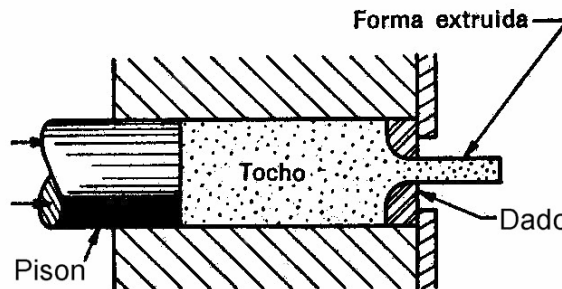


FIGURA 3.35 Extrusión directa

Un problema en la extrusión directa es la gran fricción que existe entre el tocho y la pared interna del recipiente al forzar el deslizamiento del tocho hacia la abertura del dado. Esta fricción ocasiona un incremento sustancial de la fuerza requerida en el pisón para la extrusión directa. En la extrusión en caliente este problema se agrava por la presencia de una capa de óxido en la superficie del tocho que puede ocasionar defectos en los productos extruidos. Para resolver este problema se usa un bloque

simulado entre el pistón y el tocho de trabajo, el diámetro del bloque es ligeramente menor que el diámetro del tocho, de manera que en el recipiente queda un anillo metal de trabajo (capas de óxido en su mayoría), dejando el producto final libre de óxidos.

En la extrusión directa se pueden hacer secciones huecas (por ejemplo, tubos) por medio del proceso que se ilustra en la figura 3.36. El tocho inicial se prepara con una perforación paralela a su eje. Esto permite el paso de un mandril que se fija en el bloque simulado. Al comprimir el tocho, se fuerza al material a fluir a través del claro entre el mandril y la abertura del dado. La sección transversal resultante es tubular. Otras formas semihuecas se extruyen usualmente de esta misma manera.

El tocho inicial en la extrusión directa es generalmente redondo, pero la forma final queda determinada por la abertura del dado. Obviamente la dimensión más grande de la abertura del dado debe ser más pequeña que el diámetro del tocho. La extrusión directa hace posible una infinita variedad de formas en la sección transversal. Algunas posibilidades se ilustran en la figura 3.36.

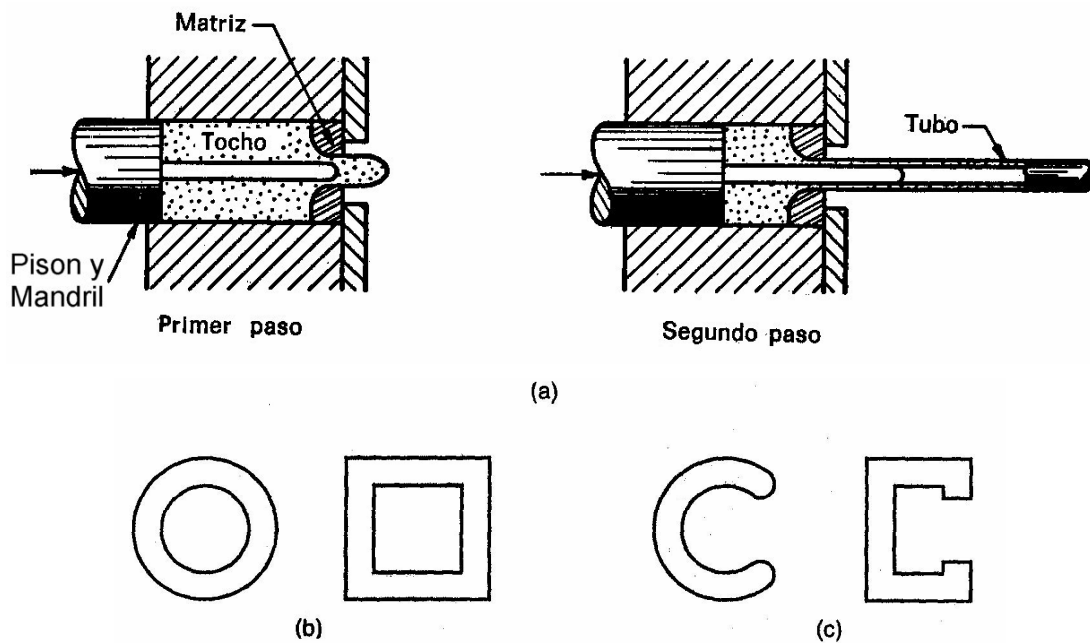


FIGURA 3.36 (a) Extrusión directa para producir una sección transversal hueca o semihueca; (b) hueca y (c) semihueca

En la **extrusión indirecta**, también llamada extrusión hacia atrás o extrusión inversa (figura 3.37), el dado está montado sobre el pistón, en lugar de estar en el extremo opuesto del recipiente. Al penetrar el pistón en el material de trabajo fuerza al metal a fluir a través del claro en una dirección opuesta a la del pistón. Como el tocho no se mueve con respecto al recipiente, no hay fricción en las paredes del recipiente. Por consiguiente, la fuerza del pistón es menor que en la extrusión directa. Las limitaciones de la extrusión indirecta son impuestas por la menor rigidez del pistón hueco y la dificultad de sostener el producto extruido tal como sale del dado.

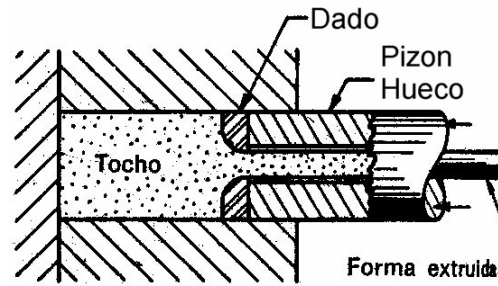


FIGURA 3.37 Extrusión indirecta para producir una sección transversal sólida.

La extrusión indirecta puede producir secciones huecas, como las de la figura 3.38. En este método el pistón presiona en el tocho, forzando al material a fluir alrededor del pistón y tomar una forma de copa. Hay limitaciones prácticas en la longitud de la parte extruida que pueden resolverse por este método. El sostenimiento del pistón se convierte en un problema a medida que la longitud del trabajo aumenta.

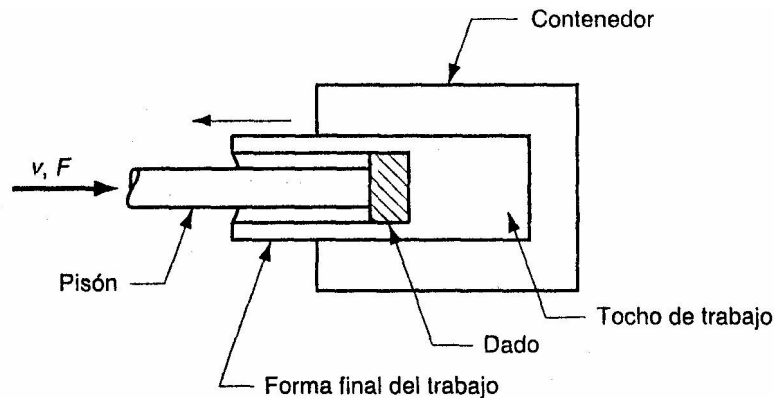


FIGURA 3.38 Extrusión indirecta para producir una sección transversal hueca.

**Extrusión en frío versus extrusión en caliente** La extrusión se puede realizar ya sea en frío o en caliente, dependiendo del metal de trabajo y de la magnitud de la deformación a que se sujete el material durante el proceso. Los metales típicos que se extruyen en caliente son: aluminio, cobre, magnesio, zinc, estaño y sus aleaciones. Estos mismos materiales se extruyen algunas veces en frío. Las aleaciones de acero se extruyen usualmente en caliente, aunque los grados más suaves y más dúctiles se extruyen algunas veces en frío (por ejemplo, aceros de bajo carbono y aceros inoxidables). El aluminio es probablemente el metal ideal para extrusión (en caliente o en frío), muchos productos comerciales de aluminio se hacen por este proceso (por ejemplo, perfiles estructurales y marcos, para puertas y ventanas).

La extrusión en caliente involucra el calentamiento previo del tocho a una temperatura por encima de su temperatura de cristalización. Esto reduce la resistencia y aumenta la ductilidad del metal, permitiendo mayores reducciones de tamaño y el logro de formas más complejas con este proceso. Las ventajas adicionales incluyen reducción de la fuerza en el pistón, mayor velocidad del mismo y reducción de las características del flujo de grano en el producto final. La lubricación es un aspecto crítico de la extrusión en caliente de ciertos metales (por ejemplo acero), y se han desarrollado lubricantes especiales

que son efectivos bajo las condiciones agresivas de la extrusión en caliente. Algunas veces se usa el vidrio como lubricante de la extrusión en caliente; además de reducir la fricción proporciona aislamiento térmico efectivo entre el tocho y el recipiente de extrusión.

En general, la *extrusión en frío* y la *extrusión en tibio* se usan para producir partes discretas, frecuentemente en forma terminada (o en forma casi terminada). El término extrusión por impacto se usa para indicar una extrusión fría de alta velocidad. Algunas ventajas importantes de la extrusión en frío incluyen mayor resistencia debida al endurecimiento por deformación, tolerancias estrechas, acabados superficiales mejorados, ausencia de capas de óxidos y altas velocidades de producción. La extrusión en frío a temperatura ambiente elimina también la necesidad de calentar el tocho inicial.

**Procesamiento continuo versus procesamiento discreto** Un verdadero proceso continuo opera con estabilidad por un periodo indefinido de tiempo. Algunas operaciones de extrusión se aproximan a este ideal, produciendo secciones muy largas en un solo ciclo, pero estas operaciones quedan al fin limitadas por el tamaño del tocho que se puede cargar en el contenedor de extrusión. Estos procesos se describen más precisamente como operaciones semicontinuas. En casi todos los casos las secciones largas se cortan en longitudes más pequeñas en una operación posterior de corte o aserrado.

En una operación discreta se produce una sola parte o pieza en cada ciclo de extrusión. La extrusión por impacto es un ejemplo de este caso de procesamiento discreto.

### 3.2.3.2. Análisis de la extrusión

Usaremos la figura 3.39 como referencia para nuestra revisión de algunos parámetros de extrusión. El diagrama asume que tanto el tocho como la extrusión tienen una sección redonda transversal.

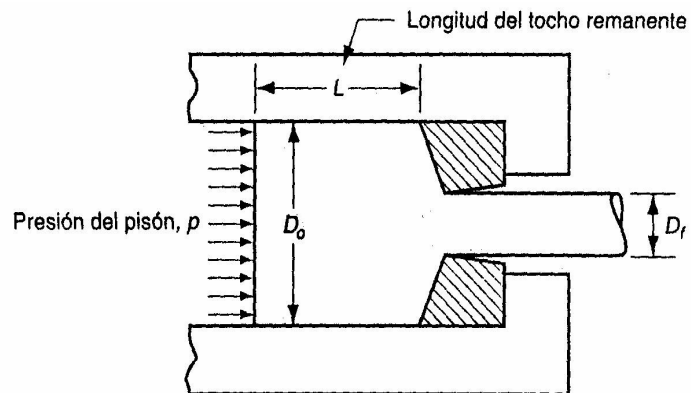


FIGURA 3.39 Presión y otras variables en la extrusión directa.

Un parámetro importante es la *relación de extrusión* también llamada *relación de reducción*. La relación se define como:

$$r_x = \frac{A_o}{A_f} \quad (3.24)$$

Donde

$r_x$  = relación de extrusión;

$A_o$  = área de la sección transversal del tocho inicial, (mm<sup>2</sup>);

$A_f$  = área final de la sección recta de la parte extruida, (mm<sup>2</sup>)

La relación se aplica tanto para la extrusión directa como para la indirecta. El valor de  $r_x$  se puede usar para determinar el *esfuerzo real* en la extrusión, dado que la deformación ideal ocurre sin fricción y sin trabajo redundante:

$$\varepsilon = \ln r_x \quad (3.25)$$

La presión aplicada por el pisón para comprimir el tocho a través de la abertura del dado se describe en la figura 3.39 y se puede calcular bajo la suposición de deformación ideal como sigue:

$$p = \bar{Y}_f \varepsilon_x \quad (3.26)$$

Donde

$\bar{Y}_f$  = esfuerzo de fluencia promedio durante la deformación, (MPa).

De hecho, la extrusión no es un proceso sin fricción, y las ecuaciones anteriores subestiman totalmente la deformación y la presión en una operación de extrusión. La fricción existe entre el dado y el material de trabajo, a medida que el tocho se comprime y pasa a través de la abertura del dado. En la extrusión directa, también existe la fricción entre la pared interna del contenedor y la superficie del tocho. La fricción incrementa la deformación experimentada por el metal. Por tanto, la presión real es mayor que la obtenida en la ecuación 3.26, que supone una extrusión sin fricción.

Se han sugerido varios métodos para calcular la deformación real y la presión del pisón asociada en la extrusión [1, 2, 4, 10, 11 y 18]. La siguiente ecuación empírica propuesta por Johnson [6] para estimar la deformación de extrusión ha ganado considerable reconocimiento:

$$\varepsilon_x = a + b \ln r_x \quad (3.27)$$

Donde

$\varepsilon_x$  = deformación de extrusión, a y b son constantes empíricas para el ángulo del dado. Los valores típicos de estas constantes son a = 0.8 y b = 1.2 a 1.5. Los valores de a y b tienden a aumentar cuando se incrementa el ángulo del dado.

La presión del pisón para desempeñar la *extrusión indirecta* se puede estimar con base en la fórmula de Johnson para la deformación de extrusión como sigue:

$$p = \bar{Y}_f \varepsilon_x \quad (3.28a)$$

Donde

$\bar{Y}_f$  se calcula con base en la deformación ideal de la ecuación 3.25, en lugar de la deformación de extrusión de la ecuación 3.27.

En la *extrusión directa*, el efecto de fricción entre las paredes del recipiente y el tocho ocasiona que la presión del pisón sea más grande que para la extrusión indirecta. Podemos escribir la siguiente expresión que aísla la fuerza de fricción en el recipiente de la extrusión directa:

$$\frac{P_f \pi D_o^2}{4} = \mu p_o \pi D_o L$$

Donde:

$P_f$  = presión adicional requerida para superar la fricción, (MPa);

$\pi D_o^2 / 4$  = área de la sección transversal del tocho, (mm<sup>2</sup>);

$\mu$  = coeficiente de fricción en la pared del recipiente;

$p_o$  = presión del tocho contra la pared del contenedor,

$\pi D_o L$  = área de la interfase entre el tocho y la pared del recipiente, (mm<sup>2</sup>).

El miembro a la derecha de la ecuación indica la fuerza de fricción entre el tocho y la pared del contenedor, el lado izquierdo, la fuerza adicional del pisón para superar dicha fricción,

En el peor de los casos, ocurre adherencia a la pared del recipiente con lo cual el esfuerzo de fricción iguala la resistencia a la fluencia cortante del metal de trabajo:

$$\mu p_o \pi D_o L = Y_s \pi D_o L$$

Donde

$Y_s$  = resistencia a la fluencia cortante, (MPa). Si asumimos que  $Y_s = \bar{Y}_f / 2$ , entonces  $P_f$  reduce a:

$$P_f = \bar{Y}_f \frac{2L}{D_o}$$

Con base en este razonamiento se puede usar la siguiente formula para calcular la presión del pisón en la extrusión directa:

$$p = \bar{Y}_f \left( \varepsilon_x + \frac{2L}{D_o} \right) \quad (3.28b)$$

Donde

El término  $2L/D_o$  representa la presión adicional debida a la fricción en la interfase contenedor - tocho.  $L$  es la porción de la longitud del tocho remanente para extruirse y  $D_o$  es el diámetro original del tocho.

Nótese que  $p$  disminuye al reducirse la longitud remanente del tocho durante el proceso. En la figura 3.40 se presentan las curvas típicas de la presión del pistón en función de la carrera del pistón para la extrusión directa e indirecta. La ecuación 3.38b probablemente sobreestima la presión del pistón. Las presiones podrían ser menores que los valores calculados por esta ecuación con una buena lubricación.

La fuerza del pistón en la extrusión directa o indirecta es simplemente la presión  $p$  de la ecuación 3.28a multiplicada por el área del tocho  $A_o$ .

$$F = pA_o \quad (3.29)$$

Donde

$F$  = fuerza del pistón en extrusión, (N).

El requerimiento de potencia para llevar a cabo la operación de extrusión es simplemente:

$$P = Fv \quad (3.30)$$

Donde

$P$  = potencia, (J/s);

$F$  = fuerza del pistón, (N);

$v$  = velocidad del pistón, (m/s).

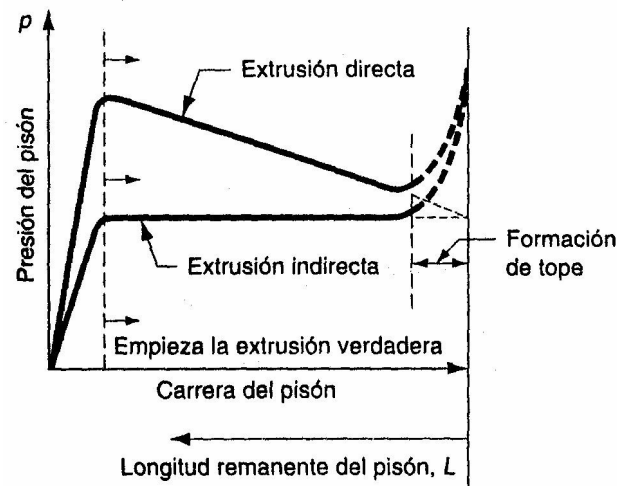


FIGURA 3.40 Gráficas típicas de la presión contra la carrera del pistón (y la longitud remanente del tocho) para extrusión directa e indirecta. Los valores más altos de la extrusión directa resultan de la fricción en las paredes del recipiente. La forma de la acumulación de la presión al inicio de la gráfica depende del ángulo del dado (mayores ángulos del dado significan acumulaciones de presión más pronunciadas). El incremento de presión al final de la carrera se relaciona con la formación del tope.

**EJEMPLO 3.3** Presiones de extrusión

Un tocho de 76 mm de largo y 25 mm de diámetro se extruye en una operación de extrusión directa con una  $r_x = 4.0$ . La extrusión tiene una sección recta transversal. El ángulo del dado (medio ángulo) =  $90^\circ$ . El metal de trabajo tiene un coeficiente de resistencia = 414 Mpa y un exponente de endurecimiento por deformación = 0.18. Use la fórmula de Johnson con  $a = 0.8$  y  $b = 1.5$  para estimar el esfuerzo de extrusión. Determine la presión aplicada al extremo del tocho cuando el pisón se mueve hacia adelante.

**Solución**

Examinamos la presión del pisón a las longitudes del tocho de  $L = 76$  mm (valor inicial),  $L = 50$  mm,  $L = 25$  mm y  $L = 0$ . Calculamos la deformación real ideal, la deformación de extensión usando la fórmula de Johnson y el esfuerzo de fluencia promedio:

$$\varepsilon = \ln r_x = \ln 4 = 1.3862$$

$$\varepsilon_x = a + b \cdot \ln r_x = 0.8 + 1.5 \cdot \ln 4 = 2.8794$$

De la ecuación 3.12

$$\bar{Y}_f = \frac{k\varepsilon^n}{1+n} = \frac{414 \times 10^6 \cdot 1.3862^{0.18}}{1+0.18} = 372089140.2 Pa$$

Para  $L = 76$  mm con un ángulo en el dado de  $90^\circ$ , se asume que el tocho será forzado a través de la abertura del dado casi inmediatamente; entonces nuestro cálculo asume que la presión máxima se alcanza a las longitudes del tocho de 76 mm. Para ángulos del dado menores a  $90^\circ$ , la presión podría acumularse a un máximo, como en la figura 3.40, al comprimirse el tocho inicial dentro de la porción en forma de cono del dado de extrusión. Usando la ecuación 3.28b.

$$p = \bar{Y}_f \left( \varepsilon_x + \frac{2L}{D_o} \right) = 372089140.2 \cdot \left( 2.8794 + \frac{2 \cdot 76 \times 10^{-3}}{25 \times 10^{-3}} \right) = 3333695442.71 Pa$$

Para  $L = 50$  mm

$$p = \bar{Y}_f \left( \varepsilon_x + \frac{2L}{D_o} \right) = 372089140.2 \cdot \left( 2.8794 + \frac{2 \cdot 50 \times 10^{-3}}{25 \times 10^{-3}} \right) = 2559750031.0 Pa$$

Para  $L = 25$  mm

$$p = \bar{Y}_f \left( \varepsilon_x + \frac{2L}{D_o} \right) = 372089140.2 \cdot \left( 2.8794 + \frac{2 \cdot 25 \times 10^{-3}}{25 \times 10^{-3}} \right) = 1815571751.0 Pa$$

$L = 0$ : La longitud 0 es un valor hipotético en extrusión directa. En realidad es imposible comprimir todo el metal a través de la abertura del dado. En su lugar, una porción del tocho (el tope) permanece sin extruir y la presión empieza a aumentar rápidamente conforme  $L$  se aproxima a cero. El incremento de presión al final de la carrera se observa en la gráfica de la presión del pisón contra la carrera del pisón en la figura 3.40. El próximo cálculo es el valor mínimo hipotético de la presión del pisón que podría resultar cuando  $L = 0$ .



$$p = \bar{Y}_f \left( \epsilon_x + \frac{2L}{D_o} \right) = 372089140.2 \cdot \left( 2.8794 + \frac{2 \cdot 0}{25 \times 10^{-3}} \right) = 1071393470.0 Pa$$

### 3.2.3.3. Dados y prensas de extrusión

Los factores importantes en un dado de extrusión son el ángulo del dado y la forma del orificio. El ángulo del dado, más precisamente la mitad del ángulo del dado, es el ángulo  $\alpha$  de la figura 3.41(a). Para ángulos menores, el área superficial del dado aumenta, así como también la fricción en la interfase dado-tocho. Mayor fricción significa mayor fuerza en el pisón. Por otra parte, un ángulo grande del dado ocasiona mayor turbulencia del flujo de metal durante la reducción, y también incremento en la fuerza requerida del pisón. El efecto del ángulo del dado sobre la fuerza del pisón es una función en forma de U como se muestra en la figura 3.41(b). Existe un ángulo óptimo del dado, como lo sugiere nuestra gráfica hipotética. Este ángulo depende de varios factores como material de trabajo, temperatura del tocho y lubricación; en consecuencia, es difícil determinarlo para un trabajo de extrusión. Los diseñadores de dados usan reglas empíricas para decidir el ángulo apropiado.

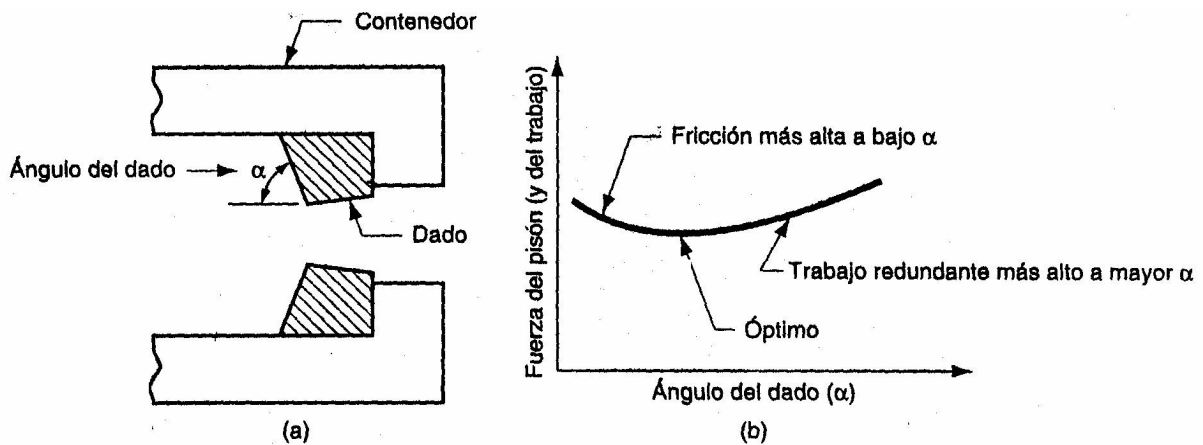


FIGURA 3.41 (a) Definición del ángulo del dado en extrusión directa, (b) efecto del ángulo del dado sobre la fuerza del pisón.

Las ecuaciones previas para la presión del pisón, ecuaciones 3.28(a) y (b), se aplican a los orificios circulares del dado. La forma del orificio del dado afecta la presión requerida del pisón en una operación de extrusión. Una sección transversal compleja, figura 3.42, requiere más presión y fuerza que una sección circular. El efecto de la forma del orificio del dado puede valorarse por el *factor de forma*, definido como la relación entre la presión requerida para extruir una sección transversal de la forma dada y la presión de extrusión para una sección redonda de la misma área. Podemos expresar el factor de forma como sigue:

$$k_x = 0.98 + 0.22 \left( \frac{C_x}{C_c} \right)^{2.25} \quad (3.31)$$

Donde:

$k_x$  = factor de forma del dado en extrusión;

$C_x$  = perímetro de la sección transversal extruida, (mm);

$C_c$  = perímetro de un círculo de la misma área que la forma extruida, (mm)

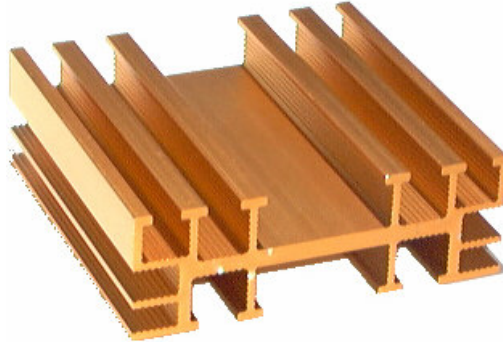


FIGURA 3.42 Una extrusión de sección transversal compleja para un disipador de calor (foto cortesía de Aluminum Company of América).

La ecuación 3.31 se basa en los datos empíricos de la referencia [1] en una escala de valores de  $\frac{C_x}{C_c}$  desde 1.0 hasta cerca de 6.0. La ecuación puede no ser válida para valores mayores al límite superior de esta escala.

Como indica la ecuación 3.31, el factor de forma es una función del perímetro de la sección transversal del material extruido, dividida por el perímetro de una sección circular de área igual. Una forma circular es la forma más simple con un valor de  $K_x = 1.0$ . Las secciones huecas de superficies delgadas tienen factores de forma más altos y difíciles de extruir.

El aumento de la presión no se incluye en nuestras ecuaciones anteriores para la presión, los cuales se aplican solamente para secciones transversales redondas, ecuación 3.28. Para formas distintas a la redonda la expresión correspondiente para una extrusión indirecta es:

$$p = K_x \bar{Y}_f \varepsilon_x \quad (3.32a)$$

y para extrusión directa:

$$p = K_x \bar{Y}_f \left( \varepsilon_x + \frac{2L}{D_0} \right) \quad (3.32b)$$

Donde:

$p$  = fuerza de extrusión (MPa);

$K_x$  = factor de forma;

Los otros términos tienen el mismo significado de antes. Los valores de la presión obtenidos por estas ecuaciones pueden usarse en la ecuación 3.29 para determinar la fuerza del pisón.

Los materiales para dados de extrusión en caliente incluyen aceros de herramienta y aceros aleados. Las propiedades más importantes de estos materiales son alta resistencia al desgaste, alta dureza en caliente y alta conductividad térmica para remover el calor del proceso. Los materiales para dados de extrusión en frío incluyen aceros de herramienta y carburos cementados. Sus propiedades deseables son resistencia al desgaste y buena disposición para retener su forma bajo altos esfuerzos. Los carburos se usan cuando se requieren altas velocidades de producción, larga vida de los dados y buen control dimensional.

Las prensas de extrusión pueden ser horizontales o verticales, dependiendo de la orientación de los ejes de trabajo. Los tipos horizontales son los más comunes. Las prensas de extrusión son accionadas normalmente por fuerza hidráulica, la cual es especialmente apropiada para producción semicontinua de secciones largas, como en la extrusión directa. Frecuentemente se usa la pulsión mecánica para extrusión en frío de partes individuales, tales como la extrusión por impacto.

#### 3.2.3.4. Otros procesos de extrusión

Los métodos principales de extrusión son la extrusión directa e indirecta. Hay varios nombres que se dan a algunas operaciones especiales de extrusión directa o indirecta cuyos métodos se describen aquí. Otras operaciones de extrusión son únicas. En esta sección examinamos estas formas de extrusión y los procesos relacionados.

**La extrusión por impacto** La extrusión por impacto se realiza a altas velocidades y carreras más cortas que la extrusión convencional. Se usa para hacer componentes individuales. Como su nombre lo indica, el punzón golpea a la parte de trabajo más que aplicar presión. La extrusión por impacto se puede llevar a cabo como extrusión hacia adelante, extrusión hacia atrás o una combinación de ambas. Algunos ejemplos representativos se muestran en la figura 3.43

La extrusión por impacto se hace usualmente en frío, con varios metales, la extrusión por impacto hacia atrás es la más común. Los productos hechos por este proceso incluyen tubos para pastas de dientes y cajas de baterías. Estos ejemplos muestran que se pueden hacer paredes muy delgadas en las partes extruidas por impacto. Las características de alta velocidad del proceso por impacto permiten grandes reducciones y altas velocidades de producción, de aquí su alta importancia comercial.

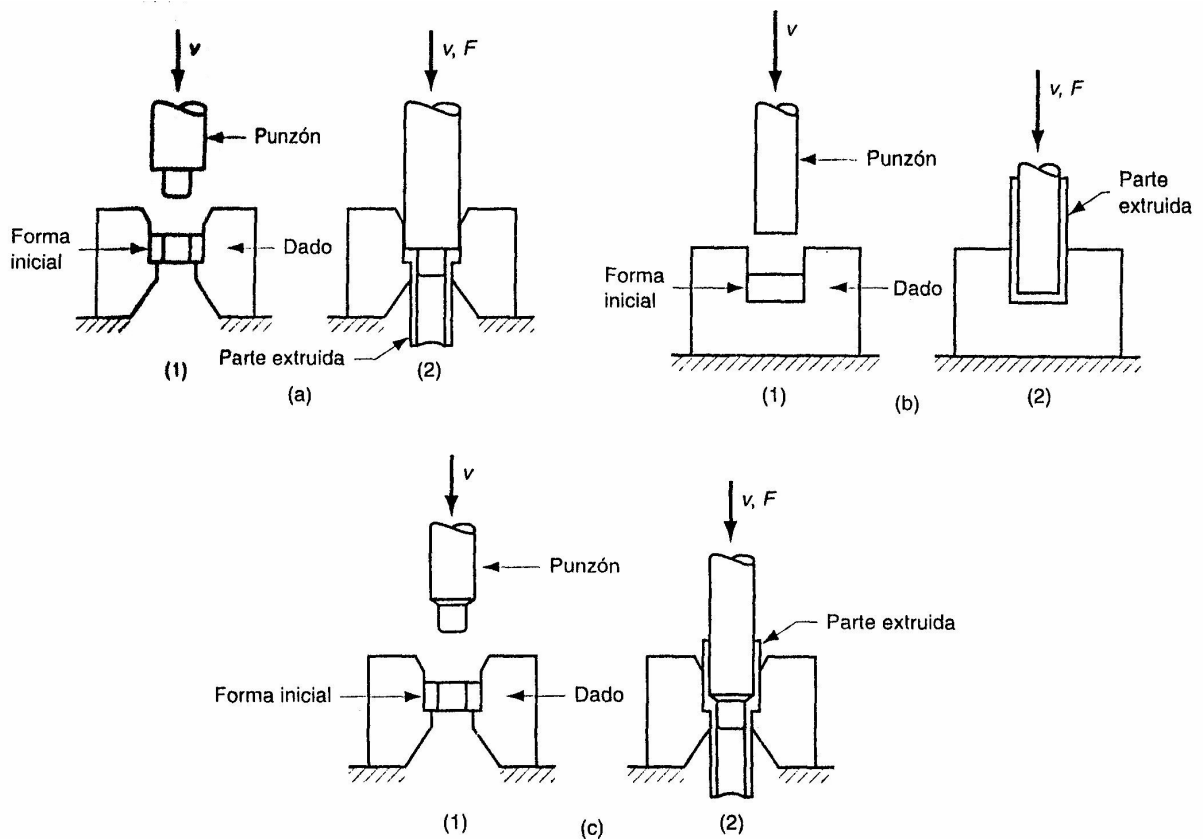


Figura 3.43 Varios ejemplos de extrusión por impacto: (a) hacia delante (b) hacia atrás y (c) combinación de las dos.

**Extrusión hidrostática** Un problema de la extrusión directa es la fricción a lo largo de la interfase tocho-contenedor. Este problema se puede solucionar utilizando un fluido en el interior del contenedor y ponerlo en contacto con el tocho, luego presionar el fluido con el movimiento hacia adelante del pistón, como se muestra en la figura 3.43. De tal manera que no exista fricción dentro del recipiente y se reduzca también la fricción en la abertura del dado. La fuerza del pistón es entonces bastante menor que en la extrusión directa. La presión del fluido que actúa sobre todas las superficies del tocho da su nombre al proceso. Se puede llevar a cabo a temperatura ambiente o a temperaturas elevadas. Para temperaturas elevadas se necesitan fluidos y procedimientos especiales. La extrusión hidrostática es una adaptación de la extrusión directa.

La presión hidrostática sobre el material de trabajo incrementa la ductilidad del material. Por consiguiente, este proceso se puede usar con metales que son demasiado frágiles para operaciones de extrusión convencional. Los metales dúctiles también pueden extruirse hidrostáticamente y es posible una alta relación de reducción en esos materiales. Una desventaja del proceso es que se requiere preparar los tochos iniciales de trabajo. El tocho debe formarse con un huso en uno de sus extremos para ajustarlo al ángulo de entrada del dado. Éste actúa como un sello que previene fugas del fluido a través de la abertura del dado, al iniciar la presurización del recipiente.

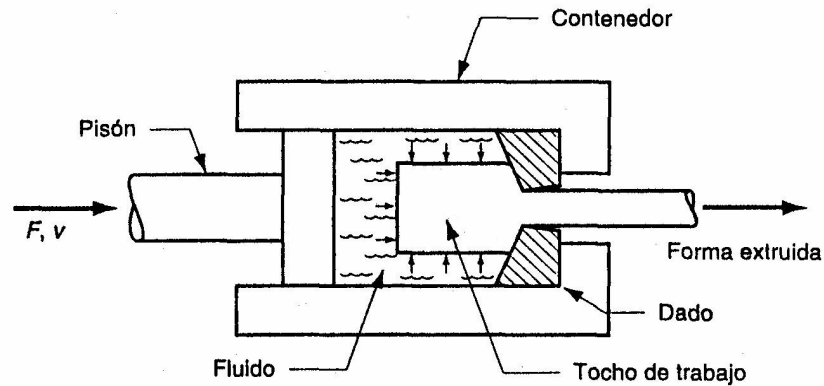


FIGURA 3.44 Extrusión hidrostática.

### 3.2.3.5. Defectos en productos extruidos

Debido a la considerable deformación asociada a las operaciones de extrusión, pueden ocurrir numerosos defectos en los productos extruidos. Los defectos se pueden clasificar en las siguientes categorías que se ilustran en la figura 3.45.

- *Reventado central.* Este defecto es una grieta interna que se desarrolla como resultado de los esfuerzos de tensión pueden parecer improbables en un proceso de compresión como la extrusión, tienden a ocurrir bajo condiciones que ocasionan gran deformación en regiones de trabajo apartadas del eje central. El movimiento de material más grande en las regiones exteriores, estira el material a lo largo del centro de la pieza de trabajo. Si los esfuerzos son lo suficientemente grandes, ocurre el reventado central. Las condiciones que promueven estas fallas son los ángulos obtusos del dado, las bajas relaciones de extrusión y las impurezas del metal de trabajo que sirven como puntos de inicio para las grietas. Lo difícil del reventado central es su detección. Es un defecto interno que no se observa generalmente por inspección visual. Otros nombres que se usan para este efecto son *fractura de punta de flecha*, *agrietado central* y *agrietado tipo chevron*.
- *Tubificado (bolsa de contracción).* La tubificación es un defecto asociado con la extrusión directa. Como se puede apreciar en la figura 3.45 (b), es un hundimiento en el extremo del tocho. El uso de un bloque simulado, cuyo diámetro sea ligeramente menor que el del tocho, ayuda a evitar la tubificación. Otros nombres que se dan a este defecto son *cola de tubo* y *cola de pescado*.
- *Agrietado superficial.* Este defecto es resultado de las altas temperaturas de la pieza de trabajo que causan el desarrollo de grietas en la superficie; ocurre frecuentemente cuando la velocidad de extrusión es demasiado alta y conduce a altas velocidades de deformación asociadas con generación de calor. Otros factores que contribuyen al agrietamiento superficial son la alta fricción y el enfriamiento rápido de la superficie de los tochos a altas temperaturas en la extrusión en caliente.

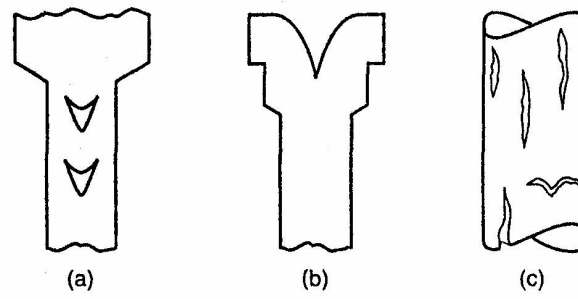


FIGURA 3.45 Algunos defectos comunes en extrusión: (a) reventado central, (b) tubificación (bolsa de contracción) y (c) agrietado superficial.