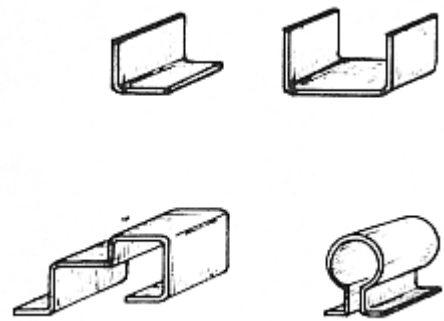


DOBLADO Y CURVADO. GENERALIDADES

1. FUNDAMENTOS

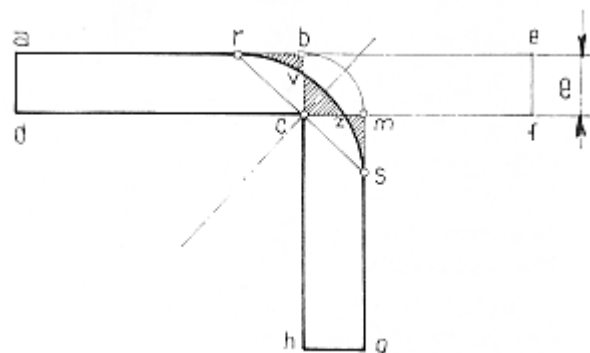
El doblado y curvado son operaciones que consisten en obtener una pieza de chapa con generatrices y bordes rectilíneos, sin someter el material a grandes desplazamientos moleculares en el transcurso de la operación. Las figuras muestran ejemplos típicos de piezas obtenidas por doblado: observar que las generatrices correspondientes al doblez siempre son rectilíneas; se denomina **doblado** cuando el doblez se hace en ángulo vivo o con un radio muy pequeño, y **curvado** cuando el doblez es de gran radio. Estas operaciones también pueden ser realizadas con alambres y tubos (doblar o curvar alambres, curvar tubos, etc.).



En la operación de doblado, en realidad, hay una ligera deformación del material, es decir, un ligero desplazamiento molecular en aquella parte en la que se efectúa el doblez; comprenderemos mejor el problema si analizamos detalladamente la operación; para ello distinguiremos un doblez en ángulo vivo y un doblez en ángulo redondeado.

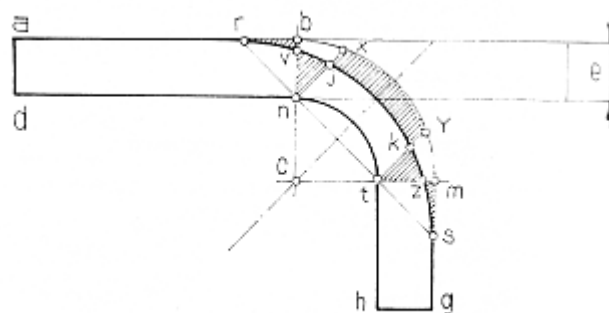
1.1. DOBLEZ EN ÁNGULO VIVO

Si deseamos obtener la pieza doblada **adgh** a partir de la chapa **adef**, doblando en arista viva, teóricamente, si se conservase uniforme el espesor de la chapa, la parte **bcef** pasaría ahora a ocupar la posición **emgh** y, por consiguiente, faltaría el material en la esquina **bcm**. En la práctica no ocurre así, sino que se produce un adelgazamiento de la chapa desde **r** a **s**, que puede alcanzar valores de hasta el 50 por 100 del espesor **e**, es decir, el material que ocupa el triángulo curvilíneo **vcz** es equivalente al material de los triángulos curvilíneos **rbv** y **zms**; por lo tanto en esta zona hay un desplazamiento molecular que puede originar el agrietado de la chapa por la parte exterior del doblez. Para evitar este inconveniente se sustituye el doblez en ángulo recto por el doblez en ángulo redondeado.

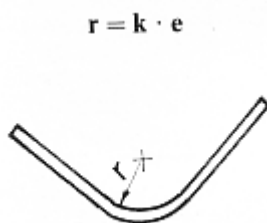


1.2. DOBLEZ EN ÁNGULO REDONDEADO

Con un radio interior **cn = e**, como mínimo, la disminución del espesor de la chapa en el doblez no sobrepasa el 20 por 100 de **e**, y si se hace el radio interior **cn = 5e**, la disminución de dicho espesor sólo alcanza el valor del 5 por 100 de **e**. Esto indica que el desplazamiento molecular es mucho menor que en el primer caso; en la siguiente figura se muestran las zonas de deformación de la chapa: el material correspondiente a los triángulos **vjn** y **ktz** es aportado por los triángulos **rbv** y **zms** y la zona **xykj**; razón por la cual el doblez en ángulo redondeado sustituye al doblez en ángulo vivo.



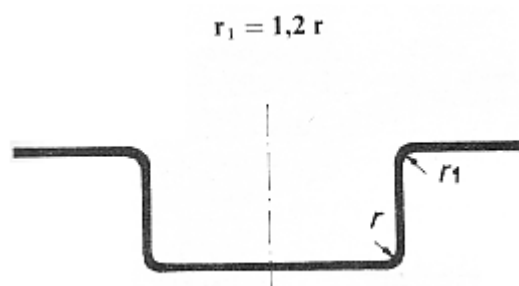
Radio mínimo de doblado. Para evitar que se formen grietas en el doblez, hay que garantizar un radio mínimo **r**, cuyo valor será:



siendo:

Material	k
Cobre	0,25
Latón agrio	0,4
Latón recocido	0,3
Acero suave	0,5
Acero semiduro	0,6
Acero duro	0,7

En los dobleces múltiples en un solo golpe de prensa, los radios que queden hacia afuera, se hacen por lo menos de:



A pesar de estas precauciones, cuando se desee garantizar una cierta uniformidad de espesor de chapa, conviene utilizar un radio mínimo no inferior al espesor de la chapa a doblar.

2. CÁLCULO DE DESARROLLOS

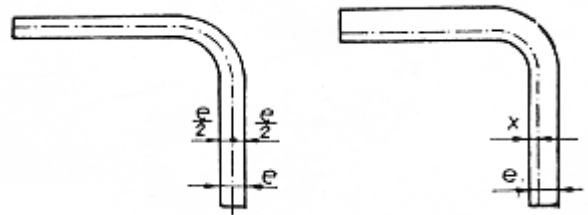
Para obtener una pieza doblada hay que partir de una pieza plana con el perfil adecuado, a este perfil plano se le denomina **desarrollo** de la pieza a obtener.

El citado desarrollo se calcularía con arreglo a la línea media del espesor de la chapa si el doblado conservase dicho espesor, y así se hace, cometiendo un error despreciable, cuando se trata de doblar chapa fina de espesor $e \leq 2$ mm. Para espesores mayores, dada la importante reducción que experimenta el espesor en el doblado, se debe considerar para el desarrollo una línea más próxima al interior, pudiendo adoptar para cálculos preliminares los siguientes valores:

- $x = 1/2 e$ (para chapa hasta de 2 mm.)
- $x = 3/7 e$ (para chapa de 2 a 4 mm.)
- $x = 1/3 e$ (para chapa de más de 4 mm.)

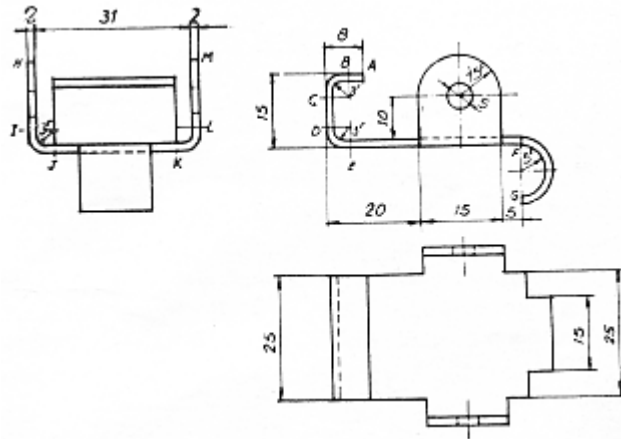
y en general:
$$x = \frac{e}{3} \cdot \sqrt[4]{\frac{r_i}{e}}$$

siendo r_i el radio interior.



Una vez conocida la posición de la **línea de desarrollo**, fácilmente se puede calcular éste; para ello basta con determinar la longitud de dicha línea y considerar la pieza desdoblada, es decir, abatidas sus caras sobre el plano horizontal.

Ejemplo. Calcular el desarrollo de la pieza representada en la figura adjunta, construida en chapa de 2 mm de espesor.



Resolución: Como el espesor de la chapa es de 2 mm, se calculará el desarrollo de acuerdo con el que corresponde a la línea media, resultando:

$$AB = 8 - (3 + 2) = 3,00 \text{ mm}$$

$$BC = 0,5 \times \pi \times r = 0,5 \times 3,14 \times 4 = 6,28 \text{ mm}$$

$$CD = 15 - (5 + 5) = 5,00 \text{ mm}$$

$$DE = 0,5 \times 3,14 \times 4 = 6,28 \text{ mm}$$

$$EF = (15 + 15 + 5) = 35,00 \text{ mm}$$

$$FG = \pi \times r = 3,14 \times 6 = 18,84 \text{ mm.}$$

por lo tanto, el desarrollo en el sentido longitudinal será:

$$L_1 = AB + BC + CD + DE + EF + FG = 3 + 6,28 + 5,00 + 6,28 + 35,00 + 18,84 = 74,40 \text{ mm}$$

Por otra parte, se tiene:

$$HI = (10 + 7,5) - 3 = 14,50 \text{ mm}$$

$$IJ = 0,5 \times 3,14 \times 4 = 6,28 \text{ mm}$$

$$JK = 31 - (2 \times 3) = 25,00 \text{ mm}$$

$$KL = 0,5 \times 3,14 \times 4 = 6,28 \text{ mm}$$

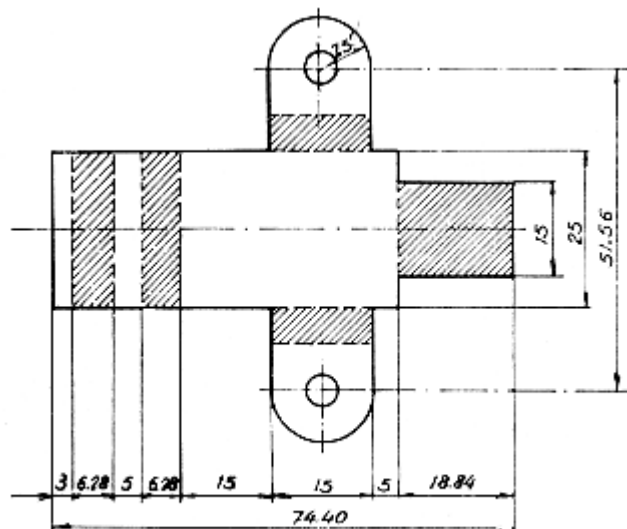
$$LM = (10 + 7,5) - 3 = 14,50 \text{ mm}$$

Sumados estos desarrollos parciales se tendrá:

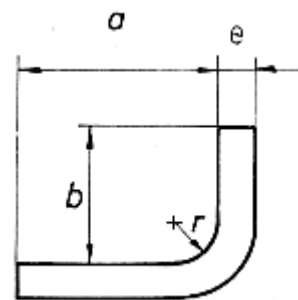
$$L_2 = HI + IJ + JK + KL + LM =$$

$$14,50 + 6,28 + 25,00 + 6,28 + 14,50 = \boxed{66,56 \text{ mm}}$$

La figura muestra la representación gráfica del desarrollo: las partes rayadas corresponden al desarrollo de los dobleces o curvas en la pieza.



Si desea obtener un desarrollo más riguroso, es necesario tener en cuenta, además del valor del espesor de la chapa, el radio interior del doblado, las características elásticas del material y del mismo ángulo de doblado. Tratándose de chapa de acero doblado a 90°, se podría calcular con bastante exactitud el desarrollo L del doblez por medio de la expresión: $L = a + b + K_1 \times K_2$ siendo a y b las cotas de las alas dobladas según la figura adjunta y estando constituido el término $K_1 \times K_2$ por el factor K_r , que depende del espesor e de la chapa y de su radio interior r de doblado, y el factor K_2 , dependiente del % de alargamiento del material. Los valores de K_1 y K_2 se encuentran en las siguientes tablas.

COEFICIENTE K_r

$r \backslash e$	0,5	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5
4,5	-1,770	-1,664	-1,275	-0,720	-0,308	-0,178	+0,112	+0,376	+0,639	+0,900
4	-1,570	-1,452	-1,060	-0,543	-0,132	-0,040	+0,287	+0,598	+0,804	+1,058
3,5	-1,358	-1,240	-0,845	-0,366	-0,006	+0,222	+0,462	+0,720	+0,968	+1,206
3	-1,146	-1,028	-0,630	-0,189	+0,170	+0,404	+0,636	+0,913	+1,132	+1,354
2,5	-0,935	-0,816	-0,415	-0,012	+0,346	+0,586	+0,811	+1,065	+1,296	+1,522
2	-0,729	-0,604	-0,200	+0,165	+0,522	+0,768	+0,826	+1,287	+1,460	+1,680
1,75	-0,618	-0,498	-0,107	+0,254	+0,610	+0,859	+1,073	+1,232	+1,542	+1,759
1,5	-0,513	-0,392	+0,015	+0,343	+0,698	+0,950	+1,161	+1,409	+1,624	+1,838
1,25	-0,407	-0,355	+0,123	+0,432	+0,786	+1,041	+1,248	+1,495	+1,706	+1,917
1	-0,302	-0,180	+0,230	+0,321	+0,874	+1,132	+1,336	+1,381	+1,788	+1,996
0,75	-0,196	-0,074	+0,338	+0,610	+0,862	+1,223	+1,423	+1,667	+1,870	+2,065
0,5	-0,090	+0,022	+0,445	+0,698	+1,050	+1,314	+1,510	+1,754	+1,952	+2,154
0,25	+0,016	+0,128	+0,552	+0,788	+1,138	+1,405	+1,598	+1,839	+2,034	+2,233
0	+0,010	+0,200	+0,560	+0,860	+1,140	+1,401	+1,650	+1,940	+2,216	+2,420

COEFICIENTE K_2

Alargamiento %	5	10	15	20	25	30	35	40	45
Cuando K_1 es positivo	1,2	1,15	1,1	1,05	1	0,95	0,9	0,85	0,8
Cuando K_1 es negativo	0,8	0,85	0,9	0,95	1	1,05	1,1	1,15	1,2

Ejemplo. Calcular el desarrollo de una pieza de alas iguales (a-b) de 25 mm de longitud cada una, sabiendo que se trata de chapa de acero de 4 mm de espesor y 3 mm de radio interior, y que posee un alargamiento del 15 %.

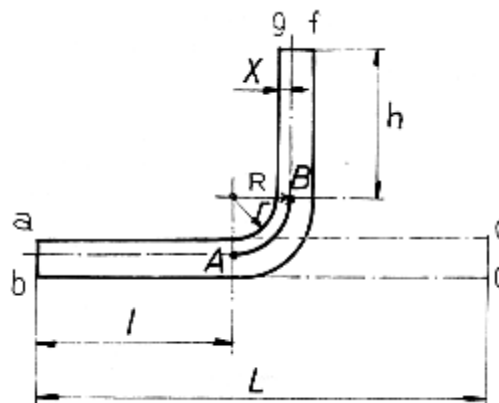
Resolución: El valor de K_1 para el espesor de 3 mm y el radio de 4 mm tiene un valor positivo de: $K_1 = + 1,132$

y para K_1 positivo y chapa de acero con el 15 % de alargamiento le corresponde un valor de K_2 de 1,1 por lo tanto, el desarrollo será:

$$L = a + b + K_1 \times K_2 = 25 + 25 + 1,132 \times 1,1 = 50 + 1,24 = \boxed{51,24 \text{ mm}}$$

2.1. DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA LÍNEA DE DESARROLLO

En el número anterior se dieron valores aproximados de la distancia de la línea de desarrollo a la cara interior de la pieza doblada. Naturalmente estas distancias dependen del espesor de la chapa a doblar, así como de su naturaleza e incluso radio de curvatura; por esta razón, es recomendable realizar algunas pruebas prácticas de doblado con pequeñas tiras del mismo material que se va a doblar y a la vista de los resultados obtenidos determinar la posición exacta de la línea de desarrollo.



Para hacer la experiencia, basta con coger una pequeña tira de chapa **abcd** y doblarla con el radio interior r , que se desee, obteniendo entonces la pieza doblada **abfg**. Naturalmente la longitud L del desarrollo ha de coincidir con la longitud de la línea correspondiente a la pieza doblada; por consiguiente, podremos escribir:

$$L = l + \frac{2 \cdot \pi \cdot R}{4} + h$$

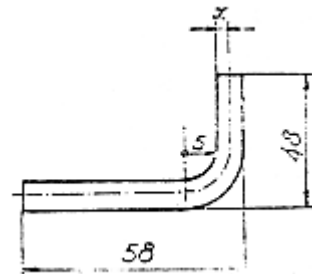
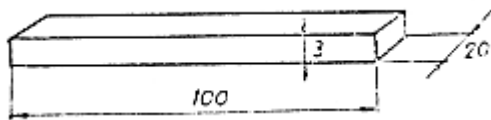
y también: $2L = 2l + \pi R + 2h$

de donde se deduce: $R = \frac{2(L - l - h)}{\pi}$

siendo $R = r + x$, resultara finalmente: $x = R - r = \frac{2(L - l - h)}{\pi} - r$

Lo más preciso es calcular la longitud AB por la expresión; $AB = L - (l + h)$

Ejemplo. Determinar la distancia X de la línea de desarrollo de la cara interior de una pletina de acero de 100 x 20 x 3, que una vez doblada, quedó a las dimensiones que se indican en la figura.



Dimensiones finales

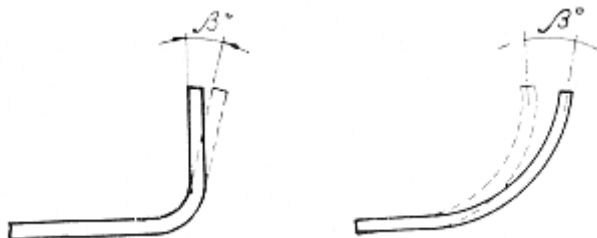
Resolución: aplicando la fórmula:

$$x = R - r = \frac{2(L - l - h)}{\pi} - r$$

Se tiene $x = \frac{2 \cdot (100 - 50 - 40)}{3,14} - 5 = 6,3 - 5 = 1,3 \text{ mm}$

3. RECUPERACION ELÁSTICA DESPUÉS DEL DOBLADO

Toda pieza doblada tiende a recuperar ligeramente su forma primitiva tan pronto como el útil doblador deja de ejercer su acción sobre ella.



Por consiguiente, el ángulo de la matriz conviene que sea ligeramente menor que el ángulo definitivo a que ha de quedar la pieza. Esta recuperación del material es debida a la elasticidad del mismo y depende, por lo tanto, en primer lugar, de la clase de material y su estado (recocido o agrio); en los materiales recocidos, el ángulo β de recuperación es menor que cuando están agrios; también depende del espesor de la chapa: a menor espesor, mayor ángulo β de recuperación y finalmente, depende del radio de curvatura, teniendo éste una gran influencia sobre el ángulo β de recuperación, o sea que **a mayor radio de curvatura le corresponde mayor ángulo de recuperación.**




El citado ángulo β de recuperación puede oscilar entre 1° o menos hasta 10° ; depende de los factores anteriormente mencionados. Para tener una idea exacta de su valor, conviene realizar un ensayo previo de doblado y controlar sobre éste dicho ángulo. El siguiente cuadro proporciona algunos valores orientativos de la recuperación elástica de los materiales de uso corriente.

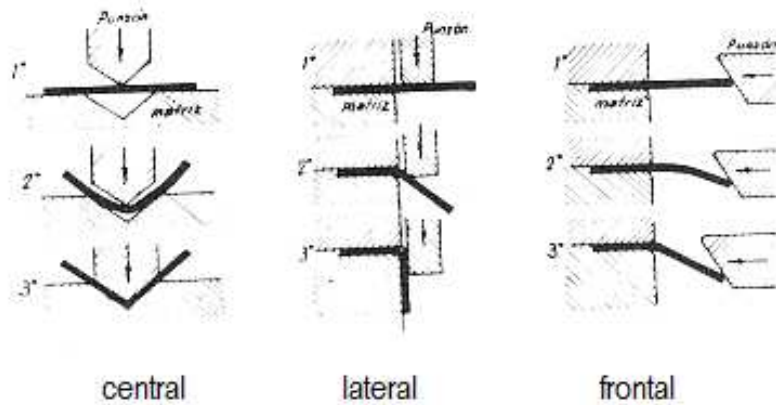
**RECUPERACION ELASTICA
DEL MATERIAL DOBLADO**

Espesor e de la chapa	Radio interior r	Material doblado		
		Acero suave: aluminio β	Acero semiduro: latón agrio β	Acero duro β
$\leq 0,8$	$r < e$ $e < r \leq 5e$ $r > 5e$	4°	5°	7°
		5°	6°	9°
		6°	8°	12°
de 0,8 a 2	idem	2°	2°	4°
		3°	3°	5°
		4°	5°	7°
< 2	idem	0°	0°	2°
		1°	1°	3°
		2°	3°	5°

4. MÉTODOS DE DOBLADO

Las figuras inferiores muestran las tres formas básicas de acción del punzón para efectuar un doblado o curvado, en sus respectivas fases inicial, intermedia y final, denominándose los distintos sistemas:


-  doblador de acción central o doblador en V: es empleado preferentemente en el doblado de largos perfiles
-  doblador de acción lateral o doblador en L o U, con el que se obtienen perfectos doblados, debido al pequeño brazo de palanca bajo el que actúa el punzón; este sistema es el más empleado para la obtención de pequeñas piezas dobladas
-  doblador de acción frontal, utilizado preferentemente en el doblado de perfiles cerrados y curvados.



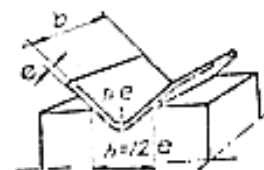
Naturalmente en un mismo útil doblador se pueden emplear uno, dos o los tres sistemas.

5. ESFUERZOS DE DOBLADO

Las fuerzas de doblado F_d se pueden calcular con suficiente aproximación utilizando las siguientes fórmulas:

-  Para el doblado en V, siendo la abertura de la V en la matriz de $h = 12e$ y sus bordes redondeados con un radio $r = 2e$

$$F_d = \frac{K_c \cdot b \cdot e}{8} = 0,1 \sigma_B \cdot b \cdot e$$



siendo: σ_B la resistencia a la tracción, K_c la resistencia de rotura al cizallamiento, b la longitud a doblar (mm) y e el espesor de chapa. La siguiente tabla proporciona los valores de K_c :

Material	$K_c(Kg/mm^2)$		
	Material recocido (en frío)	Material agrio (en frío)	Material caliente (a 900°)
Aluminio	9	16	Sólo para chapas gruesa de ac ro
Duraluminio	18	40	
Cobre	20	30	
Plomo	3	—	
Latón	28	38	
Cinc	14	20	15
Acero dulce	33	45	
Acero semiduro	50	70	
Acero duro	70	90	
Acero inoxidable	50	56	

Para otro dimensionado de la matriz en V, se puede aplicar la siguiente fórmula, que proporciona valores con suficiente aproximación:

$$F_d = \frac{1,33 \cdot b \cdot e^2 \cdot K_c}{h - 1,4 r}$$

Para el doblado en L, es decir, por acción lateral, se utiliza la fórmula:

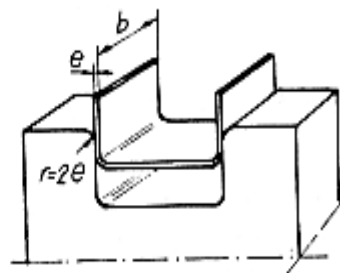
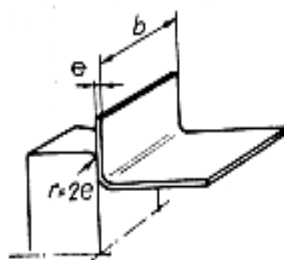
$$F_d = \frac{K_c \cdot b \cdot e}{2}$$

siendo el radio de la matriz $r = 2 e$.

para el doblado en U:

$$F_d = K_c \cdot b \cdot e$$

siendo el radio de la matriz $r = 2 e$.



K_C es la resistencia al cizallamiento, y las fórmulas son válidas en el supuesto de que el radio interior del doblado sea al menos $r = e$; para mayores radios, el esfuerzo es menor.

El esfuerzo de doblado desarrollado en un útil doblador de acción frontal es muy variable y depende además, de la clase de operación a realizar, es decir, según se trate de doblado, curvado o enrollado.

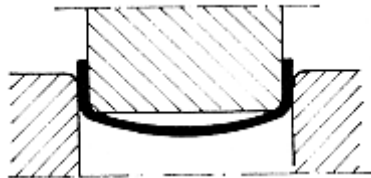
Ejemplo. Calcular la fuerza necesaria para doblar una chapa de acero semiduro ($K_C = 50 \text{ Kg/mm}^2$) de 4 mm de espesor y 1 metro de longitud, siendo el radio interior $r = 5 \text{ mm}$ y la abertura de la matriz $h = 60 \text{ mm}$.

Resolución: Aplicando la anterior fórmula, se tiene:

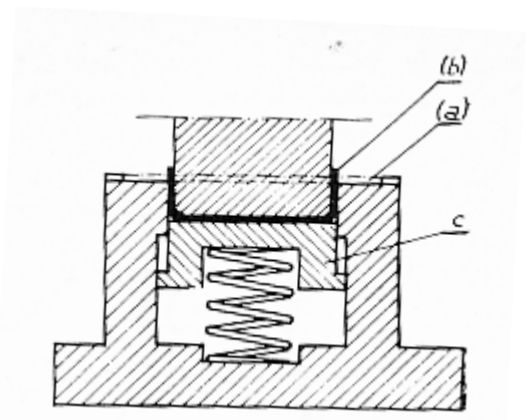
$$F_d = \frac{1,33 \times 1.000 \times 4^2 \times 50}{60 - 1,4 \times 5} = 20.000 \text{ Kg}$$

5.1. FUERZA DEL SUJETACHAPA

En el caso del doblado en L o en U, para evitar la deformación de la chapa es conveniente que el sujeta-chapa presione sobre aquella con la fuerza de un 40 % del valor de la **fuerza de doblado**.



Nota: A los útiles dobladores en U se les suele colocar un expulsor, que tiene doble finalidad: expulsar la pieza después de doblada y evitar que ésta se curve durante el doblado. Por esta última razón la fuerza con que debe actuar dicho expulsor también será, al menos, el 40 % de la fuerza de doblado. En estos casos, la fuerza total que ha de vencer la prensa será: fuerza de doblado + fuerza de los muelles del expulsor.



Nota: Observar que la fuerza de doblado es una fracción de la fuerza necesaria para cortar la misma longitud de una chapa de idénticas características.