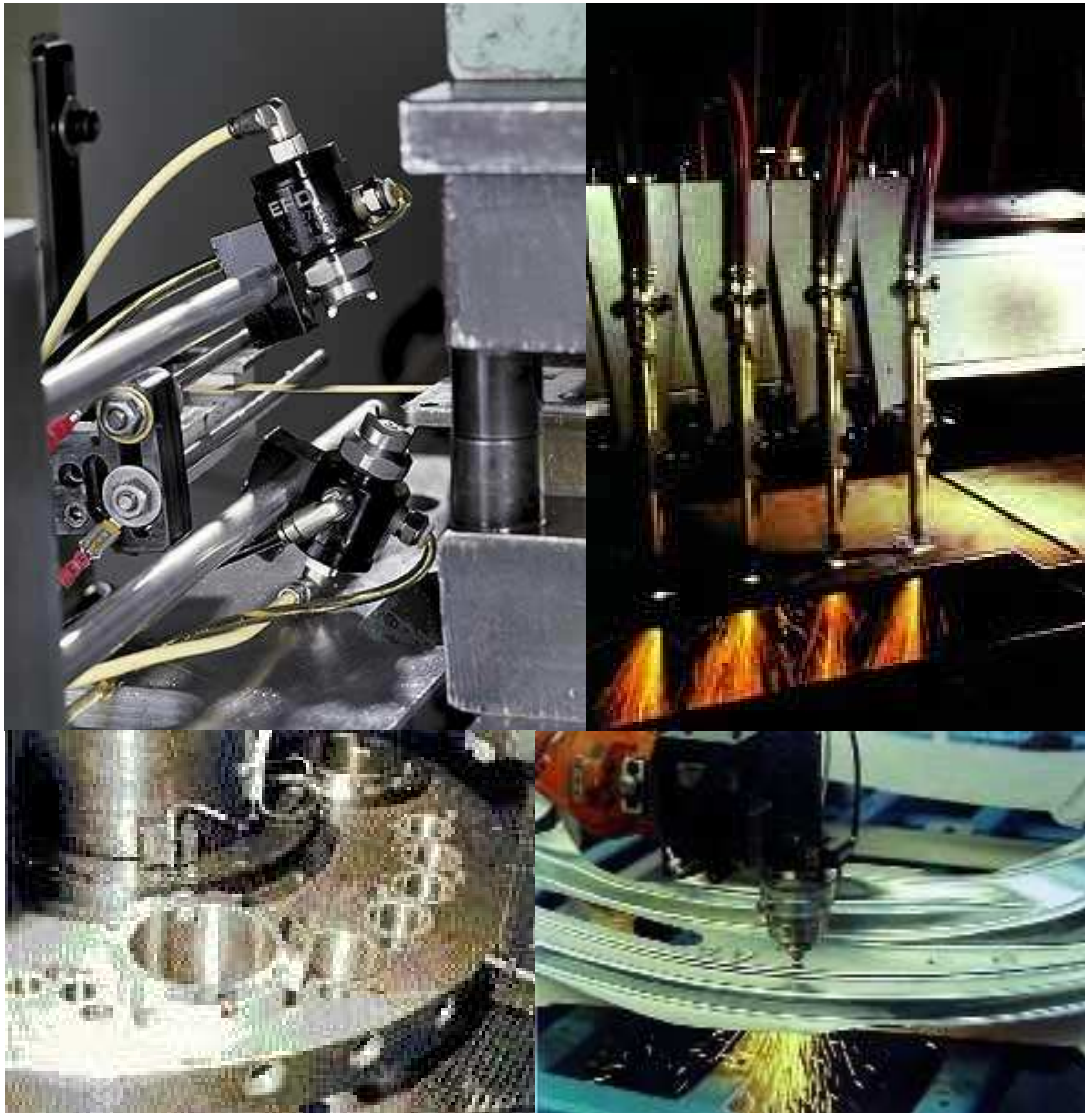


FUNDAMENTOS DE CONFORMADO PLASTICO



**DEPARTAMENTO DE INGENIERIA
MECANICA F.I.U.B.A.**

ING. GUILLERMO CASTRO

FEBRERO 2008

FUNDAMENTOS DE CONFORMADO PLASTICO

INTRODUCCIÓN

Los metales, los plásticos y los materiales de cerámicas se transforman en artículos útiles y productos de consumo por muchos diferentes medios. Los metales se vacían de maneras diferentes en moldes para producir formas intrincadas pequeñas o partes para máquinas en producción en serie. Los metales también se laminan entre rodillos, se conforman en piezas y se martillan en matrices o se fuerzan a través de dados por extrusión para hacer formas especiales. Por ejemplo, el hierro y el acero se calientan a temperaturas altas para poder conformarlos fácilmente por forjado (martillado y comprimido). Aunque la forja fue en un tiempo una operación para metales en caliente, en la actualidad se practica el forjado en frío aún con el acero. A temperaturas intermedias se puede producir un material metalúrgicamente superior para algunos fines. Por ejemplo, en la conformación a calor medio, los materiales tenaces como el acero SAE 52100 se manufacturan por rutina en partes de alta calidad con los más bajos costos de producción de la conformación en frío.

Gran parte de la manufactura se especializa en el proceso del metal laminado en operaciones de trabajo es frío como troquelado, estampado y conformación. La fabricación de utensilios para el hogar, de automóviles y de muchos otros productos depende del proceso de lámina metálica.

La maquinaria de toda clase que requiere partes de precisión depende del maquinado y de la industria de las maquinas herramientas, la cual se podría considerar como la base de la manufactura moderna. La industria de la herramienta y dados, aunque poco conocida y entendida, es la columna vertebral de la industria moderna.

Todo proceso de manufactura depende prácticamente de los talleres de herramientas y dados en alguna medida. El estampado, el troquelado, el moldeo por inyección y el vaciado por inyección son solo algunos de los procesos para los cuales son absolutamente necesarios los servicios de las herramientas y de los dados.

La manufactura de los materiales plásticos y compuestos está creciendo en forma constante y ha reemplazado a muchos productos que anteriormente se hacían de metal, cuero y madera. Muchas de estas industrias de manufactura son independientes. Por ejemplo, los moldes para inyección de plástico requieren de herramienta especial y procesos especiales de maquinado de dados; la manufactura de la máquina moldeadora es un proceso de máquina herramienta.

MECANISMOS DE LOS TRABAJOS EN FRIO Y EN CALIENTE

La deformación es únicamente uno de los diversos procesos que pueden usarse para obtener formas intermedias o finales en el metal. El metal líquido puede vaciarse en moldes para ser formado, rociado para formar figuras intermedias o finales, o hecho polvo para ser prensado en moldes y sinterizado, para producir componentes fuertes. Si bien, cada uno de éstos tiene un campo de aplicación, el volumen abrumador de metal es formado a partir de un simple lingote vaciado, por una serie de procesos de deformación. La aplicabilidad y desarrollo de estos procesos, depende completamente de la plasticidad del metal sólido.

El estudio de la plasticidad está comprometido con la relación entre el flujo del metal y el esfuerzo aplicado. Si ésta puede determinarse, entonces las formas mas requeridas pueden realizarse por la aplicación de fuerzas calculadas en direcciones específicas y a velocidades controladas.

En la práctica, la carga externa se aplica mediante una herramienta y su forma controla la dirección de aplicación necesaria para obtener el flujo deseado. El tipo de la herramienta puede

usarse para clasificar las diferentes categorías de los procesos de deformación. Los procesos industriales comunes se agrupan en seis categorías; embutido profundo o prensado, laminado, forjado, estirado, extruido y estirado de alambre (trefilado). Hay otros procesos de trabajo, como forja con rodillos, formado por atomizado, etc., pero éstos todavía no son de gran importancia industrial.

EMBUTIDO PROFUNDO Y PRENSADO

El embutido profundo es una extensión del prensado en la que a un tejo de metal, se le da una tercera dimensión considerable después de fluir a través de un dado (Fig. 1). El prensado simple se lleva a cabo presionando un trozo de metal entre un punzón y una matriz, así como al indentar un blanco y dar al producto una medida rígida. Latas para alimentos y botes para bebidas, son los ejemplos más comunes:

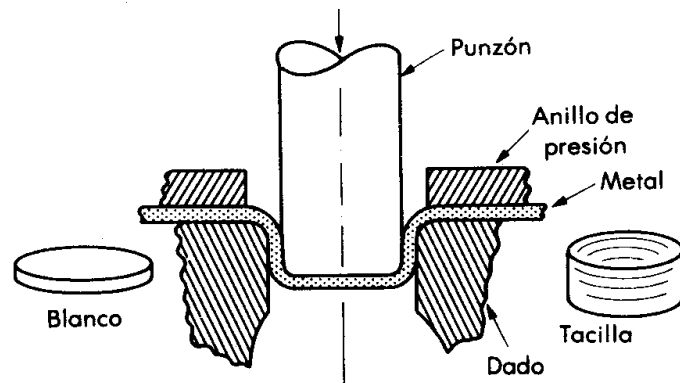


Figura 1 - Embutido

Como se verá más adelante, este proceso puede llevarse a cabo únicamente en frío. Cualquier intento de estirado en caliente, produce en el metal un cuello y la ruptura. El anillo de presión en la Fig. 4, evita que el blanco se levante de la superficie del dado, dando arrugas radiales o pliegues que tienden a formarse en el metal fluyendo hacia el interior desde la periferia del orificio del dado.

LAMINADO

Este es un proceso en el cual se reduce el espesor del material pasándolo entre un par de rodillos rotatorios (Fig. 2). Los rodillos son generalmente cilíndricos y producen productos planos tales como láminas o cintas. También pueden estar ranurados o grabados sobre una superficie a fin de cambiar el perfil, así como estampar patrones en relieve. Este proceso de deformación puede llevarse a cabo, ya sea en caliente o en frío:

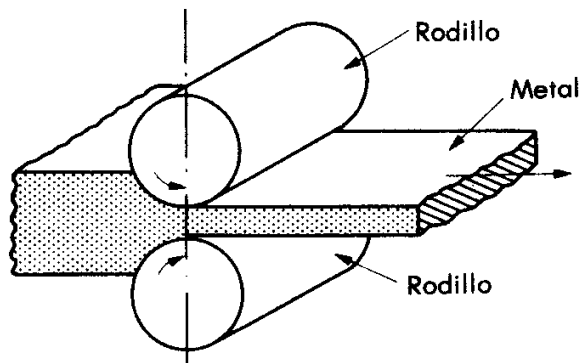


Figura 2 - Laminado

El trabajo en caliente es usado muy ampliamente porque es posible realizar un cambio en forma rápida y barata. El laminado en frío se lleva a cabo por razones especiales, tales como la producción de buenas superficies de acabado o propiedades mecánicas especiales. Se lamina más metal que el total tratado por todos los otros procesos.

FORJADO

En el caso más simple, el metal es comprimido entre martillo y un yunque y la forma final se obtiene girando y moviendo la pieza de trabajo entre golpe y golpe. Para producción en masa y el formado de secciones grandes, el martillo es sustituido por un martinete o dado deslizante en un bastidor e impulsado por una potencia mecánica, hidráulica o vapor.

Un dispositivo utiliza directamente el empuje hacia abajo que resulta de la explosión en la cabeza de un cilindro sobre un pistón móvil. Los dados que han sustituido al martillo y al yunque pueden variar desde un par de herramientas de cara plana (Fig. 3), hasta ejemplares que tiene cavidades apareadas capaces de ser usadas para producir las domas más complejas:

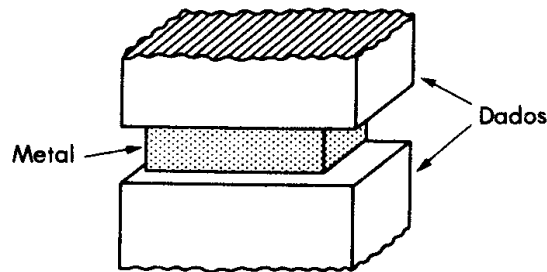


Figura 3 - Forjado

Si bien, el forjado puede realizarse ya sea con el metal caliente o frío, el elevado gasto de potencia y desgaste en los dados, así como la relativamente pequeña amplitud de deformación posible, limita las aplicaciones del forjado en frío. Un ejemplo es el acuñado, donde los metales superficiales son impartidos a una pieza de metal por forjado en frío. El forjado en caliente se está utilizando cada vez más como un medio para eliminar uniones y por las estructuras particularmente apropiadas u propiedades que puede ser conferidas al producto final. Es el método de formado de metal más antiguo y hay muchos ejemplos que se remontan hasta 1000 años A. C.

ESTIRADO

Este es esencialmente un proceso para la producción de formas en hojas de metal. Las hojas se estiran sobre hormas conformadas en donde se deforman plásticamente hasta asumir los perfiles requeridos (Fig. 4). Es un proceso de trabajo en frío y es generalmente el menos usado de todos los procesos de trabajo:

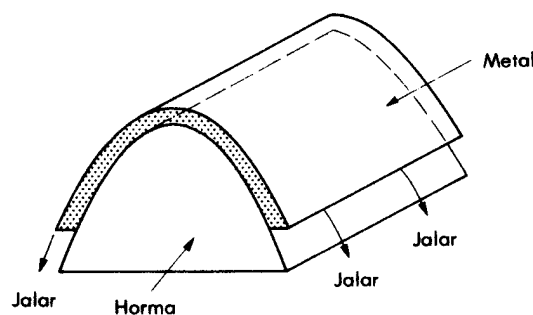


Figura 4 - Estirado

EXTRUSION

En este proceso un cilindro o trozo de metal es forzado a través de un orificio por medio de un émbolo, por tal efecto, el metal estirado y extruído tiene una sección transversal, igual a la del orificio del dado.

Hay dos tipos de extrusión, extrusión directa y extrusión indirecta o invertida. En el primer caso, el émbolo y el dado están en los extremos opuestos del cilindro y el material es empujado contra y a través del dado. En la extrusión indirecta el dado es sujetado en el extremo de un émbolo hueco y es forzado contra el cilindro, de manera que el metal es extruído hacia atrás, a través del dado:

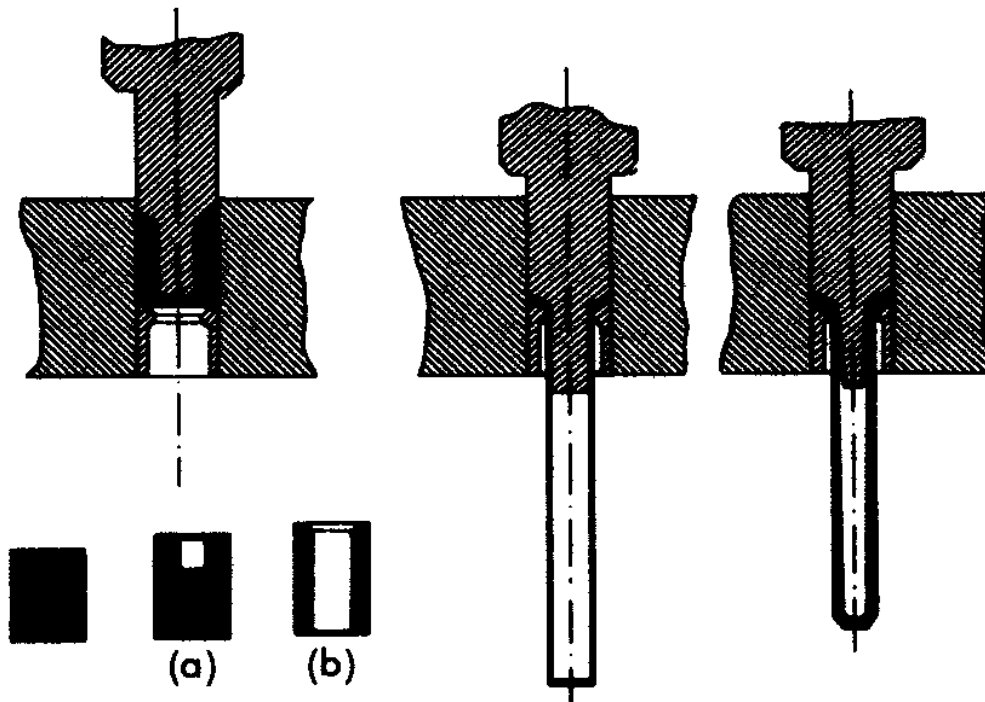


Figura 5 - Proceso de Hooker de impacto para tubos

La extrusión puede llevarse a cabo, ya sea en caliente o en frío, pero es predominantemente un proceso de trabajo en caliente. La única excepción a esto es la extrusión por impacto, en la cual el aluminio o trozos de plomo son extruídos por un rápido golpe para obtener productos como los tubos de pasta de dientes. En todos los procesos de extrusión hay una relación crítica entre las dimensiones del cilindro y las de la cavidad del contenedor, especialmente en la sección transversal. Un ejemplo del proceso de extrusión por impacto, se da en la Fig. 5.

TREFILADO

Una varilla de metal se aguza en uno de sus extremos y luego estirada a través del orificio cónico de un dado. La varilla que entra al dado tiene un diámetro mayor y sale con un diámetro menor. En los primeros ejemplos de este proceso, fueron estiradas longitudes cortas manualmente a través de una serie de agujeros de tamaño decreciente en una "placa de estirado" de hierro colado o de acero forjado. En las instalaciones modernas, grandes longitudes son estiradas continuamente a través de una serie de dados usando un número de poleas mecánicamente guiadas, que pueden producir muy grandes cantidades de alambre, de grandes longitudes a alta velocidad, usando muy poca fuerza humana. Usando la forma de orificio apropiada, es posible estirar una variedad de formas tales como óvalos, cuadrados, hexágonos, etc., mediante este proceso.

LAMINADO

Este es un proceso de compresión indirecta. Normalmente la única fuerza o esfuerzo aplicado es la presión radial de los rodillos laminadores. Esto deforma el metal y lo jala a través de la holgura de los rodillos. El proceso puede ser comparable a la compresión en el forjado pero difiere en dos aspectos; la compresión se efectúa entre un par de planas con diferentes inclinaciones entre una y otra, y que el proceso es continuo:

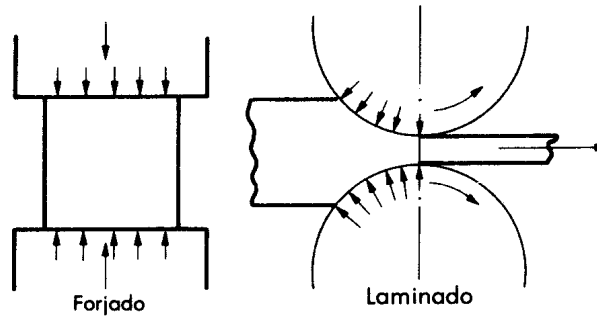


Figura 6 - Distribución de fuerzas de el Forjado y Laminado

El laminado es el proceso de deformación que más ampliamente se usa y por la razón de que existen muchas versiones el proceso tiene su propia clasificación. Esta puede ser de acuerdo al arreglo de los rodillos en el bastidor en el molino o de acuerdo con el arreglo de los bastidores en secuencia.

Los molinos de laminación se clasifican de acuerdo a la Fig. 7. El molino de dos rodillos fue el primero y el más simple pero su capacidad de producción tiende a ser baja debido al tiempo que se pierde al tener que regresar el metal al frente del tren o molino. Obviamente esto condujo al molino reversible de dos rodillos donde el metal puede ser laminado en ambas direcciones. Este molino está limitado por la longitud que puede manejar y si la velocidad de laminado se aumenta, el resultado casi es el mismo debido al incremento del tiempo requerido para invertir la rotación en cada pasada. Lo anterior fija una longitud máxima económica de alrededor de 10 m:

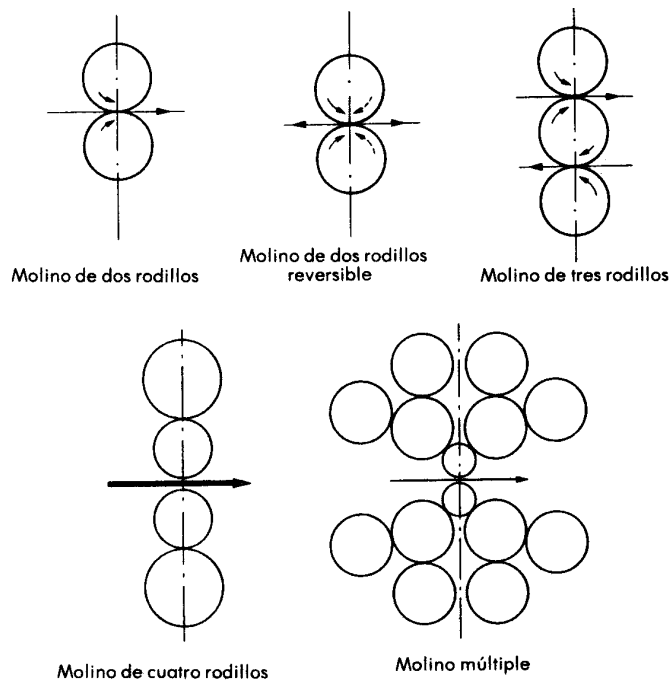


Figura 7 - Tipos de molinos

El siguiente obvio desarrollo fue el molino de laminación de tres rodillos, el cual tenía las ventajas de los molinos reversibles de dos rodillos. Estos molinos deben tener, por supuesto, mesas elevables en ambos lados de los rodillos. La holgura en un molino de tres rodillos no puede ser ajustada entre pasadas, por ello deben cortarse ranuras o canales en la superficie del rodillo para lograr diferentes reducciones. Los tres tipos de molinos de laminación, tienen la desventaja de que todas las etapas del laminado son efectuadas en la misma superficie del rodillo y la calidad de la superficie del producto tiende a ser baja. Los cambios de rodillo en estos molinos son relativamente frecuentes y requieren de tiempo. Es por ello que este tipo de molinos se usa para el laminado primario, donde se requiere un rápido cambio de forma, aun a expensas de la calidad de la superficie.

Los molinos de cuatro rodillos son un tipo especial del molino de dos rodillos, en un intento por reducir la carga de laminado el diámetro del rodillo de trabajo se disminuye.

Existe, sin embargo, el riesgo de que el rodillo se flexione, lo cual se evita soportando los pequeños rodillos de trabajo por rodillos grandes de apoyo. El diámetro de los rodillos de apoyo, no puede ser mayor que 2 a 3 veces el de los rodillos de trabajo, y como el diámetro de los rodillos de trabajo se disminuye más y más (para adecuarse a procesos con cargas de laminado excesivamente altas), el tamaño de los rodillos de apoyo debe también disminuir. Se llega a un punto en que los rodillos de apoyo en si mismos, comienzan a flexionarse y requieren ser apoyados, lo cual da lugar al diseño más avanzado (el molino múltiple).

La crítica principal al molino tradicional es la tendencia de los rodillos a flexionarse, debido a su diseño inherente (el principio de la viga) Fig. 8:

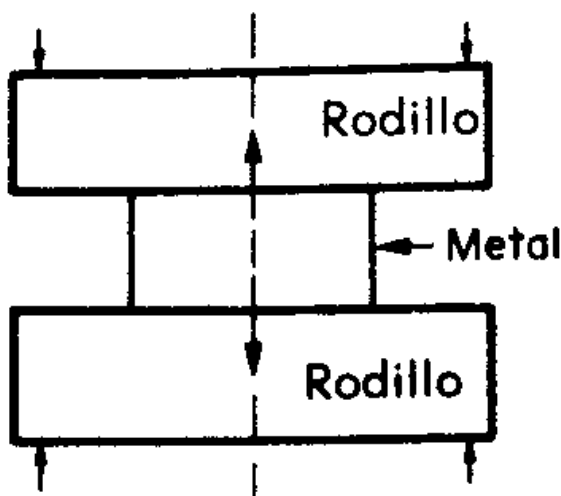


Figura 8

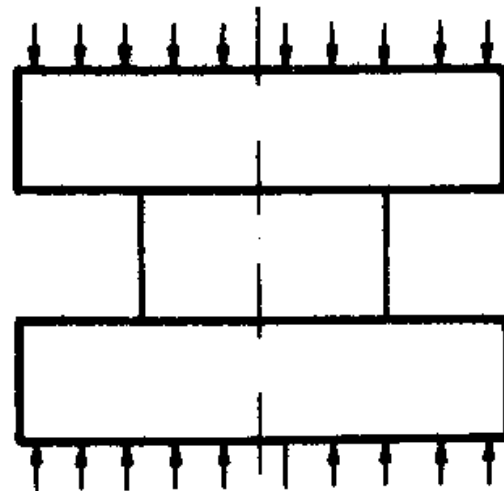


Figura 9 - Propuesta de apoyo de Sendzimir

Sendzimir propuso un diseño que eliminaba esta limitación, basado en el principio del castor, donde el rodillo de trabajo es soportado en toda su cara por un arreglo de rodillos de apoyo Fig. 9.

La fotografía muestra un molino de este tipo que tiene rodillos de trabajo sumamente pequeños (10 mm), el cual puede usarse para procesos en los que se esperan cargas de laminado extremadamente altas, y los rodillos de trabajo pueden cambiarse con facilidad, Fig. 10. Este principio puede aplicarse a molinos más grandes y una instalación para laminar acero inoxidable de 1600 mm de ancho está equipada con rodillos de trabajo de 85 mm de diámetro:

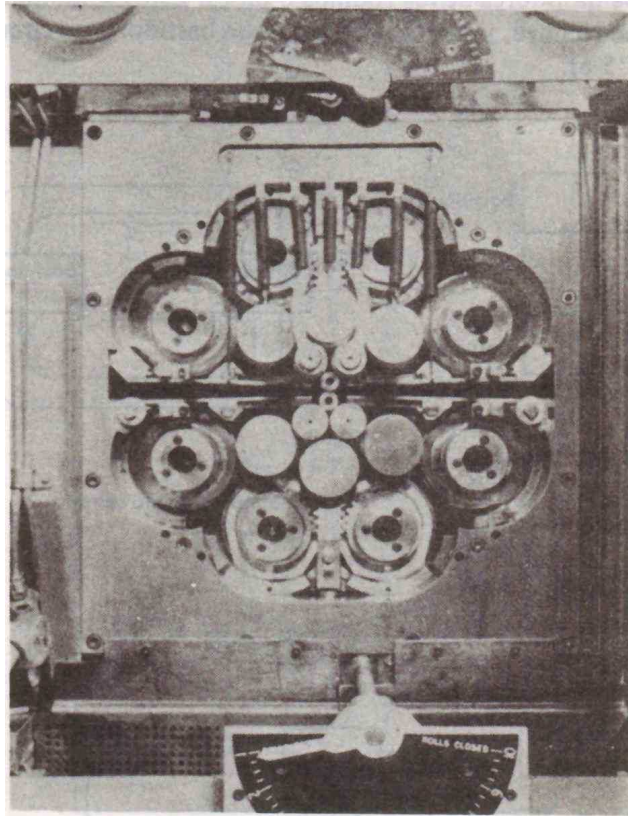


Figura 10 - Arreglo de rodillos en un molino Sendzimir

Los molinos continuos de laminación pueden clasificarse de acuerdo al arreglo de los bastidores de los rodillos o pases. Estos son molinos continuos de laminación en línea, y en línea de frente con bastidores en circuito cerrado o abierto, Fig. 11:

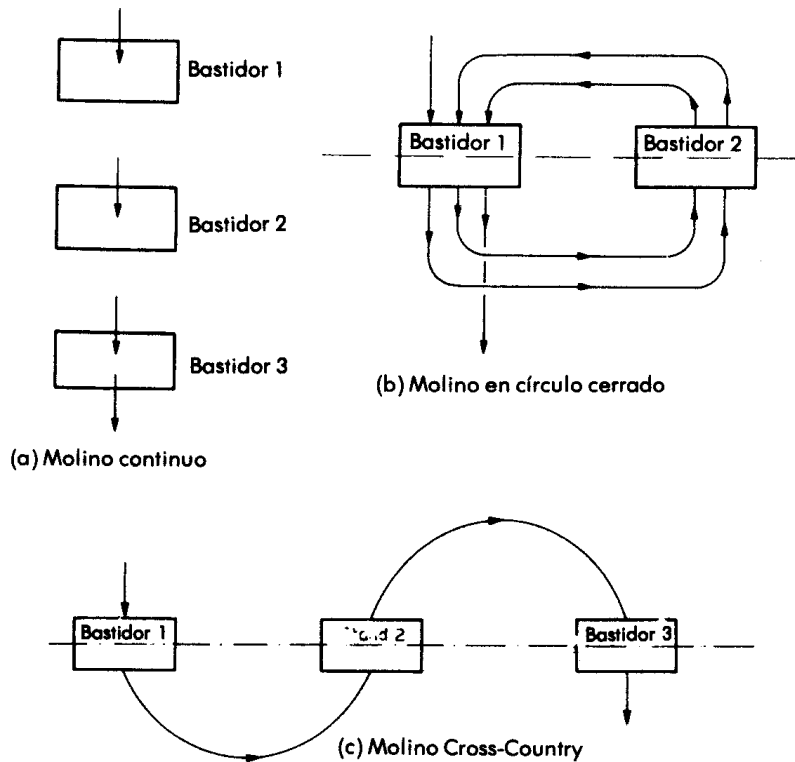


Figura 11. Clasificación de molinos de acuerdo con el arreglo de bastidores.

Los molinos en circuito abierto o cerrado requieren que la pieza de trabajo sea doblada o girada entre cada bastidor o castillo, y por ello se usan para laminar barras, rieles o secciones. Los molinos continuos se usan para placas, tiras u hojas. Todos ellos requieren de una gran inversión y sólo se justifican cuando se tiene garantizada una alta demanda del producto.

EFFECTOS DE LA CARGA DE LAMINADO

Es esencial en los procesos de deformación de metales que la herramienta esté cargada sólo en forma elástica mientras la pieza de trabajo fluye plásticamente. Esta deformación elástica es, por lo general, tan pequeña que puede ignorarse, pero éste no es el caso en el laminado. Existen dos razones. Una es que las cargas y esfuerzos de laminado pueden ser muy grandes, especialmente cuando la pieza de trabajo es delgada y endurecida por trabajo. La otra es que la herramienta en el laminado comprime todo el molino rodillo y carcaza que tiene dimensiones medibles en metros. Esta combinación puede resultar en grandes deformaciones debidas a la deformación elástica dividida entre la extensión del bastidor del molino (resorteo del molino), y el aplastamiento y flexionamiento de los rodillos.

APLASTAMIENTO DE LOS RODILLOS

La pieza de trabajo pasando entre un par de rodillos es comprimida por el esfuerzo radial aplicado a ella, pero la reacción es transferida a la carcaza y a los rodamientos del molino, los cuales tienen una cedencia limitada debido a sus grandes dimensiones. Si se intenta comprimir materiales delgados y duros, la reacción se vuelve tan grande que los rodillos se deforman elásticamente y el radio de curvatura del arco de contacto es aumentado, Fig. 12. La extensión de este aplastamiento depende de la magnitud del esfuerzo de reacción y de las constantes elásticas de los rodillos:

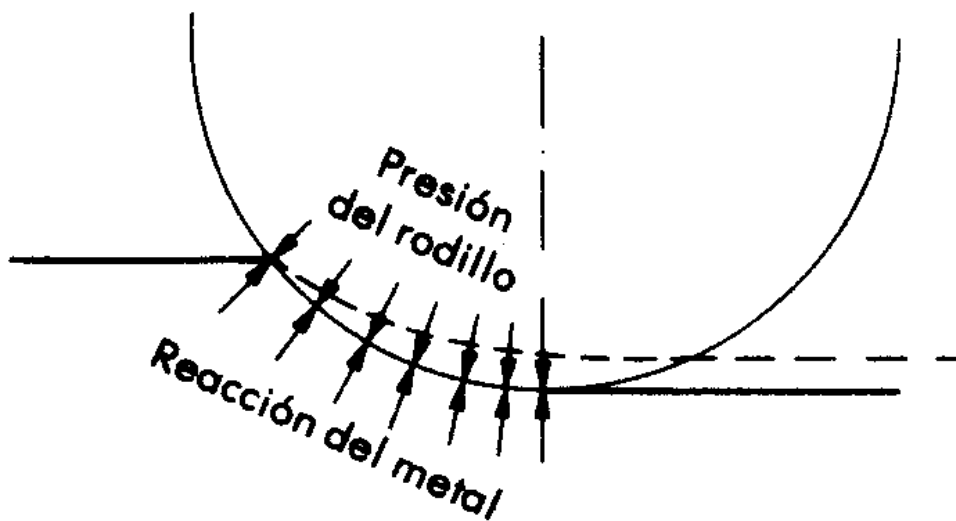


Figura 12 - Reacción del metal ocasionando aplastamiento en los rodillos.

FLEXIONADO O COMBADURA DE RODILLOS

Los molinos del tipo de cuatro rodillos, agrupado o Sendzimir han sido desarrollados con intención de eliminar la flexión de los rodillos, ya que cualquier deflexión da lugar a que el metal producido sea más grueso en su centro que en sus orillas.

Mientras que esto sea posible, tal forma resultará en un producto fuera de tolerancia de calibre, el problema mayor es la pérdida de forma. El metal se alarga más en sus orillas que en su línea de centro, resultando en diferentes longitudes a través del ancho, como se muestra en la Fig. 13:

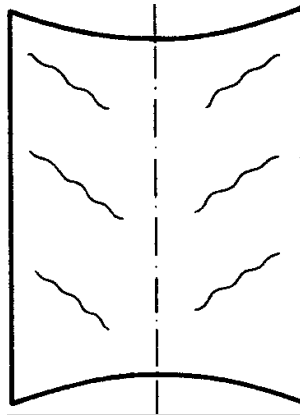


Figura 13 - Flexión del rodillo

Esto sólo puede ser acomodado por plegado o arrugado con la consecuente pérdida de planicidad. Una vez que la tira de metal ha perdido su forma de esta manera, nunca puede recuperarla y debe ser desechada.

Los intentos para evitar o limitar el flexionado de los rodillos involucran entre otros la disminución de la carga de laminado. Esto ha dado lugar a rodillos de trabajo pequeños y a molinos de cuatro rodillos. Pero aun con este tipo de molinos ocurre cierta flexión y ésta es arreglada abombando los rodillos, es decir, dándoles forma de barril.

La carga de laminado todavía flexiona los rodillos, pero el perfil adyacente al material que se está laminando está recto. Debe notarse, sin embargo, que sólo existe un valor de la carta de laminado que produce este perfil plano, Fig. 14:

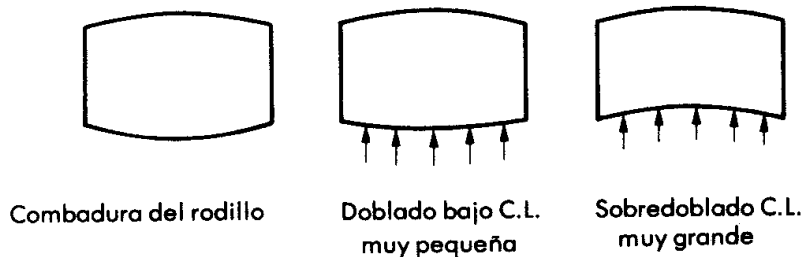


Figura 14 - Perfil del rodillo superior y efecto de la carga de laminado

Con el laminado continuo de varios bastidores, la tensión entre cada bastidor se ajusta para mantener la carga de laminado en un valor constante y así lograr una superficie plana. Este es un aspecto importante del control de la forma en laminado de tiras.

Un desarrollo reciente ha sido la introducción de gatos hidráulicos en los cuellos de los rodillos, de este modo se altera la combadura de los rodillos mediante una flexión a los mismos. A la fecha los resultados indican que este método tendrá mucho éxito en el control de la forma de las tiras.

Todos los métodos descritos hasta ahora involucran el laminado continuo donde puede emplearse tensión entre bastidores o al principio o final del molino continuo. En el laminado de hojas individuales esta técnica para controlar la carga de laminado no puede usarse y, por tanto, el problema de controlar la forma se ataca de otra manera. Cook y Parker, en 1953 proyectaron una técnica para calcular secuencias de laminado racionales, es decir, una secuencia de pasadas en los rodillos que para un metal dado, producirían la misma carga de laminado en cada pasada.

RESORTEO DEL MOLINO O DISTORSIÓN PLÁSTICA

A la reacción de la carga de laminado se le llama fuerza de separación de rodillos y si éstos no estuvieran sujetos en el cabezal del molino, tenderían a separarse y la reducción del metal no sería posible. El rodillo superior empuja hacia arriba la parte superior del cabezal, mientras que el rodillo inferior empuja hacia abajo la base del mismo cabezal. En tal virtud, el cabezal está sujeto a esfuerzos de tensión, los cuales obviamente son menores que el esfuerzo de cedencia del acero fundido con que normalmente se construyen, pero existe una deformación elástica que puede ser medida. Su magnitud depende de a) la carga de laminado, b) la sección transversal del cabezal, y c) de la altura del cabezal. Si la extensión de esta deformación es pequeña, se dice que el molino es rígido o duro, mientras que si es grande, se dice que el molino es suave o elástico. Esta deformación del cabezal obviamente afectará el calibre del metal producido. Por ejemplo, si la holgura del molino se fija a 3 mm antes de alimentar el material a ser laminado, la entrada del metal provee la fuerza que origina que el cabezal se estire y que la holgura se incremente a digamos, 3.05 mm. El metal producido será de 3.05 mm de espesor en lugar de 3.00 mm. Al ajuste de los rodillos antes de que entre el metal se le llama holgura pasiva de los rodillos, mientras que a la holgura real producida cuando pasa el metal a través de ella, se le llama holgura activa de los rodillos. Es importante conocer la relación entre las holguras pasiva y activa. Esta relación se denomina módulo del molino.

CONTROL AUTOMÁTICO DEL CALIBRE

El calibre de una pieza laminada de metal puede variar a todo su ancho o a toda su longitud. Normalmente la variación a través del ancho está asociada con el control de la forma. La variación a través de la longitud se asocia con el control de calibre, el cual se ha transformado en un factor de primera importancia en el laminado moderno de tiras. Las demandas de los compradores de tolerancia cada vez más cerrada en calibre, coincide con las siempre en aumento velocidades del molino, y para evitar la producción de grandes cantidades de material "fuera de calibre", los molinos de tiras modernos invariablemente incluyen un control automático de calibre. Este equipo corrige el molino siempre que se está produciendo material "fuera de calibre". Puesto que las correcciones no pueden aplicarse hasta que el material fuera de calibre ha pasado a través de dispositivos sensores, una proporción de tal material está siempre presente en el producto. Este es un sistema correctivo; un sistema mucho mejor sería uno basado en la anticipación, colocando sensores antes del molino y usando las señales para variar la holgura de tal manera que se produjera material "en calibre" todo el tiempo. En la práctica no ha sido posible implementar tal sistema, ya que todos los parámetros del metal que pueden afectar la holgura activa de los rodillos, deben ser continuamente monitoreados e interpretados. Estos incluyen: esfuerzo de cedencia, calibre a la entrada, ancho, condición de la superficie, y lograr esto en tiras que se mueven a velocidades de hasta 50 m/s es impracticable por el momento. Debido a lo anterior el sistema correctivo aún se usa, con su desventaja inherente de producir siempre algo de material fuera de calibre, pero tiene la ventaja práctica de que solamente un parámetro, es decir, el calibre de salida necesita ser monitoreado.

Los primeros sistemas de calibre automático usaban radiación y para medir el espesor. Estos eran colocados a una distancia de la salida del molino y los valores instantáneos del calibre eran alimentados a un dispositivo el cual ajustaba los tornillos del molino, corrigiéndose de este modo la holgura de los rodillos. Esta técnica, sin embargo, padecía de una limitación llamada Velocidad de Retardación.

Considérese la Fig. 15, el calibre es monitoreado en B el cual en este caso está a una distancia de la salida del molino A. Si el material en B es muy grueso, la señal origina que el sistema de control empiece a cerrar la holgura. Cuando la holgura está en el valor correcto, la señal desde B es todavía de producto grueso y el cierre continuará "sobrepasando" el ajuste correcto. Conforme el material delgado pasa desde A a B, el proceso comienza a invertirse y ocasiona un

"seguimiento" en el sistema de control. Esto puede subsanarse insertando un dispositivo electrónico de retardamiento de manera que el ajuste del tornillo se efectúe en bloques de tiempo en lugar de continuamente:

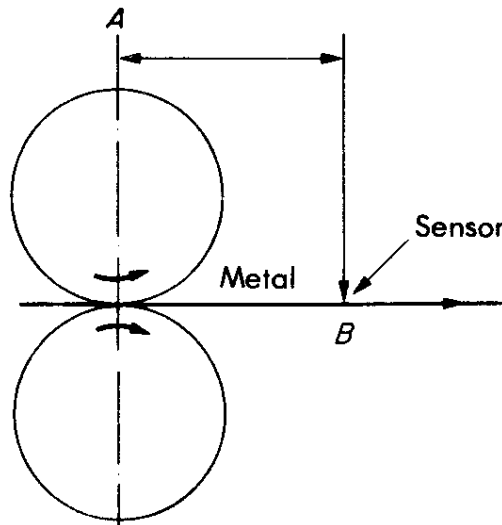


Figura 15 - Esquema general del control automático del calibre

Aun con esta técnica, grandes cantidades de material fuera de calibre pueden producirse. Mientras más cerca esté el monitor de la holgura de los rodillos, menor será el efecto Velocidad - Retardación, y en los molinos modernos el fenómeno ha sido eliminado usando cambios en las dimensiones del cabezal, las cuales están relacionadas con los cambios en la holgura de los rodillos. La Asociación Británica de Investigación del Hierro y el Acero fue pionera en el uso de medidores de deformación por resistencia para la medición de la fuerza de separación de rodillos. Las señales obtenidas de tales dispositivos se han usado para activar arietes hidráulicos o motores para bajar los tornillos para ajustar la holgura. Estas técnicas son llamadas métodos de control S o SD. En el método T la tensión del enrollador se mide y su ajuste se usa para controlar la forma o el calibre.

CONTROL AUTOMÁTICO DE CALIBRE - MÉTODO T (CA C - T)7

Si uno de los parámetros de las tiras que entran a un molino aumenta, la carga para llevar a cabo la deformación aumenta. Esto a su vez, causará un incremento en la fuerza de separación de los rodillos y en la holgura activa de los mismos. La tira que sale del molino en consecuencia será más gruesa y posiblemente "fuera de calibre". La corrección puede lograrse si se reduce la carga en los rodillos a su valor original, ya que esto origina que la holgura activa de los rodillos retorne a su magnitud anterior. Una manera de lograr esto es alterando la tensión trasera o de entrada sobre la tira -si ésta se incrementa, como se explicó con anterioridad, el esfuerzo requerido para deformar el metal disminuirá y, por tanto, la carga de laminado también. Este es el principio del CAC-T. La carga de laminado es monitoreado continuamente por medidores de deformación, ya sean colocados en el cabezal del molino o entre los elevadores de tornillos y los rodamientos de los rodillos. Las variaciones en la fuerza de separación de los rodillos y, por tanto, en la holgura activa de los rodillos, son instantáneamente detectadas y las correcciones se aplican rápidamente en respuesta a señales eléctricas.

Este método tiene varias desventajas. No puede usarse en laminado en caliente e impide el uso de tensión entre bastidores como medio para el control de la forma, Los molinos de laminación modernos no usan CAC-T y utilizan variaciones de la tensión entre bastidores para el control de la forma.

CONTROL AUTOMÁTICO DE CALIBRE-MÉTODO SD (CAC-SD)8

El principio de este método se resume en la Fig. 16. Con material con calibre a la entrada G_o , y el molino ajustado a una holgura pasiva G_a , una carga de laminado L_1 , se genera para dar un calibre de salida G_p . Si el calibre de entrada se incrementa a G_o' la holgura activa de los rodillos aumenta a G_p' , y probablemente se producirán tiras fuera de calibre, debido al hecho de que la carga de laminado ha aumentado a L_2 . Para corregir esto la holgura pasiva de los rodillos debe cerrarse a G_a incrementándose con esto la carga de laminado a L_3 . (Nótese la diferencia entre el método CAC-T y el CAC-SI) en que en el primero la corrección se logra reduciendo la carga de laminado, mientras que en el segundo la carga de laminado es aumentada.):

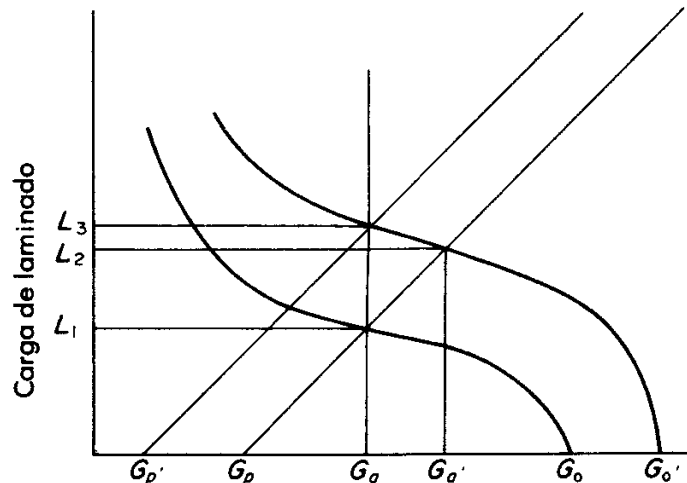


Figura 16 - Control automático de calibre - método sd (cac - sd)

CONTROL AUTOMÁTICO DE CALIBRE-MÉTODO S (CAC-S)9

Este es un intento para solucionar las dos mayores desventajas del método CAC-SD; el desgaste que ocurre en los tornillos y unidades del molino y la alta inercia de los grandes y pesados tornillos del molino. La técnica fue descrita por Sims y Slackg y está basada exactamente en los mismos principios del método CAC-SD, excepto que la holgura pasiva de los rodillos se controla por medio de arietes hidráulicos, los cuales se colocan alrededor de los tornillos y tienen poca o ninguna inercia y sin problemas de desgaste.

FORJADO

El forjado fue el primero de los procesos del tipo de compresión indirecta y es probablemente el método más antiguo de formado de metales. Involucra la aplicación de esfuerzos de compresión que exceden el esfuerzo de fluencia del metal. El esfuerzo puede ser aplicado rápida o lentamente. El proceso puede realizarse en frío o en caliente, la selección de temperatura es decidida por factores como la facilidad y costo que involucre la deformación, la producción de piezas con ciertas características mecánicas o de acabado superficial es un factor de menor importancia.

Existen dos clases de procedimientos de forjado: forjado por impacto y forjado por presión. En el primero, la carga es aplicada por impacto y la deformación tiene lugar en un corto tiempo. Por otra parte, en el forjado por presión, se involucra la aplicación gradual de presión para lograr la cedencia del metal. El tiempo de aplicación es relativamente largo. Más del 90% de los procesos de forjado son en caliente.

El forjado por impacto a su vez puede ser dividido en tres tipos:

- a) Forjado de herrero.
- b) Forjado con martinete.
- c) Forjado por recalcado.

FORJADO DE HERRERO

Este es indudablemente el más antiguo tipo de forjado, pero en la actualidad es relativamente poco común. La fuerza de impacto para la deformación es aplicada manualmente por el herrero por medio de un martillo. La pieza de metal es calentada en una fragua y cuando se encuentra a la temperatura adecuada es colocada en un yunque. El yunque es una masa pesada de acero con la parte superior plana, una parte en forma de cuerno la cual está curvada para producir diferentes curvaturas, y un agujero cuadrado en la parte superior para acomodar varios accesorios del yunque. Mientras está siendo martillado el metal, éste se sujeta con unas tenazas apropiadas. Algunas veces se usan formadores, éstos tienen asas o mangos y el herrero los fija a la pieza de trabajo mientras el otro extremo es golpeado con un marro por un ayudante. Las superficies de los formadores tienen diferentes formas y son usados para conferir estas formas a las forjas. Un tipo de formador llamado copador, tiene un borde bien redondeado en forma de cincel y se usa para estirar o extender la pieza que se trabaja. Un copador concentra el golpe y origina que el metal se alargue más rápidamente que como puede hacerse usando la superficie plana del martillo. Los copadores también son hechos como accesorios del yunque de manera que el metal es estirado usando copadores en la parte superior e inferior. En el agujero cuadrado del yunque pueden colocarse accesorios de varias formas. Los cinceles de trabajo son usados para cortar el metal, se usan punzonadores y un bloque con barreno de tamaño adecuado para lograr barrenos. La soldadura puede hacerse dando forma a las superficies a ser unidas, calentando las dos piezas y agregando fundente a la superficie para eliminar la escoria e impurezas. Posteriormente las dos piezas son martilladas juntas produciéndose la soldadura.

Los metales más fáciles de forjar son los aceros al bajo y medio carbono y la mayoría de los forjados de herrero están hechos de estos metales. Los aceros al alto carbono y los aceros con aleaciones son más difíciles de forjar y requieren mucho cuidado. La mayoría de los metales no ferrosos pueden ser forjados satisfactoriamente.

FORJADO CON MARTINETE

Este es el equivalente moderno del forjado de herrero en donde la fuerza limitada del herrero ha sido reemplazada por un martillo mecánico o de vapor. El proceso puede llevarse a cabo en forjado abierto donde el martillo es reemplazado por un mazo y el metal es manipulado manualmente sobre un yunque.

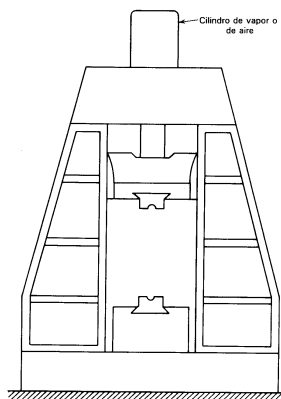


Figura17 -. Martillo para forja por caída libre.

La Fig. 17 muestra el martillo de caída libre. La calidad de los productos depende en mucho de la habilidad del forjador. El forjado abierto se usa extensamente para el proceso de espigado en donde la pieza de trabajo es reducida en tamaño por golpes repetidos conforme el metal gradualmente pasa bajo la forja. La manera en que esto se logra se muestra en las Fig. 18 y 19 en donde el metal listo para ser deformado está indicado por el área sombreada, la pieza de trabajo se mueve hacia la derecha:

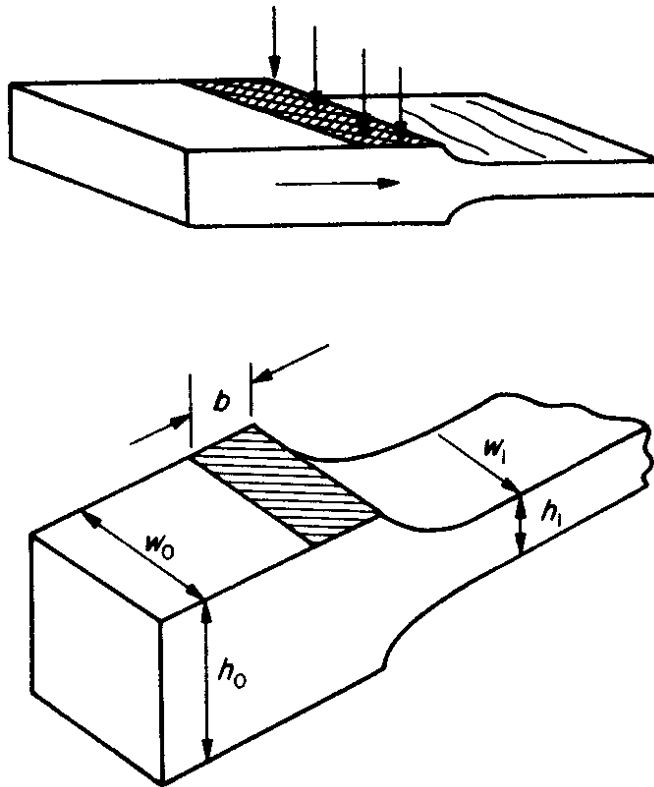


Figura 18 – 19 - Espigado

El espigado de una barra prismática puede usarse para evaluar los parámetros involucrados y cómo son controlados. El objetivo es reducir el espesor de la pieza de trabajo en una secuencia escalonada de extremo a extremo. Pueden requerirse varias pasadas para completar el trabajo y usualmente se efectuaría un canteado para controlar el ancho. La reducción en el espesor está acompañada por una elongación y un extendimiento. Las cantidades relativas de elongación y extendimiento no pueden calcularse teóricamente pero han sido determinadas experimentalmente para aceros suaves. Se encontró que los valores actuales dependen de la relación de la longitud de la herramienta a ancho del metal, la cual se denomina relación de agarre.

FORJADO CON DADO CERRADO EN MARTINETE

La forja con dado cerrado en martinete es ampliamente usada, el mazo y el yunque son reemplazados por dados. Los dados están machihembrados para ser fijados en el yunque y en el mazo. Además tienen una serie de ranuras y cavidades labradas en ellos y la pieza de trabajo se pasa en secuencia, a través de las series de formado.

La Fig. 20 ilustra el principio de una forja de impacto. La forja masiva es actualmente producida por el proceso de forja con dado y martinete. La Fig. 20 muestra un ejemplo de los dados usados para este proceso (el ejemplo muestra un dado de dos estaciones). El número de estaciones dependerá de la complejidad de la forja:

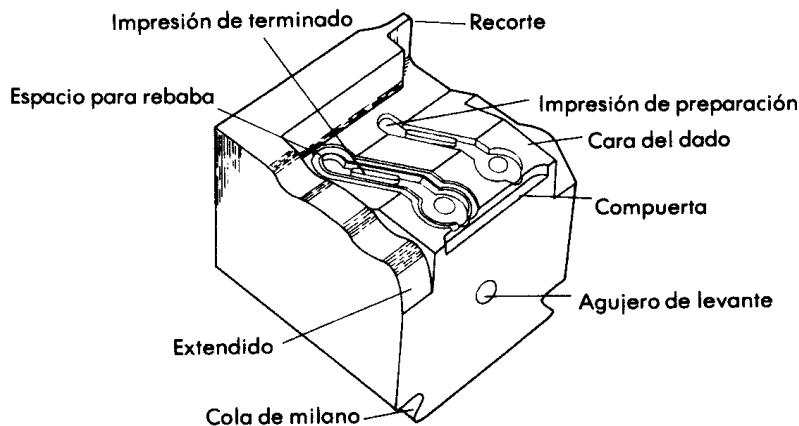


Figura 20 - Elementos típicos de un dado para forja cerrada

Estas estaciones tienen nombres tales como extendido, bloqueado, canteado, doblado y cortado. Donde se involucran varias estaciones, debe tenerse cuidado y asegurarse que el metal no se enfríe demasiado, antes de llegar a la última estación. Para asegurar que la cavidad del dado se llena completamente, el volumen del lingote o trozo inicial es mayor que el de la forja final. El exceso de metal aparece como "rebaba" en cada etapa, ésta es aleta delgada alrededor del perímetro de la forja en la línea de partición. Esta rebaba es cortada posteriormente en una prensa, por lo general, a alta temperatura. El peso de la rebaba debe ser un pequeño porcentaje del peso total de las forjas de formas simples, pero puede exceder el peso de las forjas de forma complicada.

De esta manera, cada tamaño y forma de forja requerirá un juego independiente de dados de forja y recorte. La tolerancia de producción para el metal inicial debe incluir un exceso por ejemplo 10 ± 0.2 mm. La sobretolerancia del metal es acomodada por un canal alrededor de la cavidad del dado, que permite la formación de la aleta referida anteriormente.

FORJADO POR RECALCADO

Este proceso fue desarrollado originalmente para colectar o recalcar metal para formar las cabezas de tornillos. Actualmente el propósito de esta máquina ha sido ampliado para incluir una vasta variedad de forjas. Es esencialmente una prensa de doble acción con movimientos horizontales en lugar de verticales. La máquina de forja tiene dos acciones. En la primera, un dado móvil viaja horizontalmente hacia un dado similar estacionario. Estos dos dados tienen ranuras horizontales semicirculares las cuales sujetan las barras. Una barra calentada en un extremo es insertada entre el dado móvil y el estacionario. Mientras está sujeta de esta manera, un extremo de la barra es recalcado o presionado dentro de la cavidad del dado por una herramienta cabeceadora montada sobre un ariete que se mueve hacia el frente de la máquina. Si se desean cabezas hexagonales, la herramienta cabeceadora recalcará algo del metal dentro de la cavidad de forma hexagonal del dado. Para forjas más complejas pueden usarse hasta seis dados diferentes y herramientas cabeceadoras a un tiempo, de manera similar a las diferentes estaciones en un dado de forjado por martinete.

FORJADO EN PRENSA

Mientras que el forjado por impacto usualmente involucra una prensa mecánica, por otro lado en el forjado en prensa se requerirá de fuerza hidráulica. Las grandes forjas invariablemente son producidas en grandes prensas hidráulicas. Estas tienen arietes que se mueven vertical y lentamente hacia abajo, bajo presión considerable. El equipo requerido es, por tanto, mucho mayor y la Fig. 21 muestra este tipo de forja:

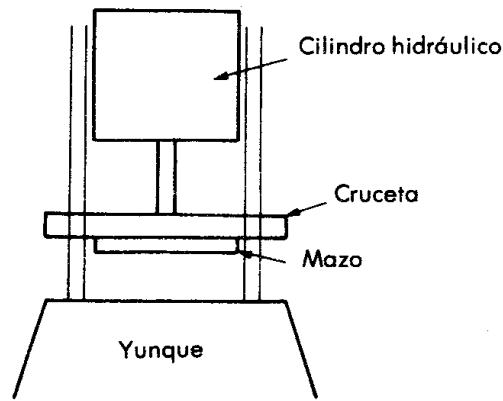


Figura 21 - Elementos de una prensa para forja

Una prensa típica de forja es capaz de cargas del orden de 6000 a 10 000 ton. Forjas de más de 100 ton de peso pueden ser movidas fácilmente en estas prensas forjadoras y los productos de más alta calidad son manufacturados por esta técnica.

EXTRUSION

Este proceso de compresión indirecta es esencialmente de trabajo en caliente, donde un lingote fundido de forma cilíndrica, se coloca dentro de un fuerte contenedor de metal y comprimido por medio de un émbolo, de manera que sea expulsado a través del orificio de un dado.

El metal expulsado o extruído toma la forma del orificio del dado. El proceso puede llevarse a cabo por dos métodos llamados: extrusión directa, donde el émbolo está sobre el lingote en el lado opuesto al dado y el metal es empujado hacia el dado por el movimiento del émbolo Fig. 22 (a), o extrusión indirecta, en la cual el dado y el émbolo están del mismo lado del lingote y el dado es forzado dentro del lingote, por el movimiento del émbolo:

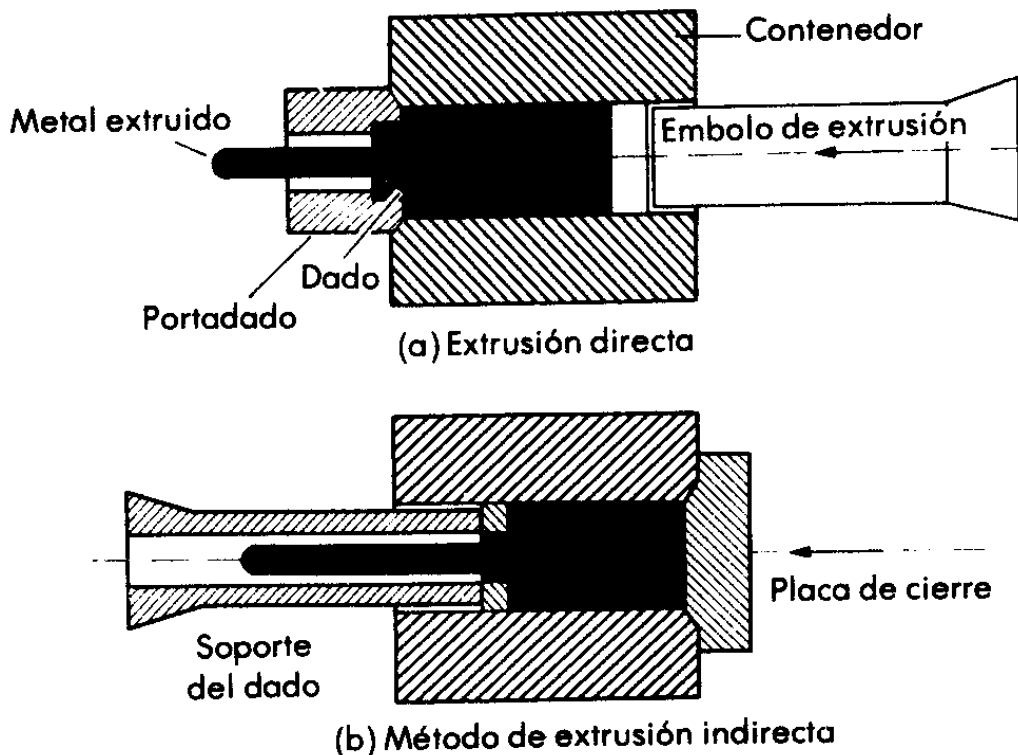


Figura 22 - Métodos de Extrusión

La extrusión es un método relativamente nuevo en la fabricación de piezas metálicas. Originalmente fue desarrollado para la fabricación de tubo de plomo por los sistemas victorianos de agua y gas.

Los problemas del material adecuado para el dado, que soporte las temperaturas altas y presiones requeridas para extruir los metales más duros y fuertes, no fueron resueltos sino hasta bien entrado el siglo XX.

En nuestros días, es posible extruir con éxito los siguientes metales y sus aleaciones: Aluminio, Cobre, Plomo y Acero, aunque para este último se requiere una técnica especial.

PRENSA DE EXTRUSIÓN DIRECTA

Una prensa típica para la extrusión de aleaciones de cobre, sería de alrededor de 5000 ton de capacidad de carga en el émbolo, y consistiría de una pesada placa de acero recubierta con una aleación de acero resistente al calor. Este podría acomodar un lingote de 560 mm de diámetro y 1 m de longitud. Ajustado dentro del contenedor mencionado estaría un émbolo que tenga un diámetro menor que el barreno interior del contenedor. El propósito de este claro es doble, minimizar la fricción entre el émbolo y el contenedor y también permitir una calavera de metal para ser dejada después que el lingote ha sido extruido. La razón para esta calavera de metal será explicada más adelante. Un cojincillo de presión precalentado se coloca entre el émbolo y el lingote a fin de prevenir el enfriamiento de la cola del lingote caliente desde el émbolo. El dado de extrusión está hecho de acero para herramienta resistente al calor y la forma del orificio junto con el orificio del soporte o paralelo son cuidadosamente preparados por el herramentero de la caseta de dados:

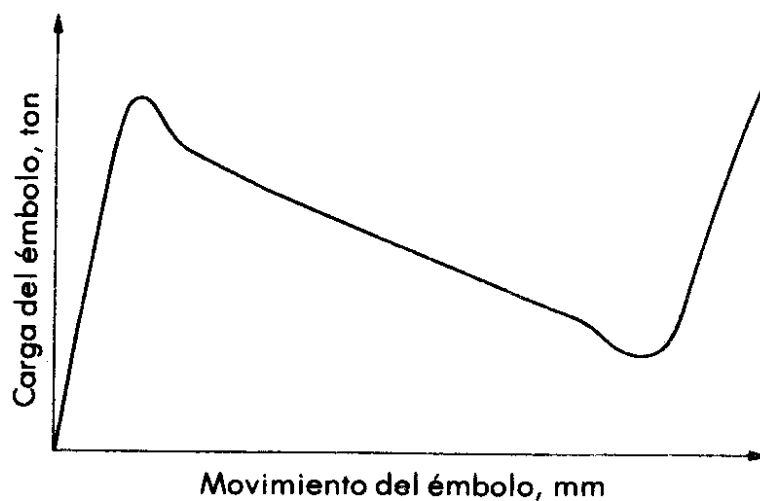


Figura 23 - Gráfica carga - movimiento

El lingote fundido de dimensiones apropiadas a la prensa de extrusión y el producto se calienta a la temperatura de trabajo en caliente. Como una regla aproximada ésta es de dos terceras partes de la temperatura de fusión en grados K, por ejemplo, aluminio 600 K, cobre 800 K.

El lingote calentado se coloca en el contenedor, seguido por el cojincillo de presión, caliente. El émbolo se coloca en el contenedor y se aplica la presión. Cuando se opera, el lingote es recalado y comprimido haciendo contacto por todos lados con el contenedor. Entonces incrementando la presión, el lingote es extruido a través del orificio del dado. El metal sale del dado y corre sobre una canal. Colocando celdas de carga sobre el émbolo de extrusión, es posible seguir los cambios de la carga durante el ciclo de extrusión como se muestra en la Fig. 23.

La carga se eleva bruscamente, mientras el lingote está siendo recalado, pero una vez que comienza la extrusión la carga desciende. La rapidez de descenso es constante hasta que se ha extruido aproximadamente el 85% del lingote, cuando ocurre un paro súbito, seguido de una elevación muy rápida hasta alcanzar la capacidad de carga de la prensa.

En este punto la extrusión debe detenerse. Esto ocurre mientras aún hay alrededor del 5 al 10% del sobrante del lingote y éste debe descartarse. La razón para esta elevación final de la carga es fácil de explicar, es la misma razón por la que es imposible extruir la última pizca de pasta de dientes del tubo. Durante las primeras etapas de la extrusión, Fig. 24 (a), la fuerza aplicada debe provocar que el metal fluya hacia el dado, a lo largo de una trayectoria diagonal. Al final del ciclo de extrusión, la dirección del flujo del metal, llega a ser más y más perpendicular a la línea de acción de la fuerza aplicada, Fig. 24 (b). Las razones para las otras características del diagrama carga/movimiento del émbolo, se explicarán más adelante:

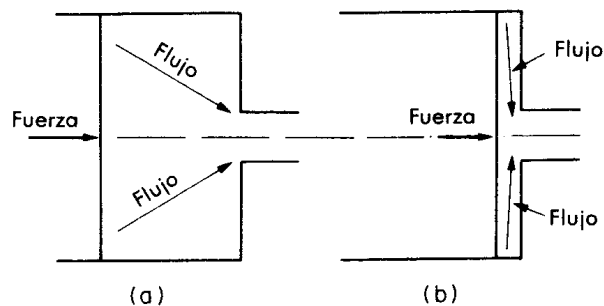


Figura 24 - Esquema del flujo y la fuerza en un proceso de extrusión

Puesto que siempre hay una pequeña cantidad de metal remanente, después que se completa la extrusión, significa que debe prevenirse la remoción del dado y expulsar el descarte.

La extrusión de cable forrado es un interesante ejemplo del proceso de extrusión directa. La Fig. 25 muestra una prensa vertical. El metal líquido se vacía en el contenedor, el cual es enfriado por vapor que pasa a través de unos agujeros cuadrados. Se impulsa el émbolo hacia abajo hasta que hace contacto con el plomo fundido, el cual se deja solidificar antes de aplicar una mayor presión por el movimiento del émbolo. Esto está sincronizado con el movimiento de izquierda a derecha del cable y el plomo es extruido como un tubo a través del orificio anular entre el cable y el dado. Puesto que la extrusión se detiene mientras todavía hay plomo en el contenedor, la siguiente adición de metal líquido causará una fusión parcial, dejando a los óxidos flotar en la superficie y entonces la resolidificación da un lingote continuo, listo para el siguiente elemento de extrusión. De esta manera, una longitud continua de forro sin uniones puede ser producido, el cual puede ser de una longitud sin fin:

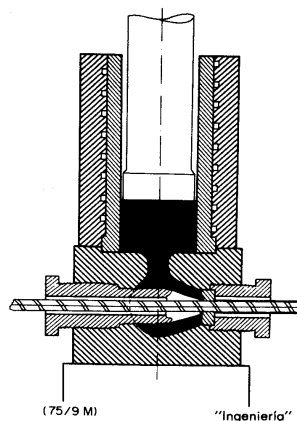


Figura 25 - Sección diagramática a través del contenedor y dado de bloque de una prensa vertical para cable

PRENSA DE EXTRUSIÓN INVERTIDA

El contenedor es similar a aquel del proceso de extrusión directa, excepto, que en lugar de un dado y un émbolo, en los lados opuestos del lingote hay un dado y un soporte del dado hueco en un lado del lingote. El soporte hueco del dado toma el lugar del émbolo. Esto debilita toda la prensa y limita el tamaño de la sección que puede ser producida por este proceso.

El diagrama carga/movimiento del émbolo, para esta clase de prensa se muestra en la Fig. 26:

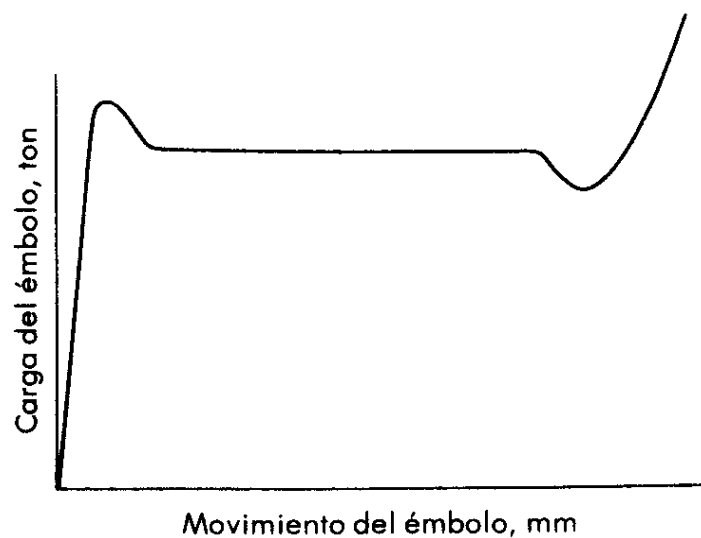


Figura 26 - Gráfica carga - movimiento para una prensa vertical

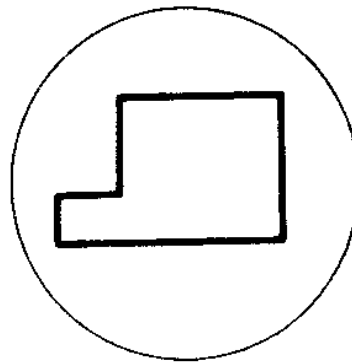
Comparando la Fig. 26 con la Fig. 29, se observa que son muy similares al principio y al final, por las mismas razones, la diferencia en la sección media puede considerarse por el hecho de que en la extrusión directa el lingote se mueve hacia el dado, es decir, se desliza a lo largo de la pared del contenedor con lo cual se produce una fuerza de fricción o carga. Esta carga de fricción depende del área de contacto entre el lingote y el contenedor y puesto que ésta es decreciente cuando el émbolo se mueve, de esta manera se hace que la carga de fricción disminuya con el movimiento del émbolo.

En el caso de la extrusión invertida no hay movimiento relativo entre el lingote y el contenedor y, por tanto, no puede haber fuerza de fricción. Se requiere una carga máxima más baja cuando se usa extrusión invertida, pero la ventaja de esta carga más baja no puede ser capitalizada, debido al hecho, de que como se explicó al principio, con extrusión inversa, la máxima reducción posible en el proceso es limitada.

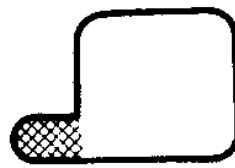
DADOS DE EXTRUSION

Los dados de extrusión están hechos de acero de alta velocidad para herramienta y son componentes muy importantes en el proceso de extrusión. Como el material del dado es demasiado caro, a menudo es hecho en forma de un disco delgado de diámetro mucho más pequeño que el lingote soportado por un dado de refuerzo. El orificio del dado controla la forma del metal extruído.

Si la abertura del dado consta de un barreno circular y paralelo, es decir, la longitud del soporte es igual al espesor del dado, la extrusión será una varilla circular que requiere una fuerza considerable para estirla y tiene una pobre superficie de acabado. La superficie de acabado puede mejorarse y disminuir la carga, aumentando el diámetro del barreno en el extremo de descarga:



Dado (a)



Extrusión (b)

Figura 30. (a) Dado; (b) Resultado de la extrusión

En caso de formas complejas, tales como la que se muestra en la Fig. 30 (a), se encontrará que un barreno completamente paralelo, resultará en la producción de una forma como la Fig. 30 (b). Esto es porque la resistencia a fluir a través del área sombreada del dado, es mucho mayor que a través del residuo.

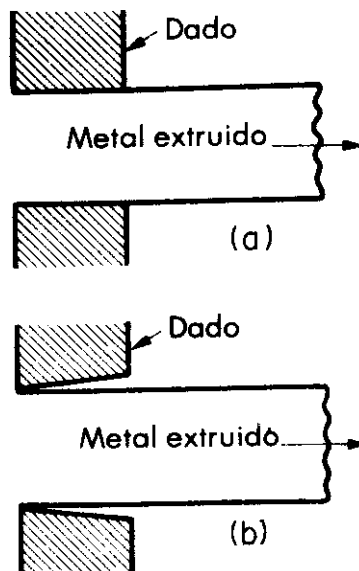


Figura 31.

Esta resistencia puede reducirse "puliendo" o recortando el dado, de manera que la longitud de contacto con la extrusión sea reducida alrededor de las superficies externas del área sombreada en la Fig. 31 (b). ¿Qué longitud de soporte se requiere?, es una cuestión de experiencia, y se necesita un buen diseñador de herramienta, para asegurar que el pandeo y torsión de la sección extruída no ocurra y que el metal no tenga desgarres o filos ásperos. La Fig. 32 muestra por qué se requiere una abertura adicional para asegurar el balance del flujo, cuando se extruye una forma asimétrica:

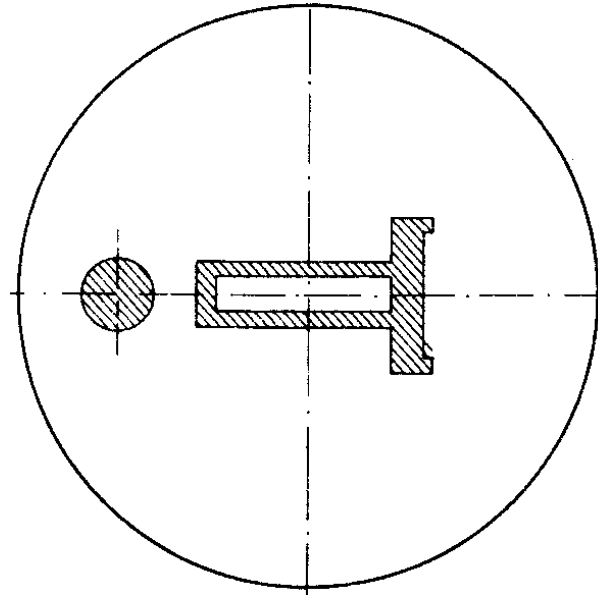


Figura 32. Dado hecho con abertura adicional para balancear el flujo, cuando se extruye una sección de forma asimétrica.

Un dado múltiple de extrusión puede usarse cuando la carga de extrusión es excesiva para una sola área pequeña de extrusión. Un número dado de secciones que pueden ser idénticas o de diferentes formas, pueden extruirse al mismo tiempo, cortando varios orificios como en la Fig. 33. Se acostumbra disponer de orificios idénticos, ya que de otra manera puede surgir el problema del balanceo del flujo:

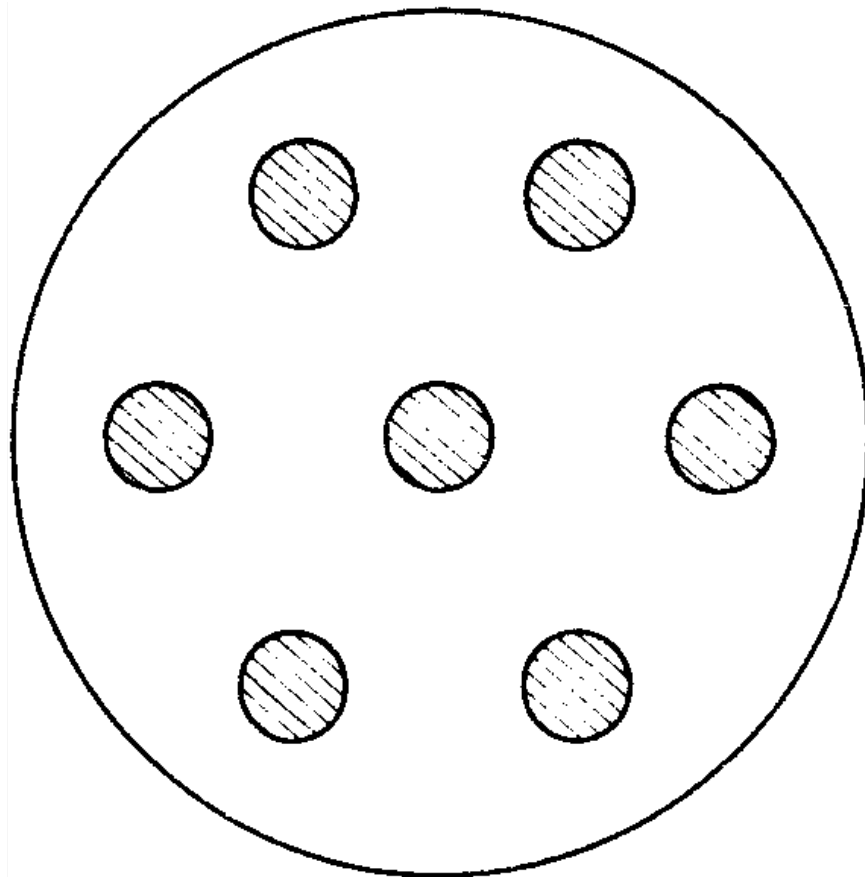


Figura 33. Dado de extrusión para producción múltiple de barras.

PRODUCCION DE TUBOS EXTRUIDOS

La extrusión es un método ideal de producir tubos sin costura, y el principio del método ya se ha utilizado en la extrusión de cable forrado. El cable en el centro del orificio circular del dado, forma un espacio anular a través del cual el metal extruido fluye para formar el forro.

Para la producción de tubos, el cable se reemplaza por un mandril. Hay tres tipos de arreglo, de mandril que pueden usarse:

- (a) fijo
- (b) flotante
- (c) perforante

Los tipos (a) y (b) están fijos al émbolo como se muestra en la Fig. 34 y el lingote debe perforarse de manera que el mandril pueda sobresalir a través del lingote y tomar su posición en el orificio del dado. La tendencia moderna es la de usar el mandril flotante, más que uno fijo, puesto que él mismo se centra y, por tanto, produce tubos con concentricidad dentro del 1 %:

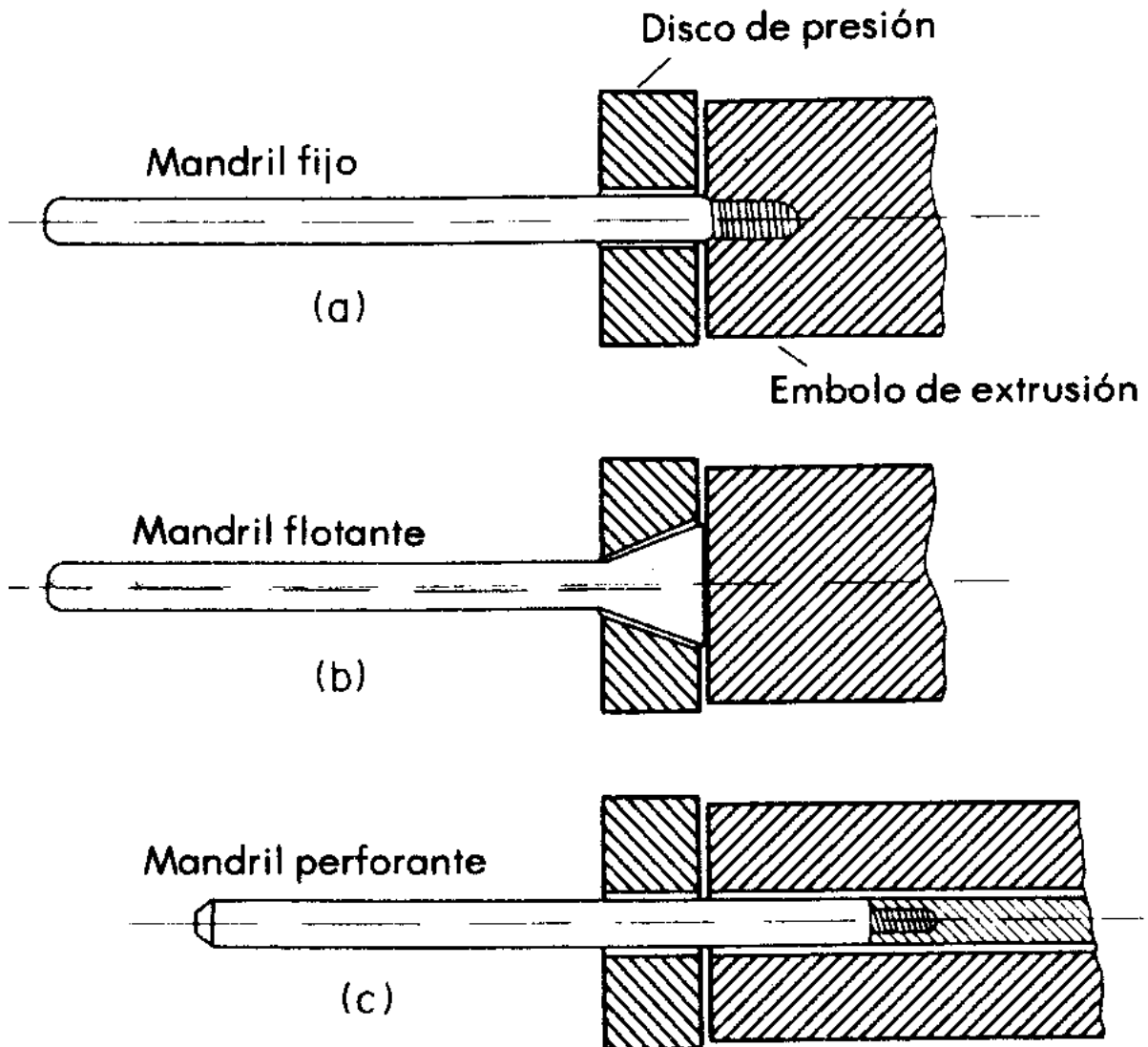


Figura 34. Tipos de arreglos del mandril.

Por otro lado, los mandriles fijos producen tubos excéntricos a menos que se tenga cuidado, para perforar con precisión el lingote. Cuando se usa mandril perforador, el lingote es sólido y el mandril se retrae dentro del émbolo. Después que el lingote caliente se coloca dentro del contenedor, el mandril es empujado dentro del lingote y pasa a través de él para colocarse en el orificio del dado. Las principales ventajas de este proceso son velocidad y economía, porque elimina la operación de perforado por separado y el equipo especial requerido.

Las desventajas son que las prensas requeridas, son mucho más grandes y mucho más caras que las del tipo sin perforador. La operación severa de perforado, algunas veces da abundantes grietas y desgarres en el agujero del lingote produciendo defectos en el tubo. Por estas razones, el perforado no se lleva a cabo en tubos de aluminio y sus aleaciones, y se usa principalmente en aleaciones de cobre donde no son necesarios buenos acabados superficiales, requeridos en usos hidráulicos y de alta presión. Un desarrollo reciente ha sido la introducción de dados puente, donde el mandril normal se ha reemplazado por uno más pequeño, sostenido en posición en el orificio del dado, por tres brazos delgados de araña, como se muestra en la Fig. 35:

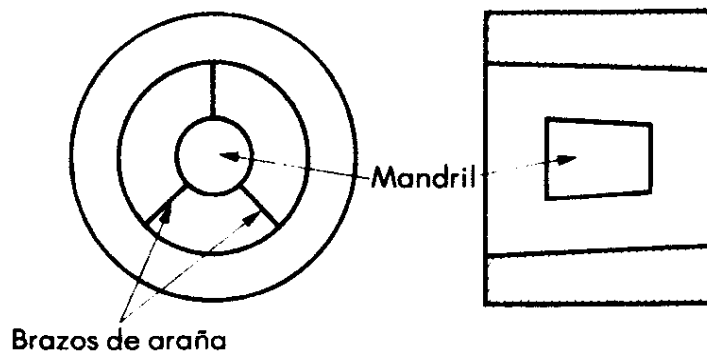


Figura 35

El metal es rebanado por los tres brazos de araña cuando es extruído, para dar tres segmentos separados, pero éstos son inmediatamente comprimidos por el soporte cónico del dado sin exponerse al aire, por lo que las superficies limpias se sueldan por presión, para formar un tubo completo. Cuando este proceso fue propuesto inicialmente, los clientes tendían a ser renuentes a aceptar el producto, que era considerado inferior a los tubos sin costura normales. Sin embargo, ahora se acepta que los tubos hechos con dados puente son tan buenos, si no es que superiores a los tubos extruídos normalmente. Esto en particular, es cierto con los productos recién desarrollados; dados puente de tres y cuatro aberturas se muestran en las Figuras. 35 y 36:

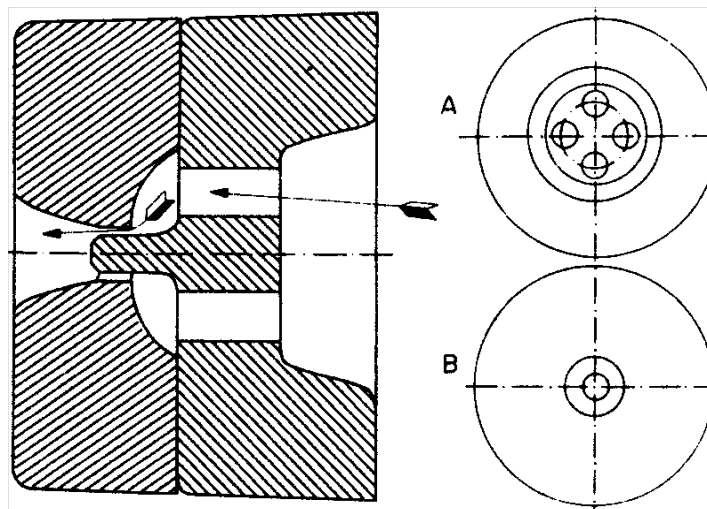


Figura 36. Dado puente de cuatro aberturas.

FLUJO DEL METAL DURANTE LA EXTRUSION

Cada proceso de trabajo involucra la aplicación de una fuerza o esfuerzo a la superficie del metal, para provocarle un flujo y un cambio de forma. Es importante conocer la relación entre las fuerzas aplicadas y las direcciones del flujo, de manera que las formas finales requeridas y predecibles puedan producirse. El primer intento para estudiar el flujo del metal fue hecho por Siebel quien taladró agujeros verticales en una placa de hierro forjado y luego los obturó con pernos de hierro forjado. Esta placa se calentó y se pasó parcialmente por una parte de la trayectoria entre los rodillos de un molino de laminación. La pieza fue removida y seccionada longitudinalmente para exponer los pernos como aparecen en la Fig. 37:

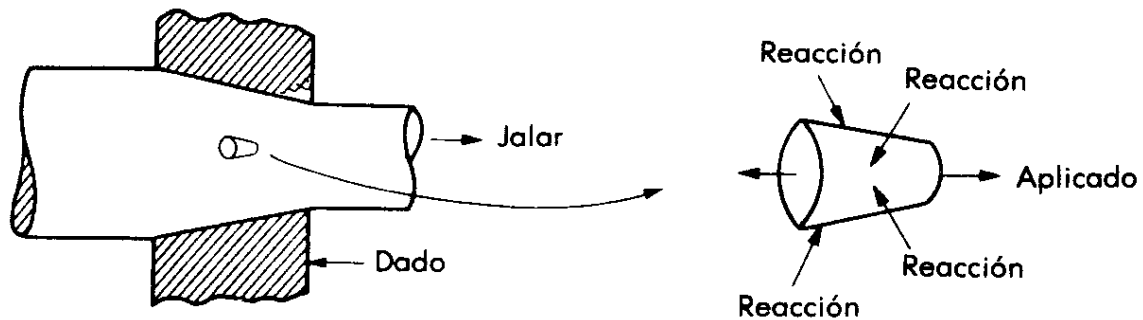


Figura 37. Estirado de alambre.

Siebel argumentaba que con esta técnica era posible eslabonar en una muestra el metal que había sido deformado, con el metal que estaba sometido a deformación en el límite de la pasada del rodillo. Un examen de la sección muestra que la deformación empieza en la superficie, por un deslizamiento hacia adelante y que es necesaria cierta reducción mínima antes que el efecto haya penetrado hasta el centro. También puede ser visto que para una reducción dada en el espesor, el patrón de deformación permanece constante, hasta que la deformación es completa. A este tipo de patrón de deformación se le llama casi estático y es independiente del tiempo de duración del ciclo de deformación. Los conocimientos ganados con el experimento de Siebel, tomaron en cuenta el tipo de extremos del producto producido, esto es, las puntas y colas del tubo, que en la práctica requieren recortarse. Los defectos y métodos de mejoramiento del flujo del metal también pudieron ser considerados y en consecuencia, la calidad del producto fue sugerida. Desde esta investigación inicial de Siebel, el flujo del metal se ha investigado en todos los procesos de deformación, usando técnicas más sofisticadas y los resultados de ambas deformaciones, cualitativas y cuantitativas. La extrusión probablemente ha sido el proceso que más se ha investigado y Pearson ha hecho la más grande contribución al conocimiento del flujo del metal. El mayor problema cuando el flujo de metal se examina en la extrusión, es el hecho de que el patrón del flujo se altera con el tiempo, durante el ciclo de deformación. La técnica simple usada por Siebel en el laminado, no puede, por tanto, usarse en la extrusión y se requiere una investigación más detallada.

En principio, la mejor técnica sería hacer una película del patrón de deformación durante todo el ciclo. Esta entonces podría proyectarse en cámara lenta de manera que el patrón de deformación pudiera ser seguido por todo el ciclo. Esta técnica aún no se ha usado en gran escala, pero ofrece posibilidades para el futuro.

Es importante que el método de investigación no tenga influencia sobre el patrón de flujo. Siebel reconoció esto cuando obturó los agujeros con el mismo material de la placa, es decir, hierro forjado. El hecho de que los pernos se aflojaran demostró que su premisa no era válida, ya que la presencia de los agujeros aun cuando rellenos, de hecho influyeron en el patrón de flujo. Sin embargo, al investigarse el flujo en la extrusión, puede aprovecharse el hecho de que debido a que el patrón de flujo es simétrico axialmente, no pueden existir esfuerzos de corte en planos

longitudinalmente axiales. En otras palabras, si un lingote se corta longitudinalmente por la mitad y las dos mitades se colocan juntas y extruídas a través de un dado, que esté colocado axialmente, el hecho de que el lingote esté cortado, no afectará el flujo. Por otro lado, si el dado se coloca asimétricamente, entonces es obvio que el lingote cortado, fluiría en forma diferente a otro que no esté cortado, como se muestra en la Fig. 38:

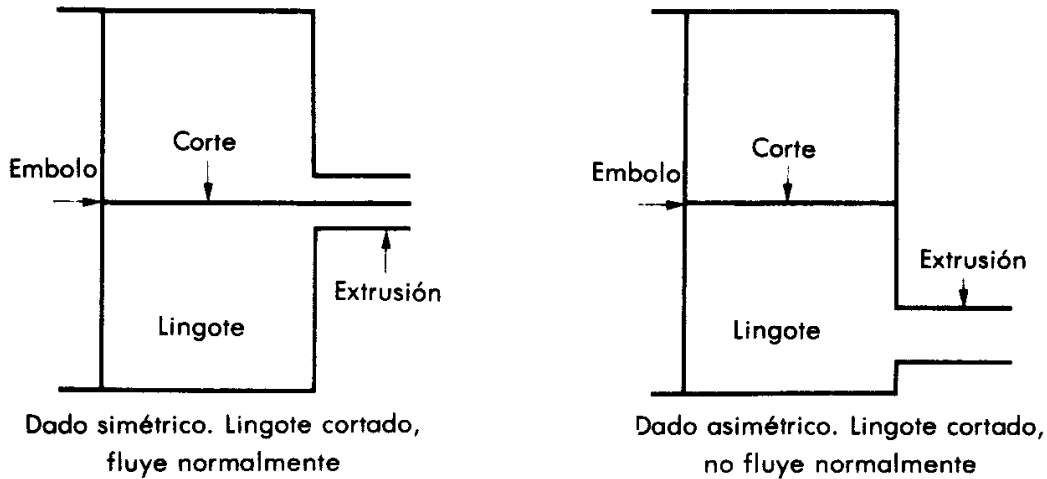


Figura 38

Pearson obtuvo una considerable cantidad de información, extruyendo un lingote cilíndrico de estaño que había sido cortado en mitades a lo largo del eje y rayadas con un patrón regular de rejilla, sobre las interfaces planas y amarradas juntas con alambre. La extrusión fue fácilmente separada a lo largo del plano axial y la deformación cuantitativamente impuesta desde el límite de distorsión de la rejilla. Él identificó tres patrones básicos: A, B y C, asociados con tres maneras de deformación, más tarde atribuidas a diferencias de fricción entre el lingote y las paredes de la cámara de extrusión. En el patrón de flujo tipo A, no hay fricción entre el lingote y el contenedor y el metal se desliza hacia la región del dado, sin deformación a todo lo largo. Esto se demuestra por el hecho de que las líneas horizontales del patrón de la rejilla permanecen así hasta que llegan a la vecindad del dado. Cerca del dado, el lado exterior del lingote es detenido por los hombros del contenedor mientras que la región central fluye fácilmente dentro del dado. Esto produce la desviación de las líneas horizontales. El grado de desviación aumenta cuando la cola del lingote se acerca al dado. Esto es importante para el extremo final del tubo, lo cual ocurre siempre en los metales extruídos por la disminución en la carga de extrusión durante los últimos pasos del ciclo, justamente antes de la rápida elevación final. El patrón de flujo tipo A es típico del proceso de extrusión indirecta, cuando el dado es empujado dentro del lingote y no hay movimiento relativo entre éste y el contenedor.

En el patrón de flujo tipo B, hay una cierta cantidad de fricción entre el lingote y el contenedor y esto tiende a retener el metal hacia atrás, cuando se está moviendo hacia el dado. Esto provoca desviación al principio de la etapa, antes que el metal alcance la vecindad del dado. Al principio del ciclo, las desviaciones son mucho más severas y un ducto más profundo se forma en el metal. El tipo C, muestra el patrón de flujo cuando hay fricción adhesiva entre el lingote y el contenedor. La zona muerta del metal, la cual se forma en los hombros del dado, crece muy rápidamente y se extiende hacia atrás del émbolo. El flujo ocurre por corte a lo largo de un plano que está bajo la superficie, tomado de un trabajo sobre la extrusión de aluminio, por C. Smith.

Mientras que el patrón de flujo tipo A es típico de la extrusión indirecta, el tipo C es típico de la extrusión directa de los metales duros, tales como el cobre y el aluminio. Este patrón de extrusión tipo C da lugar a dos clases de defectos. El primero es "defecto de extrusión", esto ocurre porque el flujo se realiza por corte bajo la superficie, el metal más exterior está inmóvil y es sacado por el émbolo con una acción similar a la de un removedor de nieve (ver Fig. 39):

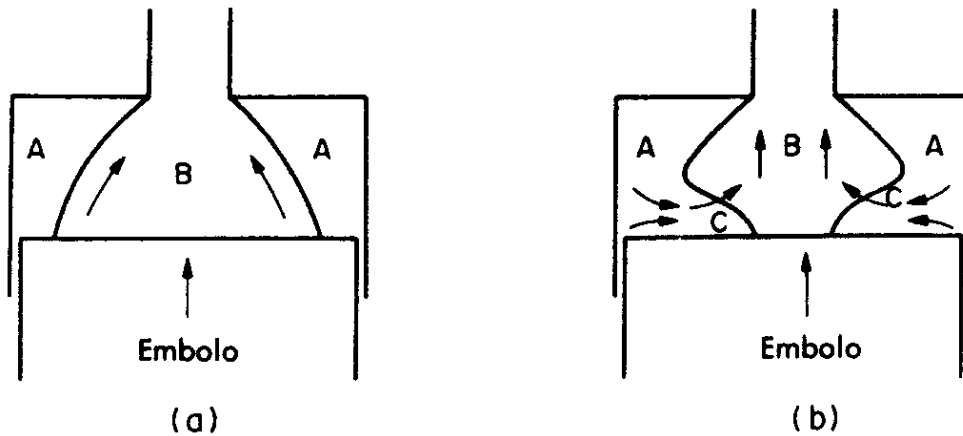


Figura 39. Defecto de extrusión.

El metal de la zona muerta A no fluye, Fig. 39 (a). El émbolo saca el metal inmóvil, Fig. 39 (b), el cual entonces puede empezar a fluir a lo largo de C dentro de la región central del lingote. Desafortunadamente el metal de la zona muerta A contiene material oxidado en la superficie y cuando éste entra a la extrusión produce el "defecto de extrusión", que vuelve al material inaceptable. Una forma de evitar que ocurra este defecto, es usar un cojín de presión entre el émbolo y el lingote, que es de diámetro menor al del lingote [ver Fig. 25 (a)]. Este deja una calavera delgada sobre la pared de la cámara que incluye el metal oxidado de la superficie.

La segunda clase de defecto introducida por el patrón de flujo tipo C, es el 'agrietamiento de abeto'. Puesto que el flujo tiene lugar por corte bajo la superficie, la deformación y las velocidades de deformación en la región de corte, ambas deben ser muy altas.

Esto puede producir condiciones de deformación adiabática y la elevación de temperatura resultante puede exceder la temperatura de solidificación del metal produciendo fusión incipiente.

El metal extruído no tiene ductilidad y la eyección desde el dado se realiza con estallidos esporádicos para dar la muy característica apariencia de abeto. Esto tiende a ocurrir en aquellas aleaciones de aluminio, donde la diferencia entre la temperatura mínima para trabajo en caliente y la temperatura de solidificación es pequeña.

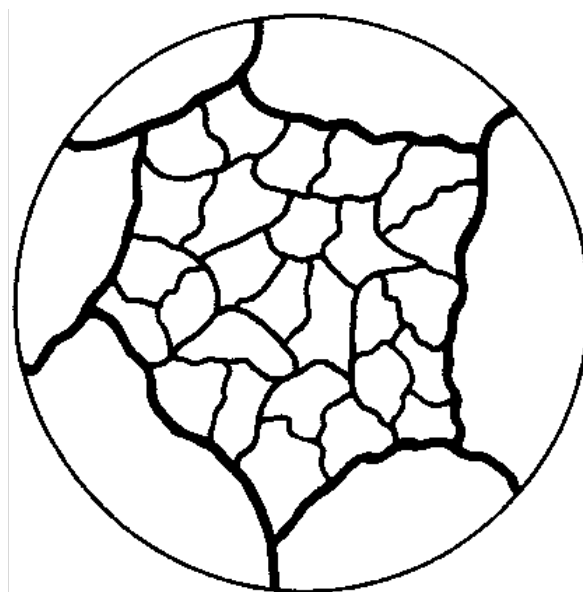


Figura 40. Aumento de los grandes granos periféricos.

El intento para evitar la fusión incipiente por el uso de velocidades más bajas del émbolo puede conducir al problema de grandes granos periféricos (Fig. 40). Esto ocurre si el lado exterior del lingote es enfriado abajo de la temperatura de recristalización, por el contacto con la pared del contenedor más fría. Después de la extrusión, el calor fluye desde el centro de la pieza extruída a las capas exteriores, elevándose desde abajo hasta arriba de la temperatura de recristalización. Por las condiciones especiales de extrusión de estas capas, la cantidad de trabajo en frío que se ha efectuado, es aquella cantidad crítica que resulta en la producción de granos extremadamente grandes en la recristalización. Este material de grano grande tiene tan baja ductilidad que otra vez es inaceptable. C.S. Smith investigó el problema de la extrusión de tales aleaciones de aluminio y encontró que debe ser ejercido conjuntamente un control muy estrecho sobre la temperatura de extrusión y la velocidad del émbolo para producir un material aceptable.

El patrón de flujo en la extrusión es muy complejo y está cambiando continuamente durante todo el ciclo. Sin embargo, mucho trabajo se ha llevado a cabo para entender y explicar tales patrones, y del conocimiento obtenido los defectos de extrusión se han estudiado y métodos para minimizarlos o aun para eliminarlos, también se han inventado.

DISTRIBUCION DE TEMPERATURA EN LA EXTRUSION

La mayoría de la extrusión industrial es esencialmente un proceso de trabajo en caliente donde el lingote se calienta a una temperatura uniforme antes de insertarlo en el contenedor. No obstante que el contenedor se calienta siempre a una temperatura más baja que el lingote con el resultado de que el exterior de éste tiende a enfriar una vez que hace contacto con el contenedor. Esto ocurre al principio del ciclo de extrusión y las capas exteriores del lingote son continuamente enfriadas durante el resto del ciclo.

La deformación no es uniforme a través de la sección. De hecho se encuentra a lo largo de ciertos planos de corte, dando origen a muy altas reducciones localizadas, acompañadas por extremadamente altas velocidades de extrusión.

Las velocidades de deformación en estas zonas pueden ser tales que provoquen considerables elevaciones de temperatura, bajo condiciones esencialmente adiabáticas. Si estas elevaciones son excesivas, entonces el metal puede exceder su punto de fusión dando origen a fusión incipiente, y el metal extruído como se explicó al principio será expulsado desde la apertura del dado, en forma de explosiones, para dar la clásica fractura de "abeto":

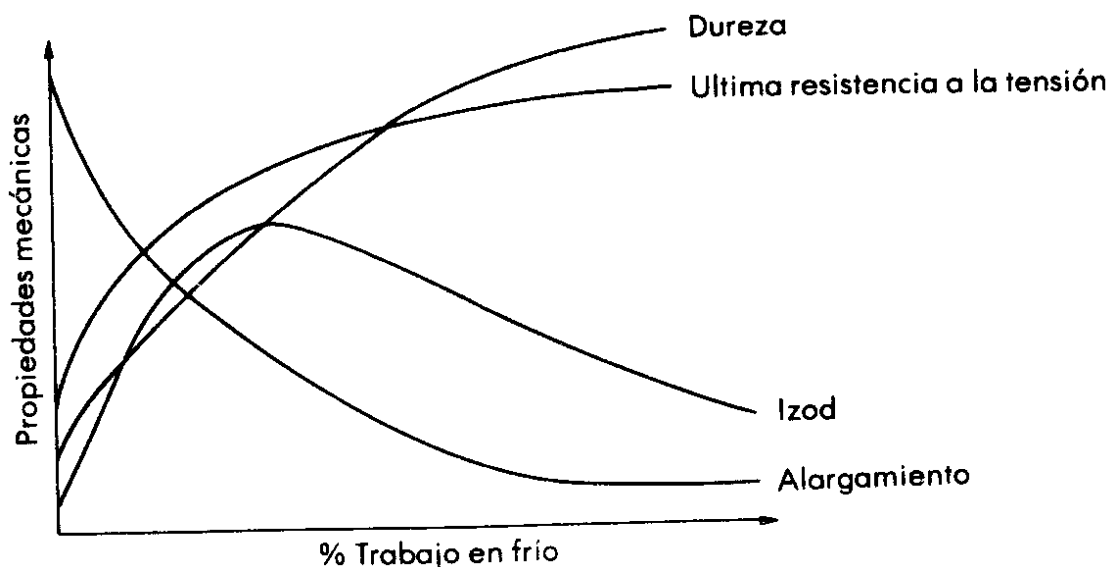


Figura 41.

Si se hace un intento para eliminar la fractura de abeto disminuyendo la temperatura de precalentamiento del lingote, existe el riesgo de que se produzcan grandes granos periféricos, disminuyendo las propiedades mecánicas del material extruído. La explicación de la formación de estos granos grandes se ha dado en la Fig. 41. Este es un problema particularmente severo para las aleaciones de aluminio y ha sido estudiado por Smith. Una ilustración de este fenómeno se ha dado en la Fig. 40.

Smith concluye que para evitar granos grandes periféricos y fusión incipiente, es necesario imponer un control preciso de la temperatura de recalentamiento del lingote, temperatura del contenedor y velocidad del émbolo como se muestra en la Tabla 1:

Designación	Composición				Rango de extrusión (°C)	Temp. Óptima (°C)	Temp. Contenedor (°C)	Veloc. de extrusión (pies/min)
	Cu (%)	Mg (%)	Si (%)	Zn (%)				
B.S. Núm. HE14	4	0.6	0.6	—	400-480	450	420	6-8
B.S. Núm. HE11	2	0.6	1.0	—	400-480	460	420	15-20
B.S. Núm. HE10	—	0.6	1.0	—	400-520	500	420	30-50
D.T.D. Núm. 683	1	2.0	—	5.5	380-440	420	420	3-4
B.S. Núm. NE4	—	2.0	—	—	380-440	420	420	14-18
B.S. Núm. NE6	—	5.0	—	—	400-460	440	420	8-14
B.S. Núm. NE7	—	7.0	—	—	400-460	440	420	4-6

Tabla1. Temperaturas típicas de extrusión y velocidades para algunas aleaciones de aluminio.

La variación de la temperatura en el interior del metal durante la deformación como se ilustró antes tiene una influencia controlada sobre las propiedades del producto A propuestas. De Smith se investigaron los parámetros de operación y se propusieron guías para la eliminación de los mayores defectos del producto. Tanner y Johnson han deducido un método más preciso que la versión cualitativa simplificada dada antes, para determinar la distribución de temperaturas en la extrusión. Los problemas de transferencia de calor no existen durante la deformación adiabática y Johnson y Tanner investigaron procesos comerciales de extrusión a fin de encontrar qué tan cerca están de las condiciones adiabáticas. Ellos concluyeron que fueron muy precisos con las velocidades del émbolo de 25 mm., condición que se vio para aplicar en los procesos industriales listados en la Tabla 1.

ESTIRADO DE ALAMBRE (TREFILADO)

En éste, el diámetro de una pieza de metal cilíndrica es reducido jalándola a través de un agujero cónico que es el perfil interno de un dado de estirado. El metal cilíndrico alimentado es inicialmente ahusado de manera que salga a través del orificio del dado y pueda ser sujetado para el estirado. El equipo necesario puede encontrarse desde un simple banco de estirado para trabajo intermitente, hasta bloques múltiples para operación continua.

El bloque de estirado consiste de tres partes un sujetador o cabrestante para sujetar el arrollamiento de varilla lista para estirarse, el dado que es el que ejecuta realmente la reducción y el bloque de estirado que suministra la carga y energía para la reducción; éste también acumula, enrollado, el alambre ya estirado. Las tres partes se muestran en la Fig. 42:

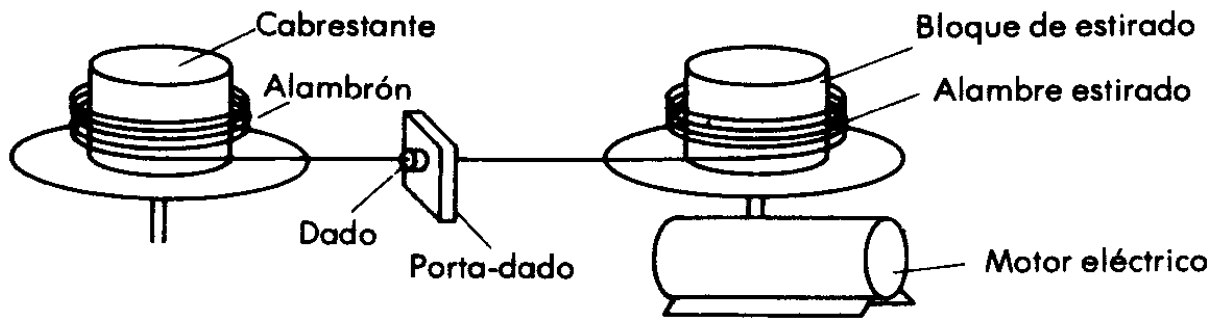


Figura 42. Elementos que componen el trefilado

El denominado bloque de estirar tiene solamente un dado el cual debe cambiarse y reemplazarse por otro de menor diámetro después de cada pasada completa. También es posible estirar el alambre de manera continua, de tal manera que se pasa a través de varios dados simultáneamente. Debe haber, sin embargo, un bloque de estirado para cada dado. Una máquina continua que tenga cinco dados, también tendrá cinco bloques de estirado, etc. Tal tipo de máquina se muestra en el diagrama de la Fig. 43.

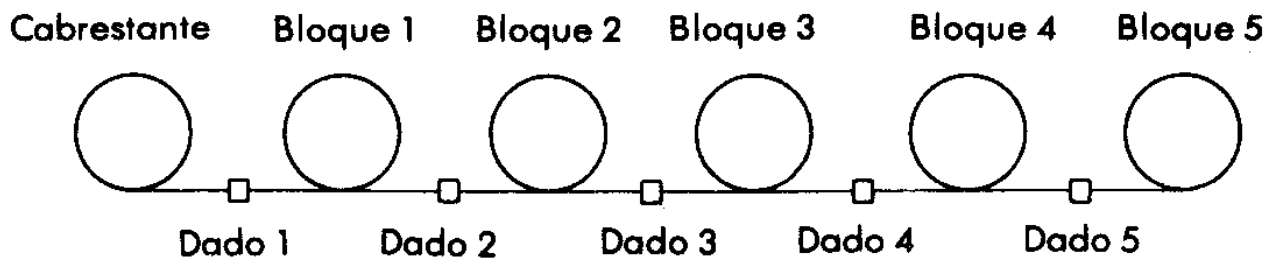


Figura 43. Diagrama de una máquina continua de trefilado.

Puesto que el diámetro del alambre disminuye desde el dado 1 al dado 5, la velocidad y longitud aumentarán proporcionalmente. Por estas razones la velocidad periférica de los bloques debe aumentarse a lo largo de la línea. Esto puede lograrse por una de dos maneras.

En la primera, cada bloque de estirado está equipado con su propio motor eléctrico con control de velocidad totalmente variable, el cual puede ajustarse automáticamente para sincronizar la velocidad del bloque con la del alambre. Tienen la desventaja de que son grandes y costosas debido a la inversión en la instalación de los costosos equipos eléctricos.

El segundo tipo de máquina supera estas desventajas haciendo uso de un solo motor eléctrico para mover una serie de conos escalonados. Los diámetros de los conos son tales, que generan una secuencia de velocidades periféricas equivalentes a una serie definida de reducciones de tamaño. Tales máquinas están, por tanto, diseñadas para dar una reducción específica por pasada, como se ilustra en la Fig. 44:

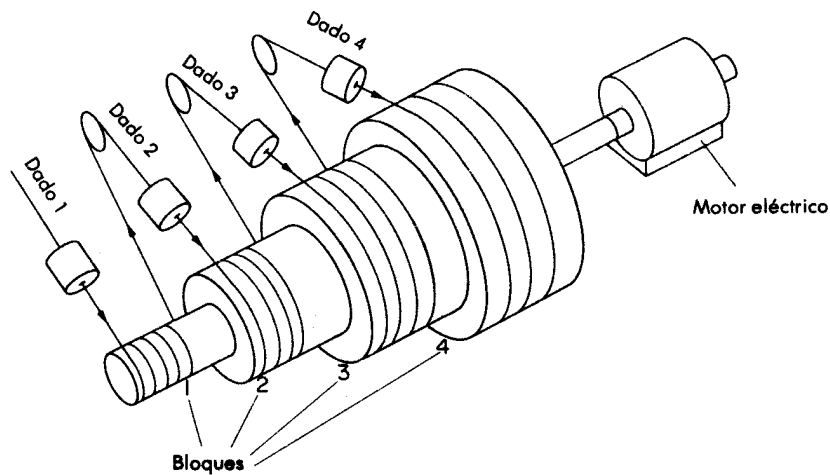


Figura 44

No es posible lograr una relación precisa entre los diámetros del dado y del bloque que es esencial en este patrón, pero el estirado puede llevarse a cabo satisfactoriamente si la discrepancia no es muy grande. La discrepancia da como resultado que el material estirado se deslice hacia adelante o hacia atrás en los bloques mientras giran. Esto resulta en fricción y generación de calor el cual se disipa sumergiendo el arreglo completo de conos escalonados en un baño de aceite. Por esta razón se denominan máquinas de Inmersión o de Deslizamiento, mientras que el primer tipo es descrito como máquina Sin Deslizamiento.

La parte más importante de la máquina de estirado de alambre es el dado. Este consiste de dos partes, la cubierta y la boquilla. La cubierta está hecha de acero para dados de gran diámetro y de bronce para los pequeños, su función principal es proteger la boquilla. La boquilla, que está contenida dentro de la cubierta está hecha de carburo de tungsteno en los dados grandes y de diamante industrial en los pequeños. Debe ser hecha de un material extremadamente duro puesto que es la parte en donde se lleva a cabo la reducción. La boquilla tiene un agujero en su centro el cual tiene un perfil definido.

El perfil en sí mismo consiste de cuatro partes: la campana (a), el cono (b), el cojinete (c) y la salida (d). La campana está formada de tal manera que el alambre que viaje en el dado Jalará lubricante con él. La forma de la campana ocasiona que la presión hidrostática aumente y permita el flujo del lubricante en el dado. El cono de acercamiento tiene un ángulo definido con la línea de centro y es la porción donde el metal choca contra la superficie, como se muestra arriba. El metal se reduce en diámetro y es jalado a lo largo del acercamiento hacia la salida. La parte (c) es el cojinete del dado y constituye el mecanismo de reducción. Como el perfil del dado se desgasta gradualmente conforme el alambre es estirado, la duración del dado se aumenta alargando la longitud del cojinete. Mientras mayor sea la longitud del cojinete mayor será la carga por fricción en el alambre que está siendo estirado, y si se hace demasiado grande, puede ocurrir la ruptura del alambre, ya que se requiere una carga de estirado demasiada alta. En la práctica, el óptimo usado es aquel en que la longitud del cojinete es dos tercios del diámetro o barreno. A la parte (d) se le llama salida, y permite que el metal resorte o se expanda conforme el alambre sale del dado. Si el perfil de la salida no es correcto, puede presentarse erosión en el alambre en este punto.

El ángulo del dado es un parámetro importante en el estirado de alambre. Este es el ángulo que el acercamiento forma con la línea de centro del dado. El ángulo del dado controla en alto grado la carga de estirado (es decir, la carga que debe aplicarse al alambre que va sumergiendo del dado para jalar el restante a través del dado).

Para cada metal existe una carga de estirado para una reducción dada. Lo anterior puede deducirse cualitativamente como sigue: en cualquier proceso de deformación, la carga total está formada de tres componentes -la requerida para deformar el metal ideal u homogéneamente. Esto está dado por $L = \sigma_0 A \ln r$, donde σ_0 es el esfuerzo de cedencia, A la sección transversal apropiada del metal en que la carga es aplicada y r la reducción lograda. Esta carga ideal es independiente del método de trabajo y cuando es aplicada al estirado de alambre es independiente de él. El segundo componente de la carga de deformación es aquel elemento requerido para vencer la fricción externa. Esto, en su caso, depende de una combinación de la presión entre el metal que está siendo deformado y la herramienta; el coeficiente de fricción entre metal y herramienta, y el área de la superficie de contacto entre el metal y la herramienta. En el estirado de alambre el área de contacto disminuye conforme el ángulo del dado es aumentado.

Con el ángulo de dado grande α_1 , el área de contacto es una corona circular basada en ab [Fig. 45 (a)], mientras que con un ángulo de dado pequeño α , aún para la misma reducción, el área de contacto es aumentada al tronco de cono del lado cd [Fig. 45(b)]. El tercer elemento es la carga para vencer el trabajo redundante. En el estirado de alambre la carga por trabajo redundante se aumenta con el ángulo del dado, como se muestra abajo. El trabajo redundante es el trabajo extra o desperdiciado que debe efectuarse para doblar las fibras de metal, primero en un sentido y después regresarlas a la dirección original del flujo.

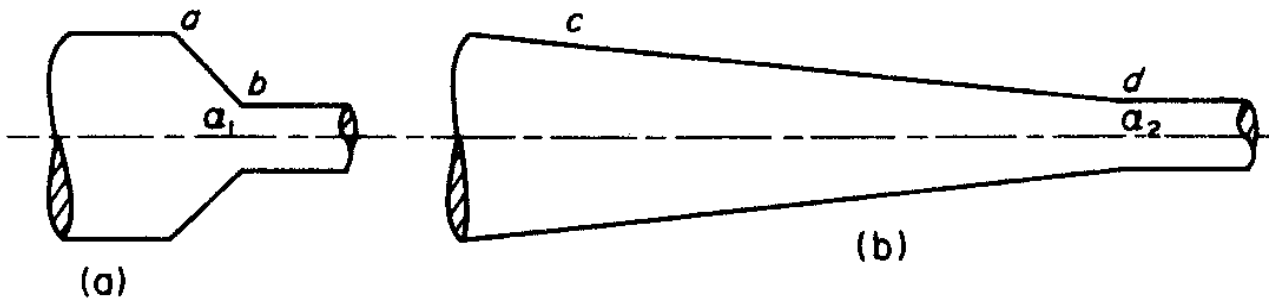


Figura 45

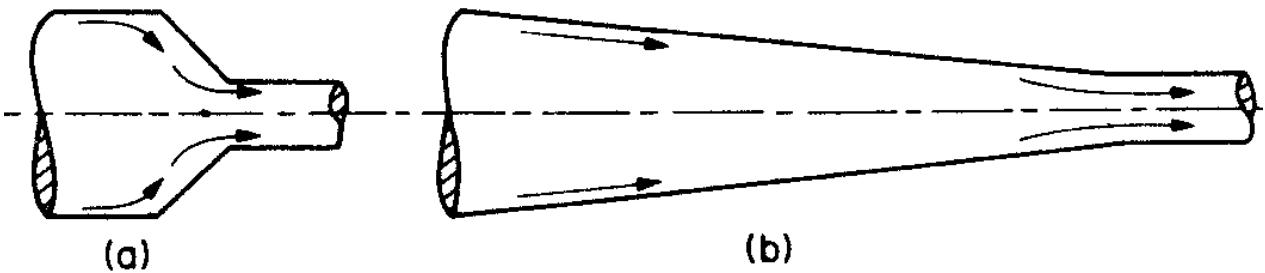


Figura 46

Es obvio que se requiere más energía para lograr esto en el caso de un ángulo de dado grande [Fig. 46 (a)] que en el caso de un ángulo de dado pequeño [Fig. 46 (b)]. La carga total de estirado, como formada por estos tres componentes, aparece en la Fig. 47 cuando se considera relacionada con ángulos de dados variables:

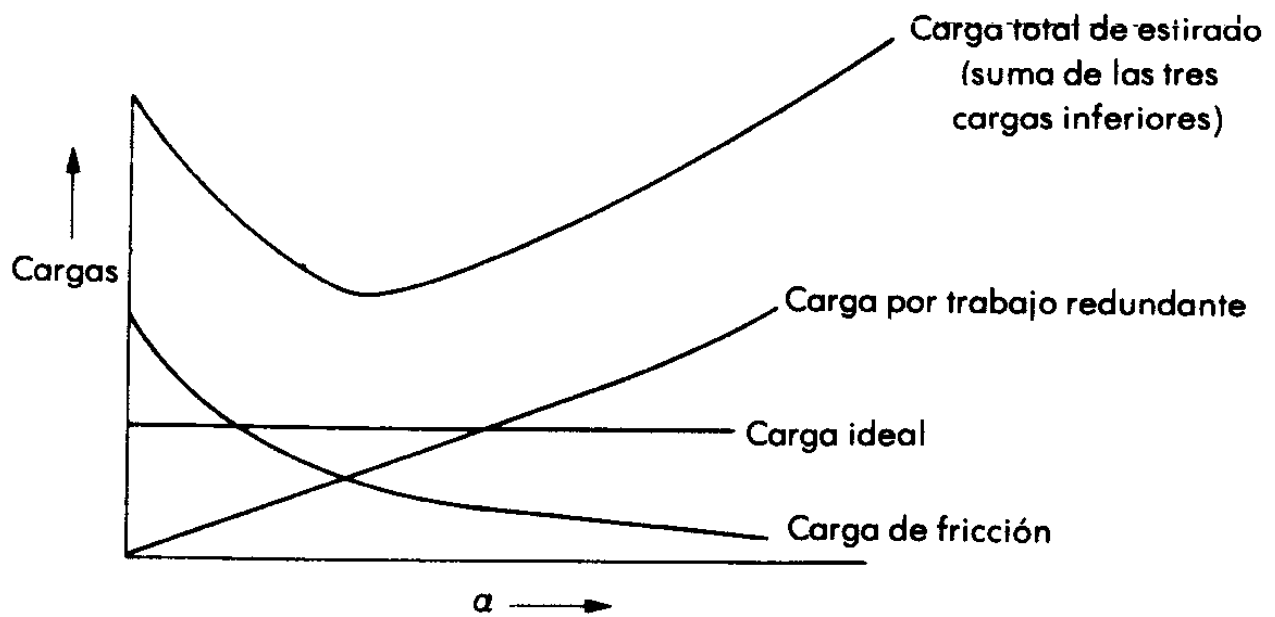


Figura 47

Se ha encontrado en la práctica que entre más duro sea el metal, será más pequeño el ángulo mínimo de carga:

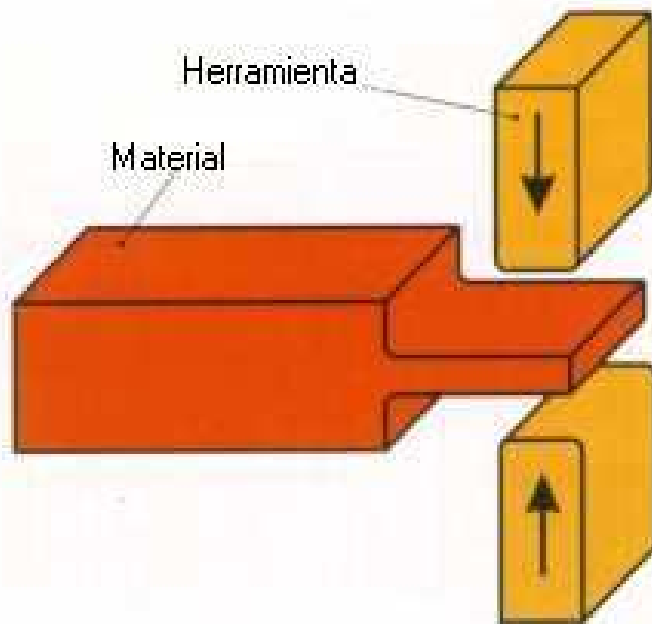
Metal	Angulo óptimo
Aluminio	24°
Cobre	12°
Acero	6°

El proceso industrial de fabricación de alambre puede involucrar muy altas velocidades de estirado. El alambre en una máquina típica de 15 dados, es la que el diámetro es reducido de 510 mm. (0.020 plg.) a 200 mm. (0.0076 plg.) tendrá una velocidad de 70 m/s (12 000 pies por min.). A tales velocidades la mayoría de la energía de deformación aparece como un aumento de temperatura y para lograr su disipación los dados y bloques son totalmente sumergidos en un baño de lubricante en circulación, el cual también actúa como refrigerante.

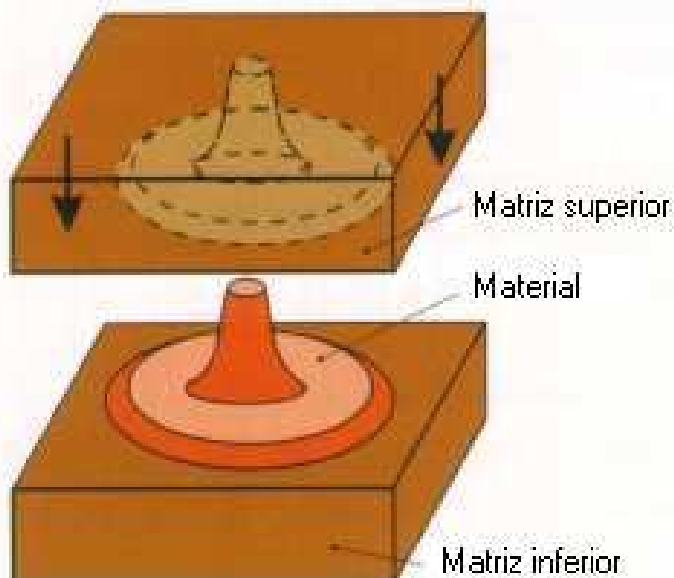
PROCESOS CON DEFORMACION PLASTICA – ILUSTRACIONES

CONFORMADO DE MATERIAL MASIVO

FORJA

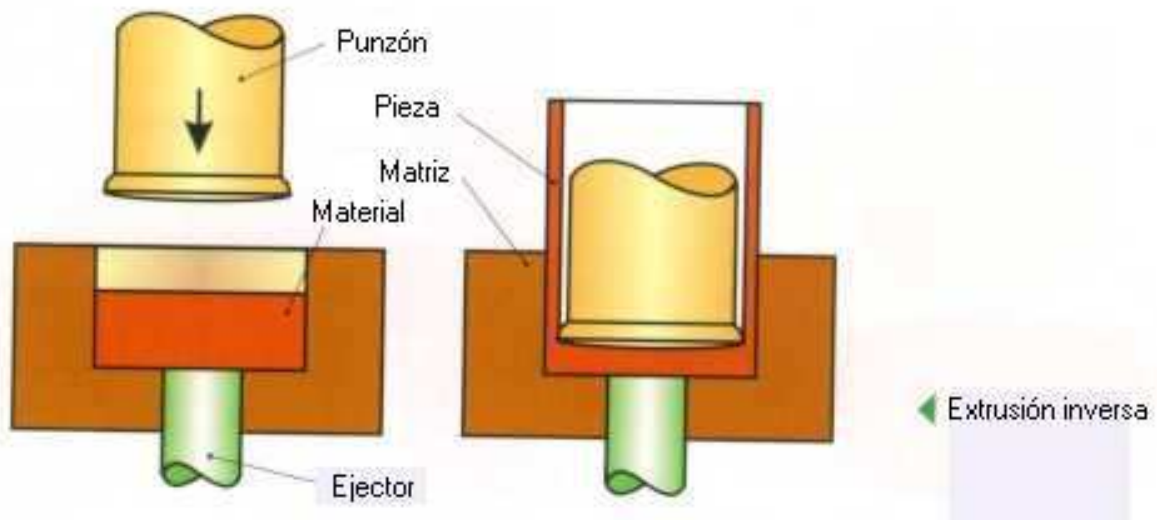
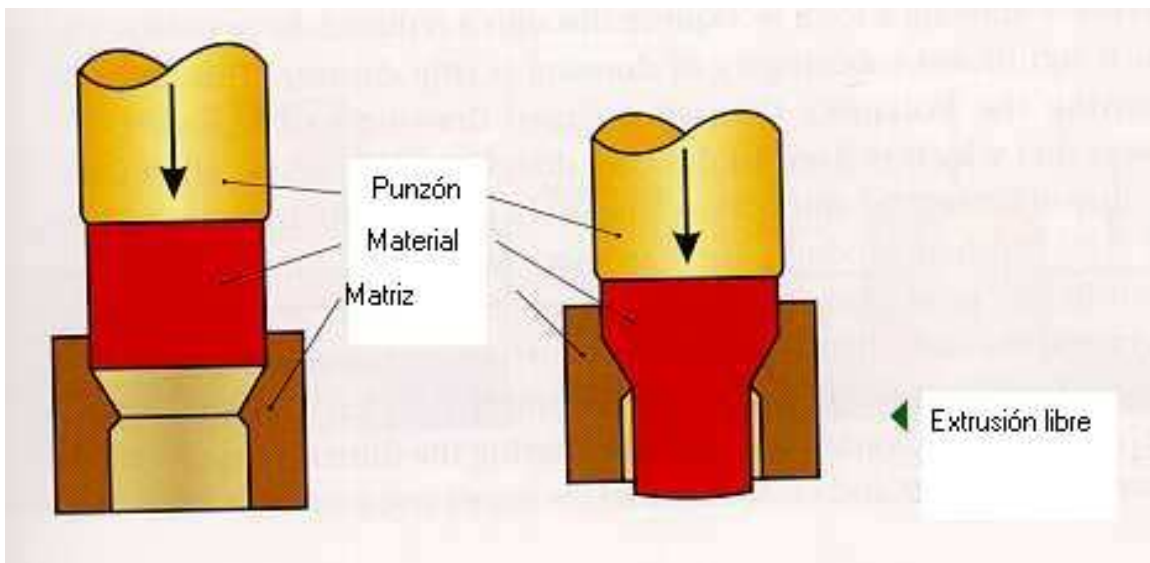


◀ Forja con matriz abierta

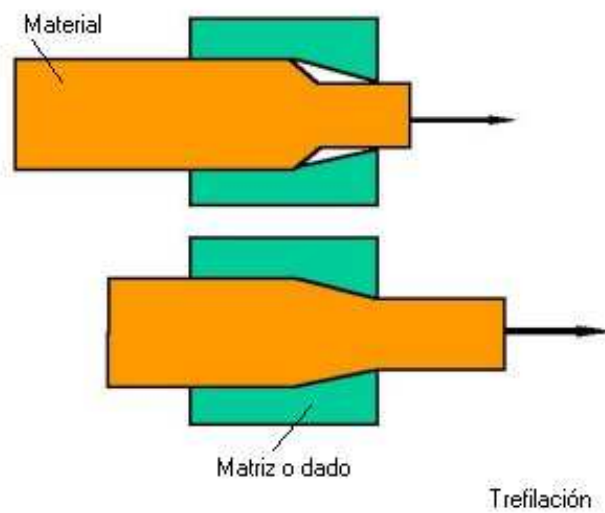


◀ Forja con matriz cerrada

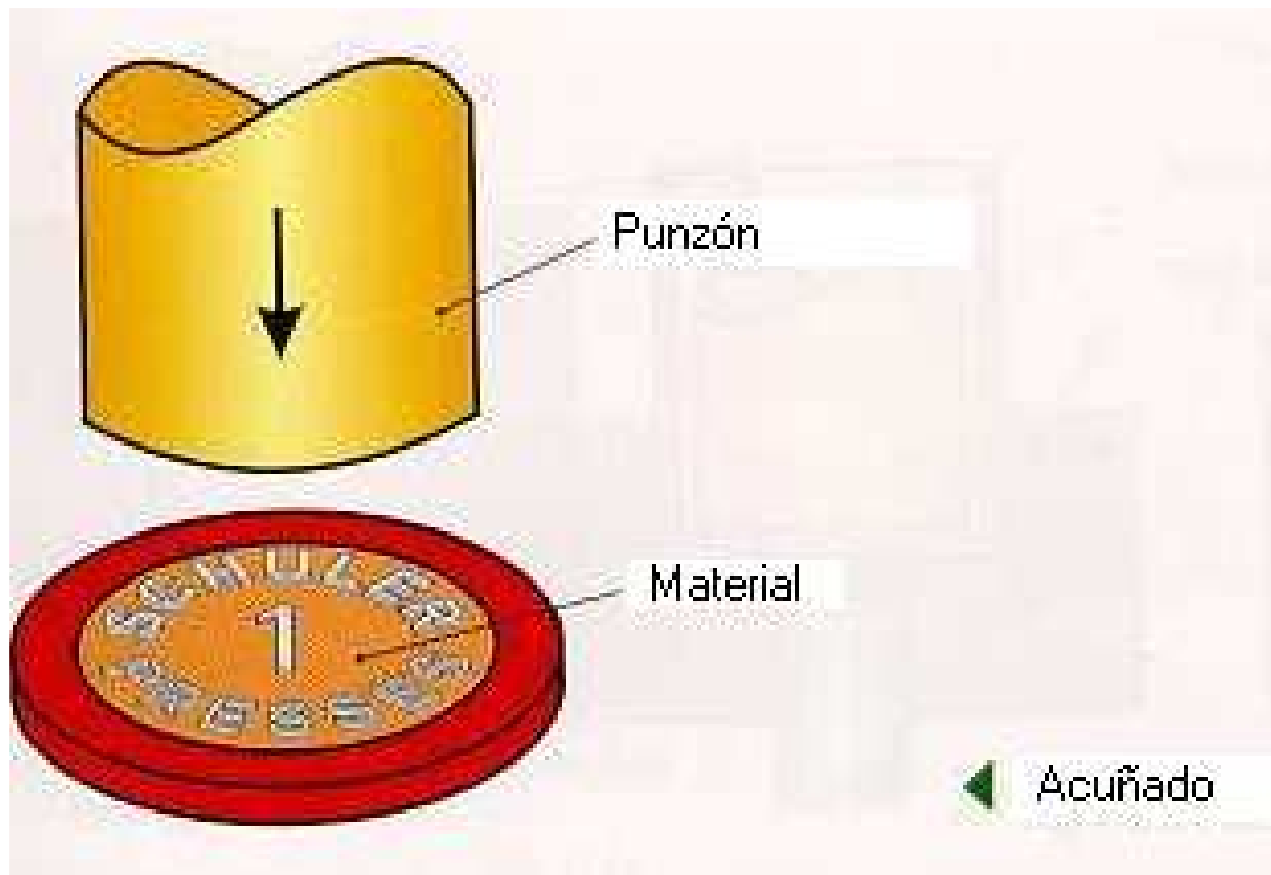
EXTRUSION



TREFILACION



ACUÑADO



CONFORMADO DE CHAPAS – CORTE O TROQUELADO

FIG. 4-1
DIRECCION DE LOS ESFUERZOS EN EL CORTE DE PIEZAS

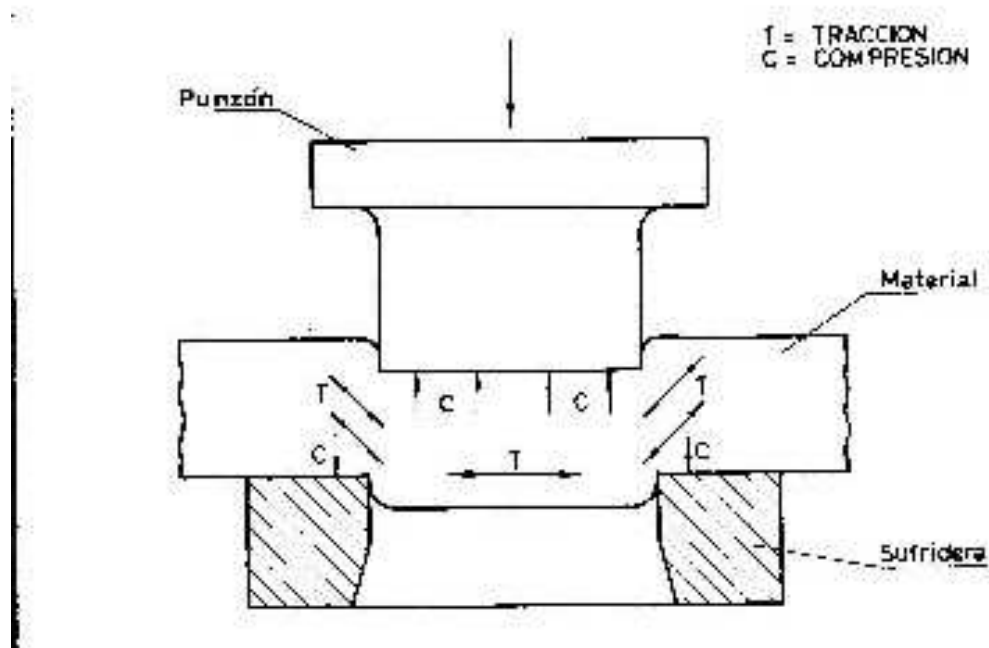
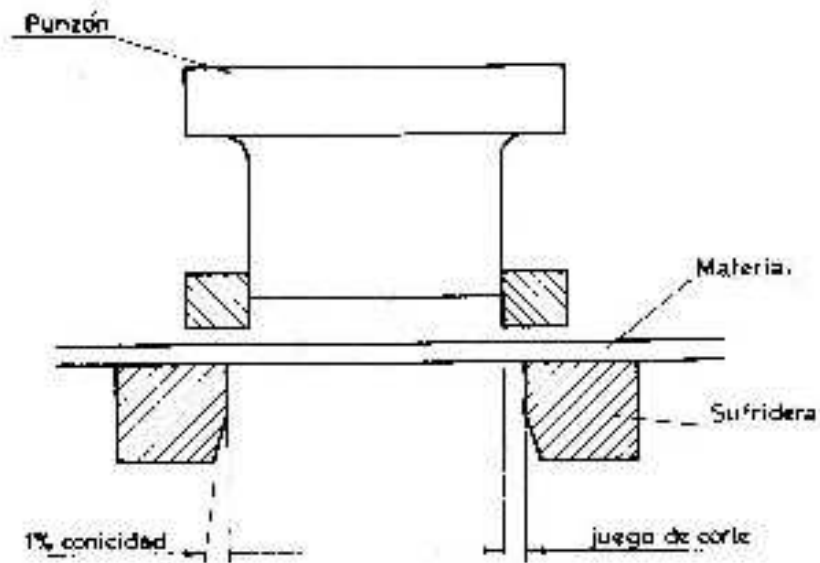
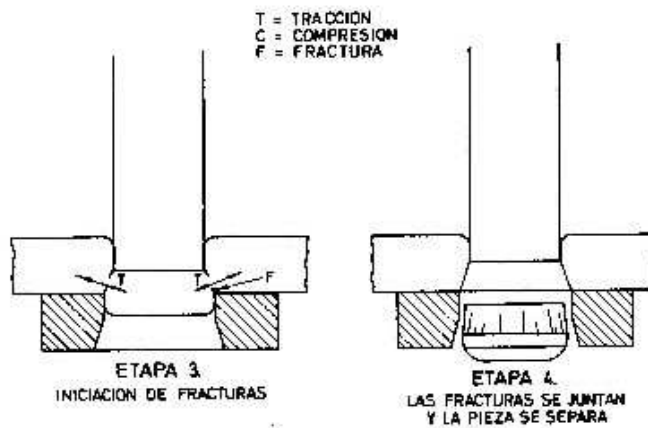
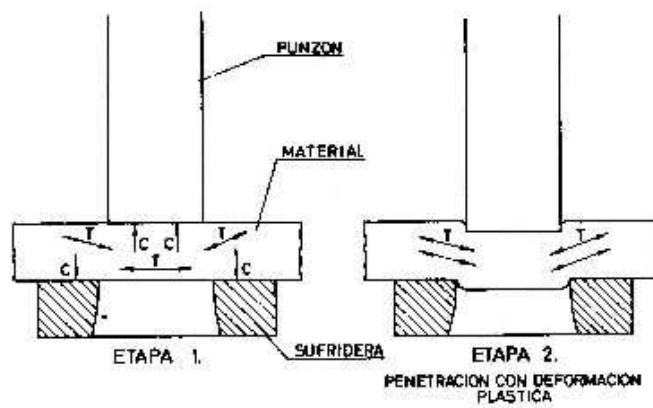


FIG. 4-2
PARTES ACTIVAS (ESENCIALES) DE UNA MATRIZ DE CORTE



7 6

FIG. 4-3
ETAPAS EN EL CORTE CON MATRICES



7 6

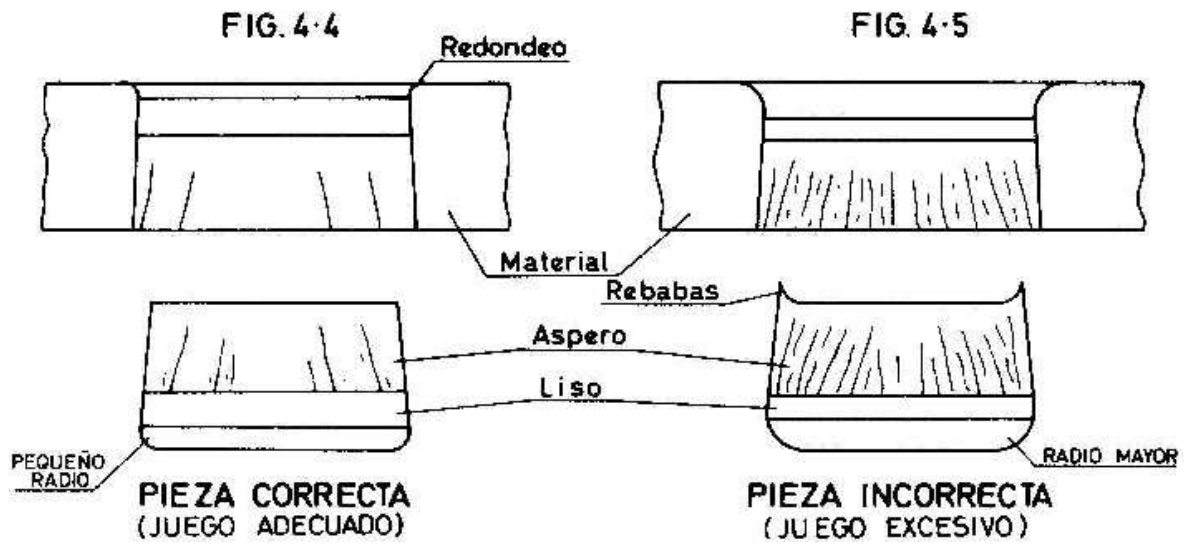


FIG. 4-6
ACCION DE CORTE CON JUEGO DEMASIADO PEQUEÑO

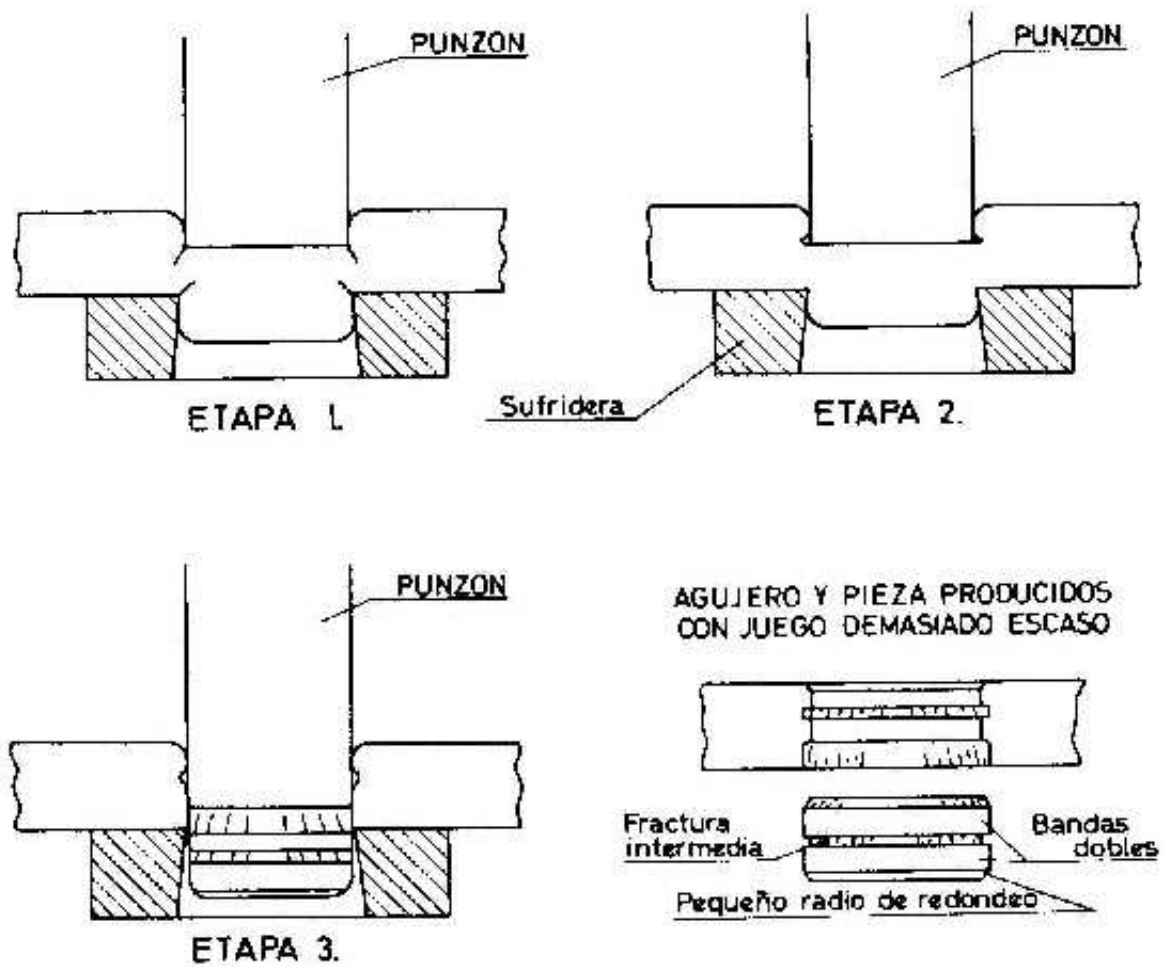


FIG. 4-7

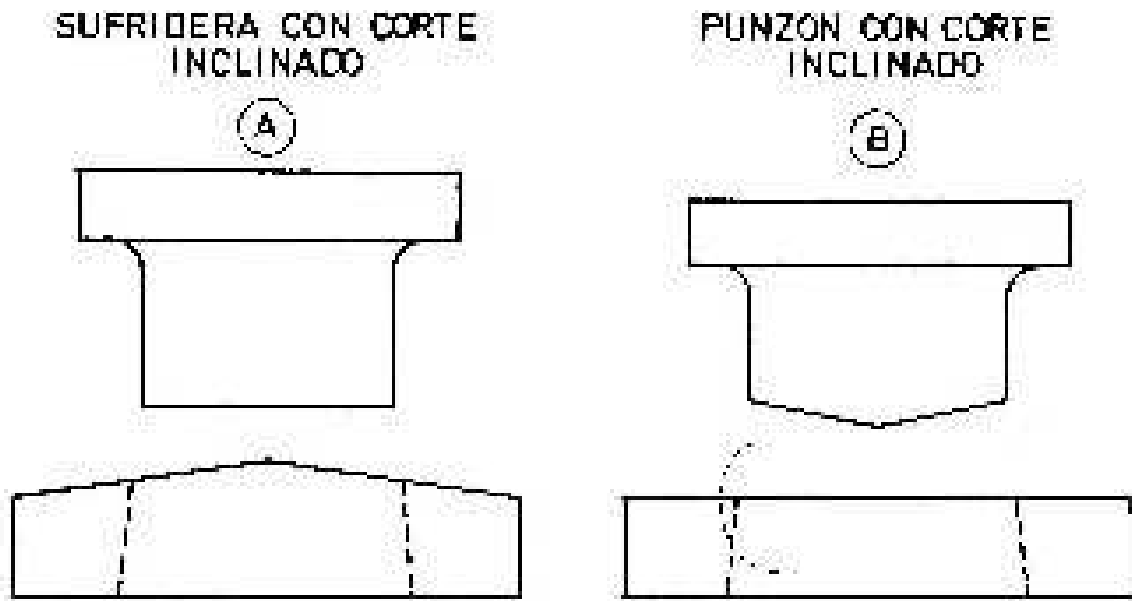
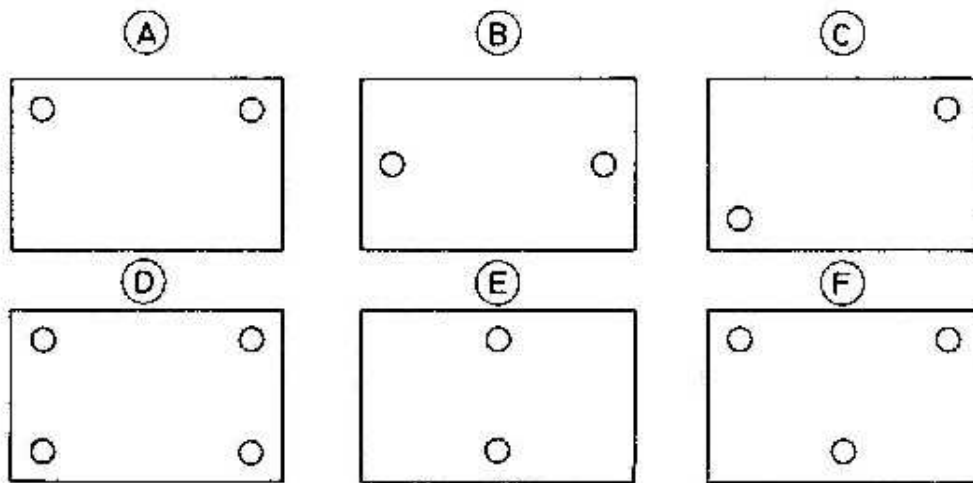
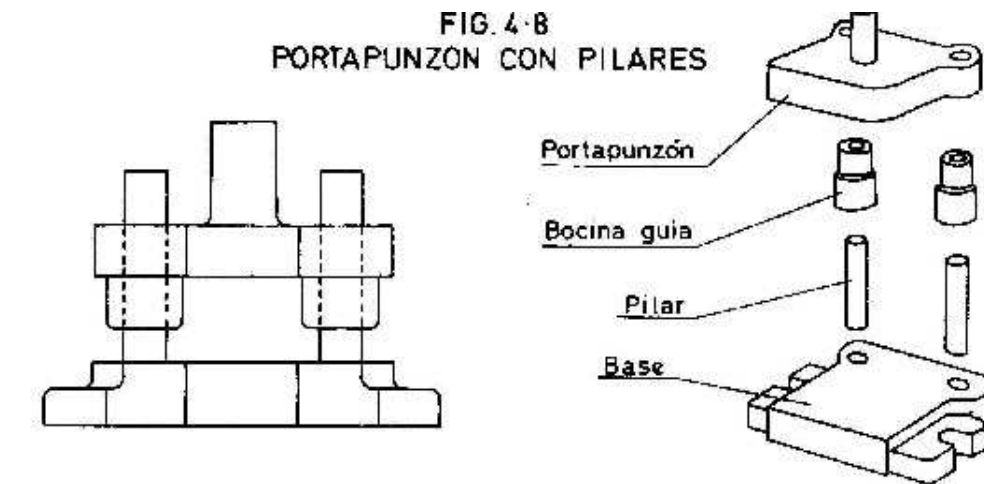


FIG. 4-8
PORTAPUNZÓN CON PILARES



POSICIONES - A B C D = NORMALES
 POSICIONES - E F = ESPECIALES

FIG. 4-9
MATRIZ PARA CORTE DE PIEZAS - BOTADOR FIJO
DE ACCION DIRECTA

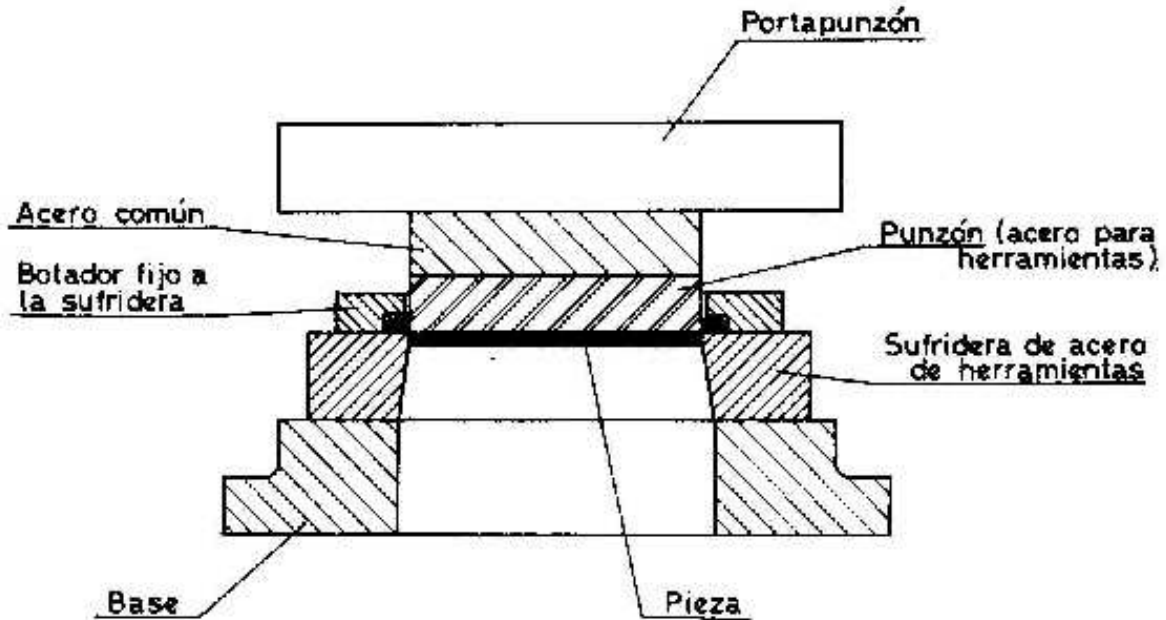


FIG. 4-10
MATRIZ PARA CORTE DE PIEZAS CON BOTADOR MOVIL
ACCIONADO CON RESORTES

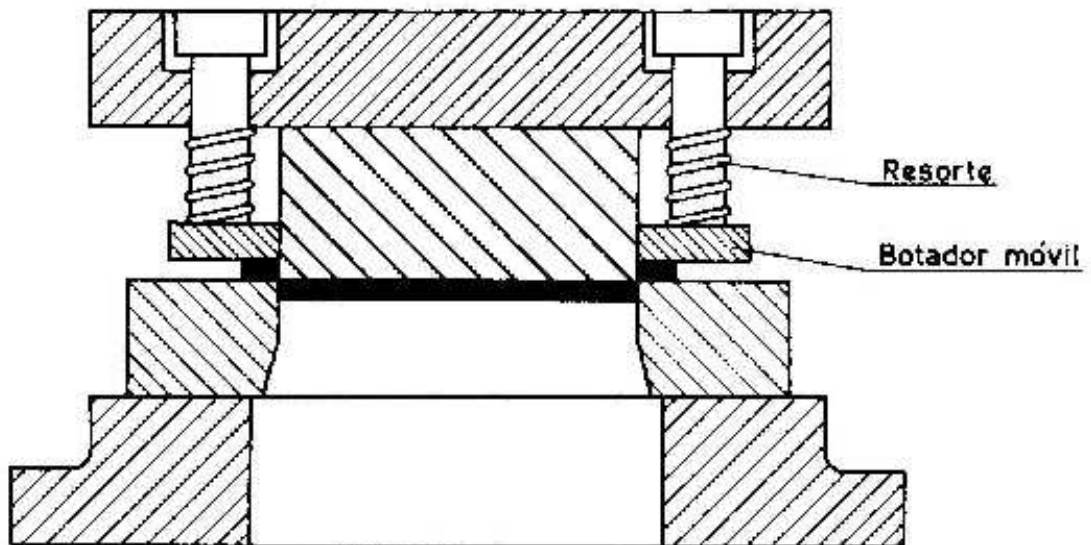


FIG. 4-11
MATRIZ COMPOUND SIMPLE

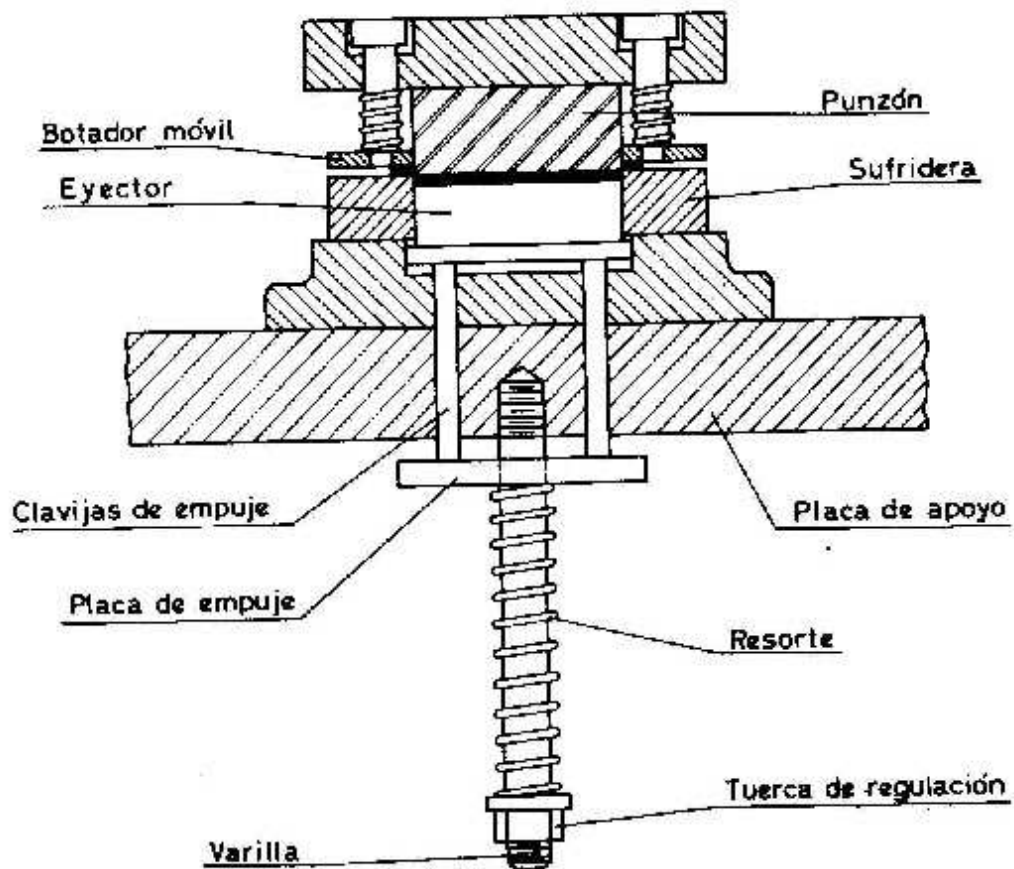


FIG. 4-12
MATRIZ DE CORTE DE PIEZAS INVERTIDA CON BOTADOR MOVIL
Y EYECCION DE ACCION DIRECTA

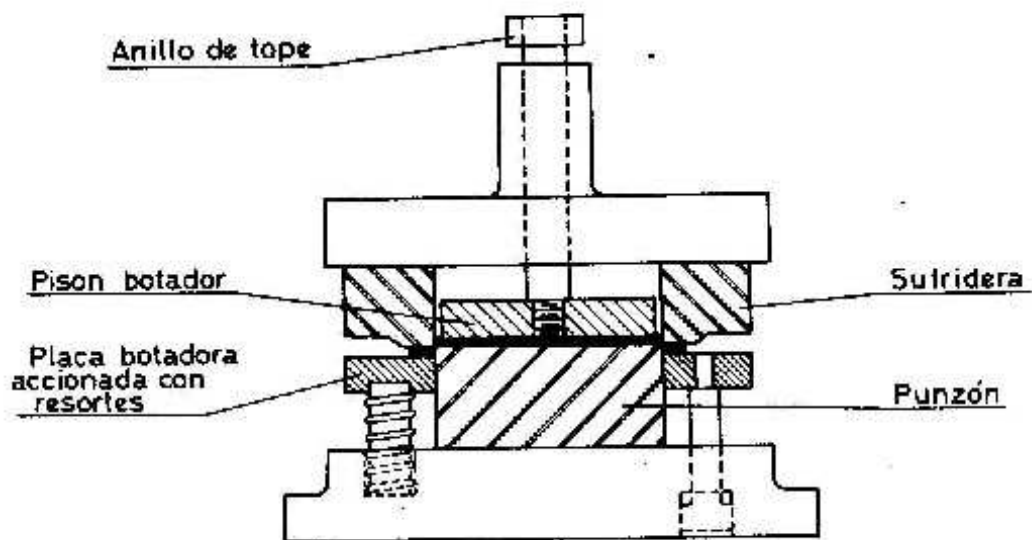


FIG. 4-13
 MATRIZ COMPOUND INVERTIDA CON BOTADOR MOVIL
 Y PISON BOTADOR EN LA SUFRIDERA

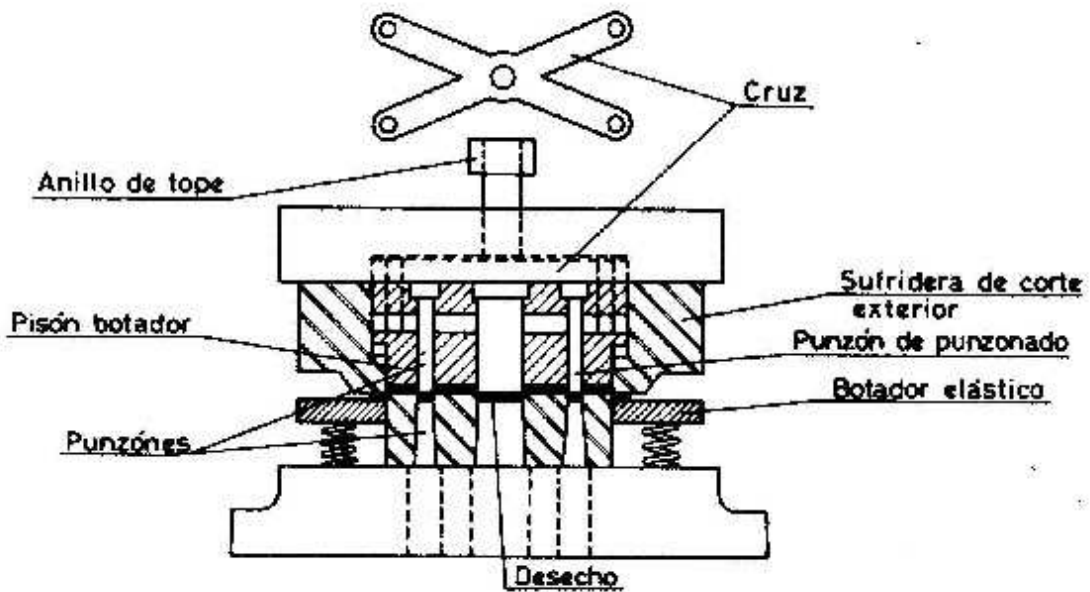


FIG. 4-14
 PUNZONES AGUDOS

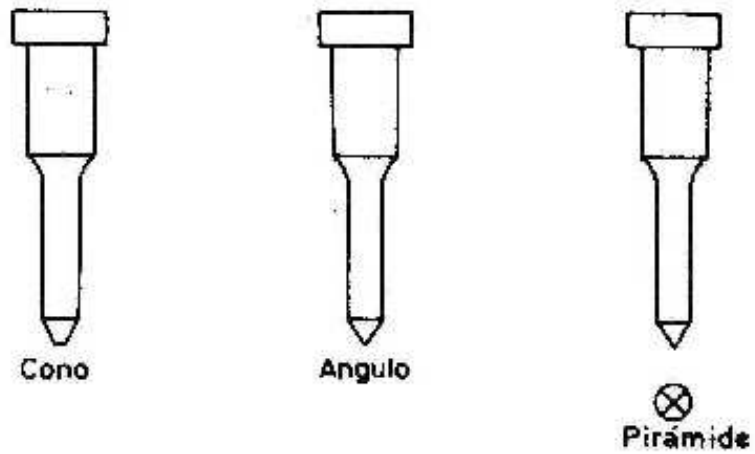
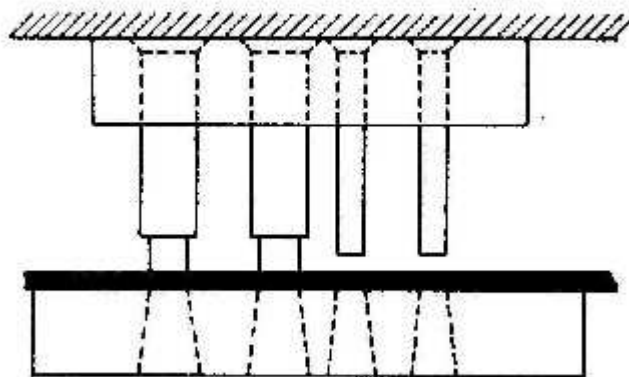


FIG. 4-15
 PUNZONES ESCALONADOS



EMBUTIDO

1) EMBUTIDO DE UNA ETAPA:

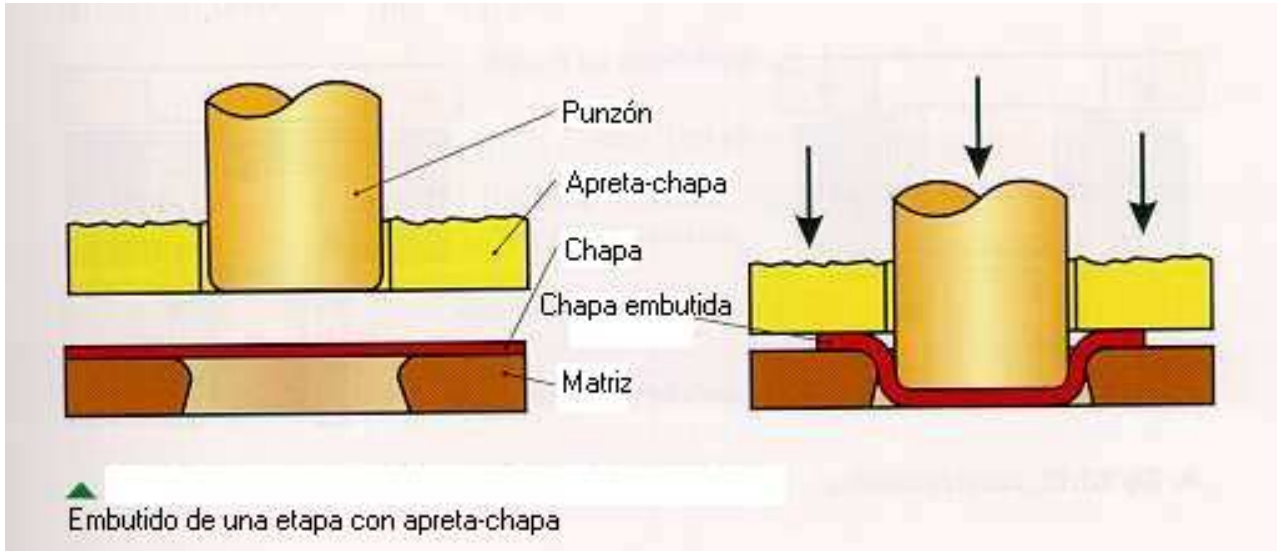
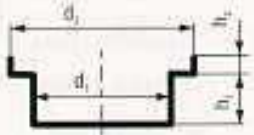
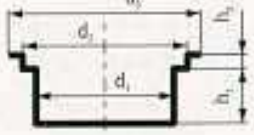
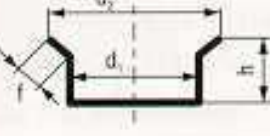
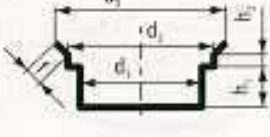

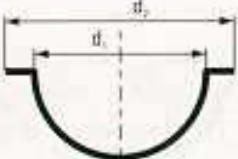
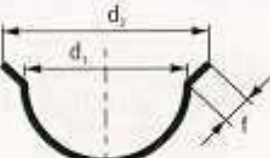



TABLA DE DIMENSIONES DE DISCO INICIAL PARA EMBUTIDO AXISIMETRICO

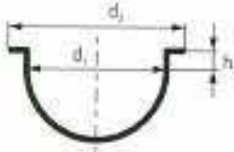
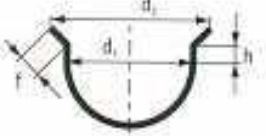
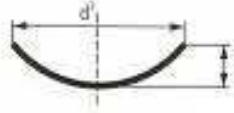
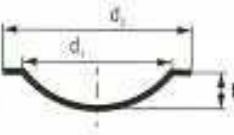
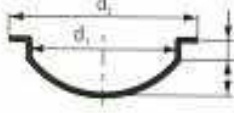
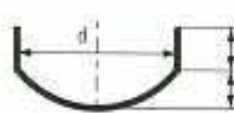
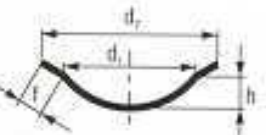
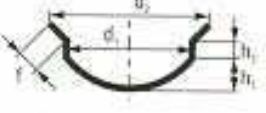
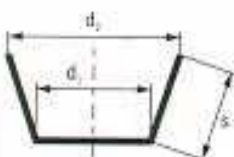
Table 4.2.1: Formulas for the circular blank diameter D

Container shape (cross-section) rotationally symmetrical shapes	Blank diameter $D =$
1	$\sqrt{d^2 + 4 \cdot d \cdot h} *$
2	$\sqrt{d_2^2 + 4 \cdot d_1 \cdot h} *$

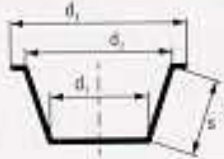
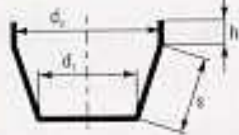
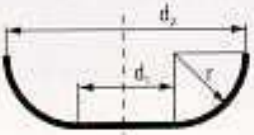
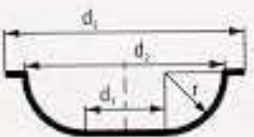
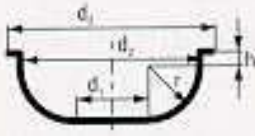
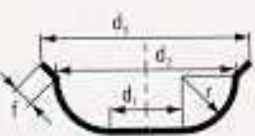


* Containers with small (bottom) radii $r < 10$ mm

Container shape (cross-section) rotationally symmetrical shapes	Blank diameter D =
3 	$\sqrt{d_2^2 + 4 \cdot (d_1 \cdot h_1 + d_2 \cdot h_2)} \quad *$
4 	$\sqrt{d_3^2 + 4 \cdot (d_1 \cdot h_1 + d_2 \cdot h_2)} \quad *$
5 	$\sqrt{d_1^2 + 4 \cdot d_1 \cdot h + 2 \cdot f \cdot (d_1 + d_2)} \quad *$
6 	$\sqrt{d_2^2 + 4 \cdot (d_1 \cdot h_1 + d_2 \cdot h_2) + 2 \cdot f \cdot (d_2 + d_3)} \quad *$
7 	$\sqrt{2 \cdot d^2} = 1.414 \cdot d$
8 	$\sqrt{d_1^2 + d_2^2}$
9 	$1.414 \cdot \sqrt{d_1^2 + f \cdot (d_1 + d_2)}$
10 	$1.414 \cdot \sqrt{d^2 + 2 \cdot d \cdot h}$

* Containers with small (bottom) radii $r < 10 \text{ mm}$

Container shape (cross-section) rotationally symmetrical shapes	Blank diameter D =
11. 	$\sqrt{d_1^2 + d_2^2 + 4 \cdot d_1 \cdot h}$
12. 	$1.414 \cdot \sqrt{d_1^2 + 2 \cdot d_1 \cdot h + f \cdot (d_1 + d_2)}$
13. 	$\sqrt{d^2 + 4 \cdot h^2}$
14. 	$\sqrt{d_2^2 + 4 \cdot h^2}$
15. 	$\sqrt{d_2^2 + 4 \cdot (h_1^2 + d_1 \cdot h_2)}$
16. 	$\sqrt{d^2 + 4 \cdot (h_1^2 + d \cdot h_2)}$
17. 	$\sqrt{d_1^2 + 4 \cdot h^2 + 2 \cdot f \cdot (d_1 + d_2)}$
18. 	$\sqrt{d_1^2 + 4 \cdot [h_1^2 + d_1 \cdot h_2 + 0.5 \cdot f \cdot (d_1 + d_2)]}$
19. 	$\sqrt{d_1^2 + 2 \cdot s \cdot (d_1 + d_2)}^*$

*: Containers with small (bottom) radii $r < 10$ mm

Container shape (cross-section) rotationally symmetrical shapes	Blank diameter D =
20 	$\sqrt{d_1^2 + 2 \cdot s \cdot (d_1 + d_2) + d_2^2} \quad *$
21 	$\sqrt{d_1^2 + 2 \cdot [s \cdot (d_1 + d_2) + 2 \cdot d_2 \cdot h]} \quad *$
22 	$\sqrt{d_1^2 + 6.28 \cdot r \cdot d_1 + 8 \cdot r^2} \quad \text{or}$ $\sqrt{d_2^2 + 2.28 \cdot r \cdot d_2 - 0.56 \cdot r^2}$
23 	$\sqrt{d_1^2 + 6.28 \cdot r \cdot d_1 + 8 \cdot r^2 + d_2^2 - d_2^2} \quad \text{or}$ $\sqrt{d_2^2 + 2.28 \cdot r \cdot d_2 - 0.56 \cdot r^2}$
24 	$\sqrt{d_1^2 + 6.28 \cdot r \cdot d_1 + 8 \cdot r^2 + 4 \cdot d_2 \cdot h + d_2^2 - d_2^2} \quad \text{or}$ $\sqrt{d_2^2 + 4 \cdot d_2 \cdot (0.57 \cdot r + h) - 0.56 \cdot r^2}$
25 	$\sqrt{d_1^2 + 6.28 \cdot r \cdot d_1 + 8 \cdot r^2 + 2 \cdot f \cdot (d_2 + d_3)} \quad \text{or}$ $\sqrt{d_2^2 + 2.28 \cdot r \cdot d_2 + 2 \cdot f \cdot (d_2 + d_3) - 0.56 \cdot r^2}$
26 	$\sqrt{d_1^2 + 6.28 \cdot r \cdot d_1 + 8 \cdot r^2 + 4 \cdot d_2 \cdot h + 2 \cdot f \cdot (d_2 + d_3)} \quad \text{or}$ $\sqrt{d_2^2 + 4 \cdot d_2 \cdot (0.57 \cdot r + h + 0.5 \cdot f) + 2 \cdot d_3 \cdot f - 0.56 \cdot r^2}$
27 	$\sqrt{d_1^2 + 4 \cdot (1.57 \cdot r \cdot d_1 + 2 \cdot r^2 + d_2 \cdot h)} \quad \text{or}$ $\sqrt{d_2^2 + 4 \cdot d_2 \cdot (0.57 \cdot r + h) - 0.56 \cdot r^2}$

* Containers with small (bottom) radii $r < 10 \text{ mm}$

DETERMINACION DE LA FUERZA NECESARIA Y NÚMERO DE ETAPAS DE EMBUTIDO PARA UNA COPA CILINDRICA

Fuerza de embutido para etapa i en el proceso de una copa cilíndrica:

$$F_i = \pi d_i t \sigma_r n_i$$

d_i : diámetro final del paso i

t: espesor del material

σ_r : esfuerzo de ruptura del material

n_i : coeficiente según m_i (tabla 1) de acuerdo a tabla 2

$$m_1 = \frac{d_1}{D} \text{ con } D = \text{diámetro disco inicial y } d_1 = \text{diámetro final copa primer paso}$$

$$m_i = \frac{d_i}{d_{i-1}} \text{ con } d_i = \text{diámetro copa paso actual y } d_{i-1} = \text{diámetro copa paso anterior}$$

TABLA 1

t/D*100	2-1,5	1,5-1	1-0,6	0,6-0,3	0,3-0,15	0,15-0,08
m_1	0,48-0,5	0,5-0,53	0,53-0,55	0,55-0,58	0,58-0,60	0,60-0,63
m_2	0,73-0,75	0,75-0,76	0,76-0,78	0,78-0,79	0,79-0,80	0,80-0,82
m_3	0,76-0,78	0,78-0,79	0,74-0,80	0,80-0,81	0,81-0,82	0,82-0,84
m_4	0,78-0,80	0,80-0,81	0,81-0,82	0,82-0,83	0,83-0,85	0,85-0,86
m_5	0,80-0,82	0,82-0,84	0,84-0,85	0,85-0,86	0,86-0,87	0,87-0,88

TABLA 2

m_i	n_1	n_2
0,55	1	
0,57	0,93	
0,6	0,86	
0,62	0,79	
0,65	0,72	
0,67	0,66	
0,7	0,6	1
0,72	0,55	0,95
0,75	0,5	0,9
0,77	0,45	0,85
0,8	0,4	0,8
0,85		0,7
0,9		0,6
0,95		0,5

EJEMPLO: Diámetro de la copa a embutir: 60 mm. Espesor del material: 1,5 mm. Altura de la copa: 100 mm. Esfuerzo de ruptura: 350 N/mm².

Diámetro del disco inicial: $D = \sqrt{d^2 + 4dh} = \sqrt{60^2 + 4 \cdot 60 \cdot 100} = 166,1$ mm.

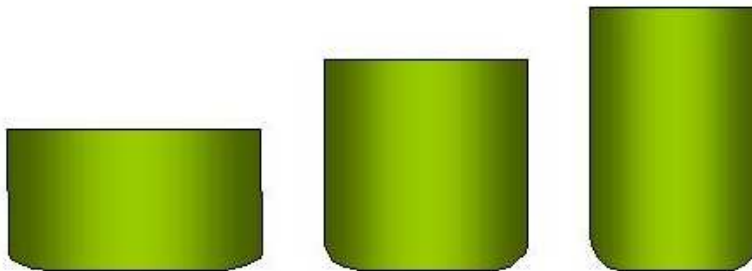
$$\frac{t}{D} \cdot 100 = \frac{1,5}{166,1} \cdot 100 = 0,9$$

De TABLA 1 $m_1 = 0,53 - 0,55 \Rightarrow d_1 = m_1 \cdot D = 0,55 \cdot 166,1 = 91,35$ mm. Se elige 92 mm.

$m_2 = 0,76 - 0,78 \Rightarrow d_2 = m_2 \cdot d_1 = 0,78 \cdot 92 = 71,76$ mm. Se elige 72 mm.

$m_3 = 0,79 - 0,80 \Rightarrow d_3 = m_3 \cdot d_2 = 0,80 \cdot 72 = 57,60$ mm. Debe ser 60 mm.

por lo tanto son necesarias tres etapas



Fuerza de embutido etapa 1: $F_1 = \pi \cdot d_1 \cdot t \cdot \sigma_r \cdot n_1 = \pi \cdot 92 \cdot 1,5 \cdot 350 \cdot 1 = 151739$ N = 151,7 KN

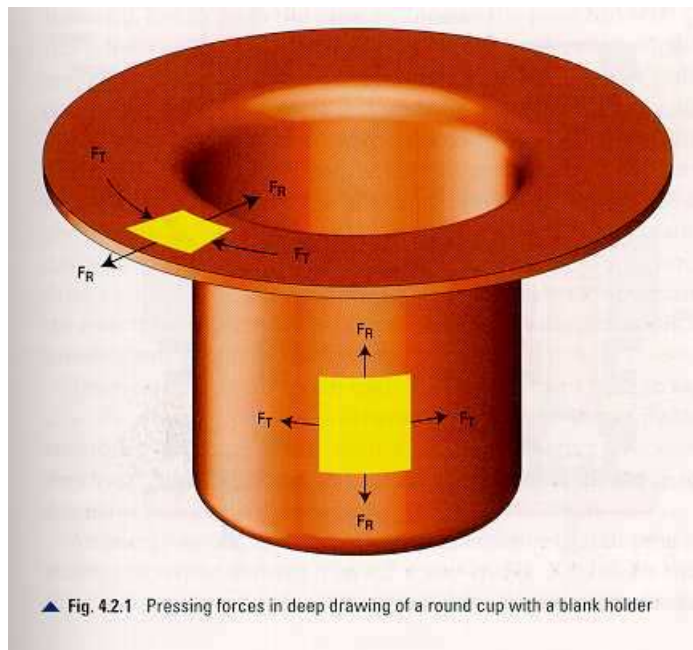
con $n_1 = 1,0$ de TABLA 2 y $m_1 = \frac{d_1}{D} = \frac{92}{166,1} = 0,55$

Fuerza de embutido etapa 2: $F_2 = \pi \cdot d_2 \cdot t \cdot \sigma_r \cdot n_2 = \pi \cdot 72 \cdot 1,5 \cdot 350 \cdot 0,83 = 98564$ N = 98,6 KN

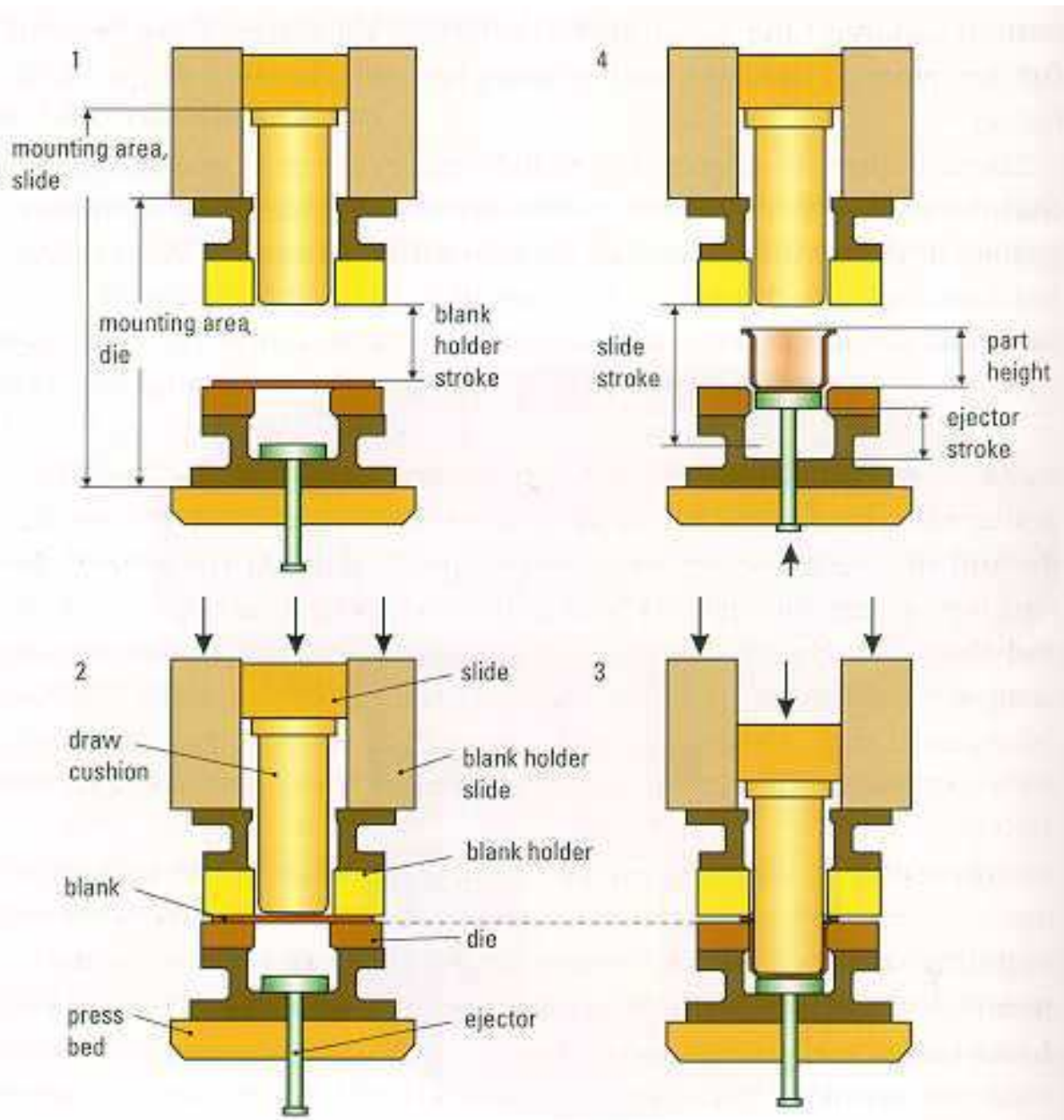
con $n_2 = 0,83$ de TABLA 2 y $m_2 = \frac{d_2}{d_1} = \frac{72}{92} = 0,78$

SIEMPRE LA FUERZA MAXIMA SE PRODUCE EN LA PRIMERA ETAPA!!!

ESFUERZOS EN EL EMBUTIDO DE UNA COPA CILINDRICA

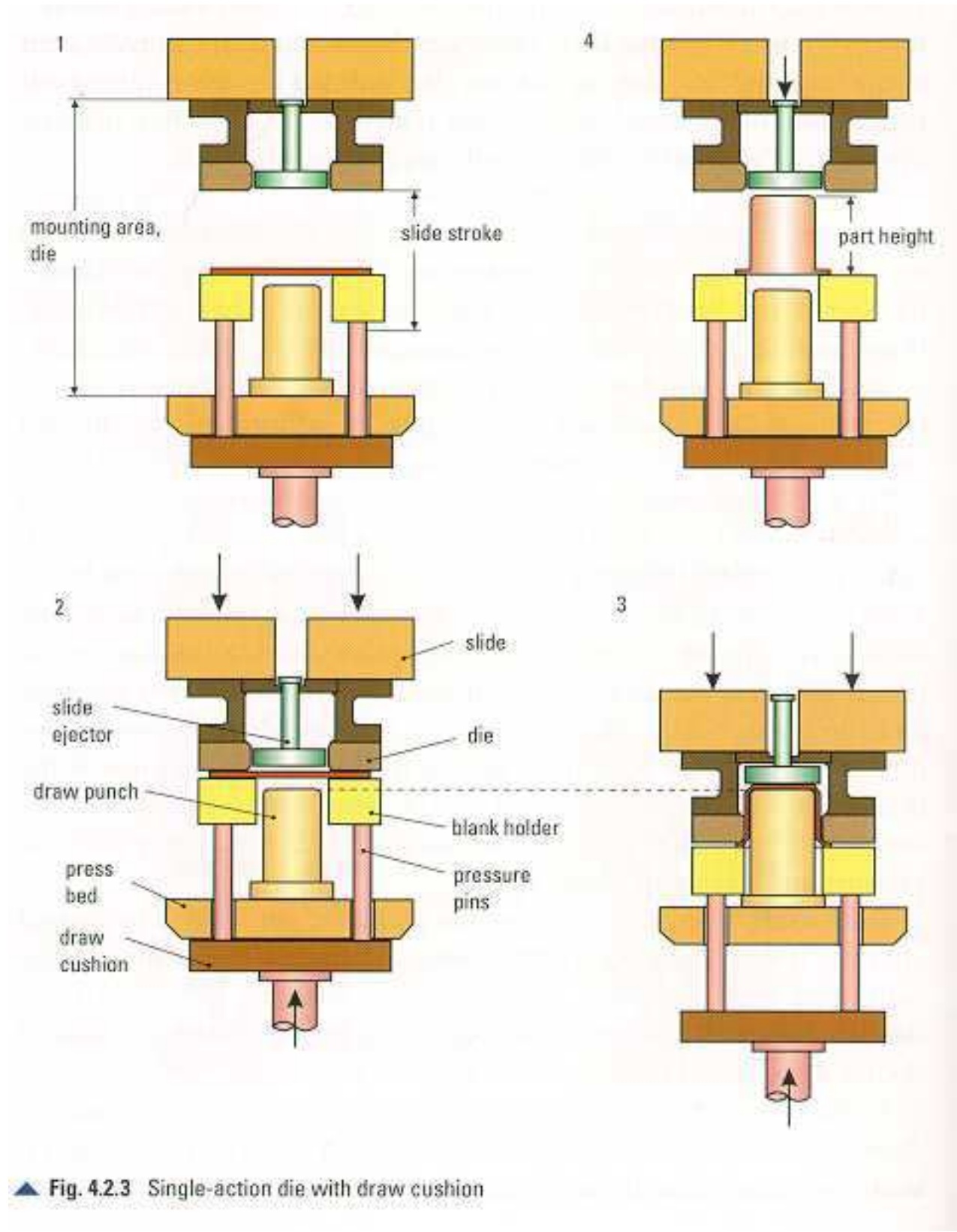


EMBUTIDO CON MATRIZ DE DOBLE ACCION



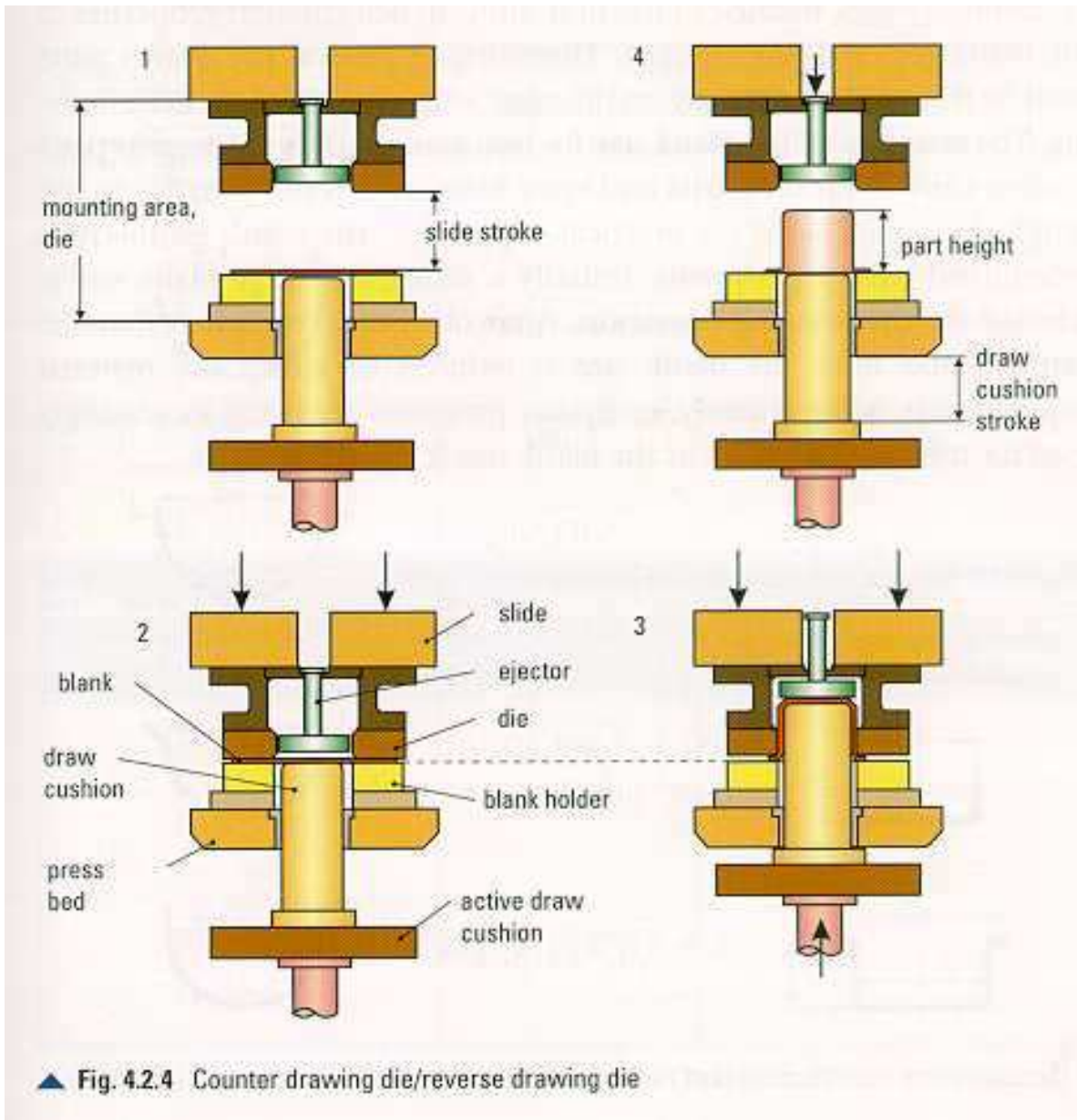
▲ Fig. 4.2.2 A double-action top down drawing die

EMBUTIDO CON MATRIZ DE ACCION SIMPLE



▲ Fig. 4.2.3 Single-action die with draw cushion

EMBUTIDO INVERSO CON MATRIZ DE ACCION SIMPLE Y PUNZON ACTUADOR



2) EMBUTIDO CON PUNZON TELESCOPICO:



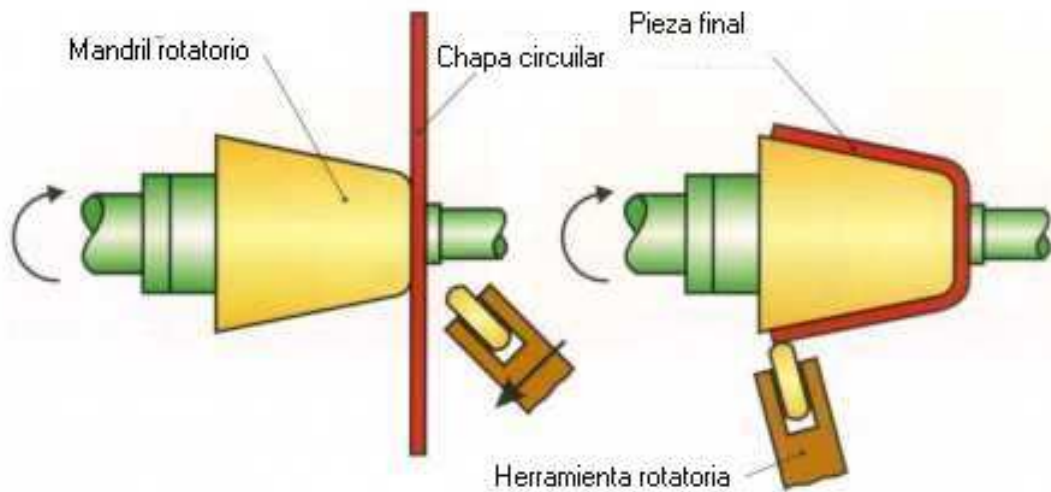
▲ Embutido con punzón telescópico

3) EMBUTIDO INVERSO:



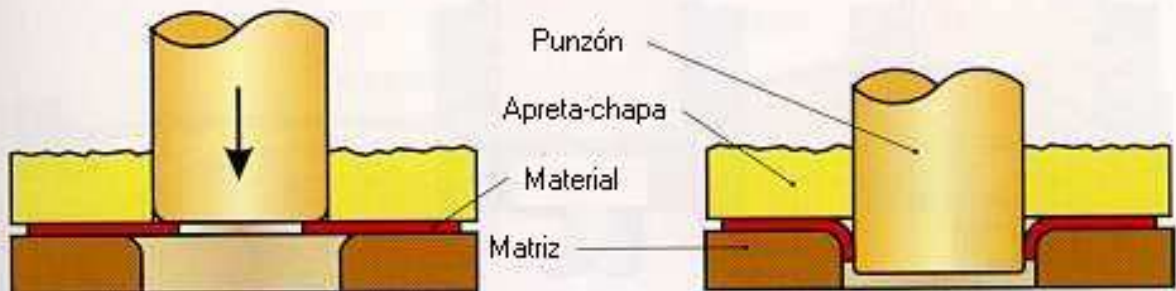
▲ Embutido inverso

REPUJADO



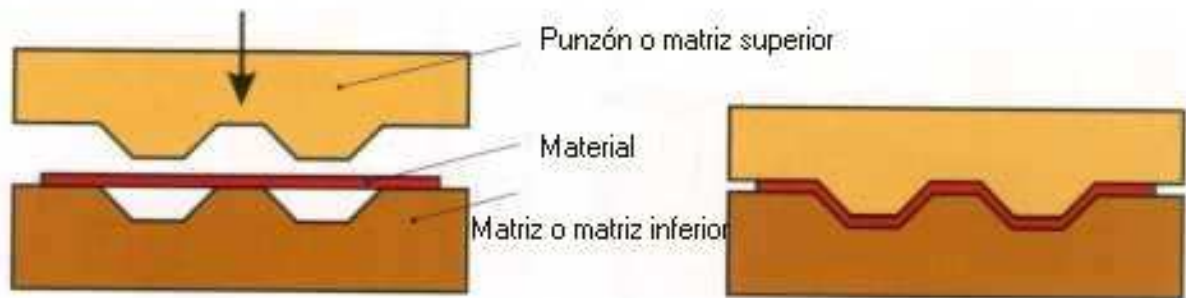
▲ Repujado

FLANCHEADO



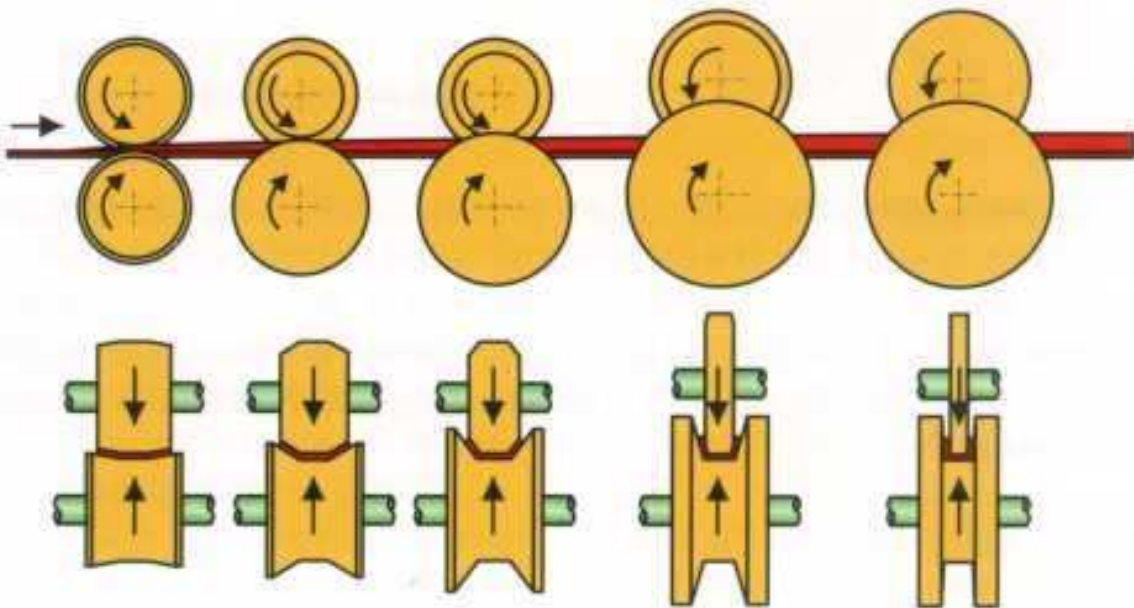
▲ Flancheado con apretachapa en chapa plana

ESTAMPADO



▲ Estampado

ROLL FORMING



▲ Roll-forming