

---

## CAPÍTULO 4: CONFORMADO POR DEFORMACIÓN

### ÍNDICE DEL CAPÍTULO

#### 1. Deformación elastoplástica

- 1.1 Introducción
- 1.2 Conceptos generales
- 1.3 Comportamiento de los materiales

#### 2. Laminación

- 2.1 Obtención de los lingotes
- 2.2 Proceso de laminación
- 2.3 Fabricación de chapas

#### 3. Prensas

- 3.1 Tipos de prensas
- 3.2 Fuerza y trabajo

#### 4. Conformación de chapas

- 4.1 Introducción
- 4.2 Plegado
- 4.3 Embutición profunda
- 4.4 Corte y punzonado de chapas
  
- 4.5 Perfilado

#### 5. Forja y extrusión

- 5.1 Forja
- 5.2 Extrusión

## 1. DEFORMACIÓN ELASTOPLÁSTICA

Cuando un material elastoplástico es deformado mecánicamente hasta superar el límite elástico, adquiere deformaciones plásticas que le confieren un cambio de forma permanente. En los procesos de fabricación los estados tensionales pueden ser uniaxiales, planos o traxiales. Los materiales utilizados para la conformación por deformación plástica, son la mayoría de los metales.

### 1.1 Introducción

#### 1.1.1 Definición

La conformación por deformación se produce por la *modificación permanente de la forma de un sólido* aplicando, mediante herramientas y útiles apropiados, tensiones superiores al límite elástico del material, a temperaturas inferiores a la de fusión.

#### 1.1.2 Trabajo de deformación

##### Trabajo primario

Transforma una materia prima (lingote) en productos semielaborados, tales como chapas, flejes, barras, etc., mediante métodos como la forja o la laminación.

##### Trabajo secundario

Generalmente a partir de las materias primas primarias, permiten obtener materiales más elaborados, como chapa laminada en frío o alambres calibrados (laminado en frío, trefilado o extrusión).

##### Trabajo terciario

Son procesos de transformación final, mediante los cuales las piezas adquieren geometrías que las hacen útiles para diferentes aplicaciones prácticas. Son procesos como la embutición, plegado o estampación).

#### 1.1.2.1 Características de la conformación por deformación plástica

##### Ventajas

- Rapidez de la transformación
- Grandes deformaciones

- Ahorro de material
- Mejoran las propiedades físicas del material

### Limitaciones

- De forma
- Acabado
- Potencias elevadas

## 1.2 Conceptos generales

### 1.2.1 Estructura cristalina

Los metales están constituidos por cristales poliédricos llamados *granos*. Cuando estos granos son sometidos a un esfuerzo capaz de deformarlos (por ejemplo, por *laminación*) se orientan en forma de planos de desplazamiento, llamados *fibras*.

La deformación de un metal se produce por la *reorientación* del grano, con o sin deformaciones permanentes. Según las fuerzas sean de tracción (+), las fibras se alargan, o de compresión (-), se acortan, pudiendo también haber desplazamiento relativo de los planos de deslizamiento entre sí (doblado o curvado).

El trabajo mecánico genera dislocaciones y alteraciones de estas estructuras, que pueden recuperar su estado normal mediante un trabajo mecánico adecuado o tratamientos térmicos.

### 1.2.2 Límite elástico y energía de deformación

#### 1.2.2.1 Tensión y deformación verdaderas

A diferencia de las aplicaciones estructurales de los materiales, en las cuales se suele trabajar en régimen elástico, en la conformación plástica las deformaciones son apreciables. Por lo tanto se necesita trabajar con el concepto de *tensiones y deformaciones verdaderas*, que se determinan en función de la sección inicial  $A_0$  e instantánea  $A$ . En la práctica es más simple conocer las deformaciones midiendo las longitudes:  $l$  (instantánea) y  $l_0$  (inicial).

$$\text{Tensiones verdaderas} \quad \rightarrow \quad \sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

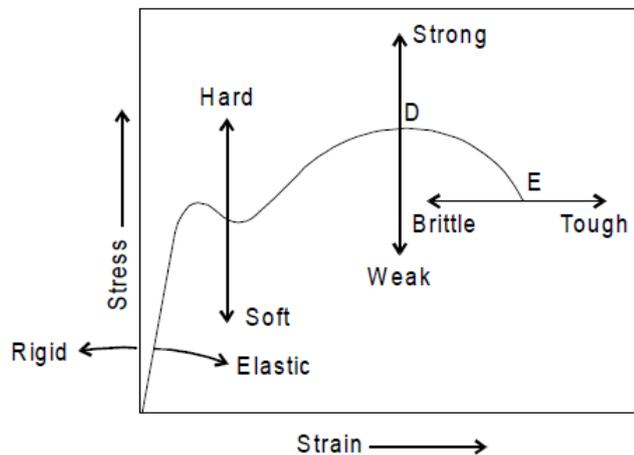
Deformaciones verdaderas  $\rightarrow \epsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln\left(\frac{l}{l_0}\right) = \ln\left(\frac{A_0}{A}\right)$  (2)

**1.2.2.2 Comportamiento bajo carga**

Toda fuerza sobre un sólido provocará una deformación. Esta tendrá una primera zona (O-A) de comportamiento *elástico*, durante la cual se mantiene la proporcionalidad entre fuerzas y deformaciones dada por la Ley de Hooke (fig. 1.):

$$\sigma_e = E \epsilon \quad (3)$$

Una vez superado el punto A deja de cumplirse dicha proporcionalidad y poco después (pto. B) comienzan las deformaciones permanentes que caracteriza el comportamiento *plástico*, hasta la rotura.



*Fig. 1.1. Diagrama tensión- deformación de un metal típico. R. Singh, Introduction to Basic Manufacturing Processes and Workshop Technology, 2006.*

El comportamiento mecánico de cada material depende de la importancia relativa de ambas zonas, según se trate de materiales *maleables* (como los metales) o *frágiles* (como las cerámicas), como se describe en el cuadro siguiente:

MATERIAL	DEFORMACIONES	
	Elásticas	Plásticas
Plástico	Pequeñas o inapreciables	Grandes
Dúctil	Medias	Medias
Frágil	Grandes	Pequeñas o inapreciables

Entonces, las deformaciones permanentes ocurrirán para tensiones tales que:

$$\sigma_Y < \sigma < R$$

La relación entre el *Límite elástico* ( $\sigma_Y$ ) y el *Límite de rotura* ( $R$ ) definirá la capacidad de un material para conservar la forma después de ser sometido a un trabajo de deformación. La plasticidad o *maleabilidad* aumenta con la relación  $R / \sigma_Y$ .

### 1.2.2.3 Trabajo de deformación

Para que una pieza metálica adquiera deformaciones permanentes se ejercerá una fuerza a lo largo de una determinada distancia. Esta fuerza será en general variable con la carrera de trabajo, y producirá un trabajo mecánico  $W$ :

$$W = V \int_0^{\varepsilon_1} \sigma_{mf} d\varepsilon \quad (4)$$

siendo  $\sigma_{mf}$  la tensión media de fluencia,  $V$  el volumen sometido a esa tensión.

La integral es el *trabajo de deformación específico*  $u$  (por unidad de volumen), correspondiente al área debajo de la curva  $\sigma$ - $\varepsilon$  en un ensayo de tracción simple.

Pero este trabajo es teórico. En la realidad se necesita una mayor cantidad de trabajo, por dos causas:

1. Vencer el rozamiento
2. En la ec. 4 la tensión es uniforme, pero el deslizamiento entre planos cristalinos supone una energía adicional o *redundante*.

Se puede definir un rendimiento  $\eta = u_{ideal} / u_{total}$ , que asume valores del orden de 30-60 % para extrusión, 70-90 % para laminación.

Para conocer la energía consumida en realidad, falta tener en cuenta el rendimiento mecánico de la máquina empleada. Así resultará un consumo de energía:

$$W = \frac{W_{total}}{\eta_{mec}} \quad (5)$$

Este trabajo de deformación será disipado en el tiempo  $dt$ , lo que da una potencia:

$$P = \frac{dW}{dt} \quad (6)$$

La mayor parte de este trabajo se disipa en forma de calor, mientras que una pequeña proporción (entre un 5-10 % y hasta el 30 % en ciertas aleaciones) se almacena en forma de energía elástica.

Sin tener en cuenta el rozamiento, este trabajo producirá en un material de densidad  $\rho$  y calor específico  $C$  un aumento de temperatura de:

$$\Delta T = \frac{u_{total}}{\rho C} \quad (7)$$

Si el proceso es adiabático, esta deformación específica significaría un aumento de temperatura del orden siguiente:

Aluminio	→	75 °C	Acero bajo C	→	280 °C
Cobre	→	140 °C	Titanio	→	570 °C

Aunque en los procesos reales estas temperaturas resultan ser menores por las pérdidas de calor, las temperaturas alcanzadas por la deformación plástica debe tenerse en cuenta a la hora de diseñar los procesos.

## 1.3 Comportamiento de los materiales

### 1.3.1 Efectos de la deformación plástica

#### 1.3.1.1 Tensiones residuales

Las tensiones residuales, también conocidas como *remanentes*, son las tensiones presentes en un material elástico, libre de sollicitaciones externas y de cambios o gradientes de temperatura. Distintos procesos de fabricación general tensiones residuales en los materiales: moldeo, mecanizado, deformación plástica, soldadura, etc. Las tensiones residuales pueden provocar distorsiones e incluso el agrietamiento del material. Por otra parte, un exceso de tensiones residuales puede perjudicar al comportamiento en servicio del componente, especialmente reduciendo su resistencia a la fatiga.

El efecto en los metales es un aumento de la capacidad de carga acompañado por una disminución del alargamiento a la rotura. Cuando este efecto es excesivo, puede relajarse mediante un trabajo mecánico adecuado (por ejemplo aplicando vibraciones adecuadas al material) o por tratamientos térmicos (recocido).

#### 1.3.1.2 Relación tensión-deformación en el campo plástico

En el caso de tensión uniaxial (probeta cilíndrica en un ensayo de tracción), la tensión en un material elastoplástico puede representarse según la ley:

$$\sigma = K \varepsilon^n \quad (12)$$

**K**, *coeficiente de resistencia*, valor de la tensión para una deformac. unitaria.

**n**, el factor de endurecimiento por *deformación*.

El valor de  $n$  caracteriza el comportamiento mecánico de un material:

- $n = 1$  Material elástico perfecto.
- $n = 0$  Material rígido, perfectamente plástico.
- $0 < n < 1$  Material elastoplástico en régimen plástico

En la Tabla 1 se presentan los valores a temperatura ambiente de  $K$  y de  $n$  para algunos materiales habituales.

Material	$K$ (MPa)	$n$
Aluminio 1100-O	180	0.20
Bronce fosforoso (recocido)	720	0.46
Cobre (recocido)	315	0.54
Acero 1020 (recocido)	530	0.26
Acero 1045 (laminado caliente)	965	0.14
Ac. Inox. AISI 304 (recocido)	1275	0.45

*Tabla 1. Valores típicos de  $K$  y  $n$  para diversos materiales*

### 1.3.1.3 Velocidad de deformación

En la caracterización del comportamiento en *servicio estático* de materiales se trabaja con bajas velocidades de deformación. Sin embargo, en el conformado se trabaja con velocidades elevadas, especialmente en algunos procesos (forja o laminación). Por ello interesa conocer el comportamiento de un material en función de la *velocidad de deformación*:

$$\dot{\epsilon} = \frac{v}{l_0} \quad (13)$$

siendo  $v$  la velocidad de desplazamiento (por ejemplo del macho de una plegadora).

El efecto de la velocidad de deformación es mayor cuanto más grande sea la deformación, y puede expresarse mediante:

$$\sigma = C \dot{\epsilon}^m \quad (14)$$

donde:

**C** es el Coeficiente de resistencia y

**m** el exponente de sensibilidad a la velocidad de deformación.

EL valor de  $m$  varia entre 0 y 1. Cuanto mayor sea, mayor será la deformación plástica hasta la rotura (1 para fluido newtoniano, 0.85 para materiales superplásticos).

Este efecto depende de la temperatura, volviéndose el material más sensible a la velocidad de deformación al aumentar  $T$ . En la Tabla 2 se dan valores de estos coeficientes para metales recocidos, para valores de  $\varepsilon$  entre 0,2 y 1.0, en función de la temperatura.

Material	$T$ (°C)	$C$ (MPa)	$m$
Aluminio	200-500	82-14	0.07-0.23
Bronce	200-800	415-14	0.02-0.3
Cobre	300-900	240-20	0.06-0.17
Acero bajo C	900-1200	165-48	0.08-.22
Acero medio C	900-1200	160-48	0.07-0.24
Acero Inoxidable	600-1200	415-35	0.02-0.4

*Tabla 2. Valores típicos de  $C$  y  $m$  para diversos materiales recocidos*

### 1.3.2 Influencia de la temperatura

La temperatura es uno de los factores que más influyen en el comportamiento estructural de un material. Ya se ha visto que influye en la sensibilidad a la velocidad de deformación. En general puede decirse que:

- Aumento de  $T$*
- *Aumentan* la ductilidad y la tenacidad,
  - *Disminuye* el módulo, el límite elástico y la tensión de rotura.
  - Generalmente *disminuye* el valor de  $n$ .

La temperatura influye en el comportamiento bajo carga del material: con temperaturas mayores se necesitan menores esfuerzos para la conformación, y el material se vuelve más dúctil, admitiendo mayores deformaciones.

Pero además, la temperatura influye en la capacidad de un material de recuperar las propiedades perdidas por efecto del trabajo mecánico.

### 1.3.3 Acritud

Al ser sometidos a una carga, la deformación de los granos resultante no es uniforme, ya que las deformaciones diferenciales entre granos darán lugar a la aparición de *Tensiones internas*.

Este estado tensional interno se conoce como *acritud*, que tiene decisiva importancia en las propiedades del material después de deformado:

Si la *acritud* AUMENTA  $\Rightarrow$

Aumenta:	Dureza
	Límite de tracción (R)
	Límite elástico ( $\sigma_Y$ ) que tiende a R
Disminuye:	Alargamiento
	Resistencia al choque (resiliencia)
	Tenacidad

Si se supera cierto valor de deformación se llega a la *Acritud Crítica*, punto en el cual el material pierde totalmente su ductilidad. Si a partir de este punto se intenta deformar más al material, aparecerían grietas.

El trabajo en *frío* produce una mayor acritud en el material, en dos sentidos: por una parte la temperatura aumenta maleabilidad del material, y por otro, si el trabajo se realiza por *arriba* de la temperatura de recristalización (punto de austenización Ac3 del acero) no se modifican sensiblemente sus propiedades.

### 1.3.3.1 Control de la acritud

Los procesos de deformación plástica aumentan la acritud del material y pueden generar una dureza excesiva, que requiera recuperar sus propiedades originales.

Para eliminar la acritud suelen emplearse *tratamientos térmicos*.

### 1.3.3.2 Recocido

Según sean los materiales y sus aplicaciones, existen muchos tipos de tratamientos térmicos, aunque se los identifica con el nombre general de *recocido*. El *recocido* es un tratamiento térmico que devuelve al metal la plasticidad perdida por acritud por restitución de la forma cristalina primitiva, disminuyendo las tensiones locales.

Se realizan en tres fases:

- Calentamiento del material a un ritmo controlado hasta cierta temperatura, siempre inferior a la de fusión,
- Mantenimiento durante cierto tiempo.
- Enfriamiento a un ritmo controlado. Puede ser en aire quieto o agitado, o en líquido (agua o aceite).

Si el recocido es de toda la pieza el calentamiento se realiza en hornos, con atmósfera controlada si es necesario evitar la oxidación; el recocido de sólo parte de una pieza, se hace calentando con soplete.

Desde el punto de vista de la temperatura, los tratamientos pueden ser *subcríticos*, *supercríticos*, según se realicen a temperaturas inferiores o superiores a la de recristalización.

El grado de regeneración de la estructura y la recuperación de los valores de dureza y resistencia originales, dependerá de las temperaturas a las que se realicen y del tiempo de residencia en el horno. Estos parámetros se eligen en función de condiciones tecnológicas y económicas.

El exceso de temperatura por encima de la cual se calienta el material se llama *grado de recalentamiento*. No se debe superar esa temperatura, ni se debe mantener el material en el horno más tiempo del indicado, por que se produciría una fragilización por crecimiento del grano por sobrecalentamiento.

No se debe recocer un metal que esté por debajo de la acritud crítica, ya que se produce un crecimiento del grano y con el consiguiente aumento de la fragilidad.

Después del recocido final, en ciertos procesos es conveniente dar al material una cierta acritud. Esta suele inducirse como una última operación de conformado.

En la tabla 3 se ven los valores de  $R$ ,  $\sigma_Y$  y  $\epsilon$  % (*alargamiento a la rotura*) para el aluminio A5 (pureza 99,5 %) y Cobre refinado.

ESTADO DEL METAL	R Bar		$\sigma_Y$ Bar		$\epsilon$ %	
	A 5	Cu	A 5	Cu	A 5	Cu
Recocido	8,5	23	3,5	7	38	45
Semiendurecido por acritud	13	30	11	25	8	14
Endurecido por acritud	17	35	15.5	32	6	6

*Tabla 3. Propiedades de A5 y Cu refinado con y sin recocido. Elaboración propia*

### 1.3.4 Recuperación elástica

En la práctica, cuando se conforma por deformación una pieza se la lleva a su régimen plástico para que la deformación sea permanente. Sin embargo, debido a que se trata de materiales elastoplásticos, las tensiones elásticas remanentes harán

que una vez quitada la aplicación de la carga, la pieza recupere de la deformación provocada.

Para compensar esta recuperación elástica pueden emplearse varios métodos:

- Deformar al material más de lo necesario, para que una vez recuperada elásticamente la geometría se aproxime a la buscada.
- Deformar localmente el material para minimizar el grado de recuperación.
- Conformar la pieza a alta temperatura.
- En plegado, someter la chapa a una esfuerzo de tracción mientras se pliega.

## 2. LAMINACIÓN

En muchos casos el material base utilizado para la fabricación de piezas metálicas proviene de chapas o perfiles. Estos se obtienen a partir de un proceso llamado genéricamente *laminación*.

Este consiste en dar sucesivas pasadas al material en ambos sentidos entre unos rodillos, a partir de unas piezas de partida llamadas *lingote* hasta obtener la chapa del espesor o el perfil de la forma requerida.

### 2.1 Obtención de los lingotes

De la composición del lingote de partida dependerá en gran medida las propiedades del material que se obtendrá. También tendrá importancia decisiva el tipo de proceso de fabricación (en frío, caliente, con o sin recocido, etc.).

Las lingoteras son cajas de arena con la forma adecuada para favorecer la calidad de los lingotes que se obtendrán, tales que:

- + Favorezcan la homogeneidad de la composición del lingote.
- + Reduzcan al máximo las diferencias de densidad.
- + Contribuyan a la evacuación de impurezas, inclusiones y burbujas.
- + Minimicen la aparición de “rechupes”. (Acero: contracción 8 %.).
- + Ayuden a controlar el crecimiento del grano.

#### 2.1.1 Colada del lingote

##### 2.1.1.1 En lingotera

- Directa. De la cuchara de colada se vierte directamente en las lingoteras.
- Sifón. La *lingotera madre* ayuda a evacuar impurezas y reduce el rechupe.

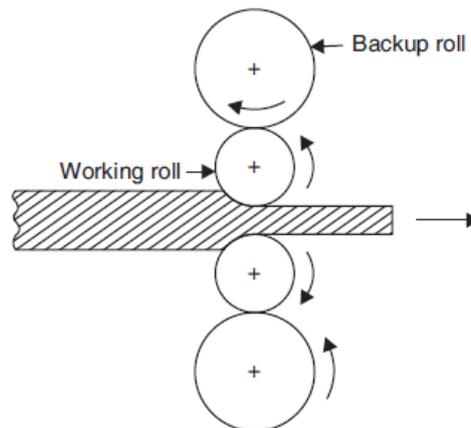
##### 2.1.1.2 Colada continua

Permite obtener directamente *tochos*, *llantones*, *palanquillas* o *redondos*, que se utilizarán para laminar la chapa, eliminando el recalentamiento previo. Además tiene otras ventajas:

- + Calidad y homogeneidad constantes.
- + Mejor aspecto exterior.
- + Disminución parque lingoteras.
- + Automatización del proceso.

## 2.2 Proceso de laminación

La Fig. 2.1 muestra esquemáticamente el desarrollo de un proceso de laminación. El material tiene un espesor inicial  $h_0$  que tras la acción de los rodillos de laminación pasa a un valor  $h_f$ . Esa reducción de espesor es debida a la presión ejercida por los rodillos sobre el material relacionada con la **fuerza de laminación,  $F$** .



*Fig. 2.1. Representación esquemática de un proceso de laminación. H. N. Gupta, Manufacturing Processes, 2009.*

Debido a la reducción de sección en la zona de laminación, la velocidad del material aumentará pasando de su valor de entrada  $v_0$  a un valor  $v_f$ . Como la velocidad superficial de los rodillos ( $v_r$ ) es constante, habrá deslizamiento entre el material laminado y los rodillos a lo largo del arco de contacto,  $L$ . En un punto de esa zona de contacto denominado punto neutro o de no-deslizamiento, la velocidad del material es igual a la velocidad superficial del rodillo. El rodillo se mueve a mayor velocidad que el material en la parte a la izquierda de ese punto y a velocidad menor en la parte de derecha. Esas diferencias de velocidad generan fuerzas de fricción de sentido opuesto. La composición de esos esfuerzos da lugar a la **fuerza resultante de fricción**.

## 2.3 Fabricación de chapas

Mediante la laminación se obtienen hojas (chapas) de espesor relativamente delgado con relación al ancho. Las chapas se fabrican en espesor comercial de que varían entre décimas de mm hasta 400 mm.

### 2.3.1 Chapas de acero

#### CHAPAS GRUESAS

Son obtenidas usualmente en una sola operación, a partir de unos lingotes llamados *llantones*. Después del laminado se somete a la chapa a una serie de operaciones:

1. Aplanado en caliente.
2. Enfriamiento en parrillas.
3. Control dimensional y superficial.
4. Eventualmente eliminación de defectos de superficie (lijado).
5. Control de defectos internos por ultrasonido.
6. Marcado. Evita la mezcla de diferentes calidades.
7. Cortado.
 

Despunte:	Guillotina.	
Canteado:	< 20 mm	{ Cizalla giratoria.
	> 20 mm	{ Dos guillotinas enfrentadas.
Oxicorte:	Corte continuo.	

#### \* *Preparación de las superficies*

Las chapas gruesas se entregan normalmente sin tratamiento superficial. También pueden entregarse sin óxido, por *granallado* o *decapado*.

#### \* *Tratamientos térmicos*

- *Acero al C soldable.* Laminado con/sin normalización (recocido).
- *Aceros soldables de límite elástico muy alto.* Templado (por inmersión o pulverización) y revenido.
- *Acero para alta temperatura.* Recocido y revenido, salvo en trenes de laminación controlada (por su alta

velocidad garantiza un grano fino).

Se parte de llantones de longitud igual al ancho de la chapa a obtener.

1. Laminación en trenes *trío*.
2. Recocido en hornos o normalizado al aire.
3. Enfriado en parrillas.
4. Enderezado.
5. Inspección superficial.
6. Corte.

### 2.3.1.1 Chapas delgadas

Se fabrican mediante trenes *continuos*, con grupos laminadores colocados uno a continuación del otro.

Sus principales características son:

- Tiempo de fabricación de una bobina: < 2 minutos
- Velocidad última etapa en caliente: 35 / 40 km/h
- Velocidad última etapa en frío: 50 / 100 km/h
- Velocidad decapado continuo: 100 m/min
- Productividad: 100 / 150 Tn/h

#### \* *Ventajas*

- Automatización del proceso.
- Menores exigencias de personal.
- Tolerancias de ancho y espesor muy pequeñas.
- Enfriamiento de la chapa más uniforme.
- Descascarillado y decapado continuo.
- Rendimiento del material 4 o 5% mayor.

#### \* *Procedimientos*

##### A. Laminación “en caliente”

Los cilindros de laminación NO son refrigerados.



- Material.
- Aplicación.
- Procedimiento de fabricación.
- Preparación y tratamiento superficial.

### 2.3.2.1 Chapas de acero

Las chapas negras de acero blando se clasifican en razón de su *empleo, contenido de Carbono y características mecánicas*.

EMPLEO	Símbolo
Construcción.	T
Cascos de buques.	N
Calderas.	C
Carrocerías de automóviles.	Z
Embutición en frío. ORDINARIA.	E
ESPECIAL	Es

### ASPECTO

Para *chapa fina laminada en frío* ( $e < 3\text{mm}$ ), como las utilizadas normalmente para embutición.

a. Calidad comercial.	TC
No puede exigirse especificación de aspecto o rugosidad.	
b. Se admiten pequeños poros, marcas y rayas.	X
c. Una de las caras debe estar sin defectos.	Z

### CONTENIDO DE CARBONO

a) Chapas <i>extra blandas</i>	Carbono:	0,05 a 0,2 %
--------------------------------	----------	--------------

b) Chapas *blandas* o *suaves*

Carbono: 0,2 a 0,27 %

\* *Denominación.*

Chapa + Estado superficial + Clase de embutición

P. ejemplo: Chapa ZE, Chapa XES.

\* *Dimensiones corrientes*

Anchura (mm)	Longitud (mm)	Espesor (mm)	PESO (kg/mm espesor)
650	1650	0,5 a 3	8,360
800	1650	0,5 a 3	10,300
800	2000	0,5 a 10	12,480
1000	2000	Todos los espesores a partir de 1 mm	15,600
1100	2100	"	18,000
1200	2200	"	20,600
1300	2300	"	23,300
1400	2400	"	26,200
1000	3000	"	23,400
1200	3000	Todos los espesores a partir de 2 mm	28,000
1300	3000	"	30,400
1400	3000	"	32,700
1500	3000	"	35,100

*Tabla. 2.1. Dimensiones corrientes de chapas. Elaboración propia*

### 2.3.3 Fabricación de pletinas, perfiles y redondos

La fabricación de estos productos se hace también por laminación. Para la fabricación de chapas sólo se debe controlar el ancho de la chapa, por lo cual se usan rodillos de laminación cuyas generatrices son planas.

En cambio para la fabricación de *pletinas, perfiles o redondos* los rodillos deben tener formas adecuadas para obtener el perfil requerido. Los perfiles habituales son:

- Estructurales: U, T, doble T, ángulos
- Pletinas, redondos, cuadrados, hexagonales, etc.

La fabricación de perfiles estructurales se realiza en “caliente” y, en función del tipo de perfil, puede requerir varias fases de desbastado y afinado o acabado. Su terminación es tosca y las tolerancias de fabricación son amplias: entre 0,1 y 2 mm, según la dimensión.

Las medidas de los perfiles en “caliente” van desde pocos *mm* hasta muy grandes (dobles T de 700 mm).

Los perfiles laminados en “frío” (pletinas, redondos, etc.) tienen mejor acabado superficial y tolerancias más ajustadas, normalmente menores a 0,1 mm, y son de tamaño menor. Los más grandes son pletinas de no más de 200 mm.

### 3. PRENSAS

Las prensas pueden definirse en general como máquinas especialmente diseñadas para realizar movimientos alternativos desarrollando elevados esfuerzos. Se utilizan en múltiples procesos de fabricación y especialmente en procesos de conformado por deformación plástica. Básicamente todas las prensas está formadas por un bastidor muy robusto, una mesa fija o desplazable y una corredera que se desplaza a lo largo de unas guías, accionada por un mecanismo que varía según el tipo de prensa. Normalmente, sobre la mesa se coloca la matriz y en la corredera se fija el punzón adecuados a la operación que se desee realizar.

#### 3.1 Tipos de prensas

##### 3.1.1 Accionamiento

Según el tipo de accionamiento empleado, las prensas se clasifican en prensas mecánicas (o de excéntrica) prensas hidráulicas y prensas neumáticas.

*Prensas mecánicas:* la corredera de la prensa está accionada por un mecanismo de excéntrica (manivela) y biela, que transforma el movimiento circular de un eje accionado por un motor, en un movimiento de vaivén. Son más rápidas que las prensas hidráulicas y más aptas para trabajos en los que se necesitan grandes fuerzas pero no elevadas capacidades de trabajo.

*Prensas hidráulicas:* la carrera de la corredera está impulsada por un émbolo que desliza por un cilindro hidráulico por la acción de aceite bombeado por una bomba adecuada. Su construcción es más delicada y cara que la de las prensas mecánicas. También son más lentas. Pueden desarrollar grandes esfuerzos durante todo el recorrido del punzón (presión máxima constante), presentando una elevada capacidad de trabajo. En general puede regularse la carrera de la corredera y definir desplazamientos de aproximación y retirada del punzón a mayor velocidad.

*Prensas neumáticas:* el movimiento se consigue mediante la energía suministrada por aire comprimido. Son las más baratas, pero también las que menores esfuerzos son capaces de desarrollar.

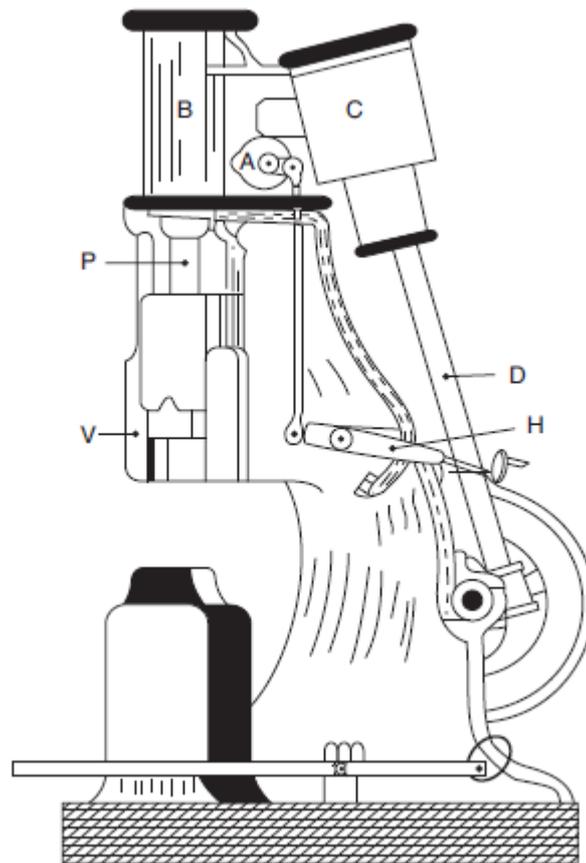
Aunque las posibles combinaciones son múltiples, sus aplicaciones habituales son:

- *Hidráulicas* en embutición, plegado de chapas y extrusión.
- *Mecánicas* en estampación, punzonado, forja y extrusión inversa.
- *Neumáticas* en trabajos que requieran pequeños esfuerzos (remachado, etc.)

### 3.1.2 Estructura

Las prensas tiene diferentes arquitecturas, según sea su aplicación. En cuanto a los soportes, las hay de un montante (de cuello de cisne, fig. 3.1), de dos (fig. 3.1.), o cuatro. La prensa de la figura 3.1 tiene un colchón neumático (también puede ser elástico) cuya misión es absorber el impacto del punzón contra la matriz y colaborar a la sujeción de la chapa.

Las prensas de un montante sufren mayores deformaciones, y por tanto, considerables desplazamientos angulares del punzón. Esto puede originar desgastes desiguales de las guías de deslizamiento y roturas de los útiles de trabajo.



*Fig. 3.1. Prensa de cuello de cisne con colchón neumático y prensa con dos montantes. H. N. Gupta, Manufacturing Processes, 2009.*

Las soluciones a estos inconvenientes son:

- Arqueado de la herramienta

- Dar un ángulo a las guías
- Bastidor más robusto

Las relaciones de elasticidad son más sencillas en el cuerpo de las prensas de doble montante, puesto que constituye un marco cerrado. Bajo la acción de la fuerza ejercida por el punzón se produce un alargamiento de los dos montantes laterales, que sólo tiene como consecuencia un desplazamiento paralelo del eje ó del punzón. Por lo tanto, no es perjudicial para la carga admisible del punzón. De idéntica manera repercute también la elasticidad de los órganos de accionamiento sobre el punzón.

### 3.1.3 Número de accionamientos

Según el número de accionamientos las prensas se clasifican en:

*Prensas de simple efecto:* Tienen un único sistema de accionamiento.

*Prensas de doble efecto:* Tienen dos sistemas de accionamiento independientes que permite regular mejor la velocidad y carrera de dos movimientos. Por ejemplo el movimiento del punzón y del sujeta-chapas en procesos de embutición. Además, se dispone de más energía para efectuar el trabajo. Su principal desventaja es su mayor coste.

*Prensas con más de dos accionamientos independientes:* Poco frecuentes.

## 3.2 Fuerza y trabajo

Durante la realización de un proceso de conformado por deformación plástica, será necesario realizar una cierta fuerza a lo largo del recorrido de la corredera de la prensa. Las magnitudes críticas a la hora de definir si una determinada máquina es capaz de realizar un proceso son la fuerza máxima, el trabajo y la carrera de la corredera que requiere dicho proceso. La *fuerza de prensado* y el *trabajo de deformación* son dos conceptos que están relacionados entre sí por el recorrido donde actúa la fuerza.

Para garantizar que una prensa está en condiciones de efectuar la operación deseada de transformación, la máquina deberá tener una fuerza máxima de prensado, una capacidad de trabajo y un recorrido máximo, de valores iguales o superiores a los necesarios para la transformación. (*Nota:* a menudo, a la fuerza máxima que puede desarrollar una prensa, se la denomina *potencia de la prensa*).

Por razones económicas no deberá utilizarse una prensa mucho más pesada de lo necesario. Pero si la misma tiene una potencia admisible menor de lo que requiere el trabajo, se rebasa la carga admisible y se corre el riesgo de que se deterioren algunas piezas de la prensa. Semejante sobrecarga no se nota muchas veces hasta que algunas piezas de la prensa dan lugar a fallos.

### 3.2.1 Prensas hidráulicas

En una prensa hidráulica, la fuerza máxima es función de la presión máxima que entrega la bomba y de la sección del cilindro o cilindros hidráulicos. Como la presión máxima es prácticamente constante a lo largo del recorrido de la corredera, se puede suponer que la fuerza máxima que puede desarrollar la máquina, también lo es.

El trabajo máximo  $A_{m\acute{a}x}$  que puede realizar una prensa hidráulica, se calcula como el producto de la fuerza máxima  $P_{m\acute{a}x}$  por la *carrera de trabajo*  $w$ .

$$A_{m\acute{a}x} = P_{m\acute{a}x} \cdot w$$

En la práctica, Una prensa hidráulica podrá realizar un determinado proceso si puede desarrollar la fuerza máxima exigida que requiere el mismo y si su carrera de trabajo máxima es suficiente. No es necesario considerar la capacidad de trabajo de la prensa, ya que las prensas hidráulicas son capaces de desarrollar la fuerza máxima, a la velocidad de trabajo, durante todo su recorrido (la bomba hidráulica permite desarrollar el trabajo correspondiente).

Otra característica importante de las prensas hidráulicas es su cadencia de producción (nº de golpes por minuto). Esta magnitud viene dada por las velocidades de desplazamiento del punzón (velocidad de trabajo y velocidad rápida), directamente relacionadas con el caudal suministrado por la bomba. Inicialmente el punzón se desplaza a velocidad rápida hasta una posición de aproximación, después desciende hasta el punto muerto inferior a velocidad de trabajo y por último asciende hasta el punto muerto superior a velocidad rápida.

### 3.2.2 Prensas de excéntrica (mecánicas)

En las prensas de excéntrica la situación es más complicada, porque la fuerza máxima que pueden desarrollar depende de la posición de la corredera.

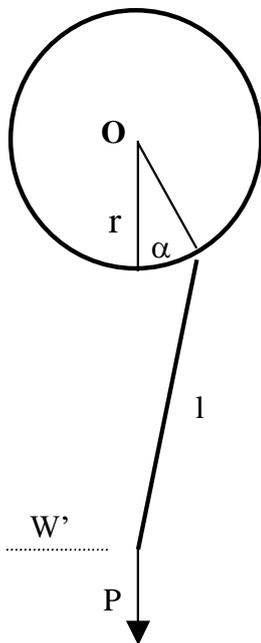
En este tipo de prensas el movimiento circular del motor de accionamiento se transforma en movimiento rectilíneo por medio de un mecanismo biela-manivela (excéntrica).

Las prensas de excéntrica pueden operar en modo de carrera continua o en carrera intermitente. En el caso de operar en carrera intermitente, la corredera se desconecta del motor de accionamiento mediante un embrague, de forma que el motor acumula energía cinética en el volante de inercia. Cuando se acciona el embrague, se conecta la corredera al eje transmisor de potencia, de forma que se produce el movimiento de bajada y subida correspondiente a la carrera de trabajo. En el momento de subida de la corredera actúa un freno de cinta para absorber la energía sobrante en el retroceso al punto muerto superior. En función del trabajo requerido por el proceso de conformado y del momento de inercia del volante, se producirá una determinada ralentización del movimiento de giro del eje de la prensa.

### 3.2.2.1 Posición y velocidad del punzón

Para un determinado ángulo de la manivela, la posición del punzón  $W'$  en relación al punto muerto inferior TU será (fig. 3.2):

$$W = r(1 - \cos \alpha + \frac{r}{2l} \text{sen}^2 \alpha)$$



El radio de la manivela  $r$  o la carrera  $H$  del punzón es de ordinario tan pequeño en relación con la longitud de la biela  $l$ , que la siguiente ecuación aproximada arroja valores bastantes exactos:

$$W = r(1 - \cos \alpha) = \frac{H}{2}(1 - \cos \alpha)$$

Esta función permite la determinación del ángulo de la manivela en función de la posición del punzón delante del punto muerto superior, tanto en lo que se refiere a prensas de carrera fija como de carrera variable, si en lugar de  $H$  se pone la carrera total que acaba de ajustarse.

La velocidad del punzón  $c$  en función del número del número de carreras (golpes) por minuto  $n$  (rpm):

$$c = \frac{dW}{Dt} = r \frac{\pi n}{30} (\text{sen} \alpha + \frac{r}{2l} \text{sen}^2 \alpha)$$

*Fig. 3.2. Esquema de un accionamiento biela-manivela. Elaboración propia*

En esta ecuación también se puede suprimir corrientemente el segundo término, dado que el radio de manivela  $r$  es por lo regular pequeño en relación con la longitud de la biela  $l$ . Se obtiene entonces:

$$c \approx W \frac{\pi n}{30} \sqrt{\frac{H}{w}} - l = 0,105 w \sqrt{\frac{H}{W}} - l \quad [mm / seg]$$

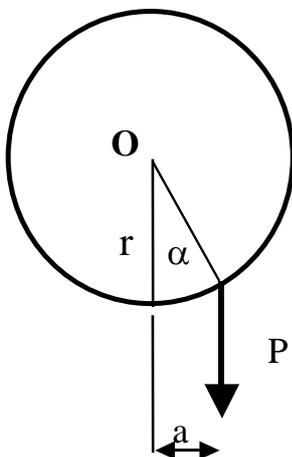
En la práctica no suele considerarse la velocidad del punzón a lo largo de su recorrido sino su cadencia de trabajo expresada en golpes por minuto (en funcionamiento en continuo).

### 3.2.2.2 Fuerza de prensado y capacidad de trabajo

#### Fuerza de prensado:

Uno de los factores que limitan la fuerza máxima que puede desarrollar una prensa de excéntrica, es el máximo par que puede soportar su eje ( $M_{dmáx}$ ).

La fuerza  $P$  que actúa en el punzón, admitiendo para mayor sencillez que el radio de manivela  $r$  es pequeño en relación con la longitud  $l$  de la biela, ataca en el punto donde ésta articula en la manivela.



*Fig. 3.3. Esquema dinámico simplificado. Elaboración propia*

La fuerza  $P$  se corresponde con un par en el eje (fig.3.3.), dado por la distancia  $a$  (brazo respecto del eje de giro  $O$ ). De esta forma, el momento de giro es igual a:

$$M_d = P a = P r \operatorname{sen} \alpha \Rightarrow P = \frac{M_d}{r \operatorname{sen} \alpha}$$

Para un par máximo  $M_{dmáx}$ , la correspondiente fuerza máxima que puede desarrollar la prensa en el punzón vienen dado por:

$$P_{máx} = \frac{M_{dmáx}}{r \operatorname{sen} \alpha}$$

Si se grafica esta expresión se ve que las fuerzas desarrolladas pueden llegar a ser muy grandes justo antes del punto muerto inferior, sin que por ello se exceda el momento de giro admisible.

Debe considerarse sin embargo que la fuerza máxima también está limitada por la resistencia de la estructura y componentes de la prensa (carga admisible por el cuerpo de la prensa, cojinetes, etc.). Normalmente la prensa suele diseñarse de forma que la fuerza máxima sea la correspondiente a un ángulo de la excéntrica ( $\alpha$ ) de entre  $10^\circ$  y  $20^\circ$ . Este valor máximo de la fuerza desarrollable es el que suele indicarse como característica de la prensa (a pesar de que sólo puede generar esa fuerza en las posiciones del punzón cercanas al punto muerto inferior).

La fuerza máxima que podrá desarrollar en cada posición de la corredera será:

- desde  $\alpha = 30^\circ$  hasta  $0^\circ$  la fuerza de prensado admisible vendrá condicionada por la carga admisible por la resistencia del cuerpo de la prensa, etc. (20 tm).
- entre  $\alpha = 30^\circ$  hasta  $90^\circ$  la fuerza de prensado admisible está limitada por el momento de giro admisible, ya que en este campo, dicha fuerza se halla por debajo de la resistencia nominal de la prensa.

En prensas de accionamiento por excéntrica con carrera regulable, la fuerza de prensado admisible es función de la carrera real.

#### Capacidad de trabajo:

Cuando para una operación hubiese que aplicar mayor trabajo del que pueda rendir la prensa de excéntrica, el resultado sería una sensible disminución del régimen de giro de su eje, pudiendo llegar a pararse. En carrera intermitente esta situación haría preciso tiempos de espera más largos para que el volante de inercia recupere su velocidad de partida.

De ordinario la disminución de revoluciones en carrera continua no debe pasar de un 15 % y, en carrera intermitente, de un 25 %. Los accionamientos eléctricos están generalmente calculados para variaciones de revoluciones de este orden.

La capacidad de trabajo  $A_N$  de una prensa mecánica depende del peso  $G$  del volante, del diámetro de inercia  $D$  y de las revoluciones  $n$ . Durante una carrera de trabajo normal, sólo está permitida una determinada disminución de las revoluciones del volante ( $n_0 - n_1$ ), por lo que el trabajo de que se dispone en una carrera puede calcularse en:

$$A_N = \frac{n_0^2 - n_1^2}{7100} GD^2$$

Donde  $n_0$  son las revoluciones de partida (en vacío),  $n_1$  las revoluciones después de la toma del trabajo (se desprecia por razones de sencillez la aportación de energía del motor eléctrico durante la carrera de trabajo). En lugar de las revoluciones  $n$ , muchas veces se indica el porcentaje de la caída  $s$  de las revoluciones:

$$A_N = n_0^2 \frac{[1 - (1 - \frac{s}{100})]}{7100} GD^2$$

Cuando se expresa el peso  $G$  en Kg, el diámetro de inercia  $D$  en m y las revoluciones  $n_0$  en rpm, se obtiene el trabajo  $A_N$  en Kgm.

Si la velocidad de trabajo se la prensa fuera regulable, la capacidad de trabajo puede calcularse con la ecuación anterior. No obstante, es más sencillo calcular la capacidad de trabajo  $A_x$  en cualesquiera revoluciones  $n_x$  deseadas, a partir de la capacidad de trabajo  $A_N$  para el régimen *nominal* de revoluciones  $n_0$ .

$$A_x = \frac{n_x^2}{n_0^2} A_N$$

Se da aquí por supuesto que en cada caso es admisible el mismo porcentaje de caída de revoluciones.

## 4. CONFORMACIÓN DE CHAPAS

### 4.1 Introducción

Las piezas chapa pueden ser *desarrollables* o *no*. Las primeras son conformadas por curvado, doblado o plegado. Al ser el plegado un curvado de radio más o menos corto, se puede decir que el conformado de las piezas desarrollables se obtiene siempre por curvado.

En éste proceso la chapa se somete a esfuerzos de flexión más o menos localizados, algunas fibras se alargan y otras se acortan. Cuando el trabajo se ejecuta correctamente, el alargamiento y el acortamiento son simétricos y presentan el mismo valor en ambas partes del plano que contiene el eje neutro.

Las piezas no desarrollables se conforman acortando o alargando algunas zonas.

#### 4.1.1 Sistemas de conformado

El conformado puede realizarse a partir de una chapa plana, llamada *desarrollo*, o a partir de una pieza desarrollable (abocardado, ahusado, borde cerrado, etc.). Si el plano de doblado está situado en la mitad del espesor de las chapas, el espesor no se modifica con el curvado. Si el alargamiento provoca un adelgazamiento de la chapa, disminuyen las cualidades mecánicas de la pieza.

##### 4.1.1.1 Métodos utilizados

El conformado puede realizarse *acortando* o *alargando* la chapa, siempre tratando de conservar el espesor, utilizando alguno de los siguientes métodos:

- Repujado
- Curvado
- Plegado
- Embutición profunda
- Estirado

A continuación se describen algunos de estos métodos.

## 4.2 Plegado

Es el doblado de chapa en prensa tal que forme un ángulo diedro, de arista más o menos redondeada. Se pueden obtener con este procedimiento una amplia variedad de trabajos.

### 4.2.1 Tipos de maquinaria empleada

Plegadora: Una plegadora es un tipo de prensa (excéntrica o hidráulica) modificada constructivamente para la realización de operaciones de plegado. Estas operaciones se caracterizan porque la matriz es rectilínea y de gran longitud.

Están formadas por un bastidor con dos guías verticales sobre una bancada en la que está dispuesta la mesa. La corredera y la mesa son de gran longitud y poco fondo por lo que este tipo de prensa tiene dos actuadores (cilindros hidráulicos o excéntricas) en lugar de uno. Las herramientas consisten en una matriz en "V" y un punzón con una arista redondeada con un cierto radio

Dobladora: Las dobladoras permiten realizar pliegues en chapas sujetándolas con un pisador situado en la mesa, mientras un punzón obliga a la chapa a doblarse hasta el ángulo deseado. En una dobladora de balancín la acción de doblado la ejecuta un balancín contrapesado que gira accionado por un motor o manualmente.

### 4.2.2 Tipos de plegado

Las operaciones de plegado pueden realizarse *en falso* o *con golpe*. El primer tipo es el más frecuente porque las fuerzas son 4 o 5 veces menores.

#### 4.2.2.1 Plegado en falso

En este tipo de plegado no se produce penetración en la chapa, por lo tanto se conserva su espesor original. Puede realizarse de dos maneras:

- A fondo.

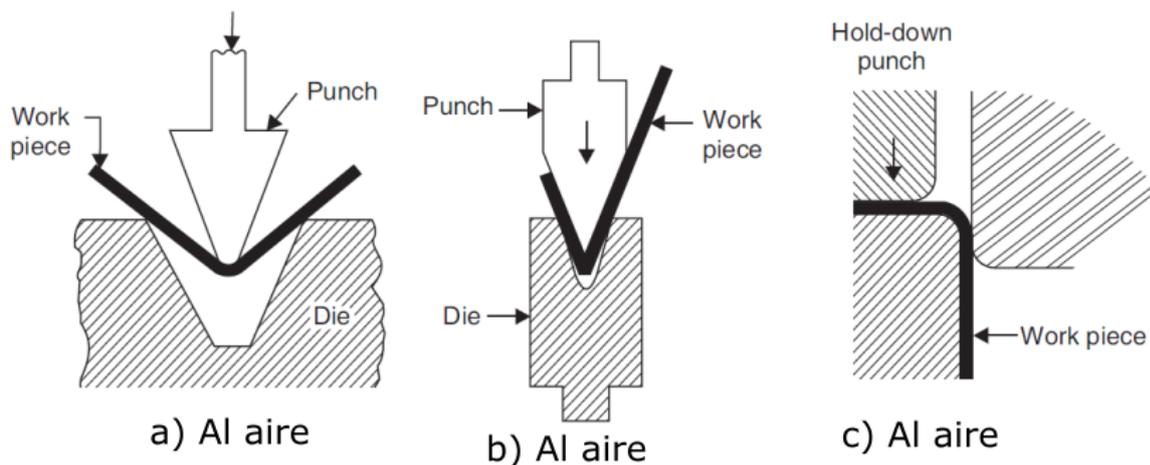
Se detiene el avance del punzón cuando la chapa entra en contacto con las paredes de la "V", sin que haya penetración, con lo que conservará algo de elasticidad. De esta manera se puede obtener una precisión angular de  $\pm 30'$ .

- Con parada.

Al ángulo del plegado se obtiene en función de la penetración del punzón en la matriz. De esta manera, con el mismo utillaje se puede obtener una amplia gama de ángulos modificando el punto muerto inferior del punzón. La precisión angular de plegado es inferior que en el caso anterior:  $\pm 1^\circ$ .

#### 4.2.2.2 Plegado con golpe

Se realiza con penetración de la chapa por parte del punzón, lo que conlleva una disminución local de espesor, aunque permite obtener una elevada precisión angular:  $\pm 15'$ . Suele reservarse para espesores  $< 2$  mm por las elevadas potencias que se necesitan.



*Fig. 4.1. Tipos de plegado. H. N. Gupta, Manufacturing Processes, 2009.*

#### 4.2.2.3 Chapa gruesa

Para plegar chapa de más de 10 mm, en lugar de punzón en V se utilizan regletas de radio apropiado.

- Hasta 10 mm se apoya la chapa sobre matrices de  $80^\circ$ .
- De 10 a 15 mm se apoya sobre rodillos con V y radios que van desde 20 mm y  $125^\circ$  hasta 25 mm y  $160^\circ$ .

### 4.2.3 Tecnología del plegado

#### 4.2.3.1 Radio mínimo de plegado

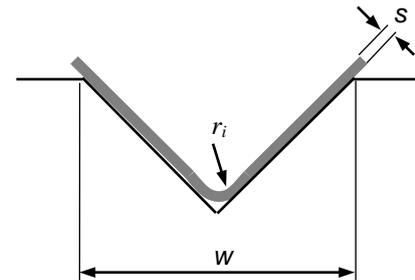
El *radio interior de plegado*  $r_i$  debe ser el mayor posible, compatible con las condiciones operativas de la pieza, para evitar fallos por concentraciones de tensiones. Una manera práctica de calcular  $r_i$  es mediante la siguiente ecuación:

$$r_{i \min} = s \left( 0,0085 \frac{\sigma_B}{\delta} + 0,5 \right)$$

$s$  . Espesor de chapa (mm)

$\delta$  . Alargamiento unitario ingenieril máximo

$\sigma_B$  . Resistencia a la tracción (kg/mm<sup>2</sup>)



**Fig. 4.2. Radio de plegado.**  
*Elaboración propia*

Esta expresión es aproximada, ya que caracterizar la *capacidad de deformación* de una chapa mediante la resistencia a la tracción y el alargamiento a la rotura constituye una aproximación llena de incertidumbres. Para que el plegado sea posible, el radio del punzón de plegado  $r$  debe ser tal que  $r > r_i$ . El ancho de la estampa  $w$  guarda relación con  $r_i$ , en un rango aproximado:

$$w = 5 \text{ a } 8 r_{i \min}$$

Se define como *radio natural de plegado*  $r = e$  y se obtiene para  $V = 6e$ .

En la práctica:  $e \leq 3 \rightarrow V = 6 \text{ a } 8$

$e > 3 \rightarrow V = 8 \text{ a } 12$

#### 4.2.3.2 Radio de plegado máximo

La línea media de plegado tendrá un radio  $\rho$ , cuya relación con el radio interior es:

$$r_i = \rho - \frac{s}{2}$$

El *máximo radio medio* que garantiza *deformación permanente* es:

$$\rho_{máx} = \frac{E s}{2 \sigma_F}$$

$E$ . Módulo de elasticidad

$\sigma_F$ : Límite de fluencia

#### 4.2.3.3 Recuperación elástica

Si el punzón NO estampa la arista, debido a la recuperación elástica se perderá parte del ángulo de plegado una vez cesada la fuerza de plegado. Para lograr los ángulos buscados se deben construir las matrices de tal manera que tengan una “demasiá de forma”: en el plegado a fondo se deberá dar a la “V” un ángulo más estrecho que el de plegado, y en el plegado al aire de deberá penetrar en la “V” un poco más que lo “geométricamente” requerido. Si se llama  $\rho^*$  al radio resultante después del plegado de la recuperación elástica de una chapa de espesor  $s$ , se define el *radio específico de recuperación elástica*  $\rho^*/\rho$ , que se puede calcular con:

$$\frac{\rho}{\rho^*} = 1 - \frac{2\rho}{s} \frac{\sigma_b}{E}$$

donde:  $\sigma_b$  Tensión doblado

$E$  Módulo elasticidad

$\rho$  Radio con que hay que plegar para obtener el radio  $\rho^*$

El cociente  $s/2\rho$  se llama *alargamiento de doblado*. La tensión de doblado  $\sigma_b$  depende del material, y por lo tanto se puede determinar a partir de la *resistencia a la deformación*  $k_f$ .

#### 4.2.3.4 Plegado con punzones múltiples

En plegados complicados, por ejemplo con punzones múltiples, debe cuidarse el excesivo debilitamiento de la chapa que puede llevar a la rotura. Cuando un troquel de doblado provoca un elevado esfuerzo de deslizamiento, es capaz de provocar la rotura de la chapa. Para evitarlo, se debe recurrir a plegados *progresivos*.

#### 4.2.3.5 Trazado del material a plegar

Para definir el material de partida necesario para obtener una cierta geometría y la posición donde deben trazarse las líneas de plegado, deben considerarse los siguientes aspectos:

- En una operación de plegado, el material es sometido a una flexión que hace que las fibras exteriores del material se traccionen y las interiores se compriman. Existirá una fibra que no se deformará llamada *fibra neutra*.

- También debe considerarse que las líneas de plegado no presentan aristas vivas, sino un cierto radio interior ( $r_i$ ).

Longitud del corte

La longitud de la pieza a cortar será la suma de longitudes de la fibra neutra en las zonas dobladas y no dobladas. La longitud de la fibra neutra en un tramo doblado es:

$$l_b = \alpha \cdot \left( r_i + \frac{s}{2} \cdot e \right)$$

Siendo  $\alpha$  el ángulo de doblado (expresado en radianes),  $r_i$  el radio interior de la chapa doblada,  $s$  el espesor y  $e$  un factor de corrección relacionado con la posición de la fibra neutra, que se puede estimar mediante la siguiente tabla:

$r_i/s$	5,0	3,0	2,0	1,2	0,8	0,5
$e$	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5

Trazado:

Deben emplearse las mismas expresiones para el trazado de las líneas de pliegue (se ha considerado  $e=1$ ):

**4.2.3.6 Fuerza y trabajo de plegado**

Al realizar una operación de plegado, la prensa debe desarrollar una fuerza que varía a lo largo del recorrido del punzón. Para poder realizar un plegado debe comprobarse que la plegadora es capaz de desarrollar la fuerza máxima de plegado y que los útiles (matriz y punzón) son capaces de soportar dicha fuerza.

El valor máximo de la fuerza de plegado viene dado por la expresión:

$$F_{m\acute{a}x} = k \frac{\sigma_u L s^2}{v}$$

$s$ . Espesor de la chapa

$\sigma_u$ . Resistencia a la tracción

$v$ . Abertura de la de la matriz

$L$ . Longitud del pliegue

$k =$  1,2 – 1,3      plegado con macho

0,7 – 0,8      plegado por doblado

Para determinar la fuerza máxima en un plegado también pueden emplearse tablas. Estos valores pueden ser tomados con fines orientativos, ya que dependen de la chapa, del sentido del plegado y del tipo de matriz.

El trabajo de plegado se obtiene aplicando la expresión:

$$A = \int F \cdot dh$$

donde:

A: Trabajo de plegado

F: Fuerza de plegado

dh: Diferencial de recorrido del punzón de plegado.

También puede emplearse la expresión simplificada:

$$A = \chi \cdot F_{m\acute{a}x} \cdot h$$

donde:

$F_{m\acute{a}x}$ : F máx de plegado

h: Recorrido del punzón en el que realiza trabajo.

X: Coef. corrector.

### 4.3 Embutición profunda

Utilizando una matriz o estampa se forma un cuerpo hueco mediante estirado, a partir una chapa plana cortada a medida. En función de la profundidad de la embutición, esta puede ser:

- Estirado único
- Estirados sucesivos

Como regla práctica, para piezas muy profundas, se recomienda no embutir en una sola operación piezas cilíndricas cuya profundidad sea mayor a *un radio*.

#### 4.3.1 Escalonamiento de la embutición

##### 4.3.1.1 Determinación del corte a medida

La determinación del usualmente llamado "corte a medida" se basa en la hipótesis de que *el espesor de la chapa no varía sensiblemente después de embutir*. Determinar el corte a medida supone la conservación del área lateral de la chapa.

Puede hacerse por métodos gráficos o analíticos. Para cuerpos de revolución el procedimiento se simplifica notablemente.

### Cuerpos simétricos al eje de rotación

#### 1. Determinación gráfica

- Se descompone el contorno en longitudes fáciles de calcular.
- El centro de gravedad de la curva compuesta  $r_m$  se determina por un polígono funicular articulado, teniendo en cuenta que el centro de gravedad de un cuadrante de círculo es  $0,9 r$ .
- La longitud  $L$  se calcula por un polígono de fuerzas.
- Las relaciones geométricas son:
 
$$R^2 = d_m L$$

$$d_m = 2 r_m$$

$$L = L_1 + \dots + L_n$$

#### 2. Determinación analítica

$$r_m = \frac{r_1 L_1 + \dots + r_n L_n}{L_1 + \dots + L_n}$$

### Recipientes cilíndricos

Para recipientes cilíndricos de diámetro  $d$  y altura  $h$  el diámetro del corte es aproximadamente  $\varphi = 1,1 (h + d)$ .

### Cuerpos no simétricos

Puede determinarse la superficie de corte subdividiendo el cuerpo en partes sencillas de calcular su área.

#### 4.3.1.2 Relación de embutición

La máxima relación de estirado depende de varios factores:

- Resistencia del material
- Dimensiones y espesor de la chapa

- Presión del portachapas
- Fricción.   ⇒   Lubricación
  - ⇒   Material y superficie de la chapa
  - ⇒   Herramienta (material, dureza y superficie)

Cuando el trabajo exige un elevado grado de deformación de la chapa, superior a la máxima deformación admisible por la chapa, no es posible realizarlo en una solo estirado. Si llamamos:

**D**                   Diámetro del disco  
**d<sub>1</sub> ... d<sub>n</sub>**        Diámetro del punzón en cada paso

Definimos como *relación de embutición* (o su recíproco, el *factor de embutición*):

**$\beta_0 = D/d$**         Relación de embutición estirado único  
 **$m_0 = d/D$**         Factor de embutición mínimo ( $1/\beta_0$ )

En cada escalón:    **$d = D/ \beta_0$**                     **$d = m_0 D$**   
                            **$d_1 = d/ \beta_1$**                     **$d_1 = m_1 d$**   
                           ...                                    ...  
                            **$d_n = d_{n-1}/ \beta_n$**                 **$d_n = m_n d_{n-1}$**

Para determinar la relación de embutición límite se puede recurrir a diversos procedimientos. Gráficamente se pueden obtener los valores de  $\beta_{0\text{ máx}}$  y  $m_{0\text{ mín}}$  para embutición de chapa de acero, con lubricación y fuerza adecuada del sujetachapas, para chapa de acero de calidades, en función de la relación  $d/s$  (diámetro punzón/espesor chapa):

- A- Buena capacidad de embutición
- B- Normal capacidad de embutición.

Analíticamente. pueden aplicarse las expresiones siguientes:

Para relaciones:  **$d/s = 25$  a  $600$**

- Materiales fácilmente embutibles:        **$\beta_{0\text{ máx}} = 2,15 - 0,001 \frac{d}{s}$**
- Materiales normalmente embutibles:    **$\beta_{0\text{ máx}} = 2 - 0,0011 \frac{d}{s}$**
- Entre estirados sucesivos:                **$\beta_n = 1,2$  a  $1,33$**

En el primer estirado después del recocido, se puede elevar este valor hasta entre 1,5 y 1,65 (o el valor  $\beta_{omáx}$  en caso de ser menor que 1,5). En los sucesivos se irá reduciendo la relación de estirado.

- Para piezas elípticas, cuadradas, rectangulares, se entra al gráfico con:

$$d = 1,13\sqrt{f} \quad ; \quad D = 1,13\sqrt{F}$$

$f$ : sección del punzón

$F$ : área corte a medida

### 4.3.2 Embutición con sujetachapas

Para guiar el movimiento de la chapa durante el proceso de embutición suele emplearse un elemento que realiza una cierta presión sobre la misma denominado sujetachapas. Como se indicó en el apartado de prensas, existen prensas de *simple efecto* (un único sistema de accionamiento que realizará la embutición y sujeción de chapa) y prensas de *doble efecto* (dos sistemas independientes). También debe considerarse un sistema de expulsión de la pieza una vez embutida.

#### 4.3.2.1 Fuerza de embutición

Para piezas cilíndricas en estirado único la fuerza necesaria para producir la embutición de una pieza será:

$$P_z = \pi d s \frac{K_{fm}}{\eta_F} \ln \beta^*$$

- en donde:
- $\beta^* = D^*/d$  Relación de embutición en el máximo de fuerza
  - $K_{fm}$  Resistencia media a la deformación al máximo de fzas.
  - $\eta_F$  Rendimiento de embutición  $f(\mu, D/d)$
  - $d$  Diámetro del punzón
  - $s$  Espesor de la chapa

El cálculo de la fuerza de embutición con ayuda de esta ecuación resulta complicado porque la relación de embutición en el máximo de fuerzas  $\beta^* = D^*/d$  y la resistencia media a la deformación, dependen de la relación de embutición  $D/d$  y del material.

Además, el rendimiento es influido por el coeficiente de deslizamiento de la pieza sobre la herramienta (por lo tanto, por la lubricación), y por la relación del diámetro del punzón al espesor de la chapa ( $D/s$ ). Precisamente esta influencia en el rendimiento origina una fuerte disminución de la máxima relación de embutición posible  $\beta_{0 \max}$ .

Por estas razones parece ser conveniente calcular la fuerza de embutición a base de la siguiente ecuación. Conceptualmente es similar a la anterior, pero se han simplificado las anteriores interdependencias entre factores, poniendo todo en función de la *resistencia a la tracción* de la chapa  $\sigma_B$  y el cociente  $n = \sigma/\sigma_B$ .

$$P_z = n \pi d s \sigma_B$$

El factor  $n$  representa la relación entre  $\sigma_B$  y la tensión de deformación por embutición  $\sigma$ :

$$\sigma = \frac{K_{f_m}}{\eta_F} \ln \beta$$

El valor de  $n$  puede obtenerse analítica o gráficamente. En general vale la expresión:

$$n = 1,2 \frac{\beta_0 - 1}{\beta_{0 \max} - 1}$$

Para materiales de *buena capacidad* de embutición, resulta más ajustada la expresión:

$$n = \frac{1,2}{1,15 - 0,001 \frac{d}{s}} (\beta_0 - 1)$$

y para material aptitud de embutición *normal*:

$$n = \frac{1,0}{1,0 - 0,001 \frac{d}{s}} (\beta_0 - 1)$$

#### 4.3.2.2 Trabajo de embutición

##### Prensas de doble efecto

En las prensas de doble efecto la sujeción de la chapa se realiza mediante un mecanismo independiente. El trabajo de embutición desarrollado por el mecanismo principal de la prensa valdrá:

$$A_d = x P_z h$$

- donde:
- $h$  Altura de embutición (mm)
  - $x = 0,5 - 0,8$  (Chapa corriente  $x = 0,65 - 0,75$ ).

El *Factor de corrección*  $x$  depende del material y de  $\beta_0$  y tiene en cuenta la variabilidad de la fuerza a lo largo de la embutición. Los valores mayores de corresponden a materiales blandos, mientras que los menores a chapa dura y poca profundidad de embutición. La fuerza máxima y el trabajo necesarios para la deformación de una chapa es independiente de la máquina utilizada. No debe confundirse la fuerza máxima en un determinado proceso con la fuerza máxima que puede desarrollar una determinada prensa. Esta última, sí depende del tipo de accionamiento: en una prensa hidráulica es constante a todo lo largo de su recorrido (solo depende de la presión hidráulica y la sección del émbolo), mientras que en una prensa mecánica varía con la posición del punzón.

### Prensas de simple efecto

En las prensas de simple efecto la sujeción de la chapa la realiza el mismo accionamiento que embute. Por ello, en éstas prensas el trabajo de embutición desarrollado por el único accionamiento de la prensa será mayor que el trabajo desarrollado por el accionamiento principal en las prensas de doble efecto (debe considerarse el trabajo de embutición *mas* el de sujeción de la chapa):

$$A_d = (xP_z + P_B)h$$

La fuerza del sujetachapas sobre un disco de diámetro  $D$  resulta:

$$P_B = \frac{\pi}{4} [D^2 - (d' + 2r)^2] p$$

- $d'$  Diámetro interior de la matriz de estirado
- $r$  Radio arista de embutición
- $p$  Presión específica del sujetachapas.

La *presión específica* puede calcularse con la expresión siguiente o bien con gráficos, en función de la resistencia del material  $\sigma_B$ :

$$p(kg/cm^2) = 0,25 \left[ (\beta_0 - 1)^2 + \frac{0,5d}{100s} \right] \sigma_B(kg/mm^2)$$

### 4.3.3 Aspectos tecnológicos

#### 4.3.3.1 Radio de aristas de matriz y del punzón

El radio de las aristas de embutición y el redondeo del punzón desempeñan un importante papel. Radios de aristas muy reducidos someten la chapa a un esfuerzo adicional de alargamiento, mientras que con radios demasiado grandes se producen fácilmente pliegues al final del proceso de embutición, pues la chapa no se puede sujetar hasta el último momento.

Para el radio de *redondeo de la arista* de embutición  $r_M$  se recomienda:

$$r_M = \text{entre } 5 \cdot s \text{ y } 10 \cdot s$$

Se toman valores bajos para las piezas de chapa de espesor  $s$  delgado y altos para las de paredes gruesas.

Para el *radio del punzón* se recomienda:

$$r_{St} = \text{entre } 0,1 \cdot d \text{ y } 0,3 \cdot d$$

Se toman valores pequeños para paredes delgadas ( $d/s=500$ ) y altos para las gruesas ( $d/s=50$ ).

#### 4.3.3.2 Anchura del intersticio de embutición

El intersticio de embutición tiene una influencia relativamente importante en la formación de pliegues. Con un intersticio demasiado grande, la chapa no queda suficientemente bien asentada en el punzón, y las piezas no obtienen una superficie cilíndrica lisa. Si el intersticio es insuficiente, se presenta la tendencia al gripaje, y en ocasiones se puede producir el desgarramiento lateral o del fondo de la chapa.

Para la embutición de cilindros con paredes lisas el intersticio debe ser algo mayor que el espesor de la chapa. Puede tomarse como valor aproximado para chapas de acero:

$$w = 1,1 \cdot s$$

#### 4.3.3.3 Recocido y tratamiento de la chapa

La deformación de la chapa debido a la embutición produce un aumento de la acritud que será necesario controlar mediante un *recocido*.

- Con deformaciones del 5 al 15 % es necesario recocer, preferentemente protegiendo de la oxidación en el caso del acero.
- Es recomendable decapar o descascarillar entre tratamientos. Las piezas decapadas se deben lavar bien en agua fría o en agua caliente, con el fin de que no queden restos de ácido en los poros de la superficie.
- En chapa de acero inoxidable ha dado buen resultado remojar primero el material a tratar aproximadamente durante una hora en un baño de decapado previo de ácido nítrico 1:10. Luego se frota con un cepillo de púas de acero y se termina de decapar. Las piezas de hierro son conveniente introducir las en una solución de sosa y luego secarlas rápidamente, siendo recomendable el empleo de serrín cuando se trate de piezas en gran escala.
- Las aleaciones de aluminio que contienen cobre, después de aclararlas se sumergen todavía en ácido nítrico concentrado, se vuelven a aclarar bien y se secan.

#### 4.3.3.4 Defectos

Defecto	Causa	Solución
<i>Pliegues</i>	Inclusiones en la chapa	Utilizar material en bruto limpio
<i>Estructura laminada</i>	Defectos del material de partida o defecto de recocido	Sólo para piezas de poca responsabilidad
<i>Agujeros o grietas</i>	Poros o elementos extraños	Cuidar limpieza
<i>Espesor irregular de la chapa</i>	Cilindros desgastados	Prescribir tolerancias de suministros
<i>Desgarre del fondo</i>	El punzón actúa como punzón de corte	Aumentar redondeo de arista punzón y/o matriz
<i>Rotura del fondo</i>	D/d demasiado grande	Introducir otro estirado o cambiar de chapa
<i>Grietas en el fondo</i>	1. Espesor irregular de chapa 2. Intersticio estrecho 3. Suciedad en las esquinas de la matriz	1. Revisar espesor chapa 2. Ensanchar intersticio 3. Limpieza matriz
<i>Forma abombada</i>	Intersticio demasiado ancho	Cambiar matriz o punzón
<i>Formación de pliegues</i>	1. En el ala 2. Verticales, con grietas	1. Aumentar presión sujetachapas 2. Idem o aumentar intersticio
<i>Ampollas en el fondo</i>	Mala aireación	Mejorar aireación y lubricación

#### 4.3.3.5 Lubricantes para embutición profunda

La lubricación tiene por objeto formar una película en toda la superficie de la chapa que facilite el deslizamiento del material sobre la herramienta y evite el desgaste de esta última. Además, en muchos casos, el lubricante tiene que servir para refrigerar la herramienta.

Sin embargo, para lograr una producción económica debe tenerse también en cuenta, que el lubricante pueda aplicarse fácilmente, y después de la transformación pueda volverse a quitar sin dificultad alguna.

Los productos recomendados van desde *grasas de embutición emulsionables* o *no* o disulfuro de molibdeno, para trabajos en acero, hasta jabón, sebo, cera de abejas y grasas vegetales (aceite de palma) para aleaciones ligeras.

#### 4.3.4 Embutición profunda sin sujetachapas

Para piezas cilíndricas es posible suprimir el sujetachapas cuando la altura de la pared del cilindro sea:

$$h \leq 0,3\sqrt[3]{d^2 \sqrt{s}}$$

En caso de piezas no circulares, se reemplaza  $d = 2r$ , donde  $r$  es el radio del redondeo de las esquinas del borde.

Debe cumplirse además que el fondo de la pieza no supere:

$$d \approx \text{entre } 20 \cdot s \text{ y } 25 \cdot s$$

##### 4.3.4.1 Estirado de pared con debilitamiento

El estirado interesa para las piezas cilíndricas cuya parte cilíndrica tiene que resultar más débil que el espesor del fondo. A la primera embutición se la suele llamar estirado *a la copa*, mientras que al resto del alargamiento con disminución del espesor de la pared se le designa con el nombre de *estirado*.

La determinación del corte a medida se efectúa en base de la uniformidad del volumen del disco y de la vaina. El diámetro del corte a medida será:

$$D = \sqrt{d^2 + (d_a^2 - d^2) \frac{h_1}{s}}$$

Si el espesor no es constante, en función del diámetro medio de la pared ( $d+s_1$ ):

$$D = \sqrt{d^2 + 4d_m \frac{h_1 s_1}{s}}$$

El estirado de la pared puede llegar a un 40 - 45 % por escalón (30 % sin recocido).

La fuerza de estirado, independientemente de los valores de fluencia, será:

$$P = c F_1 \frac{\sigma_B}{\eta_F}$$

Siendo:  $c = 0,88 \frac{s}{s_1} - 0,88$  para  $s/s_1 < 2,4$

$\eta_F = 0,5 - 0,8$  Rendimiento

$F_1$  Sección transversal después del estiramiento

Se correlaciona el factor **c** con el trabajo de deformación específico **a** y con el estiramiento.

El *trabajo de embutición* resulta:

$$P = x P h_1$$

**x** = 0,8 - 1,0 Factor de forma de la copa de partida. Tiene en cuenta la irregularidad de la fuerza a lo largo del recorrido

**h<sub>1</sub>** Carrera de trabajo del punzón.

## 4.4 Corte y punzonado de chapas

### 4.4.1 Punzonado

Aplicación: realizar agujeros en chapas mediante punzones.

#### 4.4.1.1 Clasificación

- Manual
- Mecánico:
  - \ Simple
  - \ Múltiple
  - \ Automático

#### 4.4.1.2 Fuerza de corte

##### Resistencia al cizallamiento

Puede aproximarse mediante la relación con la resistencia a la tracción:

$$R_d = 1/2 R_{tracción}$$

Para chapas de acero suave:  $R_d \cong 20 \text{ daN/mm}^2$

##### Esfuerzo de corte

Será:

$$F = P R_d e$$

Siendo: **P** desarrollo del corte ( $P = \pi d$ , p/ agujeros redondos)

**e** espesor de la chapa

##### Espesor máximo de corte en función del diámetro

Si  $R_p$  es la resistencia a la compresión del punzón, la máxima fuerza que el punzón puede realizar deberá ser:

$$R_d < F < R_p$$

.Los punzones suelen construirse de acero fundido y tratado, con una resistencia a la rotura por tracción de unos  $200 \text{ daN/mm}^2$ . Se fija entonces una tensión de trabajo de  $R_{pc} = 50 \text{ daN/mm}^2$ .

Para agujeros redondos, la fuerza necesaria para el corte de la chapa será:

$$F \geq \pi d e R_d$$

La resistencia del punzón debe ser al menos:

$$F \leq \frac{\pi d^2}{4} R_{pc}$$

Si se igualan ambas expresiones:

$$\frac{\pi d^2}{4} R_{pc} \geq \pi d e R_d \quad \Rightarrow$$

el diámetro del punzón deberá ser:

$$d \geq \frac{4 e R_d}{R_{pc}}$$

Reemplazando numéricamente los valores anteriores, resulta:

$$e \leq \frac{d}{1,6}$$

También relacionado con la resistencia de la matriz y del material debe considerarse para el diseño de un útil de punzonado de piezas de acero que la distancia entre distintos punzonados y entre un punzonado y el borde del material debe ser de al menos 2 veces el espesor de la chapa.

### Trabajo de corte

Si se supone que la fuerza sea constante, el *trabajo de corte o punzonado* será el producto de la fuerza por la carrera de corte (en general, el espesor de la chapa).

$$A = X F e$$

El factor  $X$  tiene en cuenta la irregularidad de la fuerza de corte. Varía entre 0,5 y 0,8.

#### 4.4.1.3 Perforación de chapas gruesas y agujeros grandes

Se utilizan prensas o punzonadoras potentes, y los punzones tienen tetones de guiado.

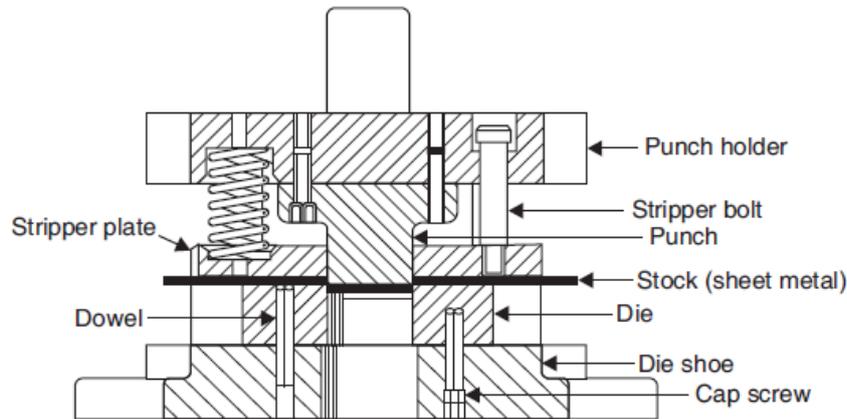


Fig. 4.3. Esquema de proceso de punzonado. H. N. Gupta, *Manufacturing Processes*, 2009.

#### 4.4.1.4 Punzonado múltiple escalonado

Para reducir la fuerza total, los punzones se pueden hacer escalonados.

#### 4.4.1.5 Punzonado en máquinas de control numérico

Permiten hacer hasta 200 agujeros/min, con punzones de distintas formas. Una punzonadora de CN consta de los siguientes componentes:

- a) Mesa. Sobre ella se desliza la chapa.
- b) Carro portamordazas. Sujetan la chapa. Tiene movimiento longitudinal y transversal.
- c) Bastidor. Estructura rígida de la máquina.
- d) Centro de punzonado. Portaherramientas fijo montado sobre una torre circular giratoria. Unos cilindros neumáticos oprimen la chapa contra la mesa antes de la operación.

#### 4.4.1.6 Matrices

Para la extracción de la chapa, se coloca un dispositivo en el punzón o bien en la matriz. Para trabajos más complejos, las estampas suelen incluir varias operaciones (corte, punzonado y embutición) que se realizan durante una única carrera de trabajo.

#### 4.4.1.7 Alimentación automática de material en forma de fleje

Para la fabricación de grandes series de piezas por conformado de chapa, suele partirse de largas tiras de material enrollado denominadas flejes. Los flejes se obtienen cortando con un ancho adecuado bobinas de chapa obtenidas en trenes de laminación. Una devanadora desenrolla el fleje para suministrar el material necesario. La enderezadora, mediante un sistema de rodillos, elimina la curvatura de la chapa. Y por último, un sistema de alimentación automático hace avanzar al material a la velocidad adecuada en función del útil de conformado montado en la prensa. El sistema de alimentación puede encontrarse a la entrada o a la salida de la prensa (alimentará el fleje empujándolo o tirando de él). Cuando el recorte resultante del conformado mantiene su continuidad (tira de metal) es necesario colocar a la salida de la prensa un sistema que trocee el material sobrante para facilitar su manipulación y almacenaje.

#### 4.4.2 Cizallado

Las cizalladoras están formadas por hojas rectas, que trabajan bajo el sistema de guillotina: la hoja inferior fija y la superior móvil, con un ángulo menor a 30°.

##### 4.4.2.1 Cuchillas cortas

Se refiere a aquellas cizallas cuyas hojas tienen una longitud útil de corte de entre 180 y 300 mm.

Accionamiento. Electromecánico: excéntrico con volante de inercia.

Pisachapas. Evita el giro de la chapa en el momento del corte.

Bastidor. Muy rígido.

##### 4.4.2.2 Cuchillas largas

Son aquellas cuyas hojas oscilan entre 1 y 5 m.

---

Espesores máx:	30 mm
Accionamiento.	Por cigüeñal y bielas, mediante embrague y volante de inercia.
Pisachapas.	Mecánicos (por leva) o hidráulicos (independientes).

#### 4.4.2.3 Regulación del corte

El huelgo entre ambas cuchillas determina el aspecto y acabado del corte.

#### 4.4.3 Otros procedimientos de corte

##### 4.4.3.1 Oxicorte

Definición. Corte de metales por combustión por chorro de oxígeno.

##### Aplicación y características

Metales oxidalbes que cumplan con las siguientes condiciones:

1. Reacción exotérmica para mantener la temperatura de cebado.
2. Temperatura de cebado menor o igual a la de fusión, capaz de mantener la reacción.
3. Escoria muy fluida; temperatura de fusión por lo menos igual a la del metal.

Estas características se cumplen con los aceros al carbono, aunque varían con el contenido de C de la aleación:

< 0,4 %C. Se cortan muy fácilmente

- Temperatura de cebado: 1.300 °C
- Temperatura de fusión: 1.400-1.500 °C
- Temp. fusión escorias (FeO): 1.370 °C

---

> 0,4 %C, aleados (Cu, Al, Mn, Si, W, Cr, Ni)

- Cortables a temperaturas más altas o con precalentado.

Los sopletes que se utilizan constan de dos dispositivos:

1. Oxígeno y gas para *calentamiento*
2. Oxígeno para *corte*.

### Gases de corte

#### *Oxígeno*

- Pureza  $\approx 97,5$  %.
- Cada 1 % de impurezas disminuye la velocidad de corte 13-15 %.

#### *Gas de corte*

- Acetileno. El más usado p/espesores normales. Fácil ajuste llama.
- Hidrógeno. Muy adecuado para grandes espesores. Relativamente bajo poder calorífico, difícil regulación.
- Propano. Corte de espesores medios. Fácil de almacenar en estado líquido. Muy apto para Trabajos en obra. Delicada regulación.
- Tetreno. Similares prestaciones acetileno (excepto para soldadura).
- Crileno. Similar al acetileno, excepto para soldadura por fusión

Son recomendables bajas presiones de alimentación.

### Preparación de la chapa

Debe estar limpia de pintura y/o óxido, para lo cual puede cepillarse o quemarse con el mismo soplete.

#### *Procedimiento.*

- 1º. Se regula la llama de corte.
- 2º. Se abre la llave de oxígeno de corte.

3º. Esto produce un exceso de acetileno de calentamiento, que se compensa cerrando un poco la llave de gas.

Se comienza el corte en el borde (cortes exteriores) o en un taladro (cortes interiores).

#### *Aspecto de los cortes*

Es un índice de la marcha del corte. Dan información sobre la velocidad de corte, la temperatura de la llama, la relación gas-oxígeno y la técnica de corte.

#### Dispositivos de guiado:

*Manuales*

*Portátiles*

*Máquinas fijas*

Mediante dispositivos de lectura, realizan el copiado de la forma a copiar mediante alguno de los siguientes dispositivos:

1. Rodillos curvigráficos.
2. Palpadores mecánicos.
3. Rodillos magnéticos.
4. Trazador electrónico de rodillo.
5. Trazador electrónico en XY.

#### **4.4.3.2 Corte con arco eléctrico**

##### Por fusión localizada

Se realiza con CC. Se utilizan electrodos de grafito. El consumo de energía es elevado. Solo se utiliza para el corte de chatarra y otros en los que el aspecto no sea importante.

##### Por oxicorte

Se utilizan electrodos huecos, por donde fluye el oxígeno. Es más rápido que el corte por fusión. Se utiliza para el desguace submarino a gran profundidad (el oxiacetileno sólo puede usarse hasta 10-12 m de profundidad)

#### 4.4.3.3 Corte por chorro de plasma

Permite cortar metales férricos u otras aleaciones incluso refractarias, con las que el oxicorte no es aplicable, a gran velocidad y con gran limpieza. El corte se produce por fusión por la elevada temperatura del plasma (30.000°C) y el metal fundido es proyectado por la energía cinética del gas (velocidad de salida: 6 km/s).

No es un corte por arco eléctrico, sino que éste se utiliza para ionizar al gas. Para evitar descargas entre electrodo y boquilla, se estabiliza el arco mediante un potente torbellino de gas que aísla al electrodo.

Se utilizan gases inertes monoatómicos (Ar) y biatómicos (N<sub>2</sub>), en éste caso con un 20 % de hidrógeno, perfectamente secos y sin O<sub>2</sub>.

##### Inconvenientes

Más allá de que permite cortar cualquier metal, sus limitaciones son:

- Espesor. Acero hasta 10 mm de espesor y aleaciones ligeras hasta 120.
- La ranura es un 50 % más ancha que con oxicorte
- El corte es más ancho en la parte superior y no resultan a escuadra.
- En utilización continua se requiere: portaelectrodo con pantalla contra los rayos UV, protector de oídos y buena ventilación.

#### 4.4.3.4 Corte por rayo láser

El láser de cuerpo sólido (rubí) permite cortes del orden de 10 μ de grosor, pero sólo se puede usar por breves períodos de tiempo y energía que consume es elevada. Actualmente se utiliza el láser de gas (CO<sub>2</sub>). Proporciona un flujo de energía continuo. El haz luminoso puede concentrarse en 1/100 mm<sup>2</sup>. En estas condiciones, 1kW corresponde a 10<sup>4</sup> kW/cm<sup>2</sup>, con lo cual se alcanzan temperaturas muy elevadas.

Las aplicaciones industriales de este láser permiten cortar, utilizándose en algunos casos atmósfera inerte:

- Acero hasta 20 mm y metales en general
- Materiales refractarios
- Madera, textiles
- Plásticos reforzados con fibras (vidrio, carbono),

Se utilizan máquinas de corte por control numérico (CNC) con movimiento en los tres ejes. Como la distancia a la pieza a cortar debe ser constante, llevan un automatismo regulador de la altura de la boquilla. La velocidad de corte depende del material:

$$P = X v d t$$

donde:	<b>P</b>	potencia del láser (kW)
	<b>X</b>	Tiene en cuenta el calor de vaporización del material
	<b>v</b>	Velocidad de corte
	<b>d</b>	Ancho del corte
	<b>t</b>	Espesor del material

#### 4.4.3.5 Corte por chorro de agua

Se produce haciendo incidir un chorro de agua muy fino de hasta a 5000 bar que, saliendo por un orificio de 0,1 a 0,5 mm arranca el material debido a su energía cinética. Para materiales duros se mezcla con un abrasivo.

El corte es limpio y en frío, puede cortar cualquier material (Ti hasta 280 mm), incluyendo hormigón, piedra y materiales blandos. No es contaminante y su única limitación son las velocidades de corte algo menores al láser o plasma.

## 4.5 Perfilado

El perfilado es una operación de doblado continuo en la que las hojas o láminas de metal se deforman plásticamente a una determinada temperatura a lo largo de un eje longitudinal. Durante este proceso, la chapa se somete a un plegado progresivo en cada uno de los cabezales hasta obtener los ángulos y la forma deseados. Cada conjunto de rodillos (superior e inferior) se denomina cabezal de perfilado.

Un juego de rodillos tandem (conocidos como estaciones de rodillos) conforman el metal. Debido a que el perfilado sucede de manera progresiva, hay poco o ningún cambio del área y del espesor de la sección del perfil.

El perfilado permite obtener perfiles de pared delgada huecos o semihuecos. También permite realizar operaciones adicionales en la línea, por ejemplo para generar agujeros o ranuras donde se necesite. Al ser un proceso continuo, el perfilado es ideal para producir piezas de longitudes elevadas, o de series grandes. El proceso se lleva a cabo a una velocidad entre 15 y 185 m/min, dependiendo de la configuración deseada, las tolerancias o el material utilizado.

Por su misma naturaleza, el perfilado es un proceso en el que los productos obtenidos tienen una alta calidad. Se alcanzan tolerancias bastante pequeñas tanto para materiales pesados como ligeros, además proporciona formas y dimensiones uniformes.

De forma más general, el perfilado de un producto en una máquina determinada se caracteriza esencialmente por:

- La flor de perfilado
- El número de pasadas o cabezales utilizados (este valor está determinado indirectamente por la flor de perfilado).
- La distancia entre los cabezales de la máquina de perfilado.
- La posición del plano de perfilado, es decir, la posición vertical de la chapa en la máquina de perfilado.
- La holgura entre rodillos.
- La lubricación.

En teoría se pueden obtener perfiles de cualquier material que se pueda doblar. También es posible perfilar varios materiales, como por ejemplo tubos de acero inoxidable cubiertos de un espesor pequeño de acero al carbono. De esta forma el

---

perfil toma la ventaja del coste y la resistencia del acero al carbono y el aspecto atractivo del acero inoxidable.

#### 4.5.1 Ventajas e inconvenientes del perfilado

Este proceso presenta una serie de ventajas e inconvenientes, los principales son expuestas a continuación.

##### ***Ventajas***

- Proceso de elevada productividad que nos proporciona grandes cadencias, alcanzando velocidades de producción de 15 – 185 m/min.
- Los costes de mantenimiento son generalmente bajos. Los rodillos pueden producir varios miles de Kilómetros de producto antes de ser reemplazados.
- El número de perfiles y superficies diferentes que se pueden producir es elevado, debido a la gran variedad de rodillos y alternativas de posicionamiento de los mismos.
- Se pueden obtener tolerancias muy estrechas, tanto para materiales pesados como ligeros.
- Secciones metálicas fabricadas por embutición, estampación o extrusión, pueden ser eficaz y rentablemente realizadas mediante el conformado por perfilado.
- Operaciones secundarias tales como: corte, punzonado, prensado, pintado, etc. pueden ser combinadas con la operación de conformado por perfilado para acelerar la producción y reducir los costes de fabricación.

##### ***Inconvenientes***

- Elevada inversión inicial (máquina, utillajes, herramientas...).
- El espesor de la chapa metálica que se utiliza en este proceso está limitada dentro del rango 0,15 – 19 mm.
- La pieza acabada puede contener tensiones remanentes debido a los grandes esfuerzos que se aplican sobre el material de partida a lo largo del proceso.
- Necesidad de contar con ingenieros expertos para el diseño de los rodillos, debido a la complejidad de las formas que, a veces, son requeridas para llegar al producto final.

## 4.5.2 Uso de elementos informáticos en el diseño

A pesar que este proceso se basa en gran medida en la experiencia del propio diseñador, el mercado cada vez es más competitivo y el factor precisión-tiempo presenta cada vez más peso en la elección de una empresa u otra. Estas características del mercado hacen que el uso de elementos informáticos especializados (software de diseño) represente un gran potencial. El uso de estos programas de computadora eficientes, permite la optimización de todos los pasos de la cadena del proceso para producir secciones de conformado en frío.

El diseñador puede encontrar una solución óptima para su conjunto de rodillos si puede simular el proceso de conformación de los rodillos mediante un modelo de computadora probado. El análisis del proceso de conformación, usando el Método de Elementos Finitos, brinda mucha información y comprensión del proceso, además de las fallas que ocurren.

## 4.5.3 Tecnología del perfilado

### 4.5.3.1 Tipología

La gama de productos obtenidos con este proceso es casi ilimitada. En algunos casos, una chapa puede recibir un conjunto de deformaciones importantes hasta conseguir un perfil realmente elaborado y complejo, en otras ocasiones es posible alimentar en una misma máquina varias tiras de chapa para que estas sean deformadas al mismo tiempo, y, si se desea, hasta poder conseguir un único perfil de sección compuesta.

Los perfiles se obtienen a partir de chapas planas dispuestas en hojas cortadas o bobinas. Se pueden clasificar en tres categorías principales:

- Perfiles anchos: se trata de productos con un ancho elevado (aproximadamente 600 a 1500 mm) que presentan múltiples ondas de forma equivalente o similar. A esta categoría pertenecen, en particular, los perfiles utilizados en cubiertas y recubrimiento de fachadas.
- Tubos: se trata de productos de sección cerrada fabricados mediante un proceso de perfilado con soldadura en continuo.
- Perfiles estrechos: productos de sección abierta o cerrada, sin soldadura, que no presentan una forma de onda repetida. Esta categoría comprende, entre otros, los perfiles de estructura, los conductos de cables, las bandas de carretera, etc.

Como se ha visto anteriormente, los perfiles no tienen que ser forzosamente abiertos, sino que existe una gran variedad de productos cerrados, conseguidos ya sea por costura como por soldadura.

Los últimos avances y el mayor control del proceso han conseguido crear perfiles curvos. Es decir, no tener perfiles rectos sino perfiles con ciertos radios de giro provocados conscientemente por el diseñador.

Las máquinas de perfilado normalmente funcionan a temperatura ambiente, aunque en algunos casos, como en el caso de aleaciones de titanio es necesario deformar a temperaturas algo más elevadas que la temperatura ambiente, hecho que hace que el diseño de las máquinas sea diferente y más complicado.

#### 4.5.3.2 Lubricación

En un proceso de perfilado se procura que la presión ejercida por los rodillos sobre la chapa sea lo menor posible y que la zona de deformación de ésta sea la utilizada para arrastrarla durante el proceso. Pero es imposible que no exista contacto entre el rodillo y la chapa, y que se produzca fricción por la diferencia de velocidades entre un punto y otro incluso en un mismo rodillo. Por tanto hay zonas en las que la chapa desliza y se crea fricción, marcando la chapa.

Este es el motivo de la importancia de la lubricación. Los lubricantes tienen muchas funciones a realizar, pero la más importante es disminuir la fricción entre los rodillos y la chapa, tanto en las zonas de contacto sin deformación como en las zonas de contacto con deformación. Si reducimos esta fricción se minimiza el riesgo de creación de marcas sobre la chapa y aumentamos la vida de los rodillos.

Otro tema importante a considerar es el que ocurre cuando la chapa a conformar está pintada o galvanizada, porque con mucha probabilidad puede ocurrir que fragmentos superficiales de la chapa se queden pegados a la superficie de los rodillos y dañen el acabado superficial de la chapa, y provoquen que esos mismos rodillos puedan manchar o estropear futuras piezas. La complicación que presenta la extracción de estos fragmentos de la superficie de los rodillos es muy grande.

Por todos estos motivos es fundamental utilizar lubricantes durante el proceso, a parte de otras muchas ventajas que ofrece el uso de los mismos, como:

- Protección del perfil durante todo el proceso de conformación.
- Protección de los rodillos, evitando daños y minimizando el desgaste.
- Refrigeración del proceso, evitando la acumulación de calor y los daños que éste podría causar.

- Limpieza de las herramientas, piezas, ejes y áreas relacionadas.
- Evita la corrosión durante y después del proceso de fabricación.

#### 4.5.3.3 Componentes principales de una línea de perfilado

Una línea de perfilado se puede dividir en 4 partes principalmente: Sección de entrada de material, máquina de perfilado, prensa de corte (cutoff press) y sección de salida.

En la sección de entrada de la línea de perfilado, el material debe de ser alimentado en forma de hoja, transferido directamente de otra operación, como el perforado, o mas comúnmente, alimentado desde una bobina de material.

En la máquina de perfilado, mas conocida como la estación de rodillos, podemos encontrar:

- Un sistema que propulsa los rodillos y conduce el material.
- Un freno que previene que el proceso continúe en curso después del apagado.
- Un sistema de refrigeración y lubricación, que reducen el desgaste por abrasión y, los requerimientos de energía, así como la acumulación de material sobre los rodillos.
- Después del último sistema de rodillos se encuentra un enderezador.

El tercer elemento principal de la línea de perfilado es la prensa de corte. Puesto que el perfilado es un proceso continuo, se utilizan frecuentemente matrices de corte al aire. Este tipo de matrices aceleran la velocidad de las tiras, sincronizándolas con el material, para realizar el golpe de corte.

La sección de salida es la cuarta etapa en el proceso y así como el corte, puede afectar a la velocidad máxima de la línea. Normalmente las piezas perfiladas, salen de la línea en una mesa o rodillo de donde se quitan manualmente.

A continuación se comentarán algunos de los órganos principales que se pueden encontrar en la máquina de perfilado o puntos de especial importancia o, simplemente, que presenten algún aspecto de diseño que pueda resultar de especial interés.

#### **Construcción modular**

La máquina, generalmente, está construida en módulos para simplificar y estandarizar la fabricación de las piezas, y facilitar el montaje. Los módulos

---

estándar consisten en dos soportes, uno fijo y otro móvil, con los engranajes de transmisión y ejes necesarios.

El soporte fijo permite disponer de dos etapas de rodillos y dos engranajes locos para la transmisión del movimiento. El soporte móvil es más simple y presenta una etapa por soporte.

#### 4.5.3.4 Clasificación de las distintas máquinas

El diseño, construcción y comercialización de estas máquinas es de forma individual, es decir, que cada máquina vendida es un proyecto en si misma, ya que se realiza una máquina diferente para cada pedido. A pesar de que existen gran cantidad de factores que intervienen en el diseño y resulta difícil estandarizarlas, se intenta conseguir crear la máquina por módulos idénticos para conseguir una mayor estandarización.

La vida de este tipo de máquinas es muy larga, teniendo un mercado de venta muy amplio y variado, debido a la posibilidad de conseguir perfiles diferentes y complejos de manera casi ilimitada.

La máquina perfiladora de chapa más comúnmente utilizada, tiene un número de etapas comprendido entre 5 y 15, cada una de las cuales, formada por una pareja de rodillos montados uno sobre el otro. Uno de los lados es ajustable mientras que el otro es fijo. La flexibilidad de esta construcción permite al diseñador utilizar suficientes etapas para satisfacer las necesidades del perfil.

En algunas ocasiones se construye la máquina de forma modular; esta disposición permite añadir una longitud adicional a la base, que a su vez, permite añadir etapas adicionales para una posible necesidad futura.

La clasificación de las máquinas de perfilado que se muestra a continuación, hace referencia al conformado en frío. La clasificación de este tipo de máquinas puede realizarse de acuerdo a varios parámetros que se verán a continuación.

#### **Según el tipo de alimentación:**

##### **Método de material pre-cortado**

Máquinas que hacen servir láminas de chapa con las dimensiones iniciales. Este tipo de máquinas, o células de conformado, necesita normalmente un sistema de almacenamiento y alimentación para introducir la chapa precortada en la máquina. Las velocidades que suelen conseguir estas máquinas suelen estar comprendidas entre 15 y 75 m/min, es importante destacar que esta velocidad es constante, es decir, la máquina no se detiene en ningún momento. Suele ser necesario también

un transportador exterior para el perfil obtenido y un sistema de almacenaje posterior.

Este método se suele usar para operaciones de bajo volumen o cuando es difícil conseguir el suficiente espacio como para lograr que todo el proceso (tanto la bobinadora, como operaciones externas al perfilado que deban ser incluidas en el perfil) se consiga de forma progresiva mediante una disposición en serie. A menudo el material precortado se obtiene de una bobina y una cortadora de chapa externas, que trabajan de forma independiente suministrando la chapa con las dimensiones necesarias para perfilar.

Se trata de un sistema relativamente barato, ya que las opciones complementarias se pueden realizar de forma totalmente independiente, y la máquina cortadora solo necesita una matriz cortante recta de características muy simples. Los inconvenientes de este método es que la logística necesaria para conseguir una buena productividad es bastante compleja, ya que el material realiza saltos de una máquina a otra, y por lo tanto el tiempo perdido en la manipulación de la chapa es bastante elevado. A esto se le debe añadir que, la longitud del producto final como mínimo tiene que ser dos veces la amplitud del perfil, y que es más difícil conseguir tolerancias precisas, por lo tanto es necesario un mayor número de etapas para conseguir el mismo perfil pero usando el método post-cortado.

#### Método de material post-cortado

Máquinas que usan una bobina de chapa. Esta chapa entra a la máquina desde una bobinadora de forma continua y el tamaño final del perfil se consigue con el posterior corte del perfil (en una máquina cortadora).

Este es el método más eficiente y productivo. Los inconvenientes es que es necesaria una bobinadora, una máquina de perfilar, una máquina cortadora y una mesa con rodillos que permita trasladar el perfil, y todo esto, junto con otros procesos que puedan ser necesarios, dispuestos de forma continua o con elementos que permitan agilizar los codos.

El coste de los elementos necesarios y el tiempo de intercambio de una herramienta o máquina son mayores que en el sistema pre-cortado, pero el incremento de la eficiencia del proceso de post-cortado equilibra esta limitación. Por esta razón, este método es el más utilizado de cara a grandes volúmenes de producción de un perfil, donde el cambio de las herramientas es de forma muy puntual.

El sistema de precorte tiende a producir un pliegue en el extremo del perfil mayor que los sistemas con corte posterior. Por esta razón, a pesar que la guillotina del sistema de post corte suele ser más cara que una usada en máquinas de precorte, se suele utilizar más el post cortado.

---

### **Según el soporte de los rodillos:**

Las máquinas perfiladoras de rodillos pueden clasificarse también según el método usado para soportar los rodillos de conformación.

#### **Rodillos en voladizo:**

- Máquinas de un solo rodillo en voladizo.

Estas máquinas tienen un solo soporte fijo y los rodillos de conformación están en voladizo. Está pensada para la creación de pequeños perfiles y de poco espesor, donde las fuerzas no son muy grandes.

La ventaja de este tipo de máquinas es principalmente una mayor facilidad de montaje, menor coste, menor ocupación de espacio y un rápido intercambio de rodillos.

- Máquinas de doble rodillo en voladizo

Estas máquinas presentan un solo lado donde se soportan los rodillos, y estos se fijan en voladizo a este lado fijo.

Estas máquinas suelen utilizarse para formar chapas de poco espesor y de gran longitud, donde solo los laterales son deformados, quedando totalmente plana la zona central. Por esta razón es muy común que estas máquinas se presenten en parejas simétricas. Ambos lados de los soportes suelen estar ubicados en una bancada que presenta un sistema de guiado que permite alejar o separar ambos soportes, y así poder deformar chapas de ancho variable.

Otra característica de estas máquinas es el soporte central que impide que la chapa se abombe por el peso en la zona central.

#### **Máquinas de doble soporte:**

Este tipo de máquinas es el más tradicional y utilizado. Cada etapa de rodillos está soportada por dos lados, uno fijo y el otro móvil. Se puede conseguir deformar perfiles de gran espesor y tamaño. El soporte móvil se puede ajustar en amplitud mientras que el otro queda fijo.

### **Según la disposición de las caras de deformación:**

Como se comentó anteriormente, las máquinas más comunes son las de doble soporte con varias etapas y montadas sobre una mesa. La forma en la cual las etapas están montadas determina otro grupo de este tipo de máquinas.

---

De soportes fijos:

Este tipo de máquinas presenta ambos soportes de rodillos fijos. Son construidas y diseñadas para conformar un solo perfil, y por lo tanto para que el cambio de rodillos no sea un hecho común. Suelen ser utilizadas para grandes producciones y su coste es bastante bajo, en comparación con los otros tipos.

Convencional:

Este es el tipo de máquina más usado. Consiste en un soporte fijo y uno móvil, que permite un cambio relativamente rápido de rodillos. Por lo tanto, se suelen utilizar para requisitos donde el cambio de perfil sea una opción.

#### 4.5.4 Aplicaciones en la industria

Los productos perfilados son elementos muy importantes en muchos sectores industriales, tales como: construcción, automoción, industria naval, electrónica, maquinaria... Su aplicación está muy extendida: desde piezas estructurales como vías de tren o marcos de puertas y ventanas, hasta perfiles especiales para aplicaciones específicas. Las principales aplicaciones se muestran a continuación:

Chapas de cubierta:

Es un producto destinado a cubiertas y cerramientos. Se caracteriza por su elevada durabilidad, resistencia y ligereza, además de su facilidad de montaje.

Perfiles de cubierta:

Los perfiles más utilizados son los denominados "tipo c" y "tipo z". Se trata de perfiles idóneos para la construcción de cubiertas de tipo industrial, ofreciendo una resistencia de carga adecuada para el reducido peso por metro lineal que tienen estos perfiles, lo que se traduce a su vez en una mayor facilidad de montaje con respecto a otros perfiles.

Rematería:

La rematería son el conjunto de perfiles, principalmente de acero galvanizado y prepintado, formados mediante pliegues y destinados a cumplir funciones de aireación, evacuación del agua, y cierre de huecos en obra.

Tubos:

---

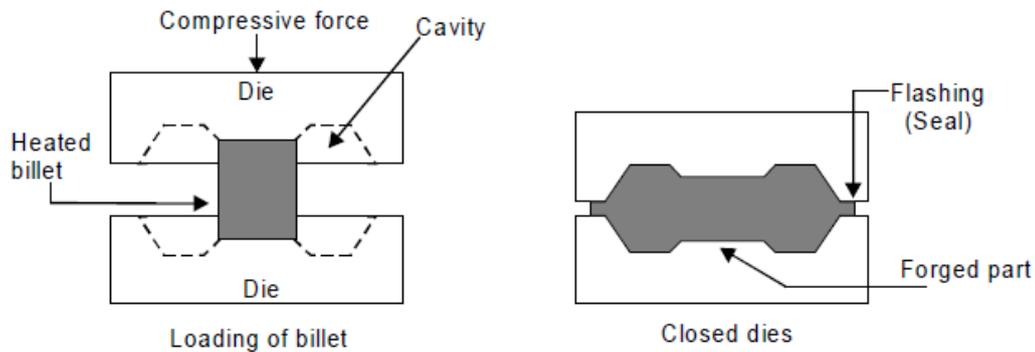
Existe una gran variedad de tamaños, espesores y formas de tubos que se pueden fabricar mediante el conformado por perfilado. Un ejemplo son los tubos de ocho ángulos utilizados como ejes para las puertas y contraventanas.

## 5. FORJA Y EXTRUSIÓN

### 5.1 Forja

#### 5.1.1 Fundamentos

Es el procedimiento por el cual damos forma a los metales mediante golpes, generalmente manteniendo el material a alta temperatura. Hay dos tipos de forja manual o automática en función de la herramienta empleada en el forjado.



*Fig. 5.1. Estampación en molde cerrado. R. Singh, Introduction to Basic Manufacturing Processes and Workshop Technology, 2006.*

#### 5.1.2 Objetivos

##### 5.1.2.1 Afino de grano

Los materiales de grano fino tienen más resistencia y más tenacidad que los de grano grueso. Durante la forja los granos se alargan y se subdividen en granos menores de forma regular. A este fenómeno se le llama *recristalización o afino de grano*. Si el material está muy caliente los granos se unen entre sí, resultando un crecimiento de grano que tiende a fragilizar al material.

##### 5.1.2.2 Reducción de forja

Es el resultado de dividir la sección inicial por la final. La *reducción de forja* tiene un valor mínimo para asegurarse que se ha conseguido un afino de grano en toda la

---

masa. Actualmente se trabaja con reducciones de 2 a 4. La reducción de forja mínima se entiende que se refiere el lingote como material de partida. Si se recalca un lingote y luego se estira para dejarlo en la misma forma inicial, aparentemente no ha existido reducción de forja, pero en realidad si la ha habido, ya que al aplastar el lingote ha aumentado su sección y al estirar lo ha disminuido.

### 5.1.2.3 Aproximación a la forma

Esto se puede conseguir trabajando el material por estirado, recalcado, punzonado, ranurado, desplazado, doblado, cortado, virado, etc.

### 5.1.2.4 Conformación por estampación

Es la fabricación en serie de piezas idénticas, previamente esbozadas mediante forja. Para ello este esbozo se coloca a la temperatura de forja, entre dos medias matrices con sendas cavidades para alojar la pieza una vez definida y de dimensiones adecuadas teniendo en cuenta la contracción del material a estampar

Dado que el objetivo del *estampado* es la obtención de piezas iguales al hueco, parece que el procedimiento intuitivo es colocar sobre la matriz la cantidad de material justa para llenar el hueco y golpear después con el martillo; ahora bien, nunca conseguiríamos una distribución exacta del material por lo que se pone más material del necesario, eliminando después rebabas.

## 5.1.3 Tipos de forja

### 5.1.3.1 Forja abierta

Con éste método se obtienen las mejores propiedades que pueden obtenerse de un determinado material. Se utilizan cavidades sencillas con el objeto de:

1. Aproximar a la forma una pieza que luego será terminada por estampación
2. Forjar piezas de tamaño grande
3. Series pequeñas

### 5.1.3.2 Estampación

Se utilizan matrices cerradas o *estampas*. Se destinan a la producción de:

1. Piezas en serie.

---

2. Geometrías complejas.

### 5.1.4 Tecnología de la forja

#### 5.1.4.1 Temperatura de forja

La temperatura de forja del acero es entre 1.100 y 1.350 °C. La máxima temperatura viene condicionada por el peligro de sobre calentar o quemar el acero y por la formación de mucha cascarilla, que será tanto mayor cuanto menor sea el contenido en carbono del acero.

Se suele considerar como seguro unos 200 °C debajo del punto de sólido en las aceros al carbono. En aceros especiales con otros elementos de aleación, el límite es de unos 50 a 70 °C menos que las que tienen el mismo contenido en carbono. Es muy importante que la temperatura de forja sea homogénea en toda la pieza.

#### 5.1.4.2 Fases de la estampación

La forja requiere ciertas operaciones posteriores para dejar las piezas en condiciones de recibir otros procesos. Por ejemplo, a continuación de la estampación es necesario cortar las rebabas y realizar tratamientos térmicos. Las fases de la estampación varían según sea en frío o caliente. El ciclo genérico para el estampado en caliente es el siguiente:

- a) Cortar el trozo de material previsto
- b) Forjado a la temperatura adecuada
- c) Estampar a la temperatura adecuada
- d) Cortar rebabas
- e) Normalizar, bonificar o recocer
- f) Decapar o granallar para eliminar cascarilla
- g) Control

#### 5.1.4.3 Normas generales

Algunos criterios fundamentales para la forja, son los siguientes:

- a) Para obtener las mejores propiedades mecánicas posibles del material, es muy importante que la orientación de las fibras sea la adecuada para las condiciones de trabajo.

- b) Conforme aumentan las dimensiones y peso de las piezas es fundamental adoptar en los calentamientos y enfriamientos las debidas precauciones para evitar la tendencia de los aceros a agrietarse.

#### 5.1.4.4 Forjabilidad del material

Entre los factores que influyen en la forjabilidad del acero, es fundamental la influencia de las impurezas entre los constituyentes de los aceros, cuya presencia de suele ser nociva, en particular el oxígeno y el desequilibrio entre las proporciones de azufre y manganeso. En todo trabajo de responsabilidad deberían estudiarse experimentalmente los ciclos de calentamiento.

La forjabilidad del acero se determina mediante ensayos de torsión y de tracción en caliente.

##### 1) Torsión en caliente.

Permite determinar la *temperatura óptima de forjado*. En general puede decirse que el número de torsiones hasta la rotura va aumentando al elevarse la temperatura hasta que lleguemos a un punto crítico, a partir del cual el número de vueltas disminuye, por agrietamiento intergranular. Se ha verificado que esta temperatura coincide con la *temperatura óptima* de forja. Es muy importante evitar la oxidación del material; esto se logra mediante una corriente de hidrógeno.

##### 2) Tracción en caliente.

Permite determinar las siguientes características:

- 1) Carga de rotura
- 2) Alargamiento
- 3) Estricción

#### 5.1.4.5 Tratamientos térmicos

Aunque el trabajo se realice totalmente a temperaturas superiores a la de recristalización, siempre queda el material con alguna acritud, tanto mayor cuanto mayor haya sido la deformación producida por el trabajo, menor haya sido la temperatura de fin de trabajo y más rápido el enfriamiento.

En este sentido, son muy importantes los tratamientos térmicos posteriores o intermedios cuya finalidad es la reducción de las tensiones internas del producto acabado. El más utilizado es el recocido, con el cuál se busca una estructura de grano fino.

Por el contrario, sobre todo en aceros de más del 0,9% de C, si el recocido se hace a altas temperaturas (superiores a 750 °C), se corre el peligro que la cementita no se disuelva en la austenita dando una estructura frágil de perlita rodeada de cementita.

Al terminar el trabajo en caliente y para enfriar el material hasta la temperatura ambiente, hay que tomar precauciones especiales, tendiendo siempre a enfriar lentamente para:

- a) Evitar que se produzcan grietas por dilataciones desiguales, temple o por desprendimiento de gases.
- b) Para evitar que el material quede con tensiones que puedan originar posteriormente grietas.
- c) Para evitar que el material quede excesivamente duro y no se pueda mecanizar.

#### 5.1.4.6 Acabado de productos

##### Inspección

El material forjado debe someterse a una inspección para descubrir los defectos superficiales e internos. Los defectos *superficiales* se detectan por inspección ocular, magnética, o con líquidos penetrantes. Se facilita la inspección pasando el material previamente por un chorro o arena o granalla.

Algunas muestras pueden atacarse en ácido clorhídrico al 50%, a 75 °C durante un período de tiempo de 20 a 60 minutos; de esta forma aparecen muy claramente los defectos superficiales, pero la pieza queda destruida. Los defectos *internos* se detectan con rayos X, isótopos, ultrasonidos y examen macrográfico de secciones.

#### 5.1.5 Defectos de forja

##### 5.1.5.1 Defectos superficiales

###### 1) Grietas transversales abiertas.

Debidas a agrietamiento de los lingotes, al exceso de azufre en el material, a la oxidación del material por sobrecalentamiento o a la permanencia durante excesivo tiempo en el horno.

###### 2) Grietas transversales finas.

Debidas a forja con el corazón más frío que el borde.

3) Grietas longitudinales abiertas aisladas.

Debidas a lingote agrietado.

4) Grietas longitudinales finas.

Debidas a enfriamiento rápido.

5) Grietas en forma de tenedor.

Proceden de grietas transversales en los lingotes que se alargan después del estirado o de una laminación previa.

6) Grietas en las esquinas.

Se deben a poros superficiales del lingote, descubiertos en el horno al formarse las cascarillas, que luego se oxidan.

7) Superficie esponjosa.

Debidas al mismo motivo anterior.

8) Surcos longitudinales.

Debidos a poros superficiales del lingote, descubiertos por oxidación en el horno y alargados por fuerte estirado o laminación previa.

9) Hojas.

Debidas a pliegues y rebabas de los lingotes.

10) Pliegues.

Procedentes de la laminación previa, por llenado excesivo de canales plegados en la pasada siguiente, o por solapes de forja.

11) Cascarilla.

Aparece al forjar.

### 5.1.5.2 Defectos internos

1) Grietas internas laterales.

Debidas a forjar con el corazón más caliente que el borde.

2) Grietas internas centrales.

Aparecen como defectos de la operación de forja.

3) Copos.

Grietas debidas a hidrógeno, permanencia insuficiente en el horno o enfriamiento demasiado rápido.

- 4) Descarburación.  
Surgen por permanencia excesiva en el horno en atmósfera oxidante.
- 5) Porosidad.  
Poros internos del lingote.
- 6) Segregación.  
Surgen debido a una solidificación irregular.
- 7) Estructura dendrítica.  
Forja insuficiente.
- 8) Carburos.  
Surgen por falta de uniformidad en la composición del material.
- 9) Inclusiones.  
Debidas a inclusiones en los lingotes.

### 5.1.5.3 Problemas en el forjado

- Falta de material.  
Solución: aumentar el espesor inicial
- Tocho demasiado grande  
El material fluye desde el centro hacia los laterales.
- Llenado defectuoso de la cavidad del molde  
Radios de acuerdo demasiado afilados impiden que el material “siga” bien la forma del molde, y la pieza quede con defectos de llenado.

### 5.1.6 Prensas para forja

#### 5.1.6.1 Accionamiento

Las prensas para forja suelen ser mecánicas, hidráulicas, neumáticas o, menos corrientemente en la actualidad, a vapor, en función del tipo de trabajo que deban

realizar. Las prensas de forja suelen ser de accionamiento por *biela y manivela*, debido a los elevados esfuerzos y rapidez de funcionamiento que estas admiten

#### 5.1.6.2 Bastidor

Las prensas se construyen normalmente con uno o dos montantes. Es deseable que las prensas sean lo más rígidas posible. Como criterio de economía, se diseñan los bastidores de tal manera que se aproveche el material de forma óptima, con el mínimo peso, bajo el criterio de *mínima deformación*.

## 5.2 Extrusión

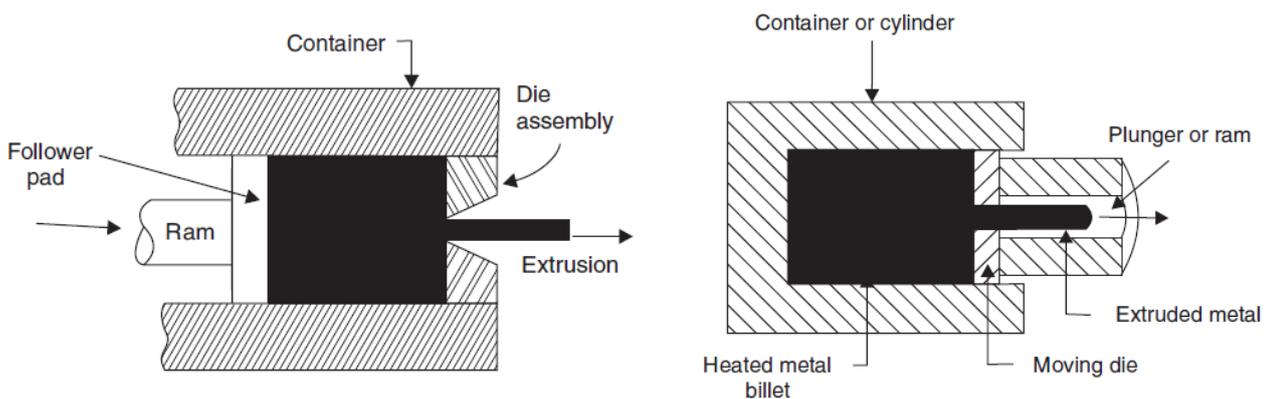
Es un método de conformación que permite obtener piezas con diversos metales, con acabados superficiales de buena calidad, ajustadas tolerancias y altas resistencias mecánicas.

Consiste en hacer fluir un metal en forma de palanquilla a través del orificio de una matriz, con una sustancial reducción de sección, mediante algún sistema que le transmita gran cantidad de energía en poco tiempo.

### 5.2.1 Clasificación

Según diferentes aspectos, los sistemas de extrusión admiten diversas clasificaciones, que pueden presentarse bajo diversas combinaciones entre si.

Método	Desplazamiento	Temperatura	Lubricación
Por presión	Directo	En frío	Con lubricación
Por choque	Inverso	En caliente	Sin lubricación
Hidroestática			



**Fig. 5.11. Tipos de extrusión: directa (izquierda) e indirecta (derecha)**

---

## 5.2.2 Procedimientos

### 5.2.2.1 Extrusión por presión

Se realiza con prensas horizontales o verticales, hidráulicas o mecánicas. Puede utilizarse para extrusión en frío o en caliente. El metal cortado de forma conveniente se coloca en el interior de un cilindro *contenedor*, y un émbolo obliga al metal bajo una gran presión a pasar por una hilera, de la que toma la forma.

En caliente se suele realizar la extrusión de barras de diversos perfiles y de tubos. Las barras, de sección redonda, cuadrada, hexagonal, etc., suelen ser acabadas por trefilado. Los tubos pueden ser posteriormente recocidos o no.

Para la fabricación de tubos la palanquilla será previamente taladrada, para permitir que el metal fluya entre las paredes de la hilera y la aguja.

### 5.2.2.2 Extrusión por choque

El material de partida (*tocho* o *peón*) se obliga a fluir entre las paredes de la matriz y el punzón, mediante una alta presión producida por un choque. Permite construir piezas huecas o macizas, abiertas por un extremo o por ambos.

La operación es muy rápida (décimas de segundo). En general se utiliza para procesos “en frío”, vale decir por debajo de la temperatura de recristalización.

### 5.2.2.3 Directa

El material fluye en el mismo sentido que el punzón. Este es de altura reducida y robusto. Este sistema permite obtener piezas de alturas 20 a 25 veces su diámetro, hasta unos 120 a 150 mm de diámetro y hasta 450 mm de alto. De esta manera se fabrican barras macizas de sección constante. Debido al rozamiento del tocho con las paredes de la matriz, se eleva la temperatura lo cual ayuda a la extrusión, pero aumenta el consumo de energía. Para obtener piezas con un extremo cerrado, se parte de un material prematrizado en forma de copa (procedimiento Hooker).

### 5.2.2.4 Inversa

El material fluye en sentido inverso que el punzón. La matriz es poco profunda, y el punzón es bastante esbelto. Como el material no tiene movimiento relativo contra la matriz, el rozamiento y la generación de calor es menor. Se utiliza fundamentalmente para la fabricación de tubos de aluminio. Para facilitar la fluencia

del material, el cuerpo del punzón suele ser más pequeño que la base, llamada *oliva*, que es la que define el diámetro interior de la pieza.

El espesor de la pieza resulta igual al huelgo entre macho y hembra. Los menores espesores son del orden de 1/200 del diámetro del punzón para estaño y plomo (unos 0,3 mm) y 1/100 para cinc y aluminio (unos 0,08 mm en Al). La relación altura/diámetro máxima es del orden de 6 a 7 para Al, ya que mayores alturas provocarían el pandeo del punzón.

En la práctica, la fuerza de las prensas limita el uso de la extrusión inversa con aluminio a diámetros de 125 / 140 mm y alturas de 250 / 300 mm.

\* *Ventajas*

1. Disminuye la tendencia a la aparición de grietas en los extremos.
2. Disminuye el consumo de energía (25 a 30 % menos).
3. La presión de extrusión NO es función del largo del tocho.
4. La vida útil del utillaje aumenta

### 5.2.2.5 Extrusión en caliente

En general se utiliza para la producción de barras de sección constante. La extrusión en caliente puede directa o inversa, lubricada, no lubricada o hidráulica.

Este último caso puede considerarse una extensión de la extrusión con lubricación; como la pieza a formar está totalmente rodeada de líquido, se deben utilizar medios hidráulicos capaces de soportar las altas temperaturas.

La temperatura depende del material y del proceso; como guía pueden darse los siguientes valores:

Material	Temperaturas de extrusión °C
Aleaciones de plomo	90-260
Aleaciones de magnesio	340-430
Aleaciones de aluminio	340-510
Aleaciones de cobre	650-1100
Aleaciones de titanio	870-1040
Aleaciones de níquel	1100-1260
Aceros	1100-1260

### 5.2.2.6 Extrusión en frío

Usualmente se realiza a temperaturas ambiente y las calidades superficiales que se logran son elevadas. Para la extrusión en frío de aceros suele usarse lubricantes jabonosos. Los esfuerzos que se generan son muy elevados: los punzones, de acero rápido tratado, alcanzan presiones desde 34,5 Mpa para metales blandos hasta 3.100 Mpa para aceros. En función de las formas de la pieza, la extrusión puede ser directa, inversa o combinaciones de ambas.

\* *Resistencia del producto final*

La deformación en frío (por debajo de la temperatura de recristalización) se traduce en un incremento de la acritud y, con ello, de la dureza. Aparece un aumento de la dureza de un acero de 0,1 %C: al llegarse a reducciones del orden del 90 %, la dureza aumentó hasta 2,5 veces la original. Puede verse que la distribución es bastante irregular, debido a las tensiones residuales internas.

Junto con la dureza, también aumenta la resistencia a la tracción: reducciones de sección de un 25 % aproximan el límite elástico la resistencia a la tracción. Esto permite que con este procedimiento de fabricación se obtengan piezas de alta resistencia y/o bajo peso. Sin embargo, esto implica una reducción del alargamiento a la rotura y la resiliencia, por lo que generalmente es necesario un recocido de normalización por debajo de la temperatura de recristalización. Este tratamiento en general no afecta notablemente a la resistencia.

### 5.2.2.7 Extrusión sin lubricación

Se suele utilizar para el conformado de piezas de aluminio en caliente. Se obtienen acabados superficiales de gran calidad.

### 5.2.2.8 Extrusión con lubricación

Para la extrusión de aleaciones de cobre y titanio y aceros (inoxidables, aleados y de herramientas) se utilizan lubricantes, con dos propósitos fundamentales: lubricar y aislar a la matriz de las altas temperaturas del tocho. En función de las temperaturas, los lubricantes recomendables son:

- |          |   |  |
|----------|---|--|
| < 1000°C | { | Lubricantes grasos, grafito, molibdeno, mica, talco, bentonita, asfaltos y plásticos. Poseen poca capacidad aislante.  |
| > 1000°C | { | Vidrio en casquillos o lana, basalto y polvo de cristal. El vidrio es altamente efectivo para titanio y acero, por su capacidad aislante que protege las matrices. |

### 5.2.2.9 Extrusión hidrostática

A diferencia de la extrusión lubricada, en ésta la pieza está totalmente rodeada de líquido, prácticamente no existe rozamiento de la pieza con el molde.

- \* *Ventajas* ✓ Mayores presiones
  - ✓ Mayores relaciones de extrusión (o menores temperaturas)
- \* *Inconvenientes*
  - ✗ Problemas de sellado del fluido (2 Mpa)
  - ✗ Aumenta el manipuleo por la inyección y extracción del líquido
  - ✗ Mayor volumen del utillaje
  - ✗ Problemas al extruir a altas temperaturas

La extrusión a altas temperaturas obligó a recurrir a fluidos que soportaran las temperaturas de trabajo: ceras y grasas, grasas jabonosas de petróleo, bentonita, polímeros de alto peso molecular (polietileno), sales y vidrio. En frío se usa el aceite de castor, porque es buen lubricante y no su viscosidad no es afectada por la presión.

Debido al bajo rozamiento y a que la presión hidrostática aumenta la ductilidad de los materiales, con éste método es posible extruir materiales frágiles como berilio y molibdeno, que con los métodos comunes se fragilizan en exceso y se agrietan.

## 5.2.3 Tecnología de la extrusión

### 5.2.3.1 Grado de deformación

La *relación de extrusión* se define como:

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

donde :  $A_0$  y  $A_f$  son las secciones inicial y final.

Para un material dado, el grado de deformación asequible dependerá de la temperatura y la presión a los que se encuentren. Para piezas de sección circular y en frío, pueden tomarse como guía:

<b>Material</b>	<b>Relación de extrusión</b>
Aluminio 1100	40

---

Acero 1018	5
Acero inoxidable	3.5

En función de la deformabilidad de cada material, podrán obtenerse piezas de formas más o menos complicadas.

### 5.2.3.2 Fuerza de extrusión

Para el cálculo de la potencia de una prensa para extrusión, conviene contemplar un amplio margen de reserva, pues una pieza mal colocada o una sobre carga por rotura de la herramienta puede ocasionar sobrecargas de elevado valor. Para este cálculo se parte de la *resistencia a la deformación*  $K_f$  (para materiales perfectamente elasto-plásticos) y la *resistencia media a la deformación*  $K_{fm}$  (para materiales endurecibles con la deformación).

Estos valores vienen dados en función de la máxima deformación verdadera  $\varphi$  donde  $L_f$  y  $L_0$  son las longitudes final e inicial respectivamente:

$$\varphi = \ln \frac{A_0}{A_f} = \ln \frac{L_f}{L_0}$$

Para deformaciones ideales, sin rozamiento y con ángulos de extrusión pequeños, la *presión de extrusión* puede calcularse con la relación:

$$p = u = k_f \cdot \ln (A_0 / A_f) = k_f \cdot \ln R = k_f \cdot \varphi$$

donde

- $p$  presión de extrusión
- $u$  energía para la deformación plástica de la unidad de volumen
- $k_f$  tensión en el límite elástico para materiales perfectamente plásticos (se sustituye por  $k_{fm}$  para materiales con acritud)

Para los casos en que se contempla el rozamiento la fórmula aplicable es

$$p = k_f(a + b \cdot \ln R)$$

donde  $a$  y  $b$  son constantes experimentales con valores aproximados de:

$$a = 0,8 \text{ y}$$

$$b = \text{entre } 1,2 \text{ y } 1,5.$$

Igualmente  $k_f$  es sustituido por  $k_{fm}$  en los materiales endurecibles. El valor de resistencia a la deformación  $k_f$  se puede obtener por ensayo de la curva de fluencia.

La fuerza necesaria para la extrusión se obtiene de:

$$F = p \cdot A_0$$

### 5.2.3.3 Trabajo de extrusión

La fuerza en el punzón varía poco a lo largo del proceso de extrusión. Por ello, el *trabajo de extrusión* será simplemente:

$$T = F w$$

donde:  $w$  recorrido de trabajo del punzón.

### 5.2.4 Prensas

Pueden ser hidráulicas o mecánicas. Estas últimas suelen de pórtico, accionadas por cigüeñal y palanca acodada. Son muy utilizadas ya que permiten mayores velocidades que las hidráulicas y son compatibles con otros procesos.

Si bien desarrollan grandes fuerzas, su gran limitación son las bajas carreras que permiten. Esto las hacen especialmente aptas para la extrusión inversa.

Las dos palancas están articuladas en el eje O; una apoya en el dosel (eje  $O_1$ ) y la otra en la corredera (eje  $O_2$ ). Una biela une al cigüeñal con la articulación O. Al girar, el cigüeñal transmite un esfuerzo de tracción a las dos palancas que, al ponerse en línea recta, transmiten el máximo esfuerzo a los ejes  $O_1$  y  $O_2$ .

Como el primero es fijo, todo el esfuerzo se transmite a la corredera portapunzones. La carrera de la corredera se regula mediante la cuña entre el dosel y la articulación superior.

Este tipo de prensa se utiliza generalmente en procesos en frío. Las elevadas energías que desarrollan son capaces de elevar la temperatura de la pieza hasta 170°C en aluminio y 300°C en aceros. Esto ayuda a la conformación de la pieza.

El ritmo de producción que se alcanza es elevado, entre 1.000 y 3.000 piezas por hora. Si bien el utillaje es barato, la extrusión por choque exige el empleo de prensas potentes (de 5.000 a 60.000 kN), por lo que sólo es aplicable para la fabricación de grandes series.