

ARTICULO DE PLEGADO

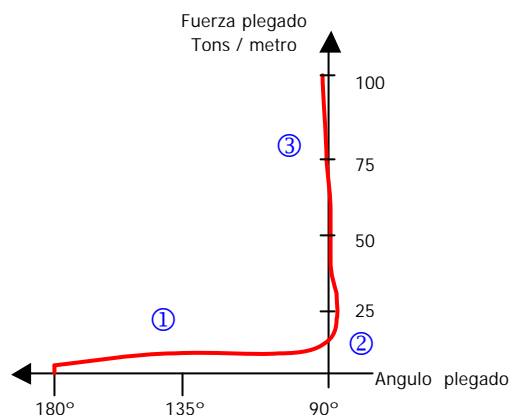
El plegado de chapa con un punzón y una matriz montados en una plegadora es un hecho bastante natural y habitual. En principio no parece que esta operación sea complicada y difícil. No obstante, el plegado de chapa no es tan simple como parece.

Muchos operarios encuentran inexplicables problemas durante el proceso de plegado. Por ejemplo, problemas como que no se obtienen los perfiles deseados, que el perfil está fuera de las tolerancias dimensionales que se exigen, marcas en las piezas o roturas durante el proceso de plegado.

A continuación explicaremos que existen tres tipos de plegado en relación a la fuerza de plegado aplicada.

Tipos de plegado

Al realizar un plegado de una chapa en una plegadora, esta se ve sometida a una presión gradual al estar situada entre el punzón y la matriz. El plegado de la pieza estará en relación con la fuerza aplicada. Esto podría ser representado en un gráfico donde se tenga en cuenta los grados a los que se pliega la chapa y la fuerza aplicada.



Entendemos que la chapa plana se corresponde con 180° . Lo primero que observamos en el gráfico es que para empezar a plegar necesitamos una cierta cantidad de fuerza. Una fuerza inferior a esta no produce deformación en la chapa cuando la fuerza cesa. Esto se debe a la elasticidad del material.

A medida que prosigue el plegado la fuerza debe aumentar hasta los 135° aproximadamente. A partir de aquí la fuerza necesaria desciende ligeramente hasta los 100° . A esta zona le llamaremos región 1.

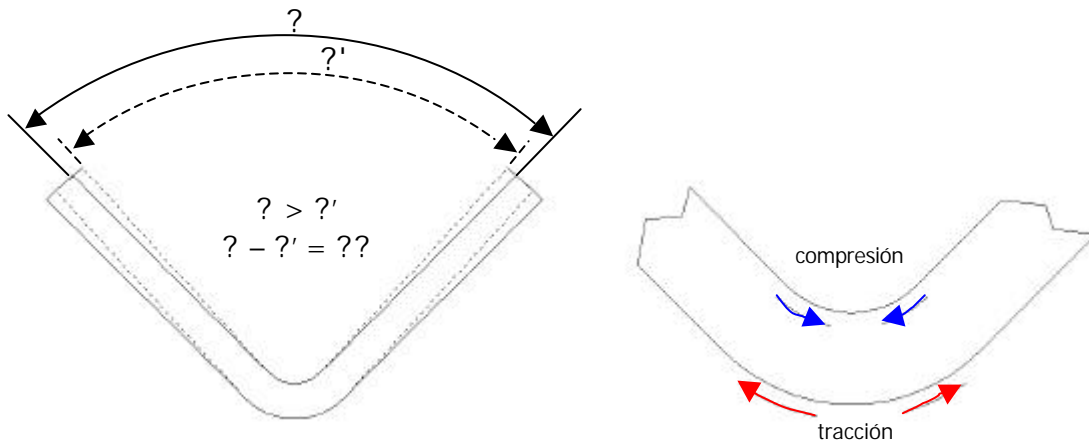
A partir de este punto a medida que desciende el ángulo de plegado aumenta la fuerza necesaria. Para conseguir plegar los 90° necesitamos una fuerza superior a la necesaria para conseguir 130° . La fuerza necesaria para plegar 90° se denomina "fuerza necesaria". Si seguimos presionando la pieza llegaremos a unos pocos grados por debajo de los 90° . A esta zona le llamaremos región 2.

Si seguimos aplicando más fuerza el ángulo de plegado volverá a ser otra vez 90° . La fuerza necesaria será una 6 veces mayor que la "fuerza necesaria". En esta zona para conseguir una pequeña variación en el ángulo de plegado es necesario un incremento muy grande de fuerza. A esta zona le llamaremos región 3.

A las regiones 1, 2 y 3 les llamaremos plegado parcial, plegado a fondo y acuñado o estampado. A partir de este punto al plegado parcial y al plegado a fondo los unificaremos y nos referiremos a ellos como plegado al aire.

Retorno elástico

En la figura inferior podemos observar el efecto del retorno elástico de una pieza plegada. Las líneas continuas representan el ángulo θ de la chapa cuando está siendo plegada, es decir, mientras la chapa está siendo presionada entre el punzón y la matriz. Las líneas discontinuas representan el ángulo θ' de la pieza después de ser plegada, cuando la chapa no está sometida a presión.



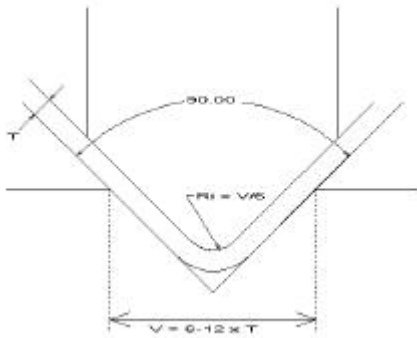
Cuando realizamos un plegado, la elasticidad de la chapa no se elimina aunque el esfuerzo producido en la chapa haya excedido el límite elástico. Podemos considerar al límite elástico como el punto donde la chapa cede al esfuerzo. La plasticidad está más allá de ese punto. Este es el motivo del retorno elástico.

En la figura superior podemos ver que al realizar un plegado la parte interior de este es comprimida y la parte exterior es extendida o alargada. Entre estas caras existe un plano intermedio, llamado neutro, en el cual no se produce ni compresión ni extensión. Cuando una chapa es plegada, los esfuerzos que son opuestos actúan en la cara interior y exterior de la chapa. En general, la resistencia a la compresión de la chapa es mucho mayor que su resistencia a la tracción (extensión). La presión ejercida deformará permanentemente la parte exterior de la chapa, pero la parte interior no llega al límite elástico. Por tanto, la parte interior tiende a recuperar su forma inicial. Puesto que el esfuerzo es una fuerza de resistencia que actúa en oposición a la fuerza externa aplicada, el esfuerzo de compresión actúa hacia fuera de la cara interior. Este esfuerzo de compresión se convierte en retorno elástico.

Plegado fondo

El plegado a fondo es uno modo de plegado muy habitual porque se puede plegar con precisión con un tonelaje relativamente bajo.

En la figura inferior la 'T' representa el espesor, la 'V' la anchura de la matriz y R_i el radio interior de plegado de la pieza. La anchura de la V adecuada varía con el espesor de la chapa. En la tabla podemos observar la relación de la anchura de la V con relación al espesor de la chapa. Observamos que a mayor espesor de chapa mucho mayor debe ser la V. Existen otros aspectos a tener en cuenta para escoger la V adecuada para realizar un plegado que serán comentados más adelante.



Espesor (T)	0,5-2,5	3,0-8,0	9 - 10	> 12
V=	6 x T	8 x T	10 x T	12 x T

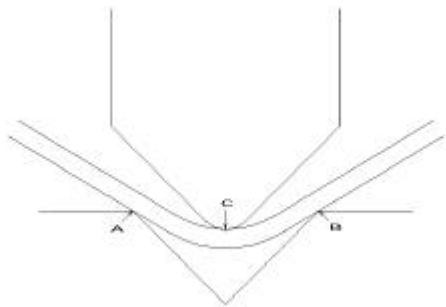
Por experiencia se sabe que en este tipo de plegado el radio interior de la chapa plegada es un sexto de la anchura de la V ($R_i = 1/6 \times V$). Por otro lado sabemos que la V varía entre 6 y 12 veces el espesor de la chapa. Por tanto, el radio interior de plegado variará entre un valor igual al espesor de la chapa (espesores finos) y el doble del espesor de la chapa (espesores gruesos).

$$R_i = \frac{V}{6} = \frac{6 T}{6} = T \quad \text{y también} \quad R_i = \frac{V}{6} = \frac{12 T}{6} = 2T$$

En este tipo de plegado se ha de tener en cuenta el retorno elástico del material. Este es el motivo por el que existen utilajes con diversos ángulos similares (90° - 88° - 85°).

Plegado parcial

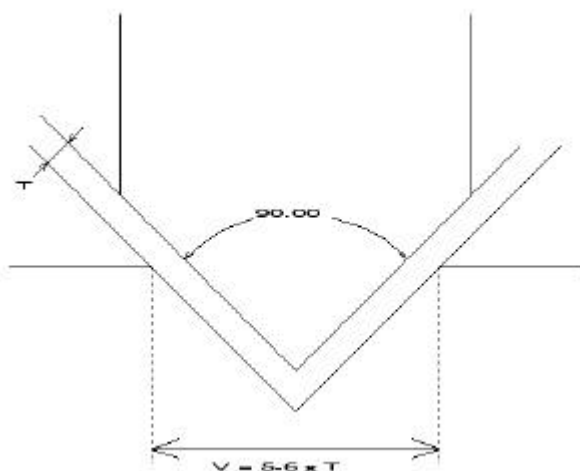
El nombre de plegado parcial se debe al hecho de que la chapa durante el plegado está en contacto con 3 puntos (A, B y C del dibujo inferior) del utilaje.



Con este método de plegado es posible plegar una gran variedad de ángulos. Por ejemplo, con un punzón y una matriz de 30° podemos realizar cualquier plegado desde 180° (chapa plana) hasta un plegado de 30° . Esto lo conseguiremos controlando la penetración del punzón en la matriz. Para ello necesitaremos una plegadora con Control Numérico para que este control sea fácilmente realizable. Con este tipo de plegadoras podremos programar diferentes plegados aunque estos tengan diferentes ángulos de plegado ya que para cada uno de ellos programaremos la profundidad correspondiente. Por otro lado este tipo de plegado permitirá compensar el retorno elástico ya que solo debemos corregir la profundidad de plegado.

Acuñado / Estampado

En el método de acuñado conseguimos 2 ventajas; una precisión muy alta y un radio de plegado muy pequeño. En el dibujo observamos el momento en que está acuñando la



chapa y que el pequeño radio del punzón penetra en la chapa. Si además le aplicamos un gran tonelaje eliminaremos los posibles efectos del retorno elástico de la chapa. Este es el motivo por el cual el acuñado necesita un tonelaje entre 5 y 8 veces superior al del plegado a fondo.

Para este tipo de plegado la anchura de la V suele ser de 5 veces el espesor de la chapa para reducir la penetración de la punta del punzón en la pieza

reduciendo el radio interno de plegado. También conseguiremos aumentar la presión al reducir el área de contacto de la matriz.

Como ya se ha comentado con este sistema de plegado es necesario una plegadora de gran tonelaje. En función del tonelaje de la plegadora tendremos el límite del espesor de chapa a plegar. Otro de los factores que determinarán el límite de que espesor podemos plegar es el límite de fuerza que puede soportar el tablero superior ("trancha") que suele ser de unas 100 toneladas por metro.

Características generales del plegado al aire y el acuñado

De una forma sencilla podríamos decir que la diferencia entre un plegado al aire y el acuñado es que en el primero es donde existe "aire" en algún lugar entre la matriz y la chapa. De todas formas más adelante explicaremos en detalle los 3 tipos de plegado.

Las características principales del plegado al aire son:

- ❑ La fuerza de plegado es relativamente pequeña. Por tanto la plegadora no deberá ser de gran tonelaje, lo que abaratará el precio de esta. Podríamos decir que es un sistema de plegado económico
- ❑ Hay que tener muy en cuenta el retorno elástico del material para poder obtener una buena precisión en el plegado

Las características principales del acuñado son:

- ❑ Es necesario una plegadora de gran tonelaje, de unas 5 a 8 veces más que una plegadora pensada para plegar al aire. Por tanto el coste de la plegadora será elevado.
- ❑ La precisión de plegado es muy buena, independientemente del retorno elástico. El utillaje debe ser acorde de las necesidades de este tipo de plegado.

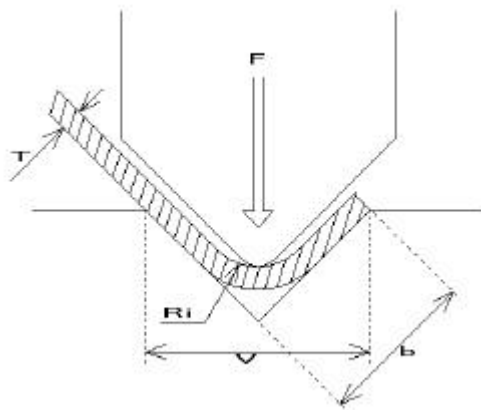
Debido a los adelantos de la tecnología actualmente se tiende a plegar al aire. La mayoría de plegadoras tienen control numérico (CNC), ya sea por que son nuevas o porque a las más antiguas se les ha adaptado uno. Por tanto el problema del retorno elástico se suele compensar fácilmente mediante el CNC tal como hemos explicado en el apartado del plegado parcial.

Tabla de plegado

La tabla de plegado es un instrumento básico para realizar cualquier operación de plegado. A continuación explicaremos la información que nos puede suministrar y la relación entre diversos parámetros que aparecen y que influyen en el plegado.

La tabla de plegado nos muestra la fuerza de plegado necesaria por metro para un plegado al aire. Los valores que podemos obtener son:

- ❑ Espesor (T) de la chapa expresado en mm en la columna de la izquierda.
- ❑ Anchura de la V de la matriz en la primera fila expresada en mm. Se muestran las V standards que se suelen comercializar.
- ❑ Ala mínima de plegado (b) que se puede plegar. Medida exterior expresada en mm. Para realizar un plegado con precisión y seguridad es necesario que durante todo el proceso de plegado la chapa se encuentre siempre apoyada en los extremos de V de la matriz. En caso contrario la chapa se puede deslizar hacia el interior de la matriz y por tanto la línea de plegado puede cambiar y ser peligroso.



- ❑ Radio interno (R_i) de plegado de la chapa que se obtendrá. Como hemos mencionado anteriormente el radio de plegado es aproximadamente una sexta parte de la anchura de la V .
- ❑ Fuerza de plegado por metro necesaria para plegar acero de 45-50 Kg/mm² . Para determinar la fuerza necesaria primero se ha de determinar la V necesaria para el espesor T de la chapa que queremos plegar. Seguir en horizontal la línea del espesor de chapa hasta que se encuentre con la columna correspondiente a la V seleccionada. Por ejemplo, si escogemos una $V=12$ para plegar chapa de 2 mm de espesor encontraremos que la fuerza necesaria es 22 Toneladas por metro. Si el espesor T es 6 y la $V=50$ la fuerza necesaria será de 48 Toneladas por metro.

Relación entre Fuerza de plegado F y la anchura de la matriz V

Para plegar chapa de 1 mm de espesor podemos utilizar una V de 6 o de 8 mm. La fuerza necesaria es de 11 Tons y 8 Tons respectivamente. Observamos que para un mismo espesor de chapa cuando aumentamos la anchura de la V disminuye el tonelaje necesario. Esto sucederá siempre. Por tanto, decimos que la Fuerza necesaria F es inversamente proporcional a la anchura de la matriz V. Esto se expresa:

$$F_2 = F_1 \frac{1}{(V_2/V_1)} = F_1 \frac{V_1}{V_2}$$

Relación entre Fuerza de plegado F y el espesor de chapa T

Si con una misma anchura de matriz $V = 12$ plegamos chapa de 1 y de 2 mm de espesor observamos que la fuerza necesaria es de 6 y 22 Tons respectivamente. Con una $V = 32$ al plegar chapa de 3 y de 4 mm de espesor necesitamos 19 y 34 toneladas respectivamente. Observamos que la fuerza proporcionalmente ha aumentado mucho más que lo que ha aumentado el espesor. En el primer caso el espesor se ha doblado y la fuerza se ha multiplicado por 4. En el segundo caso el espesor aumenta un 33% pero la fuerza aumenta casi un 80%. La relación entre la variación del espesor y de la fuerza viene determinada por el cuadrado del espesor de chapa. Esto se expresa como:

$$F_2 = F_1 \times (T_1/T_2)^2$$

Relación entre Fuerza de plegado F y la longitud de plegado de chapa l

La fuerza necesaria de la tabla es la fuerza necesaria para plegar chapa de 1 m de longitud. La fuerza total de plegado de una chapa es directamente proporcional a la longitud de plegado. Esto quiere decir que si queremos plegar chapa de 1,2 mm de espesor con una $V = 8$ necesitaremos una fuerza de 12 Tons por metro (T/m). Si la longitud que queremos plegar es de 2.400 mm necesitaremos una fuerza total de $2,4 \text{ m} \times 12 \text{ T/m} = 28,8 \text{ Tons}$. Esta relación se expresa como: $F_{\text{TOTAL}} = l \times F_{\text{TABLA}}$, siendo l la longitud a plegar expresada en metros y F_{TABLA} el valor de Tons/m que aparece en la tabla.

Este dato nos indicará la fuerza total necesaria para realizar la pieza. Como límite superior nos encontraremos el tonelaje máximo de nuestra plegadora.

Para plegar longitudes pequeñas el tonelaje será pequeño, lo cual resulta engañoso con relación al tonelaje máximo que puede soportar un punzón o una matriz. Para saber si estos pueden soportar el tonelaje se han de comparar siempre para la misma longitud de plegado. Por ejemplo, si necesitamos 8 tons para realizar una plegado de 100 mm esto implica que el utillaje que utilizemos debe soportar como mínimo 80 Tons por metro. Esta es muchas veces la causa de deteriorar utillaje de plegadora.

T	V	4	6	7	8	10	12	14	16	18	20	25	32	40	50	63	80	100	125	160	200	250	
	B	2,8	4,0	5,0	5,5	7,0	8,5	10	11	13,5	14	17,5	22	28	35	45	55	71	89	113	140	175	
	Ri	0,7	1,0	1,1	1,3	1,6	2,0	2,3	2,6	3,0	3,3	4,0	5,0	6,5	8	10	13	16	20	26	33	41	
0,5	4	3																					
0,6	6	4	4	4																			
0,8		7	7	5	4																		
1,0		11	10	8	7	6																	
1,2			14	12	10	8	7	6															
1,4				15	13	11	10	9	8														
1,6					17	15	13	11	10	9													
2,0						22	19	17	15	13	11												
2,3							25	23	19	17	15	12											
2,6								28	25	22	18	14											
3,0									34	30	24	19	15										
3,2										34	27	22	17	14									
3,5											33	26	20	16	13								
4,0											43	34	27	21	17								
4,5												44	34	27	21								
5												52	42	33	26	21							
6													60	48	38	30	24						
7															52	41	33	26					
9																67	54	43					
10																	85	67	53	42			
12																		96	78	60	55		
16																			136	107	86		
19																				150	125	100	
22																					160	130	
25																						210	170
30																							240

Relación entre Fuerza de plegado F y la resistencia de la chapa, d

Como hemos comentado los valores de fuerza que aparecen en la tabla es para un material con una resistencia de $d_{\text{acero}} = 45 - 50 \text{ Kg/mm}^2$. Esta resistencia se corresponde con un acero dulce (0,2% de Carbono). La fuerza necesaria para otro tipo de material se puede calcular fácilmente ya que esta es directamente proporcional a la resistencia de la chapa. Por tanto, para poder calcular la fuerza necesaria para plegar acero inoxidable ($d_{\text{inox}} = 65 \text{ Kg/mm}^2$) tenemos,

$$F_{\text{inox}} = F_{\text{acero}} \times \frac{d_{\text{inox}}}{d_{\text{acero}}}$$

Este calculo sería válido para cualquier otro material.

Una vez calculado este dato es importante verificar si el punzón y la matriz que queremos utilizar puede soportar este tonelaje.

A continuación adjuntamos una tabla en la que aparecen la resistencia de diversos materiales.

Material	Resistencia (Kg/mm ²)
Plomo	2.5 - 4
Estaño	4 - 5
Aluminio(99.0%)	9.3 - 171
Aleación de aluminio de alta resisten.	23 - 48
Duraluminio	26 - 48
Zinc	15 - 25
Cobre	22 - 40
Latón (70-30)	33 - 53
Latón (60-40)	38 - 49
Bronce fosforado	40 - 75
Bronce	40 - 75
Plata Niquel	35 - 70
Hierro laminado en frio	32 - 38
Acero, 0.1%C	32 - 40
Acero, 0.2%C	40 - 50
Acero, 0.3%C	45 - 60
Acero, 0.4%C	56 - 72
Acero, 0. 6%C	72 - 90
Acero, 0.8%C	90 - 110
Acero, 1.0%C	100 - 130
Acero al Silicio	55 - 65
Acero Inoxidable	65 - 70
Niquel	44 - 63

Ejemplos de calculo y uso de la tabla de plegado

A continuación plantearemos unos ejemplos para el uso de la tabla de plegado

- ❑ Qué fuerza se necesita para realizar un plegado de 4 metros en chapa de 1,6 mm de acero inoxidable (resistencia 65 Kg/mm²)?
 Lo primero será determinar que matriz utilizar: $V = 6 \times \text{Espesor} = 6 \times 1,6 = 9,6$
 Como la V no suele existir elegiremos la medida comercial más próxima $\rightarrow V=10$
 Leyendo la tabla tenemos que para plegar espesor de 1,6 mm se necesitan 17 Tons
 Pero este tonelaje es para chapa de 45 kg/mm² . Por tanto, la fuerza necesaria será:
 $F = 17 \times (60/45) = 22,66 \text{ Tons} \rightarrow$ Redondeando se necesitan 23 Tons
- ❑ Qué fuerza se necesita para realizar un plegado de 3 metros en chapa de 2,5 mm de acero dulce (resistencia 45 Kg/mm²)?
 La $V = 6 \times 2,5 = 15 \rightarrow V=16$
 Como este espesor no aparece en la tabla buscaremos el mas cercano y teniendo en cuenta que la fuerza es inversamente proporcional al cuadrado del espesor determinaremos la fuerza necesaria. La fuerza para T=2,6 es 28 Tons
 $F = 28 \times (2,5/2,6)^2 = 26,92 \rightarrow F=27 \text{ Tons}$
- ❑ Qué fuerza se necesita para realizar un plegado de 2 metros en chapa de 12 mm de acero dulce (resistencia 45 Kg/mm²) y con un ala de 100 mm?
 La V será: $V = 12 \times \text{espesor} = 12 \times 12 = 144 \rightarrow V=160$
 Si miramos en la tabla veremos que una V=160 admite un plegado mínimo de 113 mm. Por tanto está V no nos es válida ya que nuestra ala de plegado es de 100 mm. Tendremos que escoger la V inmediatamente inferior: V=125 que permite realizar plegados de alas a partir 89 mm. Por tanto, la fuerza necesaria para un espesor 12 mm con una V=125 es de 78 Tons/m. En este punto es importante verificar si el

punzón y la matriz que vamos a utilizar pueden soportar este esfuerzo. En caso contrario podríamos dañar el utillaje.

Para 2 metros de longitud la fuerza necesaria será $F = 78 \times 2 = 156$ Tons

- Calcular la fuerza necesaria para plegar 800 mm de chapa de 3 mm de aluminio (25 Kg/mm²) con una $V=16$ mm

La V adecuada sería $V=24$ mm. Sea por el motivo que sea (ala mínima necesaria o radio de plegado interno) no recomendamos utilizar V que no se correspondan con más de un lugar de la tabla que no tenga valor de fuerza. Como no existe valor en la tabla tomaremos el valor más cercano ($V=18 - 34$ Tons).

De acuerdo con la resistencia del material $F = 34 \times (25/45) = 18,88$ Tons.

De acuerdo con la anchura de matriz V y teniendo en cuenta que la fuerza es inversamente proporcional a V

$$F = 18,88 \frac{1}{\frac{16}{18}} = 18,88 \frac{18}{16} = 21,25 \text{ Tons}$$

Como la longitud es de 800 mm, o sea, 0,8 metros $F=21,25 \times 0,8 = 17$ Tons

Además de la tabla de plegado existe una fórmula para poder calcular el tonelaje necesario. En esta fórmula entran todos los parámetros anteriormente vistos. La fórmula es la siguiente:

$$F = k \frac{d \times l \times T^2}{V \times 1000} \text{ (Tons)}$$

$d =$ Resistencia material (kg/mm²)
 $l =$ longitud de plegado
 $T =$ Espesor de chapa
 $V =$ Ancho matriz
 $k =$ Constante

El mayor problema de esta formula es determinar el valor de la constante k ya que varía según la relación de los parámetros V y T . El valor de k puede oscilar entre los valores 1 y 2. Cuando V es igual a 8 veces el espesor ($V=8T$) el valor de k es de 1,33.

Como orientación podemos decir que a cuando menor es la relación V/T , mayor es el valor de k . Debido a estas variaciones la formula resulta imprecisa por lo que recomendamos utilizar la tabla.