

## Introducción

La *extrusión* es un proceso de conformado de metales relativamente moderno. Hace referencia a cualquier operación de transformación en la que un material fundido es forzado a atravesar una boquilla para producir un artículo de sección transversal constante y, en principio, longitud indefinida.

La extrusión comercial de tubos de plomo empezó a principios de siglo XIX, pero hasta finales de siglo no fue posible extruir latón, debido a que no se disponía de las grandes y sostenidas presiones requeridas. Esta falta de equipo se superó finalmente calentando los tochos a alta temperatura para reducir la tensión de fluencia, pero esto creó el problema de tener que construir recipientes para los tochos de las prensas que soportasen las severas condiciones de alta temperatura y presiones. La extrusión del acero no fue comercialmente practicable hasta 1930. Uno de los inconvenientes de este proceso es la necesidad de lubricación. La introducción de la

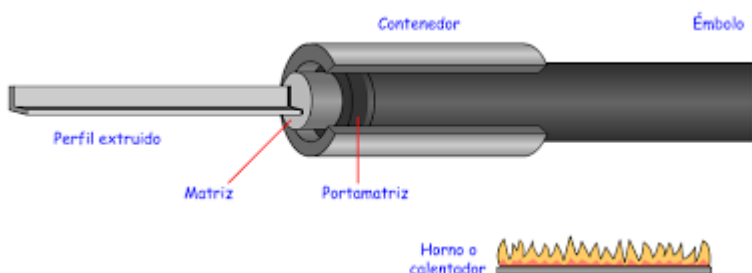
lubricación con vidrio fundido permitió el avance de esta técnica de conformado por deformación plástica.

En principio se pueden extrusionar todos los metales y aleaciones, siempre que posean una

buena capacidad de deformación y presenten al conformarlos, un bajo grado de acritud. Deben tener un límite elástico bajo y poca dureza. Los metales que más se extruyen son los de bajo límite elástico (plomo, cobre, aluminio y magnesio, y sus aleaciones). Los aceros resultan más difíciles de extruir, ya que, al presentar límites elásticos mayores, tienden a soldarse en las paredes de la hilera a causa de las condiciones de presión y temperatura que se originan.

Las ventajas de los procesos modernos incluyen:

1. Permiten la obtención de una gran diversidad en las formas de las secciones transversales antes comentadas, especialmente con extrusión en caliente, aunque la forma elegida ha de mantenerse constante durante toda la pieza.
2. Mejora sustancial de la estructura de grano interna del material y de las propiedades de resistencia.
3. La extrusión en frío permite tolerancias pequeñas.
4. El desperdicio de material es mínimo,



Extrusión en frío	Extrusión en caliente
Estaño, Zinc, Cobre, Latones 1° título (por ejemplo 15% y 30% de Zn.)	Plomo, Zinc, Cobre, Latones de 2° título (por ejemplo 42%, 40%, 33% de Zn )
Aluminio y sus aleaciones (Al-Mg-Si, Al-Cu-Mg, Al-Mg 3)	Aluminio y sus aleaciones (Al-Mg-Si, Al-Cu-Mg, Al-Mg) a 450°
Aceros	
Acero al carbono hasta C<0,4% calmados y ligeramente aleados con Mn, Si, Cr, Ni, Mo	Aceros al carbono hasta C<1,5% y altamente aleados con Cr, Mn, Si, Ni, Mo

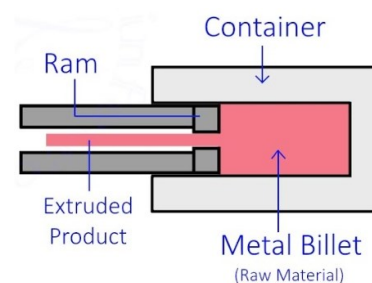
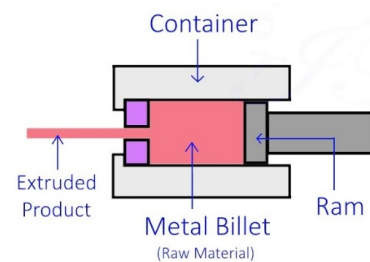
## TIPOS DE EXTRUSIÓN

### Según el flujo de material

**Extrusión directa:** En el proceso básico de extrusión, llamado *extrusión directa* o en avance, una palanquilla redonda se coloca en una cámara (recipiente) y es impulsado a través de la abertura de una matriz mediante un pistón hidráulico o ariete de prensa. La abertura del dado puede ser redonda o tener otras formas.

El gran problema que presenta es la **gran fricción** existente entre la preforma y el contenedor en el que este se encuentra y, por ende, la necesidad de una mayor fuerza en el pistón para el proceso. En contraposición, este tipo de extrusión permite la fabricación de piezas huecas.

**Extrusión indirecta:** En este caso, la matriz está montada sobre el pistón, de manera que el sentido que este tiene es contrario al flujo de material, el cual no se mueve respecto al contenedor, evitando así la fuerza de fricción y por consiguiente, la fuerza que debe ejercer el pistón es menor.



### Según la temperatura

**Extrusión en caliente:** Para los metales y aleaciones que no tienen ductilidad suficiente a temperatura ambiente, la extrusión se hace a temperaturas elevadas para reducir las fuerzas requeridas. Como en todas las demás operaciones de trabajo en caliente, tiene sus requisitos especiales, debidos a las altas temperaturas de operación. Por ejemplo, puede ser **excesivo el desgaste del dado**, y ser problemático el **enfriamiento de la palanquilla caliente en la cámara**, lo que causa alta deformación no uniforme.

Para reducir el enfriamiento y prolongar la vida del dado, pueden precalentarse los dados de extrusión, como se hace en las operaciones de forja en caliente. Como la palanquilla está caliente se forma sobre ella una **capa de óxido**, a menos que se caliente en un horno con atmósfera inerte. Esta película puede ser abrasiva y puede afectar el patrón de líneas de flujo del material. También causa un producto extruido que puede no ser aceptable, en los casos en que el buen acabado superficial sea importante. Para evitar la formación de películas de óxido sobre el producto extruido caliente, se hace que el bloque de apoyo que se coloca frente al ariete de compresión tenga un diámetro un poco menor que la cámara. En consecuencia, en la cámara queda una cáscara cilíndrica delgada (costra), formada principalmente por la capa oxidada. Así, el producto extruido queda libre de óxidos.

Este tipo de aplicación presenta una serie de ventajas como son la **reducción de la fuerza del pistón y una mayor velocidad del mismo**. En contraposición, el gradiente de temperaturas que existe en las zonas de contacto entre el tocho y la matriz, puede ser un problema, por lo que a veces se opta por una extrusión isotérmica o la aplicación de un lubricante que minimice los problemas que la extrusión en caliente puede acarrear.

# EXTRUSIÓN

**Extrusión en frío:** En cuanto a la extrusión en frío o la extrusión a aquella temperatura que está por debajo de la de recristalización, se puede decir que es utilizada para producir piezas discretas casi terminadas, evitando así el procesamiento continuo.

La extrusión en frío fue desarrollada en la década de 1940. Ha logrado gran aceptación en la industria, en especial para herramientas y piezas o partes de automóviles, motocicletas, bicicletas, electrodomésticos y equipo de transporte y agrícola. En este proceso se usan tramos de material que tienen menos de 40 mm de diámetro, se cortan y sus extremos se escuadran. Los materiales de gran diámetro se maquinan partiendo de barras, formando tramos específicos.

La extrusión en frío tiene las siguientes ventajas sobre la extrusión en caliente:

– **Mejores propiedades mecánicas**, debido al endurecimiento por el trabajado, siempre que el calor generado por la deformación plástica y la fricción no haga recristalizar el metal extruido.

– **Buen control de tolerancias dimensionales**, reduciendo la necesidad de operaciones posteriores de maquinado o acabado.

– **Mejor acabado superficial**, en parte debido a carencia de una capa de óxido, siempre y cuando la lubricación sea efectiva.

– Eliminación de la necesidad de calentar la palanquilla.

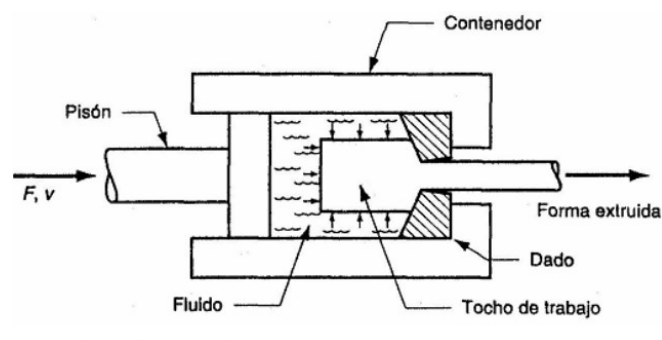
– **Capacidades y costos de producción** que son competitivos con los de otros métodos para producir la misma pieza. Algunas máquinas son capaces de producir más de 2000 piezas por hora. Sin embargo, la magnitud de los esfuerzos sobre las herramientas en la extrusión en frío es muy grande, en especial con las piezas de acero; es del orden de la dureza del material de la pieza. La dureza de los punzones suele estar entre 60 y 65 hrc, la de los dados entre 58 y 62 hrc. La lubricación es crítica, en especial para los aceros, por la probabilidad de que se peguen a la herramienta si la lubricación falla. El método más efectivo de lubricación es la aplicación de una capa fosfatada modificada en la pieza, seguida de una capa de jabón o de cera.

## Otros tipos de extrusión

**Extrusión por impacto:** Se parece a la *extrusión indirecta*; con frecuencia se incluye en la categoría de la extrusión en frío. **El punzón desciende rápidamente** sobre la pieza bruta, que se extruye hacia atrás. Debido a la constancia del volumen, el espesor de la sección tubular extruida es función de la holgura entre el punzón y la cavidad del dado. El diámetro de las piezas fabricadas puede llegar a 150 mm. Los procesos de *extrusión por impacto* pueden producir secciones tubulares de paredes delgadas, que tengan relaciones de espesor-diámetro tan pequeñas como 0,005. En consecuencia, la simetría de la pieza y la concentricidad entre punzón y pieza bruta son importantes.

**Extrusión hidrostática:** La palanquilla posee menor diámetro que la cámara, que se llena con un fluido; la presión se transmite a la palanquilla mediante un ariete. A diferencia de la extrusión directa, no hay que superar ninguna fricción a lo largo de las paredes del muelle.

La presión necesaria para la extrusión se suministra a través de un fluido incompresible que rodee a la palanquilla. En consecuencia, no hay



# EXTRUSIÓN

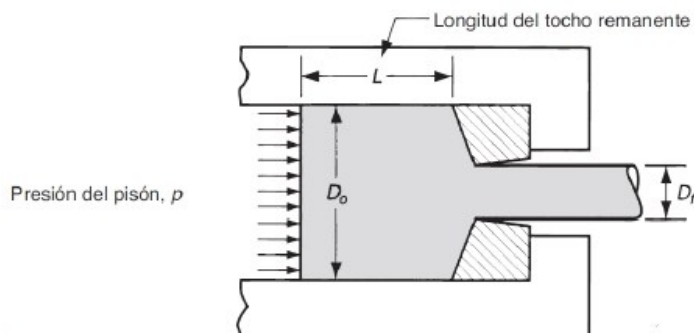
fricción entre la cámara y la pared. Las presiones suelen ser del orden de 1400 MPa. La alta presión en la cámara transmite algo del fluido a las superficies de la matriz, donde reduce en forma apreciable la presión y las fuerzas.

Debido al ambiente en compresión, esta operación **reduce los defectos** del producto extruido. La extrusión hidrostática se suele hacer a temperatura ambiente, en forma característica con **aceites vegetales** —en especial aceite de ricino, por ser buen lubricante y porque su viscosidad no se ve afectada por la presión en grado apreciable—.

Para extrusiones a alta temperatura se usan ceras, polímeros y vidrio como fluidos. Esos materiales también sirven como aislantes térmicos, y ayudan a mantener la temperatura del lingote durante la extrusión. Con este método se pueden extruir bien los materiales frágiles, porque la presión hidrostática hace aumentar la ductilidad del material. Sin embargo, las razones principales de su éxito parecen ser la **baja fricción y el uso de pequeños ángulos en el dado**, y **las altas relaciones de extrusión**. A pesar del éxito obtenido, la extrusión hidrostática ha tenido aplicaciones industriales limitadas, por la naturaleza algo compleja de la herramienta, la experiencia necesaria con altas presiones y el diseño de equipo personalizado, así como el largo tiempo en los ciclos requeridos

## ANÁLISIS DE LA EXTRUSIÓN

Para el análisis, se tendrá en cuenta un tocho de material de sección transversal circular, que se hará pasar por una matriz que reducirá su diámetro y que permitirá un estudio de la evolución de las velocidades de deformación, tensiones y deformaciones que sufre el material en su paso por la matriz. Para dicho análisis se tendrán en cuenta una serie de parámetros que permitirán caracterizar todas y cada una de las simulaciones que se realizarán. Los parámetros que se tendrán en cuenta y que son en definitiva, las variables independientes serán: la **relación de extrusión y el ángulo de la matriz**.



La *relación de extrusión* se define como:

$$r_x = \frac{A_0}{A_f}$$

Donde  $A_0$  es el área inicial del tocho de material y  $A_f$  el área transversal del material tras su paso por la matriz.

El valor de  $r_x$  es importante, pues nos permite hallar el valor de la deformación que sufre el material para el caso ideal sin fricción y sin trabajo redundante, la cual viene definida como

$$\varepsilon = \ln r_x = \ln\left(\frac{A_0}{A_f}\right)$$

# EXTRUSIÓN

Por otro lado, la presión ejercida por el pistón en condiciones ideales se puede definir como

$$P = \bar{Y}_f \ln r_x$$

donde  $Y_f$  es el esfuerzo de fluencia promedio del material en cuestión durante la deformación.

Por tanto,

$$P = \frac{K \epsilon^n}{1+n} \ln r_x$$

Esta presión es menor que la real, pues no se está teniendo en cuenta la fricción que existe en la *extrusión directa*.

En cuanto a la presión de más que se debe ejercer para superar esa fricción existente en la *extrusión directa*, podemos aislar dicha fuerza de fricción obteniendo la siguiente expresión:

$$\frac{p_f \pi D_0^2}{4} = \mu p_c \pi D_0 L$$

donde  $p_f$  es la presión adicional requerida para superar la fricción,  $\mu$  es el coeficiente de fricción en la pared del contenedor,  $p_c$  es la presión del tocho contra la pared del contenedor, y  $\pi D_0 L$  es el área de la interfaz entre el tocho y la pared del recipiente.

Conociendo cada término, se puede entender fácilmente que el miembro derecho es la fuerza de fricción que se produce entre el tocho de material y el contenedor, y por tanto, el miembro izquierdo es la fuerza adicional que debe ejercer el pistón. El caso más desfavorable, es la adherencia, donde el esfuerzo de fricción iguala la resistencia a la fluencia cortante del metal de trabajo,

$$\mu p_c \pi D_0 L = Y_s \pi D_0 L$$

donde  $Y_s$  es la resistencia a la fluencia cortante.

Si además asumimos que

$$Y_s = \frac{\bar{Y}_f}{2}$$

y, por tanto,

$$P_f = \bar{Y}_f \frac{2L}{D_0}$$

podemos reescribir lo siguiente:

$$P = \bar{Y}_f \left( \epsilon_x + \frac{2L}{D_0} \right)$$

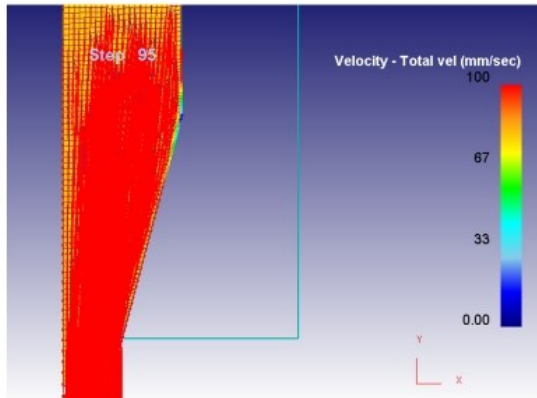
donde el término  $2L/D_0$  representa la presión adicional debida a la fricción en la interfaz contenedor-tocho,  $L$  es la longitud del tocho remanente para la extrusión y  $D_0$  el diámetro inicial del tocho. Observar que la presión disminuye con la longitud remanente, pues conforme ésta disminuye la fuerza de fricción también lo hace.



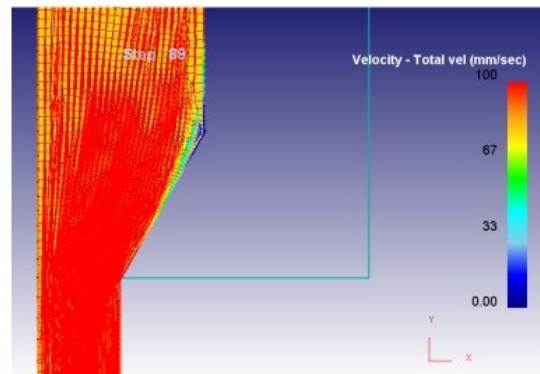
# EXTRUSIÓN

## Flujo del metal en la extrusión

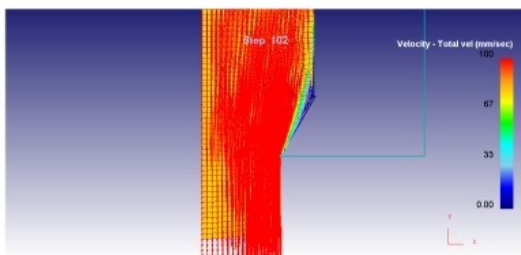
Es importante el patrón de líneas de flujo del metal en la extrusión, al igual que en otros procesos de conformado, por su influencia sobre la calidad las propiedades mecánicas del producto final. El material fluye en sentido longitudinal, en forma muy similar a la del flujo de un fluido incompresible por un canal; así, los productos extruidos poseen una estructura de grano alargada (orientación preferencial).



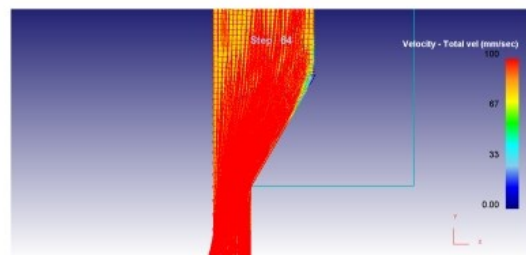
(a) Matriz de 15 grados.



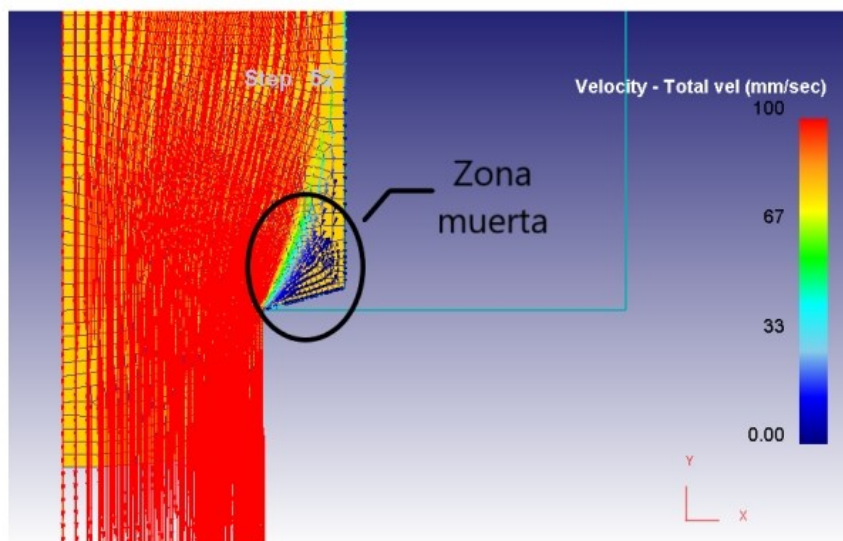
(b) Matriz de 30 grados.



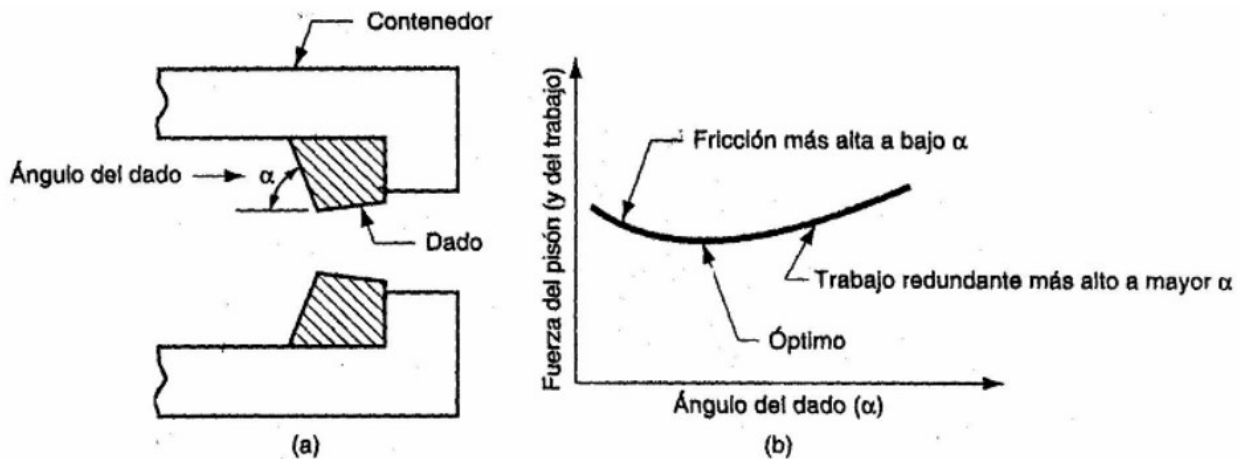
(a) Relación de extrusión con valor igual a 2.



(b) Relación de extrusión con valor igual a 7.



# EXTRUSIÓN



## Práctica de la extrusión

Por tener la ductilidad suficiente, el aluminio, cobre, magnesio y sus aleaciones, y los aceros y aceros inoxidable se extruyen con relativa facilidad, para obtener muchas formas. Se pueden extruir otros metales, como titanio y los metales refractarios, pero sólo con dificultades y gran desgaste de los dados.

Las *relaciones de extrusión* van de 10 a 100, aproximadamente. Pueden llegar a ser mayores (400) en aplicaciones especiales, o menores para los materiales menos dúctiles, aunque por lo general deben ser de 4, como mínimo, para lograr que el material fluya en forma plástica por toda la pieza. Los productos extruidos tienen casi siempre menos de 7,5 m de longitud, por la dificultad de manejar tramos más grandes, que pueden ser hasta de 30 m.

Los *diámetros de círculo circunscrito* para el aluminio van de 6 mm a 1 m; la mayor parte son menores que 0,25 m. Debido a las grandes fuerzas necesarias, el *dcc* máximo para el acero se limita normalmente a 0,15 m.

Las velocidades del ariete de compresión llegan a 0,5 m/s. En general, se prefieren velocidades menores para el aluminio, magnesio y cobre, y las velocidades mayores para los aceros, el titanio y las aleaciones refractarias.

La mayor parte de los productos extruidos, en especial los de secciones transversales reducidas, requieren enderezado y torcido. Estas operaciones se logran estirando el producto extruido, por lo general en una enderezadora hidráulica con mordazas.

En la extrusión, las tolerancias dimensionales suelen estar en el rango de  $\pm 0,25$  mm hasta  $\pm 2,5$  mm, y aumentan al aumentar el área transversal.

La presencia de un ángulo en el dado hace que una pequeña pieza del extremo de la palanquilla quede en la cámara después de haber terminado la operación. Esta parte, llamada recorte o extremo final, es eliminada desprendiendo o cortando la extrusión a la salida del dado. También se puede poner otro lingote o un bloque de grafito en la cámara para extruir la pieza que queda de la extrusión anterior.

# EXTRUSIÓN

Las extrusiones escalonadas se producen extruyendo parcialmente el lingote en un dado y después en una o más matrices o dados mayores. La extrusión lateral se emplea para forrar alambres y recubrir los conductores eléctricos con plástico.

## Materiales y lubricación de las matrices

Los **materiales** del dado para extrusión en caliente suelen ser aceros para trabajo en caliente. Se pueden recubrir los dados con materiales tales como circonio para prolongar su vida. También se emplean dados de circonio parcialmente estabilizado en la extrusión de tubos y varillas en caliente; sin embargo, no se prestan para hacer dados de extrusión de formas complicadas, por los grandes gradientes de esfuerzos que se desarrollan en ellas.

La **lubricación** es importante en la extrusión en caliente. El vidrio es un lubricante excelente para los aceros, aceros inoxidable, y metales y aleaciones para alta temperatura. En un proceso desarrollado en la década de 1940, denominado *proceso Séjournet* en honor a J. Séjournet, se coloca una placa circular de vidrio en la entrada del dado, en la cámara. La palanquilla caliente lleva el calor a la placa de vidrio, que actúa como depósito de vidrio fundido y lubrica la interfase del dado a medida que avanza la extrusión. Antes de poner la palanquilla en la cámara, se recubre su superficie cilíndrica con una capa de vidrio en polvo para proporcionar el lubricante en la interfase entre él y la cámara. Para metales con tendencia a pegarse a la cámara y al dado, la palanquilla se puede encerrar en un recipiente de pared delgada hecho de un metal más suave y de menor resistencia, como cobre o acero suave. A este proceso se le denomina *enchaquetado* o *enlatado*. Además de formar una interfase con baja fricción, esta chaqueta evita la contaminación del lingote por el ambiente —o, si el material del lingote es tóxico o radiactivo, la chaqueta evita que contamine el ambiente

## Defectos de las extrusiones

De acuerdo con la condición del material y las variables del proceso, los productos extruidos pueden desarrollar varios defectos que pueden afectar en forma apreciable su resistencia y su calidad. Algunos defectos son visibles a simple vista; otros sólo se pueden descubrir con técnicas especiales. Hay tres defectos de extrusión principales: agrietamiento de la superficie, tubos y agrietamiento interno.

**Agrietamiento de la superficie:** Si la temperatura, la fricción o la velocidad de extrusión es demasiado alta, las temperaturas superficiales suben de forma apreciable, y esta condición puede causar agrietamientos y desgarramiento de la superficie (grietas tipo abeto o agrietamiento a alta velocidad). Esas grietas son intergranulares y suelen deberse a la fragilidad en caliente. Estos defectos suceden en especial con aleaciones de aluminio, magnesio y cinc, aunque también pueden presentarse en aleaciones para alta temperatura. Lo anterior puede evitarse bajando la temperatura del lingote y la velocidad de extrusión. También puede haber agrietamiento superficial a temperaturas menores, lo que se ha atribuido a adhesión periódica del producto extruido a lo largo de la cara del dado. Cuando el producto que se extruye se pega a la cara del dado, la presión de extrusión aumenta rápidamente. Poco después, el producto avanza de nuevo y se descarga la presión. El ciclo se repite en forma continua y se producen grietas periódicas circulares en la superficie. Por la apariencia de estas grietas, se denominan defecto de bambú.



## EXTRUSIÓN

**Efecto tubo:** El patrón de flujo característico de la extrusión tiende a desplazar óxidos e impurezas superficiales hacia el centro del lingote, casi como un embudo. Este defecto se denomina defecto tubo, y también tubo de escape o cola de pescado. Hasta la tercera parte de la longitud del producto extruido puede contener este defecto, y debe cortarse y desecharse. El tubo se puede reducir al mínimo modificando el patrón de línea de flujo para formar una más uniforme; por ejemplo, controlando la fricción y minimizando los gradientes de temperatura. Otro método es maquinarse la superficie de la palanquilla antes de la extrusión, para eliminar la costra y las impurezas superficiales. También se pueden quitar las impurezas superficiales por ataque químico de los óxidos superficiales, antes de la extrusión.

**Agrietamiento interno:** El centro del producto extruido puede desarrollar grietas, que tienen diversos nombres: grieta central, reventón central o fractura en forma de punta de flecha. Se atribuyen estas grietas a un estado de esfuerzo de tensión hidrostática en la línea central, en la zona de deformación del dado. La tendencia al agrietamiento central aumenta al incrementarse el ángulo del dado y la concentración de impurezas, y disminuye al aumentar la relación entre la extrusión y la fricción.