

Capítulo 2 Aspectos Generales

2.1 Procesos de conformado de tubos

Los tubos metálicos tienen una amplia aplicación, no sólo para el transporte de fluidos, sino también como elementos constructivos, muy empleados en las fabricaciones aeronáuticas, en la industria del automóvil, en la fabricación de muebles metálicos, en la construcción de andamios, y en una gran variedad de objetos ornamentales y de aplicación doméstica.

Siendo, por tanto, tan extensa la utilización de los tubos, su fabricación ha adquirido un volumen relativamente importante, realizándose por una gran variedad de procedimientos, que a continuación se comentarán brevemente. Actualmente se fabrican las siguientes clases de tubos:

2.1.1 Tubos abiertos

Los tubos abiertos son aquellos fabricados en frío con perfiladoras partiendo de chapas. Estas plegadoras van doblando la chapa hasta obtener la forma del tubo deseada. Son tubos que no cierran herméticamente, por lo que no podrán utilizarse para el transporte de fluidos. Se usan principalmente para construcciones mecánicas.



Figura 2.1 Tubo abierto

2.1.2 Tubos engrapados

Los tubos engrapados también se fabrican en frío, partiendo de bandas de chapa con las perfiladoras-engrapadoras. El trabajo de estas engrapadoras es básicamente el de unir herméticamente los bordes de una chapa una vez obtenida la forma del tubo que queremos. Este procedimiento se aplica para el cierre de recipientes y para la fabricación de tubos de chapa.



Figura 2.2 Tubo engrapado

2.1.3 Tubos soldados

Existen diversas técnicas de soldadura para tubos: eléctrica, oxiacetilénicamente, a tope en boquilla y a tope con rodillos.



Figura 2.3 Tubo soldado

2.1.4 Tubos fundidos

Se fabrican tubos por fundición con machos, y más frecuentemente por fundición centrífuga sin machos. La principal fabricación por este procedimiento la constituyen los tubos de fundición de hierro para conducciones de agua y alcantarillado en el saneamiento de las poblaciones.



Figura 2.4 Tubos por fundición

2.1.5 Tubos extruidos en caliente

La extrusión es un método ideal de producir tubos sin costura. Utilizando un mandril en la extrusión en caliente obtendremos un importante volumen de tubos para aplicaciones varias.

Tenemos tres tipos de mandriles:

- a) Fijo
- b) Flotante
- c) Perforante

Los dos primeros tipos están fijos al émbolo y el lingote debe perforarse de manera que el mandril pueda sobresalir a través de éste. La tendencia moderna es la de usar un mandril flotante ya que él mismo se centra y puede producir tubos con concentricidades dentro del 1%.



Figura 2.5 Tubos extruidos

Los mandriles fijos producen tubos excéntricos; mientras que el mandril perforador es empujado dentro del émbolo, perforando el lingote caliente.

Las principales ventajas de los primeros mandriles son velocidad y economía, ya que se elimina la operación de perforado por separado y el equipo especial requerido. En cambio, las prensas requeridas son mucho más grandes y más caras que con los mandriles perforadores.

En cambio, la operación de perforado algunas veces da abundantes grietas y desgarres en el agujero del lingote, produciendo defectos en el tubo. Por esta razón, el perforado no se lleva a cabo en tubos de aluminio y sus aleaciones, y se usa principalmente en aleaciones de cobre.

Dentro de la fabricación de tubos por perforación nos encontramos con dos métodos o sistemas bastante utilizados:

Sistema Mannesmann

Se trata de una perforación rotativa que se lleva a cabo usando un conjunto de rodillos giratorios. Los ejes de los rodillos están en ángulo, haciendo girar la barra y obligándola a avanzar a través del punzón perforador. Debido a la gran deformación que sufre la barra, el material debe tener elevada ductilidad y estar libre de defectos.

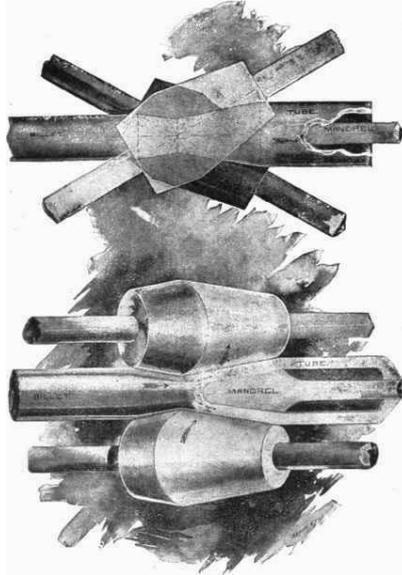


Figura 2.6 Sistema Mannesmann

Sistema Stiefel

Este sistema es muy similar al Mannesmann, con la diferencia de que se utilizan discos en lugar de conos para hacer girar y avanzar la barra a través del punzón.

2.1.6 Tubos fabricados por mecanizado y electrodeposición

Podemos obtener tubos mediante taladrado o mandrinado de barras; o mediante aplicaciones especiales como la electrodeposición del metal. Pero rara vez se utilizan estos procedimientos ya que no son nada económicos.

2.2 Procesos de flexión de tubos

Tras una breve descripción de la fabricación de un tubo, pasamos ya a comentar los métodos existentes para la flexión de un tubo, conceptos importantes en este proyecto.

2.2.1 Principios de la flexión de tubos

Hay varios métodos de flexión de tubos, tuberías o perfiles extruidos. Sin embargo, la productividad económica de una instalación de plegado no sólo depende de la selección del método más eficaz, sino también sobre el uso adecuado de herramientas y técnicas.

Por supuesto, el operador es un factor, pero el equipo adecuado y herramientas minimizan el grado de artesanía y los conocimientos necesarios.

Dos principios se aplican a los tres principales métodos: de compresión (compression bending), presión (press bending), y de flexión rotativa (rotary draw bending). En primer lugar, el material en el interior de la curva debe comprimir. En segundo lugar, el material en el exterior del eje neutro debe estirarse.

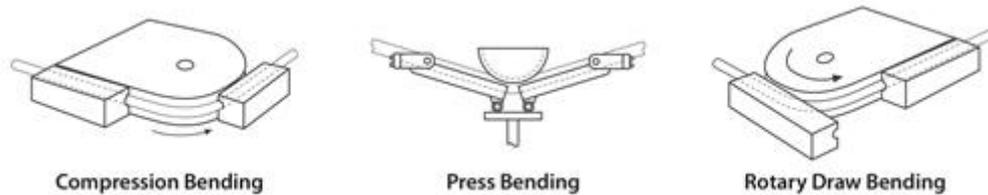


Figura 2.7 Principales métodos de flexión de tubos

Poco o ningún apoyo se necesita en el tubo cuando el diámetro del tubo es pequeño y la pared es relativamente gruesa. Los tubos se vuelven más débiles cuanto mayor es el diámetro del tubo o menor es el espesor de las paredes de éste. Además, cuando el radio de curvatura disminuye, las fuerzas que actúan sobre el tubo aumentan de manera significativa.

Flexión de compresión

Hay tres pasos básicos para la flexión de compresión:

- 1) La pieza de trabajo está anclada a una matriz de flexión.
- 2) La matriz de deslizamiento se pone en contacto con la pieza de trabajo.
- 3) La matriz de deslizamiento gira alrededor de la matriz de flexión estática, que dobla la pieza de trabajo adaptándose al radio de la matriz de flexión.



Figura 2.8 Flexión por compresión

Dependiendo del tubo y las especificaciones de flexión, la flexión de compresión puede variar desde un simple procedimiento a uno complejo. Es relativamente sencillo cuando el radio de flexión es generoso (por ejemplo, 4 veces el diámetro exterior) y el factor de pared ($\frac{t}{R}$) es bajo. La flexión de compresión es más compleja y difícil cuando el radio de flexión se reduce a 1.5 ó 2 veces el diámetro exterior y el factor de pared es aproximadamente 20. En esta situación, la acanaladura de la matriz de flexión y/o de la matriz de deslizamiento debe ser modificada para aumentar la compresión y estiramiento. En lugar del radio verdadero de la acanaladura de la matriz, ésta puede ser en forma de corazón o suma de múltiples radios para ayudar a prevenir las marcas de las herramientas y minimizar el colapso. Además, el material de la matriz de deslizamiento debe ser de acero endurecido con Kro-Lon (recubrimiento especial) o bronce-aluminio duro refinado. Las matrices de flexión generalmente son herramientas de acero y completamente endurecidas.

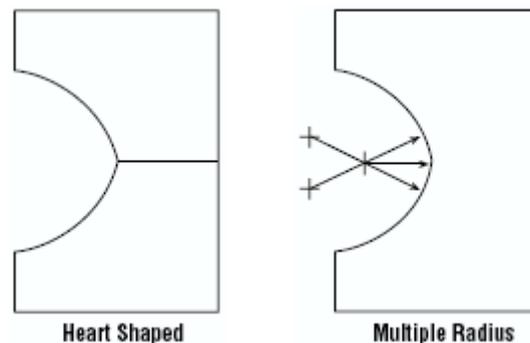


Figura 2.9 Tipos de acanaladuras de las matrices

Flexión por presión

Este método utiliza tres pasos:

- 1) Una matriz punzón con el radio de flexión está equipado al brazo de la prensa.
- 2) La matriz punzón fuerza el tubo hacia abajo contra dos matrices opuestas con la forma del tubo.
- 3) Las matrices soporte, con resistencia a la presión, pivotan hacia arriba, forzando la tubería a la flexión alrededor de la matriz punzón.

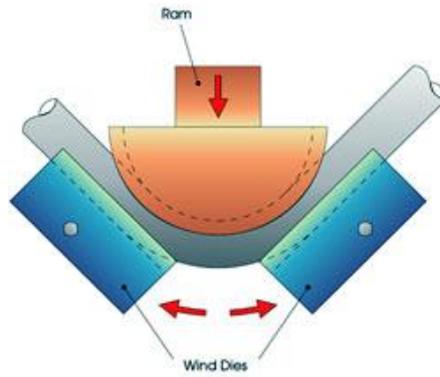


Figura 2.10 Flexión por presión

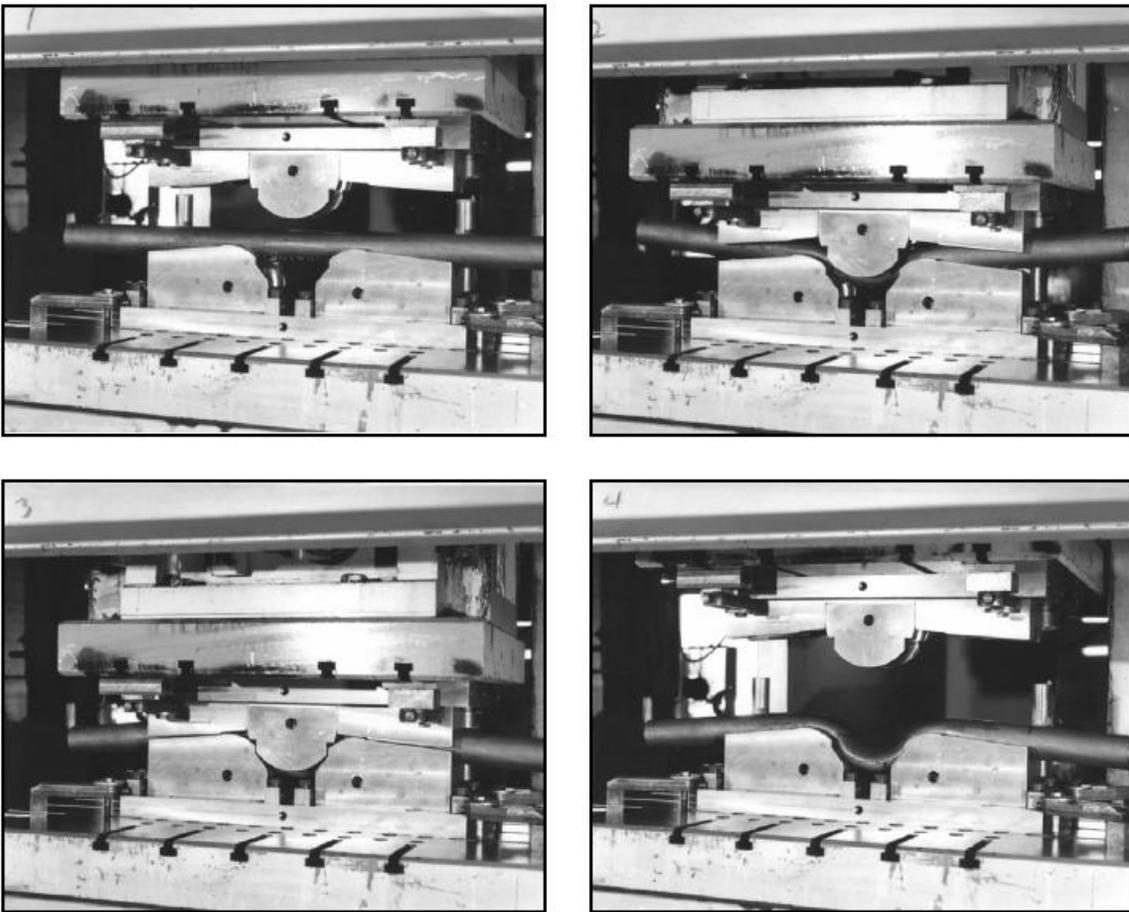


Figura 2.11 Proceso de flexión por presión

El diseño de las herramientas se basa en la tasa de producción deseada y en el diseño de las partes. Cuando la producción requerida es limitada, se puede utilizar un punzón semi-circular (R-1) con la cara interior endurecida y con la forma del tubo. Para una alta tasa de producción de piezas con flexión, se pueden usar herramientas con caras

múltiples (véase el tipo R-3). En este último caso, las herramientas deben ser de acero con alto contenido de carbono y cromo.

Debido a su alto grado de flexión, la flexión por presión probablemente doble más miles de tuberías que cualquier otro método. Sin embargo, puede producirse una deformación considerable ya que la tubería no está apoyada internamente. Por ejemplo, el tubo podría aplanarse en el exterior de la curva y “arrugarse” en la parte interior de la misma. Un punzón tipo washout (R-4) ayuda a eliminar las arrugas en el interior de la curva en las proximidades a la parte curvada. Obviamente, un punzón tipo washout está diseñado para un determinado grado de curvatura.

El punzón partido y la matriz wing (R-2 y W-2) se pueden utilizar también para aumentar la vida de la herramienta y mejorar la calidad de la curvatura. La construcción del tipo R-2 varía la presión de la "tenaza" y permite ajustes para variaciones de OD de las piezas de trabajo.

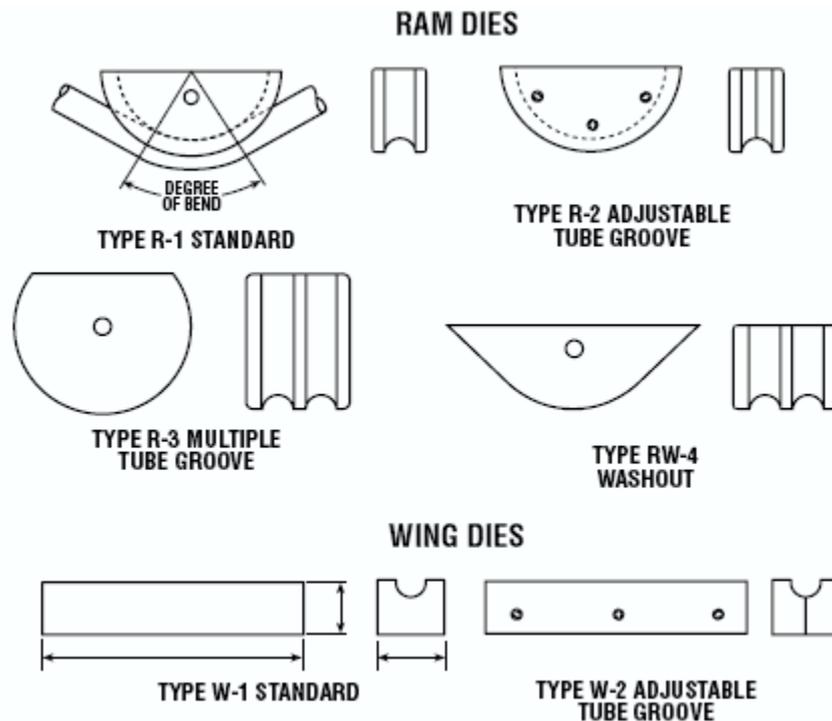


Figura 2.12 Tipos de punzones

Flexión rotativa

Este es probablemente el más versátil y preciso método de flexión. Produce constantemente curvas de gran calidad, incluso con radios pequeños y tubos de paredes

delgadas. Solamente tres herramientas son necesarias para la flexión de tubos con espesores de pared grandes a un radio generoso:

- 1) La pieza de trabajo está anclada a la matriz de flexión por una matriz de anclaje.
- 2) A la vez que la matriz de flexión gira, la matriz de presión tipo seguidor avanza con el tubo.
- 3) Cuando la pared del tubo es muy delgada y/o el radio de curvatura es reducido, se requiere un mandril y/o matriz soporte.

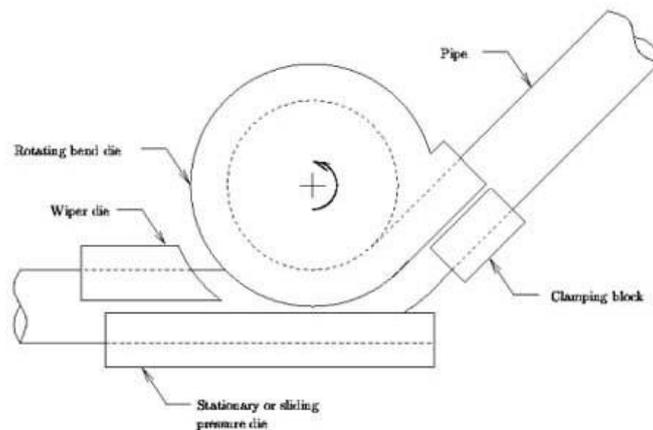


Figura 2.13 Flexión rotativa

Este será el método de flexión que utilizaremos para el estudio de la recuperación elástica que haremos. Para ello, en el siguiente apartado se describen los distintos elementos o herramientas que se usan en este método.

2.2.2 Elementos o herramientas para la flexión de tubos

Para la flexión o doblado de un tubo se necesitan fundamentalmente cinco herramientas:

- a. Matriz de flexión (bend die)
- b. Matriz de deslizamiento (wiper die)
- c. Matriz de anclaje (clamp die)
- d. Matriz de presión (pressure die)
- e. Mandril

Todos ellos en conjunto forman la máquina de doblado de tubos. Éstas pueden ser tanto manuales para tubos de pequeños diámetros y espesores; o de control numérico para producciones mayores y para tubos de dimensiones mayores.

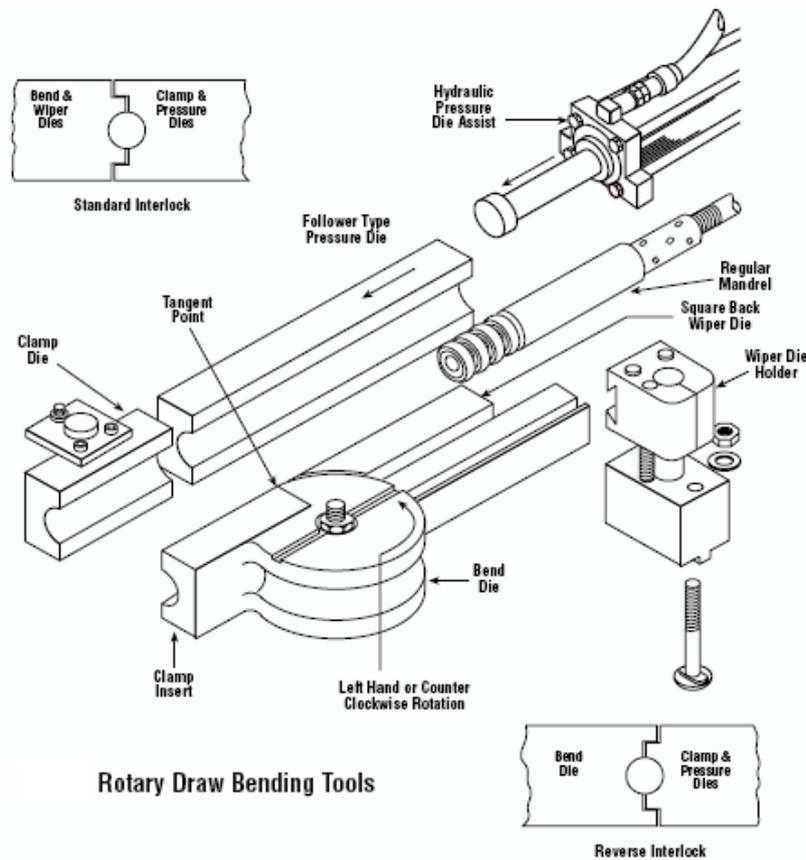


Figura 2.14 Vista explotada de los elementos de la máquina dobladora

Cada uno de los elementos anteriores cumple una función determinada dentro del proceso de doblado.

Matriz de flexión

Es sin duda el elemento principal y más importante de todo el proceso. Alrededor de él se forma el tubo con un determinado radio de curvatura.

Se compone de dos partes bien diferenciadas. Una parte curva, cuya longitud depende del grado de doblado necesario, incluyendo un exceso para compensar la recuperación elástica que se producirá tras el doblado. La otra parte es recta y su función es apoyar y sujetar la zona del tubo justo posterior a la flexión. Ambas partes de la matriz poseen una acanaladura central que, generalmente es igual en profundidad a la mitad del diámetro del tubo.

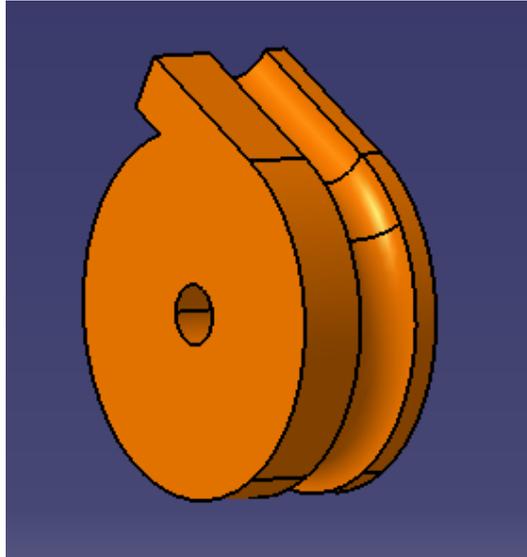


Figura 2.15 Prediseño de la matriz de flexión

Existen muchos tipos de matrices de flexión dependiendo de la calidad de doblado que queramos o necesitemos. Las matrices de doblado de una sola pieza suelen ser las más usadas y rentables. Debido a su diseño de una pieza, suelen dejar menos marcas en el tubo.

Las matrices de flexión insertadas poseen una zona de sujeción reemplazable para evitar la sustitución de la matriz completa. Se convierten así en herramientas más versátiles, sustituyendo diferentes longitudes podemos cambiar las longitudes de agarre.

Nos podemos encontrar también con matrices elípticas, pero éstas no son universales, es decir, solo se utilizan para casos de flexión muy concretos. Es una solución muy específica que depende del diámetro exterior del tubo, del espesor del tubo, del radio de la línea media, y del material y especificaciones del producto. La ventaja de estas matrices es que podemos eliminar la necesidad de un mandril, pero su costo es mucho mayor. El gran inconveniente radica en que las matrices cambian la forma y tamaño de los tubos, por lo que una gran parte de la capacidad de la máquina debe usarse en el tubo, reduciendo de esta forma la rentabilidad de la máquina.

Se pueden doblar tubos de secciones muy distintas (redondeadas, cuadradas, rectangulares y extruidas), por lo que habrá infinidad de tipos de matrices de doblado cuyas acanaladuras se ajustarán a la forma del tubo. Además, para que la producción sea mayor existen matrices dobles y triples con las que podemos estar doblando varios tubos a la vez con una sola matriz.



Figura 2.16 Matrices de flexión

Matriz de deslizamiento

La función principal de la matriz de deslizamiento es evitar la aparición de arrugas en el tubo durante el proceso de doblado. Trabaja conjuntamente con el mandril. Esta matriz es necesaria cuando la resistencia del tubo a la compresión es muy alta.

Se trata de un semicilindro de longitud variable, y con uno de sus extremos mecanizado con la forma de la matriz de flexión de manera que ambas matrices ajusten perfectamente. Esta matriz también dispone de una acanaladura central cuya profundidad será la mitad del diámetro del tubo.



Figura 2.17 Matriz de deslizamiento

Esta herramienta, como el mandril, se encuentra en un estado de constante fricción con el tubo. Olvidar la lubricación de esta matriz puede significar el fracaso en cualquier ensayo de flexión.

El material de esta matriz es similar al del mandril. Sin embargo, debido a que el extremo de la matriz es tan delgado, fabricarla de un material más duro no prolonga la vida útil de la herramienta de manera eficaz.

Una de las desventajas de estas matrices es que son muy difíciles de incorporar en las máquinas equipadas con un sistema automático de lubricación. Para evitar esto, se puede considerar un sistema independiente de lubricación en la sujeción de la matriz de desplazamiento.

De hecho, uno de los fallos frecuentes de estas matrices radica en una inadecuada e incorrecta lubricación, seguida de una mala configuración. Además, el material del tubo debe ser acorde con la lubricación usada prolongando la vida del tubo y evitando desplazamiento del tubo, e incluso su fractura.

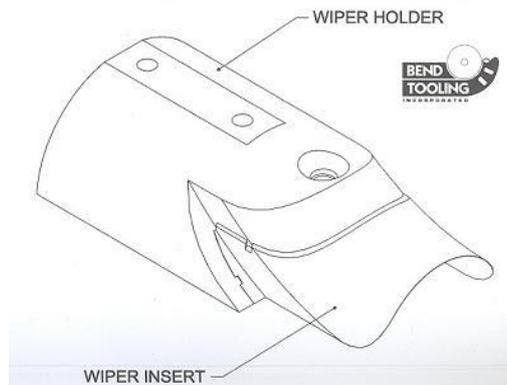


Figura 2.18 Matriz de deslizamiento en detalle

Matriz de anclaje

Esta matriz se utiliza conjuntamente con la matriz de flexión con la única función de agarre del tubo. Su longitud coincide con la zona de sujeción de la matriz de flexión, y sujeta al tubo durante el doblado.

El tamaño de esta matriz depende del tamaño del tubo y del radio de flexión. Para asegurar una adherencia adecuada se puede tratar la superficie con aleaciones y agregar estrías a la zona de sujeción de la herramienta.

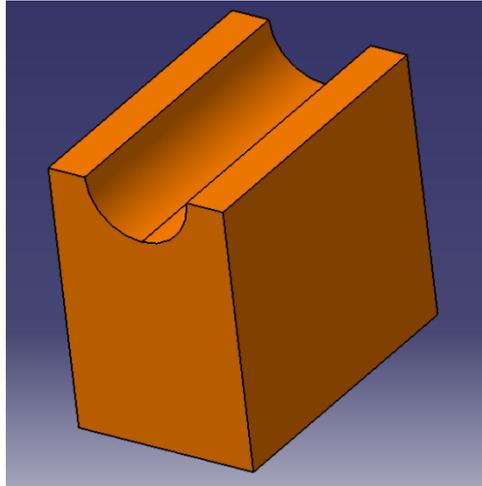


Figura 2.19 Prediseño de la matriz de anclaje

Las matrices de anclaje están fabricadas normalmente de acero de bajo carbono y reforzado para resistir el desgaste. Se suele mecanizar esta herramienta, pero en ningún caso se hará un acabado a la acanaladura.

Para ahorrar tiempo y esfuerzo debemos ajustar bien la matriz de anclaje, eliminando los movimientos excesivos en las sujeciones durante su colocación. Esto reducirá significativamente también los tiempos de configuración de la matriz.



Figura 2.20 Tipos de matrices de anclaje

Matriz de presión

La matriz de presión funciona como una herramienta de contención durante la flexión. Proporciona una presión constante sobre el tubo y lo sigue a lo largo de todo el proceso de doblado. Estas matrices, también llamadas matrices de presión seguidoras, pueden reducir los desgarres y marcas sobre el tubo al disminuir la resistencia al avance.

Además, al seguir al tubo, puede reducir el adelgazamiento del espesor de pared del mismo. Si la presión es muy alta o su velocidad excesiva, podría adherirse material al tubo.

Su longitud depende del grado de flexión y del radio de la línea media. Y el material que se utiliza será el mismo que en el resto de matrices.

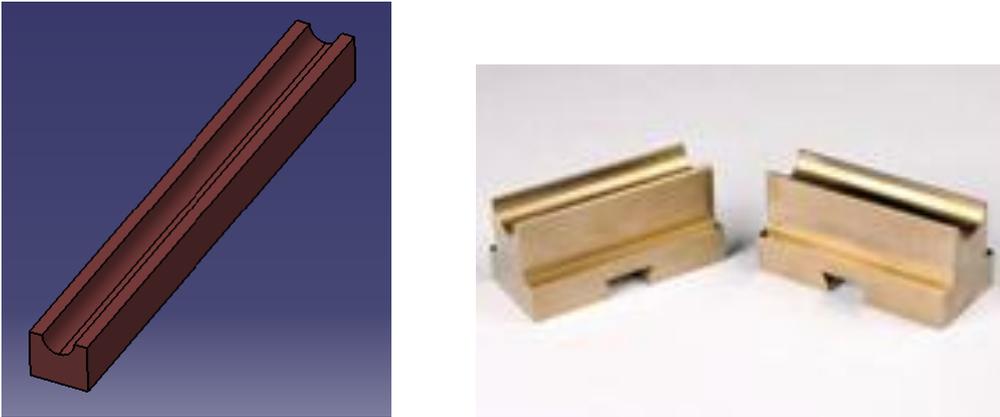


Figura 2.21 Prediseño y tipos de matrices de presión

Mandril

El mandril es el elemento que proporciona apoyo en el interior del tubo. Su función principal es evitar que el tubo se deforme y/o arrugue. Existen muchas variantes de mandriles. La forma y el material de éste depende del diámetro exterior y del espesor de pared del tubo.



Figura 2.22 Prediseño y tipos de mandriles

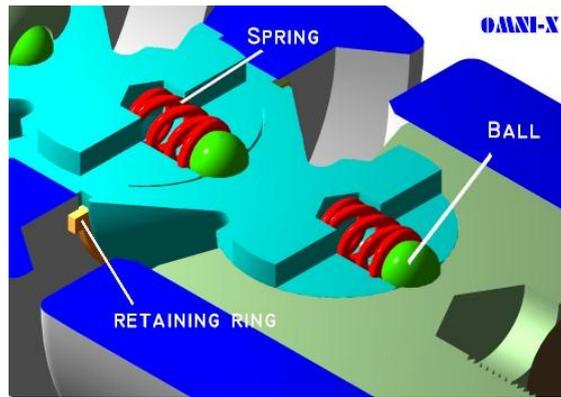


Figura 2.23 Vista en detalle del mandril

Básicamente, los mandriles constan de una serie de “bolas” unidas entre sí mediante una unión de acero y con un paso variable dependiendo del tubo que estemos doblando. Según el tipo de giro de estas bolas se clasifican en dos grupos:

- *Mandriles de flexión universal*: se trata de los mandriles cuyas bolas pueden girar libremente en cualquier plano. Dentro de este grupo nos encontramos con distintos tipos de mandriles: mandriles de paso regular (regular mandrels) para tubos estándar, mandriles de paso estrecho (close pitch mandrels) para tubos de pared delgada y mandriles joya (jewel mandrels) para tubos de pared muy delgada.
- *Mandriles de flexión en un solo plano*: son aquellos mandriles cuyas bolas giran en un solo plano. Se asimila al giro o movimiento del dedo de una persona. El tipo de mandril más representativo es el mandril “bruto” (brute mandrel). Es utilizado cuando se requiere una gran resistencia, para tubos rectangulares, cuadrados y de grandes diámetros.

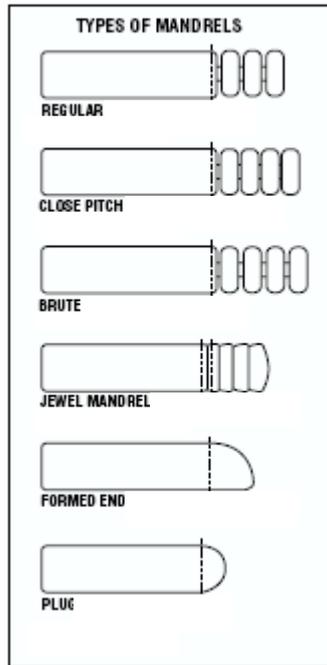


Figura 2.24 Tipos de mandriles

Otro tipo de mandriles sería el mandril taco (plug) o de extremo mecanizado (formed end), usados para tubos de paredes duras y tubos estándar. Son mandriles que no disponen de bolas, con cuerpo homogéneo y continuo.

Aun así, las herramientas se van volviendo cada vez más sofisticadas y cada día van apareciendo nuevos tipos de mandriles que se van adaptando a las necesidades del usuario.

Montaje del conjunto de la máquina dobladora

Normalmente las dobladoras son grandes máquinas de CNC. Cada herramienta tiene su función principal y se fijan respecto al tubo antes del comienzo del doblado. Así, cuando comienza el proceso de doblado, el movimiento relativo de las matrices con el tubo será mínimo y, por tanto, el error en el curvado también.

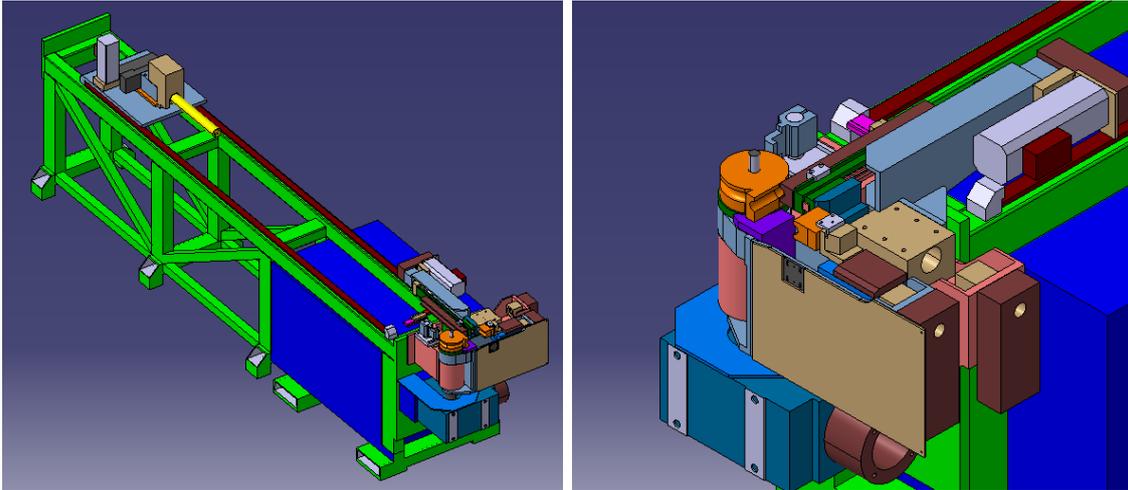


Figura 2.25 Montaje completo y detalle de la máquina dobladora

Todas las herramientas deben ser mecanizadas para ajustar las tolerancias. La matriz de anclaje irá unida a la matriz de flexión de manera que una gire con la otra. La presión hidráulica que se aplica sobre la matriz de anclaje es la necesaria como para no aplastar ni marcar el tubo, pero que confiera unas propiedades de agarre suficientes. Las posibles marcas producidas sobre el tubo son mínimas. Para ayudar a prevenir las marcas de las herramientas en la parte superior e inferior del tubo, las acanaladuras de las matrices deben ser aproximadamente un 6 % más profunda que el radio interior del tubo. Además, la zona de sujeción se debe mantener a una distancia de tres veces el diámetro del tubo. De esta manera nos aseguramos que el doblado no se ve influenciado por ninguna presión o fuerza externa. La holgura de este agarre o sujeción debería mantenerse a un mínimo. La matriz de flexión está disponible en muchos estilos, diseñados para diferentes requisitos de flexión.

A su vez, la matriz de presión se mantendrá en línea con el tubo en su parte superior, desplazándose con el movimiento del tubo. Esta matriz se mantiene en contacto con el tubo con una presión adecuada que no produzca marcas en el tubo. La matriz de presión deberá tener un diámetro de acanaladura ligeramente mayor que el diámetro exterior del tubo para ser doblado. El grosor debe ser constante, ya que una variación de éste puede causar un apriete o disminuir el efecto cuando la matriz avanza hacia delante. Si la herramienta tiene las dimensiones correctamente ajustadas, sólo se exigirá la aplicación de la presión de contención. Una presión excesiva de la matriz de presión aumentará el adelgazamiento, las marcas del tubo, y afectará a la recuperación elástica.

Sin embargo, la matriz de deslizamiento, también con la presión adecuada, se mantendrá en contacto en todo momento con el tubo. Esta herramienta es muy importante. Su acanaladura debe ser ligeramente más grande que el diámetro exterior del tubo, y tener un gran acabado superficial, lubricada con un fino aceite. Un exceso de aceite o la utilización de aceite demasiado pesado en esta zona puede causar arrugas. Debe ajustarse de forma radial a la curva de manera que la acanaladura de esta matriz y la línea media del tubo sean paralelos al menos en un 0.2 %.

La matriz de deslizamiento hecha de bronce también ayuda a minimizar la resistencia y a evitar arrugas. Las matrices de deslizamiento hechas de acero 4130 han demostrado ser muy eficaces con un desgaste considerablemente menor que el acero suave o el bronce. No es recomendable utilizar más de una cantidad mínima de lubricantes de alta calidad ya que el aceite en exceso también podría causar arrugas.

Cuando usamos un mandril flexible de bolas, debería existir un espacio libre u holgura entre éste y el tubo de alrededor del 10 % del espesor de la pared del tubo. Además, tenemos que asegurarnos que hay suficientes bolas en el mandril que soporten el tubo durante aproximadamente el 40 % de la flexión.

El bronce es la elección preferida para aplicaciones de acero inoxidable para reducir la fricción y evitar marcas sobre el tubo. El acero endurecido, con acabado en cromo o recubrimiento de Kro-Lon es recomendado para flexiones comerciales de acero al carbono. Los mandriles con un gran acabado superficial de cromo duro se usan con materiales no ferrosos como el aluminio, el cobre, etc., ya que los ajustes del mandril están parcialmente determinados por los materiales de los tubos y el radio de curvatura.

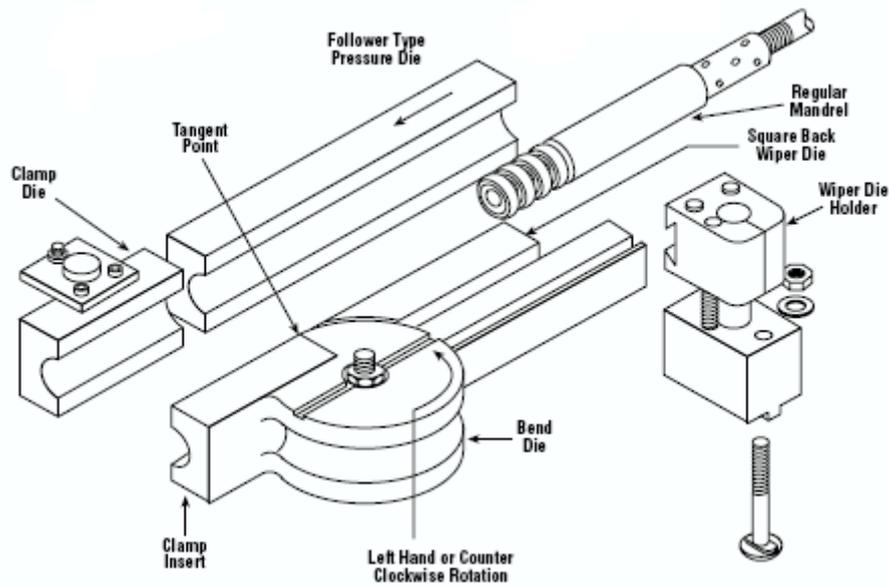


Figura 2.26 Vista explotada de la máquina dobladora

Una vez que tenemos todas las herramientas seleccionadas, antes de comenzar a montar el conjunto, debemos distribuir bien el lubricante sobre las herramientas y comprobar los ajustes de tolerancias. Otra de las comprobaciones importantes es observar la posición del mandril (adelantado o retrasado) y las posiciones de las matrices de anclaje y presión.

Tras comenzar el proceso de flexión, hay que hacer mediciones de temperatura controladas para aumentar o disminuir la presión de las matrices.

Cuando el proceso de flexión haya concluido, retiramos el mandril de la zona de flexión siempre con la matriz de anclaje y presión en posición apretada. Quitamos el tubo e inspeccionamos bien en busca de defectos. El tubo doblado es la principal fuente de información.

La inspección del tubo se basa en medidas del colapso, la acumulación de material, el adelgazamiento de la pared y la aparición de arrugas u otras marcas de herramientas. Esto nos ayuda a hacer las pertinentes correcciones sobre las herramientas. Un examen detallado de los tubos curvados, por dentro y por fuera, a menudo revela dónde radica el problema.

Un buen proceso de flexión se logra con la suficiente experiencia, logrando la mayor eficiencia posible.

2.2.3 Importancia de los mandriles en la flexión de tubos

Los mandriles son uno de los elementos más importantes en este proceso ya que de ellos depende la aparición de defectos en el tubo y afecta de igual manera a la recuperación elástica de éste.

La posición del mandril respecto al punto de flexión afectará directamente al grado de recuperación elástica. Como solución, el mandril en una posición adelantada ensancha el material por el exterior de la curva más de lo necesario. Esto aumenta la longitud del material en el exterior más de lo que se requiere para doblar el tubo. Cuando el tubo curvado se retira de la matriz de flexión, se ajustará a la matriz de flexión, y habrá menos crecimiento radial. El exterior de la curva se encuentra en realidad en compresión con las fuerzas actuando en los puntos A y B (figura 2.27). Fuerzas contrarrestando las anteriores se producen en C y D. Las fuerzas en A y B tienden a cerrar la curva mientras que las fuerzas en C y D actúan para abrir la curva.

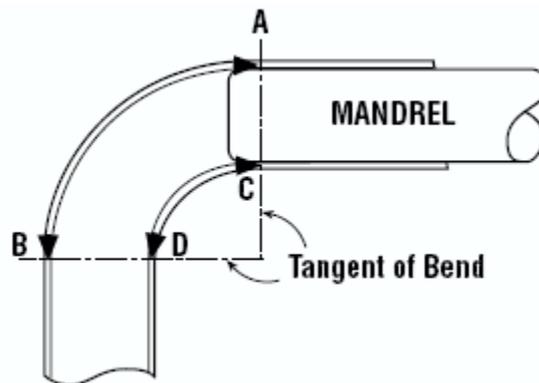


Figura 2.27 Fuerzas actuantes en la flexión

El mandril en una posición retrasada en relación con el punto de flexión no ensanchará el material en el exterior de la curva. En consecuencia, hay muy poco material para llegar de A a B el cual someta tensión en el material. Ahora, las fuerzas en A y B son inversas a los mostrados en la figura 2.27 y tienden a abrir la curva. Esto demuestra cómo la posición del mandril puede causar excesivo springback, reduciendo el ángulo de la curva y, posiblemente, aumentando el radio. El mandril debe desplazarse hacia delante cuando el radio se incrementa. Sin embargo, no hay ninguna fórmula simple para el ajuste exacto del mandril, por lo que debe determinarse con las curvas de ensayo.

Cuando el tubo se rompe repetidamente, el material podría ser demasiado duro para el proceso. Un material duro carece de propiedades de alargamiento y no se estira lo suficiente. Trabajar con materiales recocidos puede ayudar a evitar esta posibilidad. La rotura también puede ocurrir cuando el mandril está colocado demasiado adelantado o el tubo se desliza lentamente en la matriz de anclaje.

Una de las ventajas de los mandriles es que debido a que las bolas tienen rotación libre, el desgaste se distribuye uniformemente. Obviamente, la unión de bolas se romperá si el montaje no es paralelo al surco del tubo.

Dos son los problemas con los que nos podemos encontrar cuando usamos el mandril en el proceso de flexión: mandril demasiado adelantado y mandril demasiado alejado respecto al punto de flexión.

Mandril demasiado alejado

Cuando el mandril está desplazado hacia atrás en relación al punto de flexión, pueden comenzar a formarse arrugas tras éste. En este punto, el mandril no está lo suficientemente adelantado como para generar la suficiente presión en el interior de la curva para comprimir el material. Inicialmente, la curva puede ser lisa, pero a medida que la flexión avanza unos 20° , el material retrocede formando una arruga u ondulación en el punto A (Mandril demasiado alejado). Las arrugas se van formando continuamente entre el mandril y la matriz de flexión, con lo cual nunca desaparece completamente.

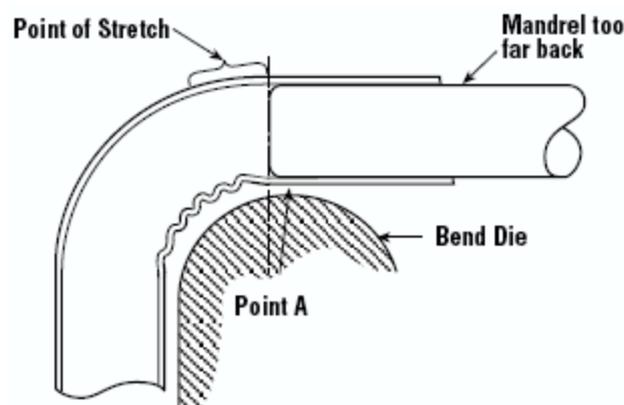


Figura 2.28 Mandril demasiado alejado

Mandril demasiado adelantado

Varios problemas se producen cuando se coloca el mandril demasiado adelantado. Aparecen bultos en el exterior de la curva, y son mucho más evidentes al final de ésta. Al inicio del proceso de doblado, estos bultos también pueden aparecer en la parte interior de la curva. Estas deformaciones no siempre aparecerán al mismo tiempo, dependiendo del material del tubo, de la forma del mandril y del radio de curvatura. Estos bultos son, evidentemente, causados por el vástago del mandril, y la huella es causada por el extremo del mandril al clavarse en el tubo, lejos de la zona donde actúa la matriz de flexión.

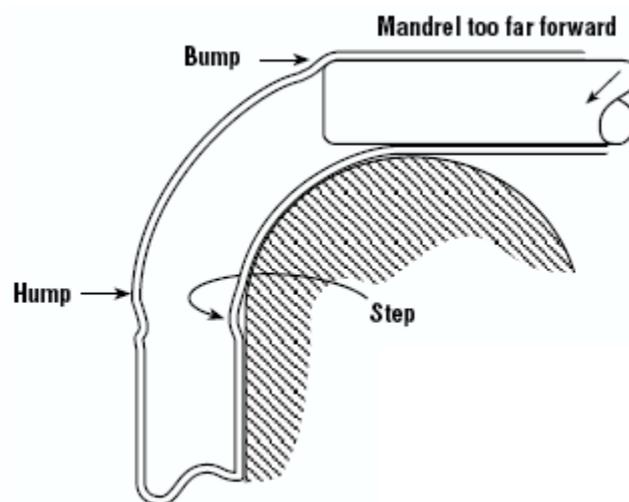


Figura 2.29 Mandril demasiado adelantado

Una plantilla del radio interior deseado ayuda a determinar la ubicación inicial del mandril. Para lograr el máximo beneficio del vástago del mandril y proteger el ensamblaje de las bolas de su ruptura, intentaremos que el vástago sobrepase el punto de flexión.

2.2.4 Lubricación

Tanto la calidad como la cantidad de lubricante usado son extremadamente importantes. Además, hay que tener en cuenta que un lubricante no funcionará igualmente bien en todos los materiales. Por ejemplo, materiales ferrosos y no ferrosos pueden requerir diferentes lubricantes. El EPA (Environmental Protection Agency de Estados Unidos) no permite el uso de algunos de los lubricantes que mejor funcionan debido a su alto

contenido de cloro y azufre contenido. Importantes investigaciones y pruebas dieron lugar a biodegradables y aceptables lubricantes especiales.

Una cantidad controlada de lubricante debe ser aplicada al mandril y al interior del tubo. Este lubricante debe cubrir todo el interior del tubo. Las matrices y, especialmente, los mandriles, pueden ser mecanizados para permitir la auto-lubricación.



Figura 2.30 Lubricante para matrices

2.3 Comportamiento elasto-plástico de los materiales

A continuación pasaremos a describir la ley de comportamiento que seguirán los materiales que usaremos en el proceso de flexión. Éstos siguen tanto una etapa elástica como una etapa plástica, de la cual especificaremos el criterio que deben seguir los materiales para evitar llegar al colapso total del material.

2.3.1 Ley de comportamiento

Al surgir la necesidad de generar una relación entre las tensiones y las deformaciones, resulta la que llamamos ley de comportamiento del material o ecuaciones constitutivas del material o simplemente relación tensión-deformación.

Es evidente que el fundamento de una relación tensión-deformación se tiene que basar en la observación del comportamiento de los materiales en situaciones sencillas donde el estado tensional sea fácilmente intuible y el cambio de posiciones relativas entre las partículas fácilmente caracterizable y medible. A partir de la información obtenida de estas sencillas situaciones se puede deducir el comportamiento del sólido ante

situaciones más complejas. Este ha sido, sin duda, el camino históricamente seguido en el desarrollo del conocimiento del comportamiento de los sólidos deformables.

El camino empírico sugerido para generar la ley de comportamiento es el ensayo clásico de tracción sobre un acero suave, pasando mediante hipótesis razonables de la relación fuerza-desplazamiento a la relación tensión-deformación. Para ello, la información que se precisa del ensayo de tracción es la fuerza F que se aplica y el alargamiento Δl que se va produciendo en la probeta, existiendo para la medida de esta magnitud diferentes alternativas. De esta manera obtenemos un diagrama fuerza-alargamiento que, con un cambio de variable, podemos transformar en el diagrama tensión-deformación, más útil.

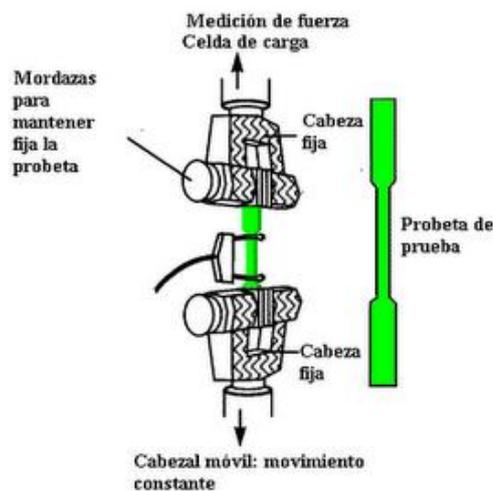


Figura 2.31 Ensayo de tracción

Si aislamos un trozo de probeta cortando por un plano perpendicular al eje de la misma y admitimos que en un extremo hay actuando una fuerza F y en el otro una tensión σ que se distribuye uniformemente en la sección transversal A , el equilibrio del trozo aislado lleva a:

—

Si por otra parte suponemos que el incremento de longitud Δl se distribuye homogéneamente a lo largo de la zona de medida l , podemos definir una deformación longitudinal ϵ constante de valor:

Tras estas dos simples ecuaciones se puede aplicar un cambio de escala al diagrama fuerza-alargamiento para obtener una relación entre la tensión σ y la deformación ϵ . Tal transformación conduce a un diagrama esquemático como el que se representa en la figura.

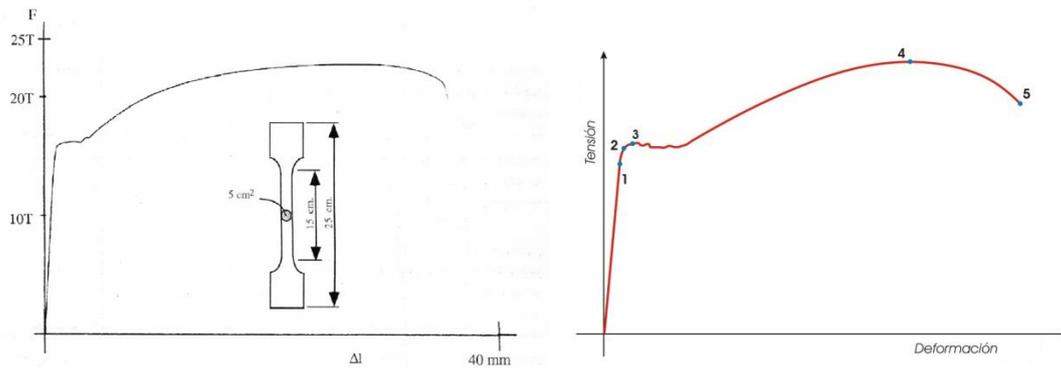


Figura 2.32 Leyes de comportamiento

A partir de la ley de comportamiento generada del ensayo de tracción se puede deducir, superponiendo efectos, el comportamiento de los materiales en situaciones más complejas. Para este ensayo se supone siempre que el material es isótropo.

Observando que existen muchos materiales en la naturaleza que se comportan de forma elástica lineal se puede establecer cuál es la ley de comportamiento más general de este tipo sin prejuzgar la constitución del material.

Descripción del diagrama

Para describir el ensayo iremos recorriendo la línea OABCDFG haciendo hincapié en el comportamiento del material y significado de algunos valores de interés.

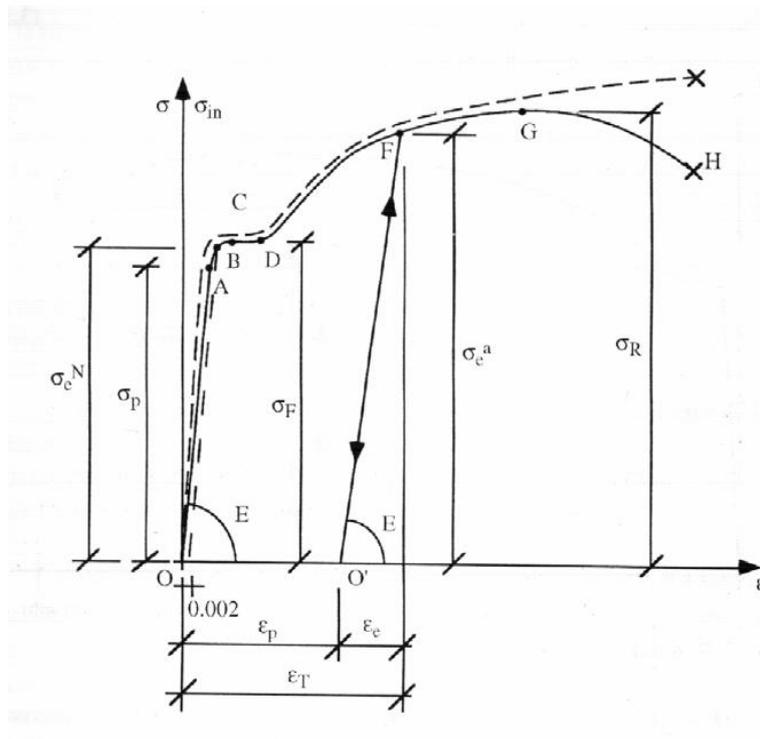


Figura 2.33 Ley de comportamiento

Tramo OA: Tramo de comportamiento elástico lineal. En este tramo se observa por un lado una proporcionalidad entre los valores de σ aplicados y los alargamientos unitarios experimentados y por otro lado una reversibilidad total del proceso de carga, teniendo el material la propiedad general de elasticidad, es decir la propiedad de recuperar su forma y tamaño una vez que desaparecen las cargas que lo solicitan. El valor de la tensión que limita este comportamiento es denominado usualmente límite de proporcionalidad, σ_p .

Tramo AB: Tramo de comportamiento elástico no lineal. En este tramo se pierde la proporcionalidad entre la tensión y la deformación pero se mantiene el carácter elástico, es decir, si a la probeta se le aplica una fuerza, yendo la tensión a algún punto entre A y B, la descarga se produce por la línea BAO. El valor de la tensión que limita este comportamiento es denominado usualmente límite elástico noval, σ_e^N . Este tramo es normalmente pequeño.

Tramo BCD: Escalón de cedencia o fluencia del material. Se observa que el material no requiere aumento de tensión para que la deformación crezca. Esta fluencia está caracterizada por un valor σ_F que está en el entorno del límite elástico noval del material.

Tramo DFG: Tramo de endurecimiento por deformación. Una vez pasado el escalón de cedencia el material requiere que se aumente la tensión para que se produzca un incremento en la deformación. El tramo es no lineal disminuyendo continuamente la pendiente de la curva σ - ϵ .

Tanto en este tramo como en el anterior se ha terminado el comportamiento elástico. Así, si una vez superado el punto B (por ejemplo en el punto F), se lleva a cabo la descarga de la probeta, ésta no se produce por la línea de carga sino por una línea recta (línea FO') paralela a la línea de comportamiento elástico (línea OA), alcanzando en el estado descargado el punto O'. Esta situación es la que caracteriza el comportamiento elastoplástico en el que parte de la deformación total que tenía el material (ϵ_T) se recupera elásticamente (ϵ_e) y parte se queda almacenada en el material (ϵ_p) recibiendo el nombre de deformación plástica, cumpliéndose que:

Si una vez descargado, el material vuelve a ser cargado, la evolución se produce a lo largo de la línea O'F de manera elástica lineal, teniendo un límite elástico aparente () de más alto valor que el límite elástico noval.

Por otro lado, cabe decir que las líneas de carga y descarga no coinciden exactamente, produciendo un comportamiento como el que se representa a continuación.

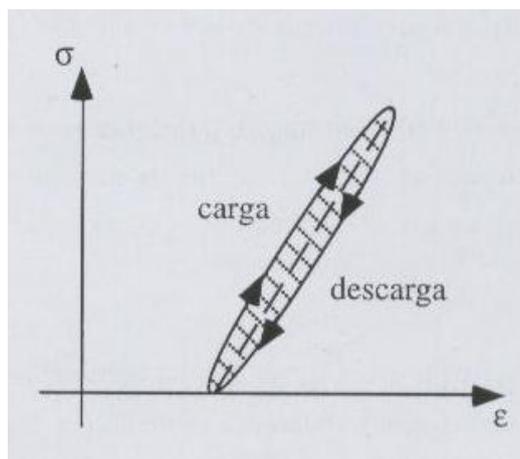


Figura 2.34 Proceso real de carga y descarga

Por último, cuando se alcanza el punto G, sea cual sea el camino seguido, se alcanza el valor de la tensión de rotura del material, σ_R , que es una propiedad no alterable mecánicamente.

Tramo GH: Zona de estricción. A partir de un cierto instante se observa en la realización del ensayo que cada vez hace falta aplicar menos fuerza para separar las mordazas, lo que indica que la probeta opone menos resistencia. La disminución de la fuerza que hace falta aplicar para separar las mordazas va acompañada de la aparición de una disminución localizada y claramente perceptible de la sección transversal, fenómeno que recibe el nombre de estricción.

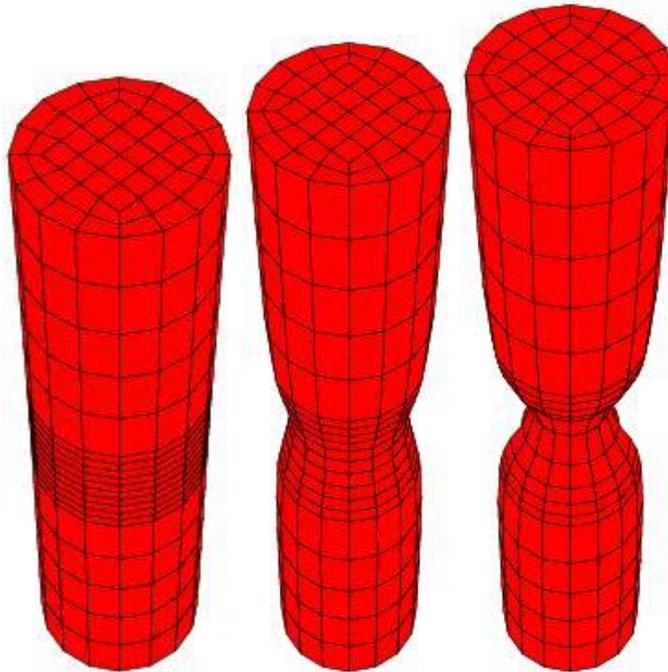


Figura 2.35 Proceso de estricción de una probeta

La estricción puede ser estudiada como un fenómeno de inestabilidad que aparece en donde se localiza la mayor densidad de imperfecciones del material.

El comportamiento general descrito a través del diagrama representado, que corresponde a un acero dulce, representa un comportamiento o un proceso de rotura dúctil, alcanzando el material un valor elevado de la deformación antes de la rotura. Existen materiales como las fibras de carbono o vidrio, también de gran aplicación en ingeniería, que tienen un comportamiento elástico lineal hasta la rotura, la cual se

produce con valores muy pequeños de la deformación, lo que representaría el comportamiento de un material frágil. Un acero podría tener en apariencia un comportamiento frágil, sin más que estirarlo en frío, llevando el punto F muy próximo al punto G. Una vez descargado, el material resultante tendría un alto límite elástico (muy próximo a la tensión de rotura del material) pero su comportamiento sería cuasi-frágil admitiendo sólo las pequeñas deformaciones asociadas al comportamiento elástico.

Propiedades

En el comportamiento elástico lineal existen dos propiedades que pueden ser medidas en el ensayo de tracción y que afectan a la relación tensión-deformación. La primera es la pendiente de la recta, representada por E y que recibe el nombre de módulo de elasticidad longitudinal o módulo de Young:

—

Se podría definir como el valor de la tensión que provocaría una deformación longitudinal unitaria. Es un valor no modificable mecánicamente pues ya se ha visto que las cargas y descargas se producen con una pendiente aproximadamente igual a E. El valor de E representa una medida de la rigidez.

Existe una segunda propiedad que puede ser también determinada en el ensayo de tracción. Acompañando a la deformación longitudinal aparece una contracción transversal. Como medida de este fenómeno, se define el coeficiente de Poisson como:

Por tanto, en una dirección perpendicular a aquella en que está aplicada la tensión σ , aparecerá una deformación de valor:

—

Por lo que el coeficiente de Poisson toma valores positivos.

El coeficiente de Poisson es también una medida de rigidez transversal. En un extremo, un valor nulo del coeficiente de Poisson representaría un material rígido transversalmente: no se modifican transversalmente sus dimensiones al aplicar una carga longitudinal. El otro extremo corresponde al material más flexible transversalmente que estaría asociado a la situación en que al aplicar una tracción en una dirección no aumenta el volumen del sólido.

Por lo tanto, tenemos definida la región elástica por la ley de Hooke dada por:

Esfuerzo real y deformación real

Hemos visto en el apartado anterior que el esfuerzo se basa en el área transversal inicial de la probeta. A este esfuerzo lo llamaremos esfuerzo ingenieril. Sin embargo, sabemos que durante la zona de estricción el área transversal instantánea de la probeta se hace más pequeña conforme se deforma. Por lo que el esfuerzo ingenieril no representa el esfuerzo real al que está sujeto la probeta.

Por ello, podemos definir el esfuerzo real como la relación de la fuerza F al área transversal real instantánea A_R :

—

Para la deformación real, primero consideramos la elongación de la probeta en incrementos de cambios instantáneos en la longitud. Después, podemos demostrar que la deformación real se calcula de la forma:

— —

Con estas nuevas definiciones se puede observar que para valores pequeños de deformación, las deformaciones ingenieriles y reales son aproximadamente iguales. Sin embargo, divergen rápidamente conforme aumenta la carga.

Por tanto, las deformaciones reales corresponden a los fenómenos físicos reales en la deformación de los materiales.

De esta forma, podemos obtener nuevas curvas de esfuerzo-deformación, que se pueden representar de manera aproximada por la ecuación de fluencia:

En ella, ‘K’ se conoce como el coeficiente de resistencia y ‘n’ como el exponente de endurecimiento por deformación. Algunos valores típicos para varios metales se encuentran en la figura siguiente.

Material	Módulo de Elasticidad 10 ⁴ Kg/cm ²	Coefficiente de Poisson	Límite Elástico 10 ³ Kg/cm ²	Tensión de Rotura 10 ³ Kg/cm ²
Hierro	200	0.3	0.5	2
Aceros suaves	210	~0.3	~ 2.4	~ 4.2
Aceros inoxidables austeníticos	210	~0.28	2.8 - 5	7.5 - 13
Aluminio	70	0.35	0.4	2
Aleaciones de Aluminio	70 - 80	~0.35	1 - 6.27	3 - 7
Aleaciones de Titanio	80 - 130	~0.36	1.8 - 13	3 - 14
Fibra Carbono	250 - 390	0.25	22 - 27	22 - 27
Fibra Vidrio E	76	0.22	14 - 25	14 - 25
Fibra Kevlar 49	125	0.34	28 - 36	28 - 36
Resina epoxi	3 - 6	0.38-0.4	-	0.35 - 1
Resina poliester	2 - 4.5	0.37-0.39	-	0.4 - 0.9

Figura 2.36 Propiedades de rigidez y resistencia de diferentes materiales

Cabe decir que la ecuación anterior es genérica, es decir, cada material tendrá una ecuación distinta pero siempre seguirá manteniendo la misma forma, como veremos más adelante en la descripción de los materiales.

Tipos de relaciones esfuerzo-deformación

La curva de esfuerzo frente a deformación real proporciona mucha información acerca del comportamiento plástico. Como ya se ha indicado, la ley de Hooke gobierna el comportamiento de los metales en la región elástica, y la curva de fluencia determina el comportamiento en la región plástica. Hay tres formas básicas de relación esfuerzo-

deformación que describen el comportamiento de casi todos los tipos de materiales sólidos:

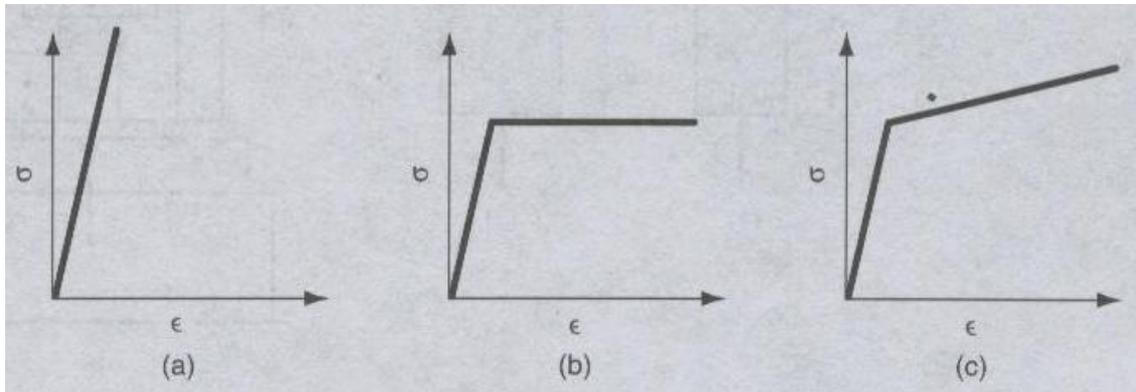


Figura 2.37 Tipos de curvas tensión-deformación

- a) *Perfectamente elástica.* El comportamiento de este material está definido completamente por su rigidez, indicada por el módulo de elasticidad E ; se fracturará antes de llegar a la fluencia. Los materiales frágiles como los cerámicos, muchos tipos de hierro colado y de polímeros termofijos presentan curvas de esfuerzo frente a deformación de este tipo.
- b) *Elástica y perfectamente elástica.* Este material tiene una rigidez definida por E . Una que alcanza el punto de fluencia σ_Y , el material se deforma plásticamente al mismo nivel de esfuerzo. La curva de fluencia está dada por $K = \sigma_Y$ y $n=0$. Los metales se comportan de esta manera cuando han sido calentados a temperaturas lo suficientemente altas para recristalizar más que endurecerse por trabajo durante la deformación.
- c) *Elástica y endurecible por deformación.* Estos materiales obedecen a la ley de Hooke en la región elástica, y comienzan a ceder en su punto de fluencia σ_Y . Su deformación continua requiere esfuerzos siempre crecientes, dados por una curva de fluencia cuyo coeficiente de resistencia K es mayor que σ_Y , y cuyo exponente de endurecimiento por deformación n es mayor que cero. La curva de fluencia se representa generalmente como una función lineal en una gráfica logarítmica natural. La mayoría de los metales dúctiles se comportan de esta manera cuando trabajan en frío.

2.3.2 Teoría de la plasticidad

Una vez visto los diagramas esfuerzo-deformación, debemos saber cuándo plastifica el material. Esto se dará cuando no exista una relación única tensión-deformación y el estado final que se alcance dependa de la historia de carga a que esté sometido cada punto del material. Lo anterior, junto con la pérdida de linealidad en la relación tensión-deformación hace que no sea de aplicación el principio de superposición. Parece claro a partir de estas consideraciones que la evolución plástica de un punto de un sólido sólo podrá simularse relacionando las variaciones de las tensiones con las variaciones de las deformaciones. Esta relación deberá ser integrada a lo largo de toda la historia de carga para obtener los valores totales de las tensiones y las deformaciones.

En el caso monodimensional la ecuación de la recta será:

A partir de la ecuación anterior podemos definir una función de plastificación:

Si el punto está en el periodo elástico. Cuando el punto está plastificado y puede desarrollarse la deformación plástica. Para cuerpos elastoplásticos perfectos, la ecuación es válida haciéndose $E_t = 0$.

Un criterio de plastificación es la generalización a situaciones multidimensionales de la ecuación anterior. Si σ_{ij} y las correspondientes variables tridimensionales, la ecuación se generaliza a:

Obviamente al comenzar a aumentar las cargas externas, un punto tiene primero un comportamiento elástico, con σ_{ij} y ϵ_{ij} indica que un punto está aún en periodo elástico, mientras que σ_{ij} indica que el punto ha plastificado.

Evidencias experimentales

No existe ninguna teoría fiable que permita deducir la función . Dichas funciones tienen por tanto una base puramente empírica, intentando reflejar una serie de hechos experimentales que pasamos a comentar:

- a) Simetría en la plastificación. Si se ensaya un material virgen a tracción y a compresión se encuentra que la plastificación se produce para el mismo nivel de tensiones σ_e . Con lo cual podemos llegar a que:

- b) Independencia de la componente hidrostática. Se puede demostrar que, en un ensayo de tracción de metales sometidos a compresiones hidrostáticas, el límite elástico y el punto del comienzo del endurecimiento por deformación son prácticamente insensibles al valor de la compresión hidrostática. El único efecto apreciable de ésta es un aumento de la deformación en rotura, es decir, de la ductilidad del material.

La independencia de la plastificación respecto a los estados hidrostáticos se escribe de la forma:

siendo un tensor hidrostático arbitrario.

- c) Isotropía plástica. Un material isótropo en estado virgen se comporta isotrópamente en cuanto a la plastificación, lo que indica que la orientación de los ejes es irrelevante. Matemáticamente se traduce en que la función es invariante ante cambios en los ejes, para lo cual debe ser función sólo de los invariantes del tensor de tensiones I_1 , I_2 e I_3 . Es decir, la hipótesis de isotropía plástica implica que la función de plastificación puede expresarse sólo en función de las tres tensiones principales ($i=1, 2, 3$):

d) Ensayos. Los criterios de plastificación se comprueban comparando los resultados con los obtenidos de ensayos experimentales.

Una característica que se pone de manifiesto en los ensayos es que la deformación plástica se produce muy aproximadamente a volumen constante.

2.3.3 Criterios de plastificación

Los criterios de plastificación surgieron intentando extrapolar los resultados del ensayo de tracción a estados tensionales más complejos, por lo que se relacionaba una variable del problema elástico con el valor que dicha variable alcanzaba en el ensayo de tracción en el instante de la plastificación.

A continuación se presentan cinco criterios, dedicando especial atención fundamentalmente a los dos últimos.

a) Criterio de Rankine.

El criterio de Rankine establece que no se producirá la plastificación siempre que las tensiones principales no superen la tensión de límite elástico del ensayo de tracción:

Este criterio no satisface varias de las evidencias anteriormente enunciadas y que en el espacio de tensiones principales el dominio elástico estaría acotado por un cubo de lado σ_e .

Tiene utilidad para predecir el final del comportamiento elástico en materiales frágiles, que no experimentan comportamiento plástico, siendo por tanto un criterio de rotura.

b) Criterio de Saint-Venant.

Este criterio establece que no se producirá plastificación siempre que las deformaciones principales no superen el valor de la deformación ϵ_e que aparece en el ensayo de tracción en el instante en que se alcanza σ_e :

En el espacio de tensiones, la superficie acotada por la ecuación anterior representa un romboedro, por lo que no satisface tampoco la evidencias experimentales exigidas en el apartado anterior.

c) Criterio de Beltrami.

En este criterio se propone que la plastificación no se produce hasta que la energía de deformación no alcanza el valor que produce la plastificación en el ensayo de tracción. Por consiguiente, un estado tensional σ correspondería a un comportamiento elástico si:

Donde σ corresponde al valor:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2}{3} \text{tr}(\mathbf{D})}$$

El criterio es dependiente del tensor esférico y, por tanto, no cumple las evidencias experimentales exigidas. La superficie que representa este criterio es un elipsoide de revolución centrado en la diagonal principal. Aunque inaceptable, este criterio tiene como aspecto diferencial de los anteriores el asociar el comienzo de la plastificación a una variable escalar que engloba las variables tensionales mencionadas en los criterios anteriores.

d) Criterio de Tresca.

Este criterio establece que no se producirá la plastificación siempre que las tensiones tangenciales se mantengan por debajo de la tensión tangencial que hay en el ensayo de tracción en el instante de la plastificación.

Si la tensión tangencial máxima viene dada por:

Y en un ensayo de tracción se tiene que $\sigma_1 = \sigma$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$, quedando por tanto el criterio de Tresca:

El contorno de la superficie de Tresca viene dado por las ecuaciones:

Y es fácil comprobar que las dos superficies que se obtienen de cada ecuación representan en conjunto 6 planos paralelos a la trisectriz. La curva de plastificación asociada al criterio de Tresca es un hexágono regular, siendo la representación tridimensional un prisma de sección hexagonal.

Este criterio cumple las evidencias experimentales de independencia del tensor esférico. Cumple también las condiciones de isotropía e igual comportamiento a tracción y compresión. Se puede así mismo comprobar cómo se acerca a los resultados experimentales obtenidos por Lode.

e) *Criterio de Von Mises.*

Von Mises estableció que la plastificación de un punto se produce cuando la energía de deformación debida al cambio de forma alcanza un valor crítico. Tratando de suavizar la superficie no regular de Tresca, propuso como superficie de plastificación un cilindro que la circunscribiera.

El criterio se expresa simplemente diciendo que la plastificación se produce cuando el módulo del vector desviador alcanza un valor crítico que, para ajustarse al ensayo de tracción, vale $\frac{\sqrt{3}}{2} \sigma$. Por tanto, el criterio se escribe en ejes principales en la forma:

$$\sqrt{\frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2} = \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma \quad i = I, II, III$$



2.4 Recuperación elástica o springback

La recuperación elástica o springback describe la tendencia del material para volver a su forma original una vez que éste ha sido deformado. Se produce como consecuencia del comportamiento elástico del material, al pasar a la etapa de deformación plástica y, al eliminar la carga aplicada. Dado que al flexionar el tubo existen fibras acortadas y alargadas, éstas se recuperan alargándose y acortándose respectivamente, provocando un cambio apreciable en el radio y ángulo de flexión.

En general, el springback provoca un aumento del radio y del ángulo de flexión, lo que se conoce como recuperación elástica positiva. Pero también podemos encontrarnos recuperación elástica negativa dependiendo de la naturaleza de la deformación que sucede en el momento en el que se termina la operación de doblado.

Las propiedades más influyentes son el módulo de Young E y el límite elástico. Se puede estimar la recuperación elástica positiva por la expresión:

$$\text{---} \quad \text{---} \quad \text{---}$$

Si imponemos que la longitud de la fibra neutra se mantiene constante, podemos obtener el factor de recuperación elástica K_s :

$$\text{---} \quad \text{---}$$

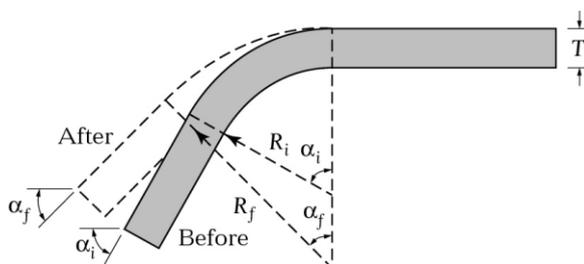


Figura 2.38 Springback en una chapa

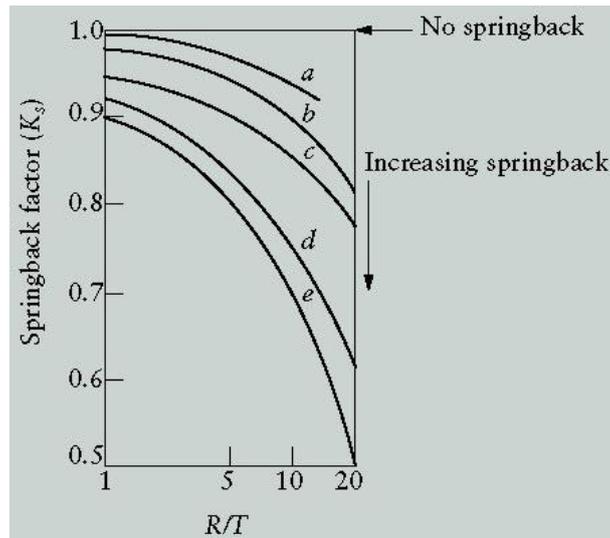


Figura 2.39 Valores de K_s para distintos materiales

En el caso de tubos, habrá excesivo springback cuando no se utiliza mandril, siendo una importante consideración a la hora de seleccionar la matriz de flexión. El springback hace que el tubo se recupere de un 2% a un 10%, dependiendo del radio de curvatura. Cuanto más pequeño es el radio de curvatura, menor es la recuperación elástica. Puede venir afectado por la ubicación y la presión de la matriz de presión.

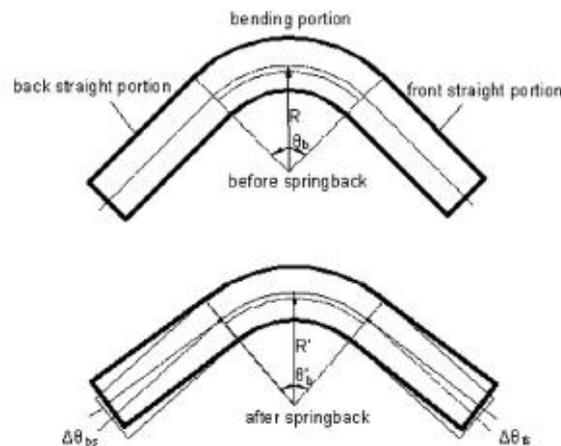


Figura 2.40 Springback en un tubo

Existen diversas técnicas o medios para compensar la recuperación elástica que, en el caso del plegado de chapas, son:

1. Sobreplegado. Es decir, plegar más de lo necesario la chapa para que al recuperarse, el radio y el ángulo finales sean los deseados.

2. Homogeneizar las deformaciones en la zona de plegado (coining y bottoming). Se trata de conseguir que todas las fibras del material estén alargadas o comprimidas, disminuyendo de esa manera el springback.
3. Plegado a elevada temperatura. A altas temperaturas se reduce apreciablemente el límite de fluencia del material, disminuyendo a su vez la recuperación elástica.