



industriales
etsii

**Escuela Técnica
Superior
de Ingeniería
Industrial**



Fundamentos de Conformación

por Deformación Plástica

Joaquín López Rodríguez



**Universidad
Politécnica
de Cartagena**

Fundamentos de Conformación por Deformación Plástica

Joaquín López Rodríguez

Departamento de Ingeniería de Materiales y Fabricación

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Cartagena, 10 de noviembre de 2011

Índice general

Índice de tablas	vii
Índice de figuras	xii
1. Introducción a la Deformación de Metales	1
1.1. Introducción	1
1.2. Deformación plástica de los metales	2
1.2.1. Deformación de un monocristal	3
1.2.2. Deformación de los policristales	4
1.3. Deformación en frío y en caliente	5
1.3.1. Conformación en frío	5
1.3.1.1. Efectos de la conformación en frío	5
1.3.1.2. Efectos del calentamiento en la deformación plástica	6
1.3.2. Conformación en caliente	8
1.3.2.1. Efectos de la conformación en caliente	9
1.4. Clasificación de los procesos de conformación metálica	10
2. Procesos de conformación masiva	13
2.1. Forja	13
2.1.1. Efectos que produce la forja	13
2.1.2. Materiales forjables	14
2.1.3. Fases en el trabajo de forja y operaciones de forja más comunes	14
2.1.4. Forja libre	15
2.1.5. Forja con estampa	16

2.1.6.	Forja por recalado	18
2.1.7.	Forja en frío	18
2.2.	Laminación	19
2.3.	Extrusión	26
2.3.1.	Extrusión directa	29
2.3.2.	Extrusión inversa	31
2.3.3.	Extrusión mixta	31
2.3.4.	Extrusión por impacto	32
2.3.5.	Extrusión hidrostática	32
2.4.	Estirado y trefilado	33
2.5.	Repujado por deslizamiento	37
3.	Procesos de conformación de chapa metálica	41
3.1.	Conformación con separación de material	42
3.1.1.	Corte	42
3.1.2.	Punzonado y perforado	42
3.2.	Conformación sin separación de material	43
3.2.1.	Doblado	44
3.2.1.1.	Doblado por rodillos	44
3.2.1.2.	Doblado con prensas plegadoras	45
3.2.2.	Embutición	47
3.2.3.	Conformado por estirado	48
3.2.4.	Repujado al torno convencional	50
3.3.	Bibliografía	51
4.	Curvas de tensión y deformación	53
4.1.	Curvas de tensión y deformación nominal	53
4.1.1.	Efecto de la velocidad de deformación, la temperatura y otros factores	58
4.2.	Curvas tensión real-deformación	60
4.2.1.	Tensión real y deformación natural	60
4.2.2.	Constancia del volumen	62
4.2.3.	Inestabilidad	63
4.3.	Curvas analíticas de tensión-deformación	65
5.	Teoría de la Plasticidad	69
5.1.	Situación real de los procesos: estados tensionales complejos	70
5.2.	Tensiones y planos principales	72
5.2.1.	Situación bidimensional de tensiones	73
5.2.1.1.	Método analítico	73
5.2.1.2.	Método del círculo de Mohr	77

5.2.1.3.	Método matricial	79
5.2.2.	Situación tridimensional de tensiones	81
5.3.	Criterios de fluencia y tensiones y deformaciones efectivas . . .	81
5.3.1.	Criterios de fluencia	81
5.3.1.1.	Criterio de fluencia de Tresca	83
5.3.1.2.	Criterio de fluencia de von Mises	84
5.3.2.	Tensión efectiva y deformación efectiva	88
5.4.	Cálculo de fuerzas y potencias	89
5.4.1.	Método del trabajo de deformación homogénea	91
5.5.	Análisis de ejemplos	96
5.5.1.	Forja libre y laminación	97
5.5.1.1.	Forja libre	97
5.5.1.2.	Laminación	99
5.5.2.	Extrusión y trefilado	103
5.5.2.1.	Extrusión	104
5.5.2.2.	Trefilado	106

Índice de tablas

2.1. Materiales más utilizados en la extrusión.	28
2.2. Dimensiones de las piezas extrusionadas según Feldmann.	28
4.1. Valores típicos de C y n en el Modelo 1 (ecuación (4.16))	67

Índice de figuras

1.1. Curva carga-alargamiento.	2
1.2. Dislocaciones en un monocristal.	4
1.3. Movimiento de una dislocación a través de los planos de cizallamiento de un cristal bajo la acción de una tensión.	4
1.4. Efectos de la restauración, recristalización y crecimiento de grano en las propiedades mecánicas y en la forma y tamaño de los granos.	7
1.5. Resistencia de los bordes de grano y de los cristales en función de la temperatura.	8
2.1. Tres tipos de operación de forja: a) Forjado libre, b) forjado con estampa semicerrada y c) forjado con estampa cerrada. . .	15
2.2. Ordenación según geometría de las piezas forjadas (según Spies). . .	17
2.3. Forja por recalcado (Recalcado).	18
2.4. Forja en frío.	19
2.5. Proceso de laminación (laminado plano).	20
2.6. Ordenación de formas de las piezas laminadas (según Spies). . .	22
2.7. Esquema descriptivo de los diferentes procesos de laminación existentes	23
2.8. Conformado de un perfil en doble T.	24
2.9. Laminación de anillos: a) esquema del proceso; b) ejemplos de secciones que se pueden obtener.	24
2.10. Laminación de tornillos	25
2.11. Laminación de tubos sin costura.	25
2.12. Laminación de tubos.	26

2.13. Extrusión directa para producir una sección transversal hueca o semihueca.	27
2.14. Extrusión directa	29
2.15. Ejemplos de extrusión directa	30
2.16. Extrusión inversa.	31
2.17. Ejemplos de extrusión inversa.	32
2.18. Ejemplos de extrusión mixta.	33
2.19. Extrusión por impacto.	34
2.20. Extrusión hidrostática.	35
2.21. Descripción esquemática de los procesos.	35
2.22. Proceso de estirado o trefilado.	36
2.23. Proceso de estirado en caliente.	37
2.24. Proceso de trefilado de alambres.	38
2.25. Proceso de estirado de tubo sin mandril.	38
2.26. Proceso de estirado de tubo con mandril o tampón.	38
2.27. Proceso de repujado por deslizamiento.	39
3.1. Incisión en una chapa metálica.	42
3.2. Cizallado o corte de una lámina metálica entre dos bordes cortantes: (1) inmediatamente antes de que el punzón entre en contacto con el material, (2) el punzón comienza a causar deformación plástica en el material, (3) el punzón comprime y penetra formando una superficie lisa de corte y (4) se inicia la fractura entre los dos bordes de corte que separan la lámina.	43
3.3. Aspecto esquemático del proceso de punzonado.	44
3.4. Doblado por rodillos.	45
3.5. Doblado de chapa.	45
3.6. Rebordonado.	46
3.7. Ejemplo de rebordonado.	46
3.8. Redondeado.	47
3.9. Arrollado y plegado.	47
3.10. Engargolado.	48
3.11. a) Embutición de una pieza acopada: (1) inicio de la operación y (2) cerca del final de carrera; y (b) piezas de trabajo correspondientes: (1) forma inicial y (2) pieza embutida.	49
3.12. Etapas en la embutición de una pieza.	50
3.13. Conformación de chapa por estirado.	50
3.14. Repujado convencional.	51
4.1. Alargamiento de una barra de sección transversal uniforme por la aplicación de una carga P	54

4.2.	Diagrama de fuerza alargamiento/esfuerzo deformación derivado de una prueba de tracción.	55
4.3.	Diagrama de carga-alargamiento para algunos materiales.	57
4.4.	Representación esquemática de un ensayo de compresión en condiciones de deformación plana.	58
4.5.	Influencia de la velocidad de deformación a) y de la temperatura b).	59
4.6.	Curvas de tensión-deformación real y nominal.	62
4.7.	Punto de inestabilidad sobre la curva tensión real-deformación natural.	64
4.8.	Modelos aproximados para la curva de tensión real-deformación natural.	65
5.1.	Sistema de tensiones sobre un cubo	72
5.2.	Sistema bidimensional de tensiones. Lámina cargada biaxialmente.	74
5.3.	Sistema de tensiones sobre un plano inclinado un ángulo θ respecto al eje y.	75
5.4.	a) Sistema de tensiones que actúa sobre un prisma elemental con un ángulo recto, en tensión bidimensional; b) Círculo de Mohr que corresponde al sistema de tensiones anterior.	78
5.5.	Representación mediante círculos de Mohr de un estado tridimensional de tensiones.	82
5.6.	Estado tensional representado en un círculo de Mohr correspondiente a un ensayo de tracción simple uniaxial.	85
5.7.	Estado tensional representado en un círculo de Mohr correspondiente a un ensayo de torsión.	86
5.8.	Estado tensional representado en un círculo de Mohr correspondiente a un ensayo de deformación plana.	87
5.9.	Ejemplo de deformación de un elemento material sometido a un estado de tensión de cortadura pura.	88
5.10.	Obtención en un diagrama $Y - \epsilon$ de la tensión efectiva σ_e necesaria para provocar una deformación efectiva ϵ_e	90
5.11.	Redondo sometido a tracción.	91
5.12.	Determinación del trabajo de deformación.	92
5.13.	a) Pieza de trabajo original; b) deformación homogénea; c) deformación no homogénea de la pieza de trabajo.	93
5.14.	Proceso real de trefilado.	95
5.15.	Deformación homogénea.	95
5.16.	Proceso de forja de una pieza cilíndrica.	98
5.17.	Proceso de laminación.	100

5.18. Proceso de extrusión directa. 105
5.19. Proceso de trefilado. 107

CAPÍTULO 1

Introducción a la Deformación de Metales

1.1. Introducción

Se denominan Procesos de Conformación por Deformación Plástica (en adelante PCDP) a aquellos procedimientos de obtención de componentes mecánicos que aprovechan el comportamiento plástico de los materiales, es decir, la posibilidad de cambiar la forma o dimensiones del material mediante la aplicación de unos esfuerzos exteriores suficientemente grandes. Dentro de una clasificación global de los procesos de producción, los procedimientos de fabricación por deformación plástica se enmarcarían en el conjunto denominado “procesos de conformado sin eliminación de material”, ya que durante su ejecución las pérdidas de material del componente obtenido con respecto al elemento de partida son, en general, prácticamente despreciables. Los procesos de conformado por deformación plástica tienen unos orígenes remotos, y han mantenido a lo largo de la historia un importante papel en el conjunto de la fabricación. De hecho, un gran porcentaje de los componentes que se fabrican han sufrido en un momento dado del proceso alguna operación de conformado por deformación.

El análisis de los PCDP se realiza a partir de la “Teoría de la Plasticidad”, que es el nombre que se da al estudio matemático de las tensiones y deformaciones en sólidos deformados plásticamente. El objetivo fundamental de la teoría de la plasticidad, desde el punto de vista del análisis de pro-

cesos de fabricación, es el desarrollo de técnicas matemáticas que permitan calcular distribuciones de tensiones y deformaciones en cuerpos deformados permanentemente por algún medio. De esta forma se pueden prever posibles problemas para la puesta a punto de dichos procesos y acortar el tiempo necesario para esta actividad, haciéndolos más flexibles y competitivos. Este análisis puede aplicarse a la obtención de los esfuerzos necesarios para la conformación y por tanto al dimensionado de equipos y plantas para el desarrollo de estos procesos. Así, el análisis teórico de los procesos de conformado puede, aún con sus restricciones, contribuir haciendo más racional la toma de decisiones en este contexto.

1.2. Deformación plástica de los metales

Los átomos de los metales en estado sólido ocupan posiciones de equilibrio en la red cristalina, que dependen de las fuerzas interiores de cohesión. Por lo tanto, si se somete a la pieza metálica a fuerzas exteriores, se altera el equilibrio y se producen desplazamientos atómicos que originan deformaciones. Estas deformaciones pueden ser de dos clases (figura 1.1):

- *Elásticas*, si los átomos recuperan la posición inicial de equilibrio cuando cesan las fuerzas exteriores.
- *Plásticas o permanentes*, en caso contrario.

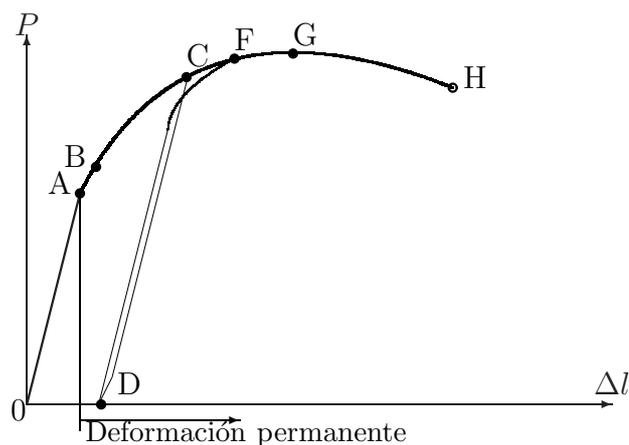


Figura 1.1: Curva carga-alargamiento.

Tecnológicamente las primeras forman la base de la Resistencia de Materiales, mientras que las segundas, la de los diferentes procesos de conformación de metales (excepto los de Fundición y Pulvimetalurgia), debido a la gran capacidad que para la deformación plástica presentan los metales. Así pues, todo material sometido a la acción de fuerzas exteriores reacciona en contra de ellas con otras interiores que las equilibran. A las fuerzas externas, calculadas por unidad de sección las denominamos esfuerzos, y a sus equivalentes internas, tensiones, que a su vez pueden ser normales o estar contenidas en un plano considerado (tensiones tangenciales o de cizallamiento). Las tensiones normales (σ), producirán tracción o compresión axial, mientras que las tensiones de cizalladura (τ) tenderán a deslizar una sección plana sobre otra paralela. Cuando la tensión normal supera un cierto valor crítico se produce la *rotura* o *despegue*, mientras que con tensiones tangenciales aparece el *cizallamiento* o *deslizamiento* de unos planos sobre otros.

1.2.1. Deformación de un monocristal

Consideremos un monocristal sometido a un esfuerzo. Así, si las tensiones tangenciales en los planos cristalográficos sobrepasan el valor límite τ_c , característico de cada metal (ley de Schmidt), los átomos se alejan demasiado de su posición normal de equilibrio produciéndose modificaciones apreciables en la estructura y en la forma exterior del cristal, que le impiden recuperar la forma primitiva cuando desaparece la causa, originándose así la deformación permanente o plástica. Las tensiones tangenciales provocan el deslizamiento de una parte del cristal a lo largo de un plano cristalográfico, siendo la longitud del deslizamiento un múltiplo entero del parámetro de la red.

El cálculo teórico de τ_c para un cristal ideal, obtenido a partir de los valores de las fuerzas interatómicas, conduce a valores 1000 a 10000 veces superiores a los que se obtienen en la práctica. Esto implica que el deslizamiento no se produce por un simple movimiento de una capa de átomos con respecto a otra. Debe existir alguna clase de debilidad mecánica en los cristales reales que sean la causa de que el deslizamiento se produzca aun con débiles esfuerzos aplicados. Esta debilidad del cristal está ligada o es debida a la existencia de imperfecciones en la red cristalina (defectos puntuales, lineales y de superficie). De entre ellos los que más influyen en la debilidad de la red frente a las deformaciones son los defectos lineales que se denominan *dislocaciones* (figura 1.2). Se admite que la deformación plástica es debida al movimiento de las dislocaciones a través de los planos de cizallamiento de un cristal bajo la acción de una tensión (figura 1.3).

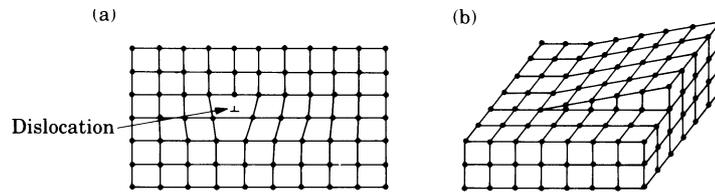


Figura 1.2: Dislocaciones en un monocristal.

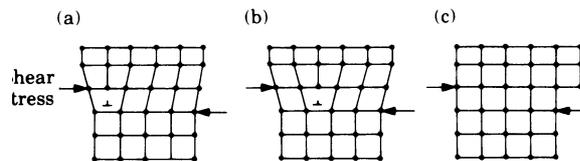


Figura 1.3: Movimiento de una dislocación a través de los planos de cizallamiento de un cristal bajo la acción de una tensión.

1.2.2. Deformación de los policristales

Los metales industriales son agregados policristalinos, formados por gran cantidad de pequeños cristales o granos orientados al azar, lo que hace que su comportamiento sea pseudo-isótropo, aunque los granos sean individualmente anisótropos. La deformación del policristal es mucho más compleja que la del monocristal, aunque esté regida por la mismas leyes. Puesto que cualquier esfuerzo que actúe sobre la pieza se transmite por el interior a través de los granos, cada uno de éstos queda sometido a la acción de varias fuerzas, dimanantes de los granos limítrofes. Si la componente tangencial supera al cizallamiento crítico en un plano cristalográfico, en él debe iniciarse la deformación plástica. Ahora bien, en un policristal, habrá planos de deslizamiento de ciertos cristales que presentarán una posición favorable al deslizamiento bajo la acción de los esfuerzos externos y otros que no. Por otra parte, la deformación plástica de los cristales que presentan la posición favorable, puede estar dificultada e incluso impedida, por los adyacentes colocados desfavorablemente, lo cual hace que en el policristal no exista un límite preciso entre la deformación elástica y la plástica. Los límites de los granos también obstaculizan la deformación plástica. Estos límites, que pueden estar formados por espesores de varios átomos, no poseen planos cristalinos regulares y en consecuencia, actúan como barreras al movimiento de dislocación.

De lo anteriormente expuesto se deduce que en un metal puro (en las

aleaciones puede no ser cierto por efecto de haber segregaciones), los límites de grano tienden a ser más fuertes que los cristales y en general una muestra de muchos pequeños cristales será más fuerte que otra del mismo metal que contenga un número inferior de granos.

1.3. Deformación en frío y en caliente

La conformación por deformación plástica puede realizarse en caliente o en frío, según que la temperatura de trabajo se halle por encima o por debajo de la *temperatura de recristalización*, respectivamente; sin que ello deba significar una estricta separación, ya que casi todos los procesos pueden tener lugar de una forma u otra.

1.3.1. Conformación en frío

La conformación en frío es la que se realiza a temperatura inferior a la de recristalización. No quiere decir, por tanto, que no se pueda utilizar energía térmica junto con la mecánica: basta con que su efecto no provoque cambios esenciales en la estructura cristalina.

Cuando se somete al metal a tensiones superiores a su tensión crítica, se produce el desplazamiento de las dislocaciones y tiene lugar la deformación plástica. Ahora bien, como consecuencia de la gran diversidad de orientaciones de los granos, no todos estarán en ese momento en posición favorable para que se inicie el desplazamiento de la dislocación, por lo que ésta se producirá sólo en algunos de ellos, alcanzándose un cierto grado de deformación plástica. Para aumentar la deformación debemos ahora producir el desplazamiento de la dislocación en cristales que por su orientación o impedimentos de los adyacentes (la red se desordena) requieren una mayor tensión crítica, es decir debemos aumentar los esfuerzos aplicados para seguir deformándolo. En otras palabras: cuanto mayor sea la deformación producida, mayor ha de ser la fuerza aplicada para que continúe deformándose. Este fenómeno se conoce con el nombre de *endurecimiento por deformación en frío* y es utilizado en la práctica para aumentar la resistencia de los metales a base de una pérdida de ductilidad.

1.3.1.1. Efectos de la conformación en frío

Las distintas orientaciones de los cristales y la baja movilidad atómica a las temperaturas de conformado, hacen que no haya homogeneización y por tanto las diferentes zonas del cristal pueden soportar distintas tensiones.

El desequilibrio de éstas dará origen a tensiones de largo alcance, también llamadas *macrotensiones* o *tensiones de Heyn*, cuyos efectos se manifiestan de las siguientes maneras:

- Produciendo deformaciones en las piezas mecanizadas, haciendo imposible su acabado final cuando las tolerancias son estrechas.
- Haciendo surgir esfuerzos superficiales de tracción que tienden a acentuar los defectos superficiales y aumentan la sensibilidad de entallas, rebajando la resistencia a la fatiga y favoreciendo la corrosión.
- Aumento de la dureza y fragilidad (acritud).

Las ventajas de estos procesos frente a los de conformado en caliente son:

- mejores superficies y tolerancias dimensionales
- mejores propiedades mecánicas (resistencia)
- mejor reproducibilidad
- confieren al material anisotropía (en caso de que esta característica suponga una ventaja para la aplicación de que se trate).

Las desventajas de estos procesos son:

- mayor necesidades de fuerza y energía debido al endurecimiento por deformación (equipo más pesado y potente)
- menor ductilidad
- se produce anisotropía en el material (en caso de que sea una circunstancia desfavorable)
- y es necesario que la pieza de partida presente unas superficies limpias.

Para producir grandes deformaciones es necesario realizar el proceso en varias etapas y someter el material, al final de cada etapa, a un tratamiento de recocido para eliminar las tensiones residuales.

1.3.1.2. Efectos del calentamiento en la deformación plástica

Al deformar un metal en frío se le comunica una energía y, por lo tanto, pasa a un estado de inestabilidad, puesto que su energía interna es ahora mayor que la que tenía sin deformar. A la temperatura ambiente la velocidad con que se pasa a la forma estructural estable es muy lenta, siendo posible aumentarla elevando su temperatura. Con ello se incrementa la agitación térmica y, en consecuencia, la movilidad atómica, dando lugar a la aparición de tres etapas: *restauración*, *recristalización* y *crecimiento de grano*.

a) **Restauración.** Caracterizada por la tendencia de los átomos a pasar a sus posiciones de equilibrio estable, sin que haya movimiento aparente de los contornos de los granos. Durante esta etapa se contrarresta la consolidación, desaparecen en el metal las tensiones internas, disminuye ligeramente la dureza y el límite elástico.

b) **Recristalización.** En esta etapa se forman cristales nuevos de entre los antiguos deformados. Comienza a partir de una determinada temperatura, con la formación de gérmenes que aparecen en los lugares de mayor acritud, en los límites de grano y en los planos de deslizamiento y maclado. Estos gérmenes crecen a expensas de los átomos que les rodean y, finalmente, sustituyen al edificio cristalino deformado. Paralelamente a estos cambios estructurales el metal recupera su plasticidad y las propiedades físicas tienden a alcanzar los valores que tenían antes de producirse la deformación. Estos efectos pueden seguirse estudiando el curso de las curvas representadas en la figura 1.4. Suele tomarse como valor de la temperatura recristalización

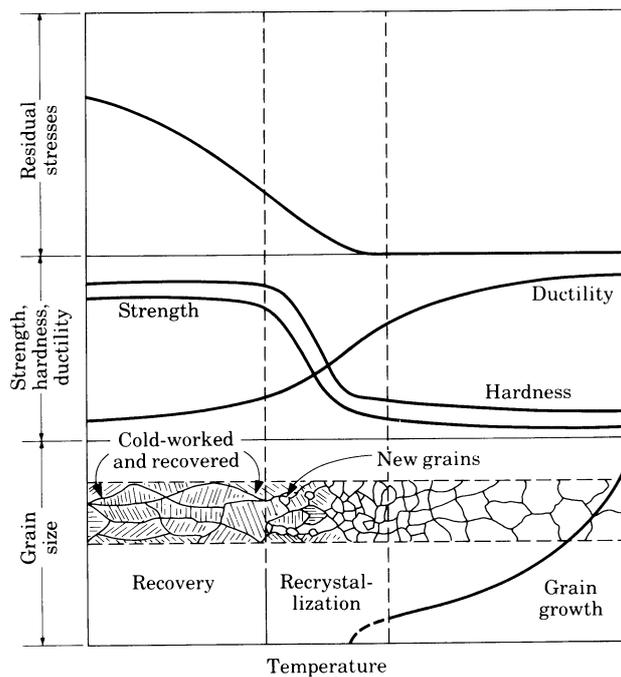


Figura 1.4: Efectos de la restauración, recristalización y crecimiento de grano en las propiedades mecánicas y en la forma y tamaño de los granos.

aproximadamente la mitad de la de fusión del metal en grados Kelvin.

c) **Crecimiento de grano.** Si continua el calentamiento por encima de la temperatura de recrystalización θ_r , comienza otra etapa, durante la cual el grano recrystalizado continúa creciendo a medida que aumenta la temperatura. El crecimiento de grano (llamado también coalescencia) por encima de la temperatura de recrystalización depende de la temperatura y del tiempo de calentamiento, siendo estos dos factores favorables para el aumento de grano.

1.3.2. Conformación en caliente

Según se ha dicho anteriormente la conformación en caliente se realiza operando a temperaturas superiores a la de recrystalización. Conforme elevamos la temperatura de un metal, deformándolo a la vez, aumenta la agitación térmica y disminuye la tensión crítica de cizallamiento, aumentando así la capacidad de deformación de los granos. Simultáneamente se produce también una disminución de la resistencia de los bordes de grano. Aparecen, pues, dos factores, ambos dependientes de la temperatura: la resistencia de los bordes de grano y la resistencia de los cristales, los cuales varían de la forma indicada en la figura 1.5. Ambas curvas se cortan en un punto al que

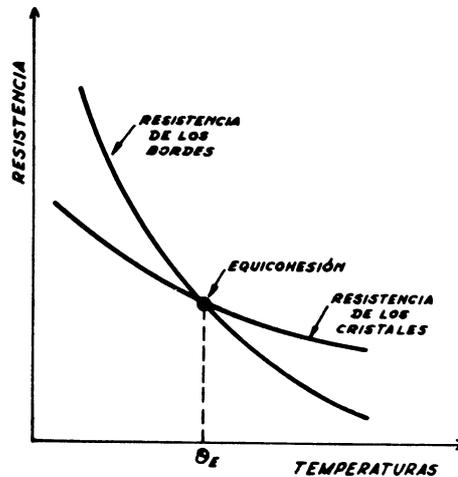


Figura 1.5: Resistencia de los bordes de grano y de los cristales en función de la temperatura.

corresponde una temperatura llamada de *equicohesión*, en la que se igualan las resistencias.

Cuando el material se trabaja a temperaturas inferiores a la de equicohesión las deformaciones se producen en el interior de los granos (transcristalina) y se origina acritud; por el contrario, a temperaturas superiores, la

deformación es intergranular, de tipo fluido y no se origina acritud.

En el trabajo en caliente hay que mantener, pues, la temperatura siempre por encima de la de recristalización. Ahora bien, como durante el tratamiento tienen lugar simultáneamente las deformaciones plásticas y la recristalización de los granos deformados, para que el metal no tenga acritud después de deformado, se requiere que la velocidad de recristalización sea suficientemente elevada, para que todos los granos hayan recristalizado al terminar el proceso. Por tanto, no basta con efectuar el trabajo por encima de la temperatura de recristalización; hay que mantener al metal con esa temperatura el tiempo suficiente para que la recristalización haya sido completada. La temperatura de trabajo tiene también un tope superior. Ha de ser inferior a la temperatura de fusión del metal y de las impurezas; y en caso de que haya eutéctico, por debajo de la temperatura de formación de éste.

1.3.2.1. Efectos de la conformación en caliente

Las ventajas de los procesos de conformado en caliente son las siguientes:

- Permite obtener la misma deformación que en frío con menores esfuerzos.
- Puesto que se producen simultáneamente la deformación y la recristalización, es posible obtener:
 - a) un grano más fino
 - b) materiales más blandos y dúctiles
 - c) aumenta la resistencia al impacto
 - d) ausencia de tensiones residuales
 - e) estructura más uniforme (las impurezas se eliminan fluyendo al exterior del material)
 - f) se pueden obtener grandes deformaciones
- Mayor densidad
- Estructura fibrosa y, por tanto, una mejor resistencia mecánica en la dirección de la fibra.

Las desventajas del conformado en caliente son

- Oxidación rápida (esto es, formación de escamas, dando por resultado superficies rugosas).

- Tolerancias relativamente amplias (2-5 %) debido a las superficies rugosas y dilataciones térmicas.
- La maquinaria de trabajo en caliente es costosa y requiere mantenimiento considerable.

1.4. Clasificación de los procesos de conformación metálica

En lo que sigue, los procesos de conformación serán clasificados en dos grandes grupos.

■ Procesos de conformación masiva.

La entrada de material se realiza en forma de tochos redondos metálicos o placas metálicas, experimentando en el proceso una variación considerable de la relación superficie-volumen en la conformación de la pieza. Los procesos de conformación en masa, presentan las siguientes características distintivas:

- La pieza de trabajo experimenta una gran deformación plástica, resultando un cambio apreciable en la forma o sección de la misma.
- El grado de deformación permanente es mucho mayor que el grado de deformación elástica, siendo esta última prácticamente despreciable.

■ Procesos de conformación de chapa metálica.

En los procesos de conformación de chapa metálica, la deformación plástica se produce sin ningún cambio significativo en el espesor de la chapa y características superficiales. Las características de los procesos de conformación de chapa metálica son:

- El material de trabajo es chapa metálica ó piezas obtenidas de la misma.
- La deformación normalmente causa cambios significativos en la forma, pero no en la sección de la chapa.
- En algunos casos las magnitudes de deformación permanente y deformación elástica son comparables, pudiendo ser la última bastante significativa.

En ambos casos, las superficies del material deformado y de las herramientas están en contacto, produciéndose una fricción entre ambos, teniendo una gran influencia en el proceso. En los siguientes capítulos se describirán algunos de los procesos de conformación más significativos.

CAPÍTULO 2

Procesos de conformación masiva

2.1. Forja

La forja es un proceso de conformación plástica, en el que se somete al material de trabajo a grandes presiones que actúan, unas veces en forma continua (con prensas), otras de modo intermitente (con martillos). Las piezas así obtenidas son, en unos casos, productos acabados (bielas, manivelas, etc.) y, en otros, sirven como preforma para un posterior mecanizado (ejes, cigüeñales, etc.).

Generalmente, la forja se realiza en caliente. En ocasiones también puede realizarse en frío, cuando se desea conseguir aumentos apreciables de dureza y resistencia del material de trabajo.¹ La acción conjunta de la energía calorífica y mecánica permite conseguir considerables reducciones de sección, modifica la macroestructura del material y crea un efecto de fibra.

2.1.1. Efectos que produce la forja

Además de los comentados en el capítulo anterior sobre el conformado en caliente, conviene resaltar los siguientes:

¹La forja en frío se aplica a metales que no son susceptibles de tratamiento térmico, bien porque no lo admiten, porque no sea deseable o porque sea muy costoso; otras veces, debido al tamaño excesivamente pequeño de las piezas (pernos, roblones, tornillos), que ocasiona un enfriamiento muy rápido de las mismas, con los consiguientes inconvenientes que esto puede producir.

- Elimina cavidades internas. Los altos esfuerzos a los que se somete el material, producen una condensación del mismo y por lo tanto la eliminación de poros, sopladuras, burbujas, etc.
- Afina el grano. Durante la forja entran en juego dos efectos complementarios: la deformación plástica de los cristales y la posterior recristalización y por lo tanto la consecución de un grano más fino.

2.1.2. Materiales forjables

Puesto que el trabajo de forja está basado en la aptitud de recristalización y crecimiento de grano, sólo podrán forjarse los materiales que cumplan esos requisitos.

Metales puros: Al, Cu, Fe, Ti, Zn.

Aleaciones formadas por una o varias soluciones sólidas: Acero, aleaciones del aluminio (Al-Cu, Al-Mg, Al-Zn, Al-Mn), de magnesio (Mg-Al, Mg-Zn, Mg-Mn), de cobre (latones Cu-Zn, Cu-Zn-Sn, Cu-Zn-Pb, Cu-Zn-Ni y bronces, Cu-Al, Cu-Ni, Cu-Si).

2.1.3. Fases en el trabajo de forja y operaciones de forja más comunes

Las fases son:

- Calentamiento (hornos para forja, fraguas).
- Deformación.
- Enfriamiento (no debe ser brusco para evitar grietas por contracciones rápidas).

Las operaciones de forja más comunes se pueden clasificar del siguiente modo:

- Forja libre.
- Forja con estampa semicerrada (matriz de impresión semicerrada).
- Forja con estampa cerrada (matriz de impresión cerrada).
- Forja por recalado.
- Forja en frío.

A continuación se describirán brevemente cada una de estas operaciones.

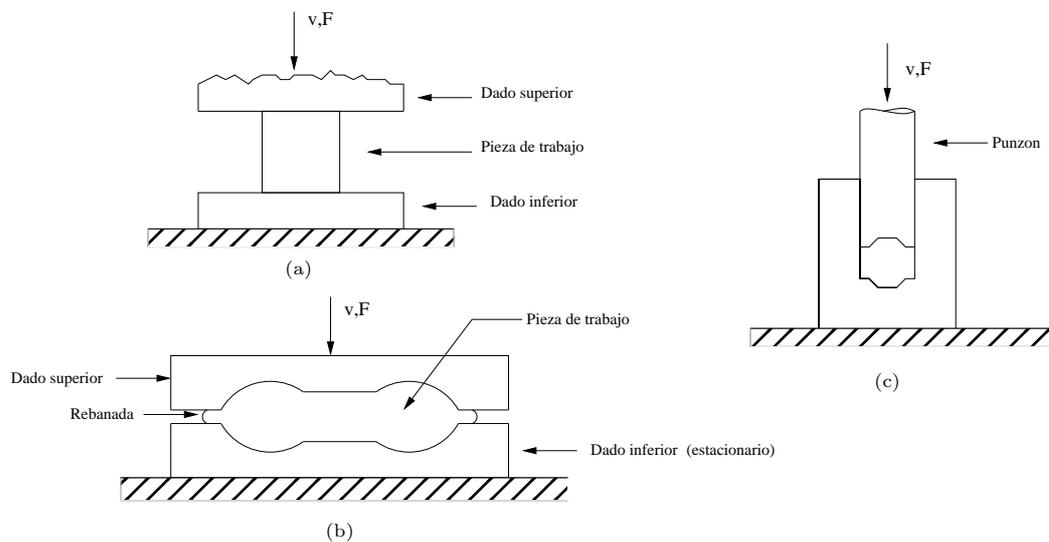


Figura 2.1: Tres tipos de operación de forja: a) Forjado libre, b) forjado con estampa semicerrada y c) forjado con estampa cerrada.

2.1.4. Forja libre

Fundamentos: La forja libre (forja en matriz abierta) es el proceso más antiguo de conformado de metales (figura 2.1a). Se caracteriza por no tener restricción alguna la herramienta en cuanto a forma y masa (no se confina el flujo del metal), en contraste con la estampa, que contiene la forma y dimensiones de la pieza a fabricar. Se trata de un proceso de conformación en caliente. El metal se calienta en toda su masa, hasta la temperatura correcta, antes de colocarse en el yunque. A continuación se golpea el metal con un martillo accionado mecánicamente, por vapor o neumáticamente. La forma deseada la obtiene el operario cambiando entre golpes la posición de la pieza.

Aplicación: A pesar de ser una operación sencilla y flexible, no es practicable para la producción a gran escala, pues es lenta y las dimensiones y forma de la pieza dependen de la destreza del operario. La forja libre se emplea en general para la fabricación de piezas únicas o series muy pequeñas, sobre todo de gran tamaño como ejes de turbinas, ejes de cola de grandes barcos, etc. hasta un peso del tocho de partida de 300 Tn.

2.1.5. Forja con estampa

Fundamentos: Con este tipo de proceso se eliminan las dificultades de la forja libre empleando matrices que controlan el flujo plástico del metal conformado, produciéndose una conformación total. La pieza de trabajo se coloca en la matriz inferior (figura 2.1) y se deforma plásticamente llenando la cavidad del molde. Suele ser común que la pieza tenga que ser desmoldeada con un eyector o expulsor.

Se puede distinguir entre forja con estampa semicerrada (figura 2.1b), cuando una parte del metal fluye más allá de la matriz de impresión formando una rebaba, y forja con estampa cerrada (figura 2.1c), cuando no se produce rebaba excedente. La rebaba que se origina entre las caras de las matrices debido al material excedente, es recortada con un troquel especial.

Existen diferentes máquinas para realizar este tipo de trabajos, como por ejemplo: martillos de vapor, martillos de tabla, prensas hidráulicas y mecánicas, etc.

La forja con estampa es un proceso que generalmente se realiza en varias etapas, a partir de un producto semielaborado, con el que se obtiene una preforma que convenga a la forma definitiva a fabricar. Forjas intermedias, sobre todo en formas complicadas son necesarias para conseguir una mejor distribución del material hasta llegar a la pieza final, ya que de otro modo fluiría solamente en la dirección más favorable y dejaría huecos en alguna zona de la pieza.

Aplicación: La forja con estampa se usa en la producción de una gran variedad de piezas de forma diversa (bielas, engranajes en bruto, palancas, etc.), limitada solamente por los requerimientos del proceso o de la matriz. En general, el resultado es una estructura fibrosa favorable. Las medidas alcanzables en este proceso oscilan entre amplios límites, se pueden forjar piezas de acero desde 10 gr de peso y 10 mm de longitud, hasta 2000 kg y 3,5 m. En el caso de aleaciones de aluminio, se pueden llegar a forjar hasta 10 m de longitud para cabeceras de alas de avión y 1,5 m para ruedas. En cuanto a la diversidad de formas, Spies, desde un punto de vista geométrico, establece una agrupación de formas semejantes tal como se indica en la figura 2.2.

Características de los productos: Las tolerancias son aceptables. La calidad de las superficies es razonablemente buena, aunque en general se requiere un procesamiento adicional para obtener mejores acabados superficiales.

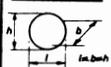
Clase 1 Forma ceñida  Piezas semejantes a esferas y cubos	Subgrupo	101.- Sin elemento secundario	102.- Con elemento secundario unilateral	103.- Con elemento secundario circundante	104.- Con elemento secundario unilateral y circundante	
Clase 2 Forma de disco  Piezas con contornos redondos, cuadrados y análogos. Piezas en cruz con brazos cortos. Cabezas recalcadas en formas largas.	Subgrupo Grupo de formas	Sin elemento secundario	Con cubo	Con cubo y agujero	Con borde (anillo)	Con borde y cubo
Clase 3 Forma alargada  Piezas con eje longitudinal estampado. Grupos - 1.- Piezas cortas l < 3h 2.- Piezas medianas l = 3 ... 8h 3.- Piezas largas l = 8 ... 16h 4.- Piezas muy largas (Estas cifras se colocan a continuación separadas por una //) Ejemplo 334/2	Subgrupo Grupo de formas	Sin elemento secundario	Con elementos secundarios simétricos respecto al eje del elemento principal.	Con bifurcación abierta o cerrada	Con elementos secundarios asimétricos respecto al eje del elemento principal.	Con dos o más elementos secundarios diferentes, de tamaño semejante.
	21 Con elemento secundario unilateral 22 Con elemento secundario bilateral	211  222 	212  223 	213  224 	214  225 	215  226 
	31 Elemento principal con eje longitudinal recto	311 	312 	313 	314 	315 
	32 Elemento principal con eje curvado en un plano.	321 	322 	323 	324 	325 
	33 Elemento principal con eje curvado en varios planos.	331 	332 	333 	334 	335 

Figura 2.2: Ordenación según geometría de las piezas forjadas (según Spies).

2.1.6. Forja por recalado

Fundamentos: La forja por recalado (figura 2.3) consiste en una acumulación (condensación) de material en una zona limitada de un producto acabado, generalmente en forma de palanquilla, barra redonda o perfil poligonal. Como se realiza por compresión axial, se produce simultáneamente un acortamiento de la pieza. La pieza de trabajo se coloca en una matriz estacionaria apoyada en un perno de desalajo o aprisionada en una matriz de desalajo. La herramienta se mueve entonces longitudinalmente, recalando la pieza en la cavidad de la matriz. Los materiales más apropiados para este tipo de conformado aceros bajos de carbono, cobre, aluminio y sus aleaciones. Existen una gran variedad de recaladores, produciendo piezas a gran

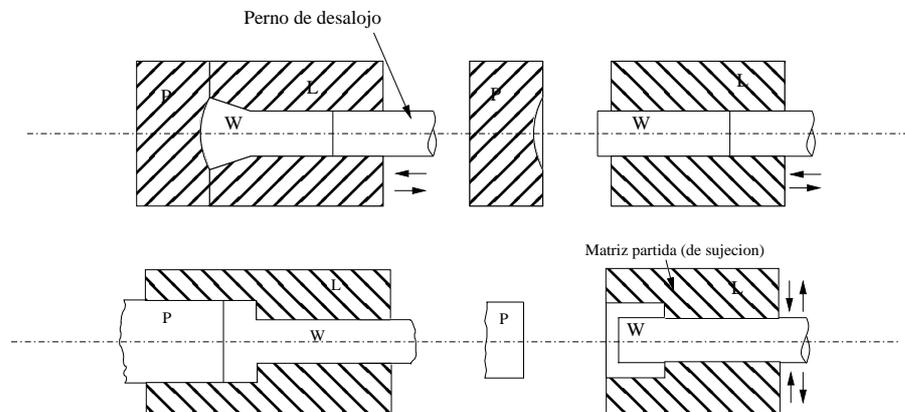


Figura 2.3: Forja por recalado (Recalado).

velocidad.

Aplicación: Este tipo de procesos tiene aplicación para forjar cabezas de pernos, tornillos, válvulas, acoplamientos y muchos otros componentes de pequeño tamaño.

Características de los productos recalados: Las tolerancias y la calidad de las superficies están determinados por las oxidaciones y lubricantes, principalmente.

2.1.7. Forja en frío

Fundamentos: En la forja en frío se obtienen cantidades de producción enormes. Con esta operación el metal es comprimido dentro de la matriz,

que le confiere la forma deseada (figura 2.4).

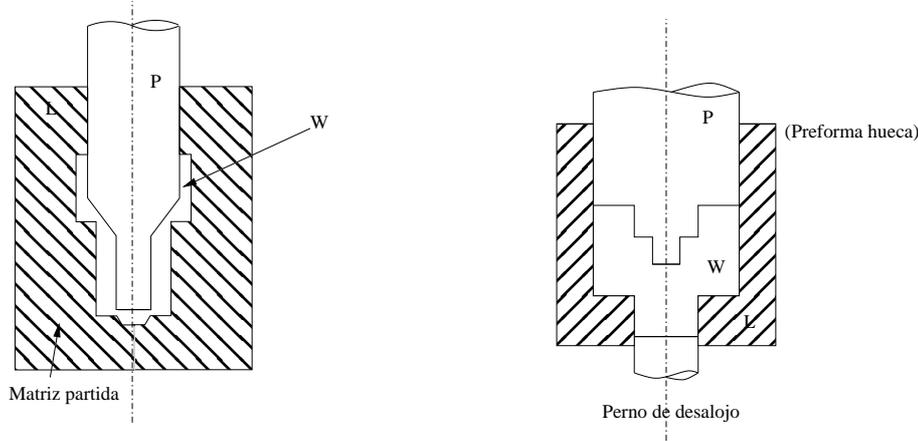


Figura 2.4: Forja en frío.

Aplicación: Este tipo de procesos presentan como ventaja el alto aprovechamiento del material, así como las excelentes propiedades mecánicas que resultan. Este proceso se usa extensamente en la fabricación de clavos.

Características de las piezas forjadas en frío: Se obtiene excelentes acabados superficiales. Las tolerancias se encuentran en torno a ± 0.05 mm para diámetros y ± 0.2 mm para longitudes.

2.2. Laminación

Fundamento: La laminación es un proceso de conformado por deformación plástica en el que el material fluye de modo continuo y en una dirección preferente mediante fuerzas de compresión, ejercidas al pasar el metal entre cilindros, y de cizallamiento, originadas por el rozamiento entre los cilindros y el metal. A diferencia de la forja, que se conoce desde muy antiguo, la laminación es relativamente moderna, pues aunque los primeros ensayos datan del siglo XV, fue realmente en el siglo XVIII cuando se aplicó técnicamente al acero. Esencialmente la laminación consiste en hacer pasar un metal entre dos rodillos separados por un hueco algo menor que el grueso del metal entrante, y que rotan en sentido contrario, tal como se representa en la figura 2.5. Los rodillos giran con una velocidad superficial superior a la del metal

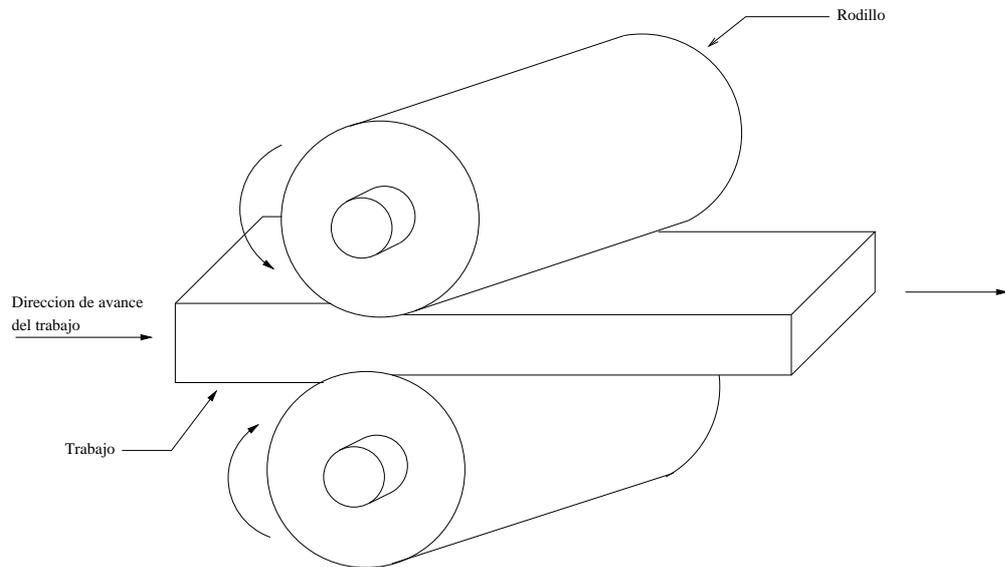


Figura 2.5: Proceso de laminación (laminado plano).

entrante por lo que el rozamiento entre ambas superficies en contacto actúa impulsando el metal hacia delante. Ya que la anchura del material casi se mantiene constante durante la deformación, la reducción de espesor da por resultado un incremento correspondiente de longitud debido a la constancia de volumen.

Aplicación: Su nombre no debe conducir al error de suponer que este método de conformado queda limitado a la producción de láminas, planchas, así como tampoco a la simple variación de forma o espesor de lingotes fundidos para transformarlos en productos semielaborados o acabados. Esto es lo que actualmente se considera como laminación clásica (o convencional), para distinguirlo de aquellos casos en que, sobre todo por laminación en frío, se consiguen piezas totalmente acabadas (tornillos, álabes de turbinas, etc.) con excelente acabado y características resistentes.

La laminación en caliente se aplica a la conformación inicial de grandes lingotes (actualmente también se parte del producto de la fundición continua), en los que las considerables deformaciones que sufren sólo son posibles con el concurso de energías mecánica y térmica simultáneamente y para altos volúmenes de producción. Los productos más comunes son placas, barras, varillas, perfiles estructurales, etc.

La laminación en frío se aplica en el caso de producirse deformaciones

con un pequeño campo de tolerancias (mayores precisiones dimensionales), cuando se desean obtener en el material características propias de estos tratamientos (mejores propiedades mecánicas), así como conseguir un acabado superficial más fino. Ejemplos son láminas, largueros, varillas,...

Para la laminación se requiere un equipo pesado y muy especializado en función de que la conformación se realice en frío o en caliente.

Características de los productos laminados: Los productos laminados en caliente presentan superficies ligeramente rugosas cubiertas de óxido conocido como cascarilla ó batidura. Las tolerancias dimensionales se sitúan entre el 2 y 5%. La laminación en frío produce superficies lisas y mejores tolerancias dimensionales (entre 0,5 y 1%).

Materiales y formas: Dentro de los metales y aleaciones, pueden ser laminados todos los que hemos señalado como forjables, además de otros en los que su buena maleabilidad o ductilidad lo permiten. Son laminables por lo tanto, los aceros, aluminio, cobre, magnesio, plomo, estaño, cinc y sus aleaciones. Algunos lingotes destinados a la producción de chapa de acero pueden pesar 20 ó más Tn y tener un espesor superior a 300 mm. Algunos trenes de laminación pueden producir 50000 Tn de desbastes de acero por semana con anchuras de hasta 180 cm, mientras que en aluminio se pueden laminar bandas de 440 cm y conseguir hojas de aluminio de hasta 0,025 mm de espesor. Es un sistema de producción de una alta productividad, consiguiéndose una gran cantidad de producto. El cuadro siguiente (figura 2.6) realiza una clasificación en función del modo de laminar y de la sección del perfil obtenido.

Tipos de laminado:

- Laminado plano (figura 2.5). Involucra el laminado de planchas, tiras, láminas y placas, piezas de trabajo de sección transversal rectangular con un ancho mayor que el espesor.
- Laminado de perfiles (figura 2.8). En el laminado de perfiles, el material de trabajo se deforma para generar un contorno en la sección transversal. Los productos hechos por este procedimiento incluyen perfiles de construcción como vigas en I, en L o canales en U; rieles para vías de ferrocarril y barras redondas y cuadradas, así como varillas. El proceso se realiza pasando el material de trabajo a través de rodillos que tienen impreso el reverso de la forma deseada.

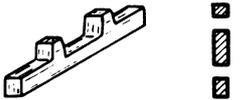
TIPO DE CILINDRO	SECCION DEL PERFIL	EJEMPLOS
Superficie cilíndrica	Forma y superficie constantes	
Canal con sección constante		
Canal con sección variando continuamente	Forma constante superficie variando continuamente	
	Forma y superficie variando continuamente	
Canal con sección de variación discontinua	Forma constante superficie con variación discontinua	
	Forma y superficie con variación discontinua	
		

Figura 2.6: Ordenación de formas de las piezas laminadas (según Spies).

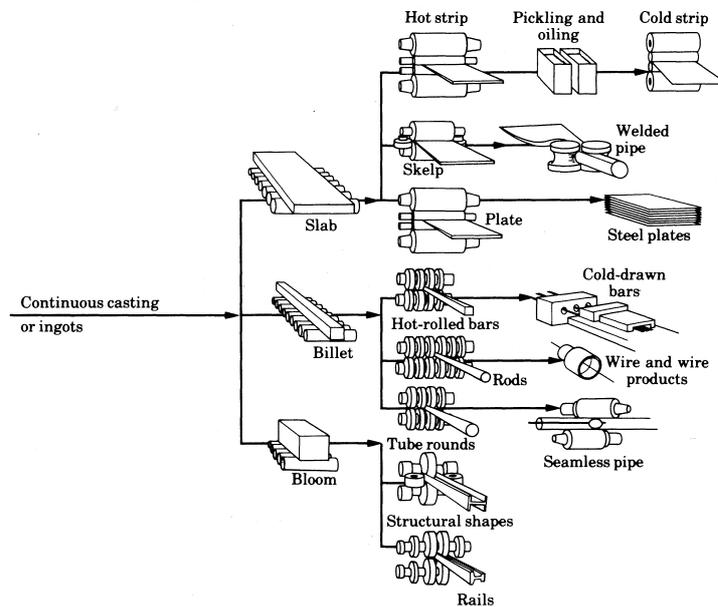


Figura 2.7: Esquema descriptivo de los diferentes procesos de laminación existentes

- Laminado de anillos (figura 2.9). Lamina las paredes gruesas de un anillo para obtener anillos de paredes más delgadas pero de un diámetro mayor. Ejemplos son: collares para rodamientos de bolas y rodillos, llantas de acero para ruedas de ferrocarril y cinchos para tubos, recipientes a presión y máquinas rotatorias.
- Laminado de roscas (figura 2.10). Se usa para formar roscas en piezas cilíndricas mediante su laminación entre dos matrices. Es un proceso de conformado en frío. Ejemplos: pernos, tornillos, etc.
- Laminado de engranajes. Es un proceso de conformado en frío muy usado en la industria automotriz.
- Laminación de tubos.
 - Laminación de tubos sin costura (perforado, figura 2.11). Es un proceso especializado de trabajo en caliente para hacer tubos sin costura de paredes gruesas. Utiliza dos rodillos opuestos y por tanto se agrupa entre los procesos de laminado.

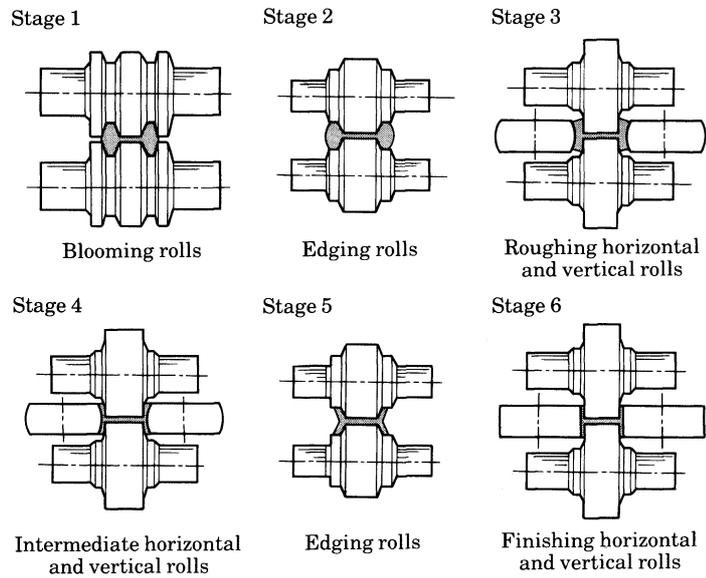


Figura 2.8: Conformado de un perfil en doble T.

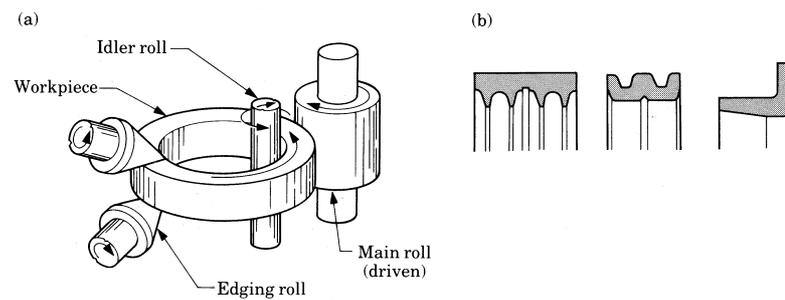


Figura 2.9: Laminación de anillos: a) esquema del proceso; b) ejemplos de secciones que se pueden obtener.

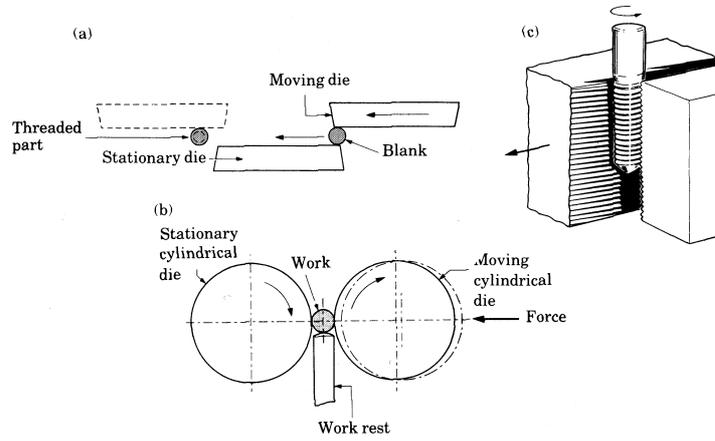


Figura 2.10: Laminación de tornillos

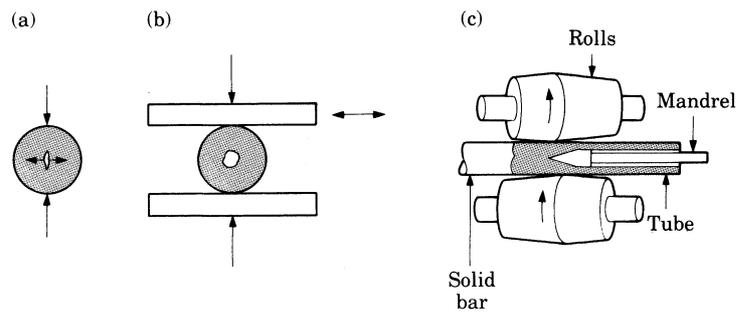


Figura 2.11: Laminación de tubos sin costura.

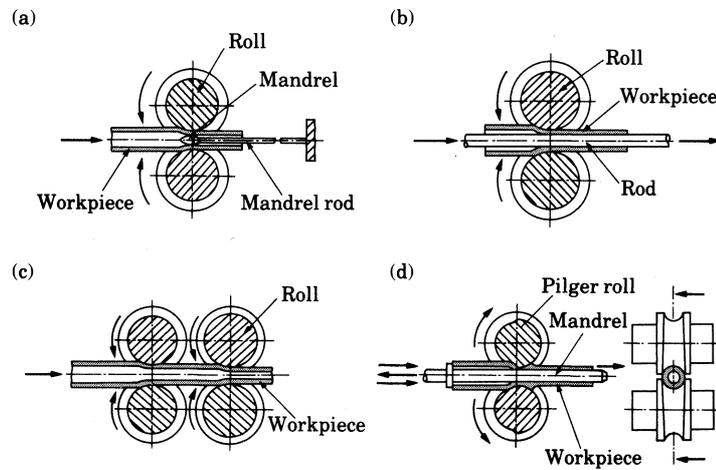


Figura 2.12: Laminación de tubos.

- Laminación de tubos (figura 2.12). Este proceso permite obtener tubos de diferentes diámetros mediante la reducción del diámetro de un tubo de partida.
- Laminación de tubos con costura (figura 2.7). Este proceso consiste en obtener tubos a partir de una chapa que es curvada por la acción de unos rodillos con la forma apropiada.

2.3. Extrusión

La extrusión es un proceso de conformado de metales relativamente moderno. La extrusión comercial de tubos de plomo empezó a principios de siglo XIX, pero hasta finales de siglo no fue posible extruir latón, debido a que no se disponía de las grandes y sostenidas presiones requeridas. Esta falta de equipo se superó finalmente calentando los tochos a alta temperatura para reducir la tensión de fluencia, pero ésto creó el problema de tener que construir recipientes para los tochos de las prensas de extrusión que soportasen las severas condiciones de alta temperatura y presiones. La extrusión del acero no fue comercialmente practicable hasta 1930. Uno de los inconvenientes de este proceso es la necesidad de lubricación. La introducción de la lubricación con vidrio fundido permitió el avance de esta técnica de conformado por deformación plástica. Esta lubricación supuso una gran ventaja sobre la realizada anteriormente con grafito, consiguiéndose así presiones de extrusión menores,

una vida de la matriz más larga y la posibilidad de utilizar tochos más largos. Actualmente otros materiales compiten con el vidrio como lubricantes.

Es un proceso, realizable en caliente o en frío, en el que mediante un émbolo o punzón, se presiona al material obligándole a fluir por compresión a través del orificio de una matriz, el cual da su forma a la pieza. De esta forma se obtiene un producto de sección transversal reducida. En este tipo de operaciones es más común el trabajo en caliente con el fin de reducir la fuerza necesaria, eliminar los efectos del trabajo en frío y disminuir las propiedades direccionadas. En el seno del metal se produce un estado de tensión biaxial. Un ejemplo de proceso de extrusión lo tenemos en la figura 2.13 con algunas de las secciones que nos permite producir. La presión de conformación actúa

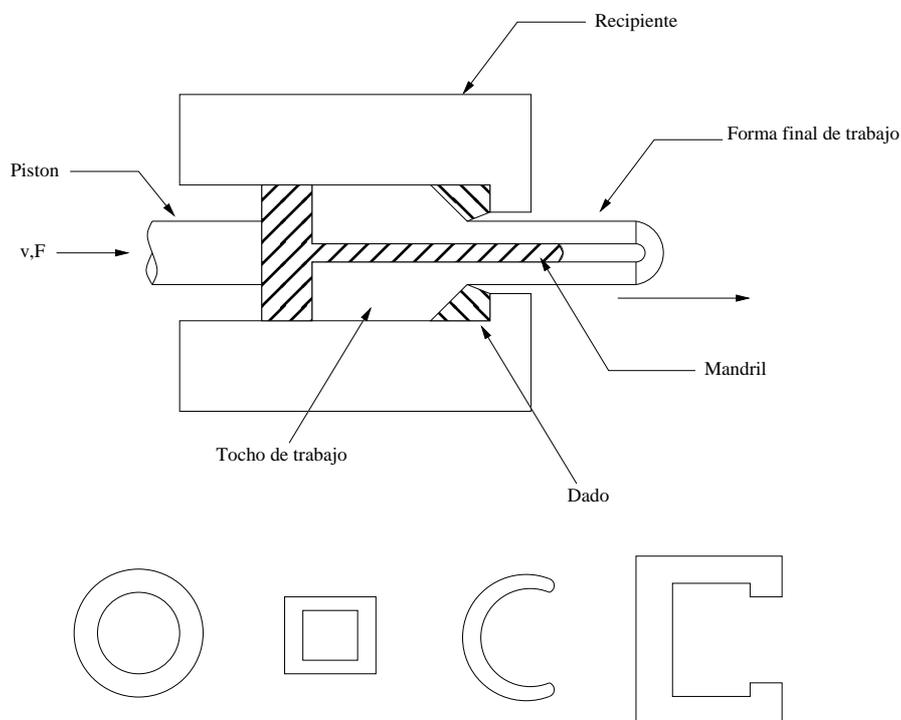


Figura 2.13: Extrusión directa para producir una sección transversal hueca o semihueca.

sobre la herramienta, de acuerdo con la forma geométrica del volumen, según una componente axial y otra radial.

En principio se pueden extrusionar todos los metales y aleaciones, siempre que posean una buena capacidad de deformación y presenten al conformarlos, un bajo grado de acritud. Deben tener un límite elástico bajo, un gran

alargamiento y poca dureza. Los metales que más se extruyen son los de bajo límite elástico (plomo, cobre, aluminio y magnesio, y sus aleaciones). Los aceros resultan más difíciles de extruir, ya que al presentar límites elásticos mayores, tienden a soldarse en las paredes de la hilera a causa de las condiciones de presión y temperatura que se originan. En el cuadro de la figura 2.1 se presentan los más utilizados.

Extrusión en frío	Extrusión en caliente
Estaño, Zinc, Cobre, Latones 1° título (por ejemplo 15% y 30% de Zn.)	Plomo, Zinc, Cobre, Latones de 2° título (por ejemplo 42%, 40%, 33% de Zn)
Aluminio y sus aleaciones (Al-Mg-Si, Al-Cu-Mg, Al-Mg 3)	Aluminio y sus aleaciones (Al-Mg-Si, Al-Cu-Mg, Al-Mg) a 450°
Aceros	
Acero al carbono hasta C<0,4% calmados y ligeramente aleados con Mn, Si, Cr, Ni, Mo	Aceros al carbono hasta C<1,5% y altamente aleados con Cr, Mn, Si, Ni, Mo

Cuadro 2.1: Materiales más utilizados en la extrusión.

Extrusión en frío	Extrusión en caliente	
	Metales no férreos y ligeros	Aceros y Metales pesados
Acero y Materiales pesados		
Diámetro hasta 150 mm.	400 mm.	250 mm.
Espesor mínimo hasta 0,3 mm. $\approx 0,07D$	0,07 mm. $\approx 0,01D$	2 mm. $\approx 0,2D$
Espesor mínimo del fondo 1,5 mm. $\approx 0,1D$	0,5 mm. $\approx 0,05-0,1D$	2 mm. $\approx 0,05D$
Peso hasta 5 Kg.	20 Kg.	50 Kg.

Cuadro 2.2: Dimensiones de las piezas extrusionadas según Feldmann.

Características de las piezas: Las piezas obtenidas por este tipo de conformado pueden ser macizas o huecas asimétricas, pero con superficies laterales paralelas e incluso, antisimétricas con cabeza, fondo y elementos laterales

de cualquier forma. En cuanto a las dimensiones, la longitud de una pieza extruida no debe sobrepasar 15 veces el diámetro de la pastilla inicial. El cuadro 2.2 resume las dimensiones según Feldmann.

La extrusión se puede llevar a cabo de varias maneras. Suele establecerse una primera clasificación atendiendo al sentido del movimiento del material extrusionado con relación al movimiento del émbolo:

- directa,
- inversa o
- mixta

2.3.1. Extrusión directa

Fundamentos: En la extrusión directa (de formas macizas o huecas), el material a conformar se coloca en una matriz y por la acción de un punzón o émbolo, se hace pasar el material a través del orificio de la matriz en el sentido de la fuerza aplicada. El material, por tanto, fluye en igual dirección y sentido que el émbolo que lo impulsa. La figura 2.14 muestra un esquema de la extrusión directa. Al presionar el émbolo, fluye el material por la matriz hacia la derecha, a la vez que las heterogeneidades superficiales de la palanquilla lo hacen en dirección opuesta a través del espacio comprendido entre el contenedor y émbolo, formando un corto casquillo que al final se elimina, lo mismo que la parte última de la palanquilla (culote) que tampoco se puede extruir.

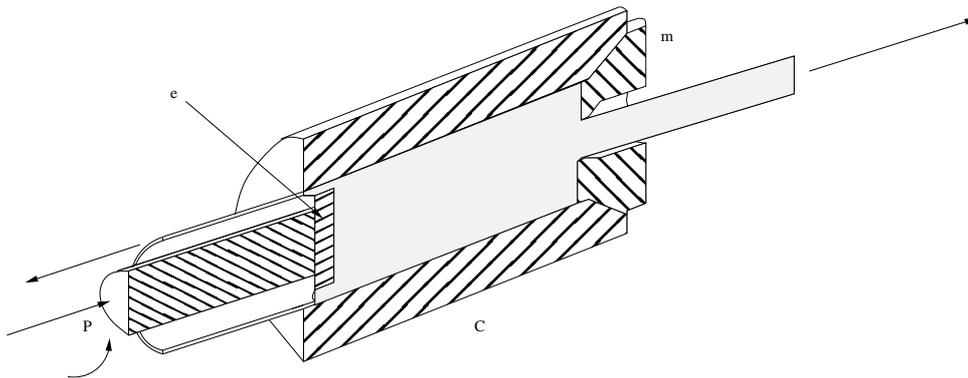


Figura 2.14: Extrusión directa

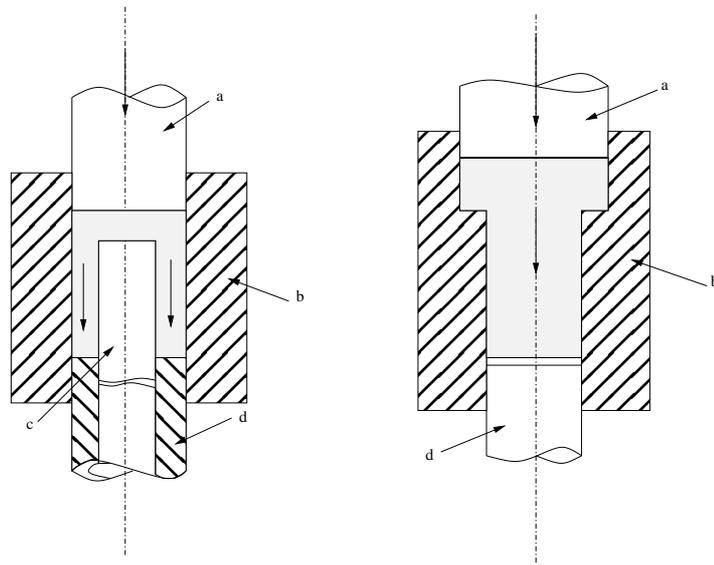


Figura 2.15: Ejemplos de extrusión directa

En este tipo de extrusión se consume mucho trabajo, en primer lugar, para conseguir la fluencia del metal y, en segundo, para vencer el fuerte rozamiento entre aquél y las paredes de la matriz. Para los procesos en caliente se usan prensas hidráulicas especialmente diseñadas. Para el trabajo en frío, se emplean prensas hidráulicas y mecánicas de uso general. La figura 2.15 muestra tres ejemplos de este tipo de extrusión. En ella 'a' es el punzón, 'b' el contenedor, 'c' la contramatriz y 'd' el extractor.

Aplicación: Como proceso de trabajo en caliente, se usa extensamente para producir una gran variedad de perfiles estructurales (regulares e irregulares) tales como ángulos, vigas en I y en U, tuberías de secciones variadas etc. Como proceso de trabajo en frío, es una variante de la forja en frío usada o combinada con cabeceado en frío, extrusión inversa o con otros procesos.

Características de los productos fabricados: El trabajo en frío proporciona excelentes tolerancias (del 0.1 al 1 %) y acabados superficiales. En el trabajo en caliente, las tolerancias y las superficies son aceptables.

2.3.2. Extrusión inversa

Fundamentos: En la extrusión inversa (figura 2.16), el contenedor está cerrado en un extremo y el metal se extrusiona hacia atrás pasando por la matriz, situada en el extremo del émbolo. Por supuesto, ahora el pistón o émbolo es hueco para permitir la salida del metal. El material fluye plásticamente alrededor del punzón o dentro de él. Aquí el rozamiento es menor, ya que la palanquilla no se mueve en el contenedor, sin embargo, al ser hueco el pistón, las presiones no pueden ser tan grandes. En la figura 2.17 se muestran tres ejemplos de extrusión inversa.

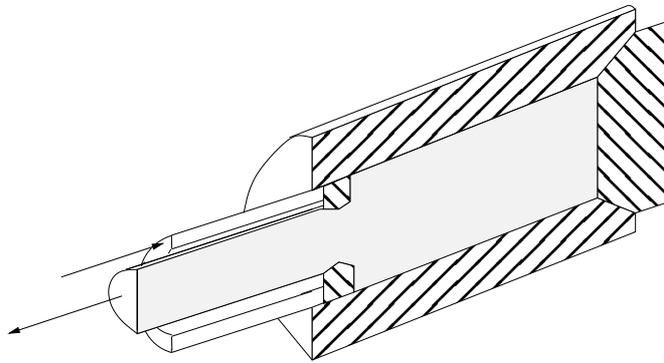


Figura 2.16: Extrusión inversa.

Aplicación: Este proceso se utiliza para producir perfiles estructurales (regulares o irregulares), tubos y componentes tubulares, etc. Una variante bastante común de este tipo de procesos, es la extrusión de envases. Esta variante se utiliza en la producción en serie pues el equipo necesario es bastante costoso.

Características de las piezas fabricadas: Cuando se trata de un proceso de trabajo en frío, las tolerancias ($0,05 \div 0,2$ mm) y los acabados superficiales son bastante aceptables.

2.3.3. Extrusión mixta

Existe un tercer sistema combinación de los dos anteriores en el que el material fluye simultáneamente en y contra el sentido de movimiento del

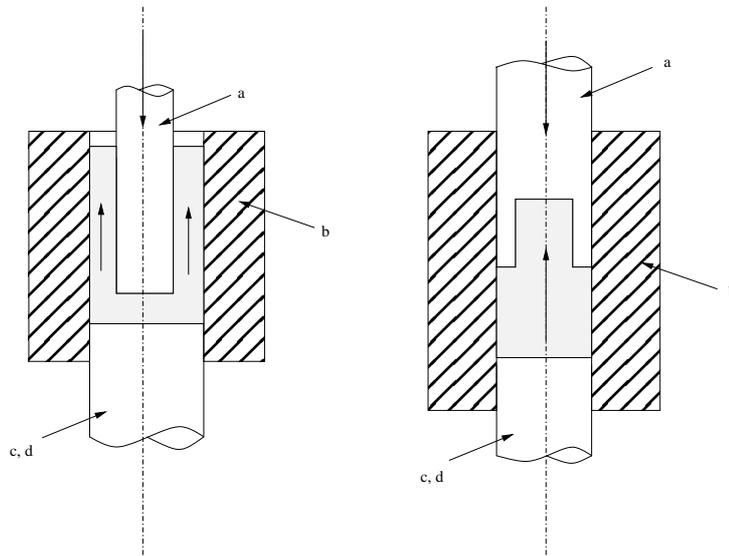


Figura 2.17: Ejemplos de extrusión inversa.

émbolo, obteniéndose así cuerpos huecos y macizos, paredes de distinto espesor, incluso con rebordes y escalonadas. La figura 2.18 muestra ejemplos de este tipo.

2.3.4. Extrusión por impacto

Finalmente existen también sistemas de extrusión con una gran velocidad de extrusión. Ejemplo típico es la fabricación de tubos de paredes finas. La extrusión por impacto se realiza a altas velocidades y carreras más cortas que la extrusión convencional. Se usa para hacer componentes individuales. Como su nombre indica, el punzón golpea a la pieza de trabajo más que aplicar presión. La extrusión por impacto se realiza normalmente en frío y mediante extrusión inversa. Las características de alta velocidad del proceso permite grandes reducciones y altas velocidades de producción, de ahí su importancia comercial.

2.3.5. Extrusión hidrostática

Un problema de la extrusión directa es la fricción a lo largo de la interfase tocho-contenedor. Este problema se puede solucionar al poner en contacto el tocho de trabajo con un fluido en el interior del recipiente y presionar

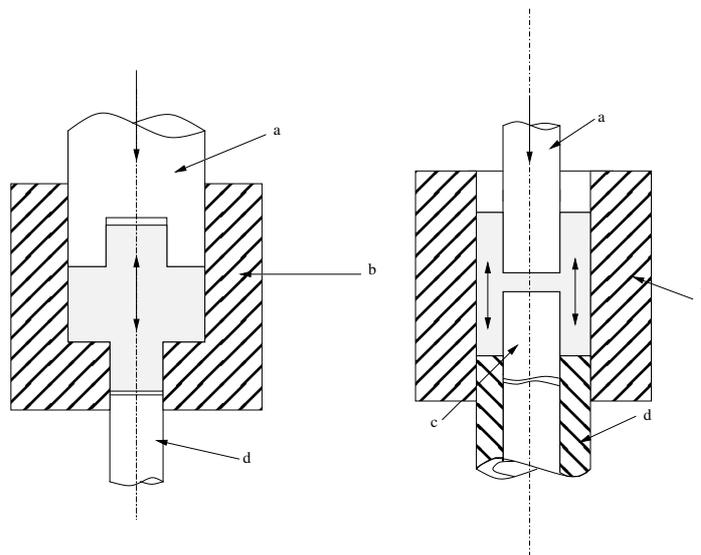


Figura 2.18: Ejemplos de extrusión mixta.

el fluido por el movimiento hacia delante del pistón, como se muestra en la figura 2.20.

2.4. Estirado y trefilado

Fundamento y características de las piezas: El estirado y el trefilado son dos procedimientos de conformado por deformación plástica (figura 2.21) en los que la deformación permanente se realiza por la acción de fuerzas de tracción, con el consiguiente alargamiento del material, al hacer pasar el material a través de orificios calibrados denominados hileras. Se opera, como fase intermedia o como acabado, con perfiles laminados o extruidos y, generalmente, en frío, lo cual confiere al material las propiedades inherentes a estos procesos: mayor dureza, aumento de la resistencia y mejor acabado superficial, teniéndose así la posibilidad de disminuir las tolerancias. Ambos procesos (estirado y trefilado) en realidad son idénticos, la diferencia estriba en el fin perseguido.

En el estirado se pretende efectuar reducciones de sección, para conseguir formas o calibres determinados, así como mejorar su calidad superficial. Se realiza en una pasada y el material de trabajo al que se aplica suelen ser barras de 4 a 6 metros de longitud y diámetro superior a 10 mm, y también a tubos.

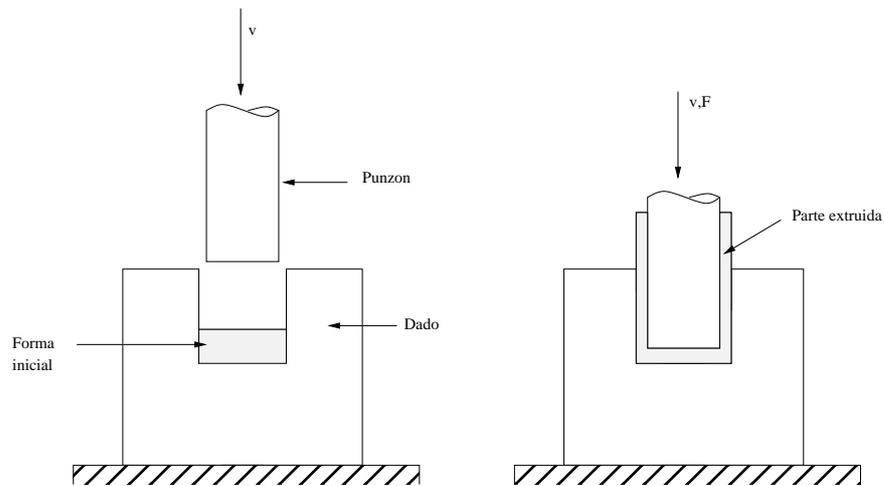


Figura 2.19: Extrusión por impacto.

En el trefilado el interés se centra en conseguir grandes reducciones de sección, lo que exige realizar el trabajo en más pasadas. El material de trabajo que utiliza el trefilado son redondos obtenidos por laminación de 5 a 8 mm de diámetro, que se conocen con la denominación de fermachine. El trefilado tiene como finalidad normalmente la fabricación de alambre a partir de la reducción de diámetro de un perfil redondo de metal, sometido a un esfuerzo de tracción, haciéndole pasar a través de una matriz circular.

Grandes cantidades de varillas, tubos, alambres y perfiles especiales, se terminan mediante un estirado en frío, haciéndoles pasar a través de una hilera (figura 2.22). Cuando se pretende producir piezas cilíndricas de paredes relativamente gruesas (tanques de oxígeno, proyectiles de artillería, torretas de tanques y tubos cortos) se puede utilizar el estirado en caliente (figura 2.23).

A las barras grandes hasta de 150 mm de diámetro y algunas veces mayores, se les da con frecuencia una ligera pasada, que reduce su diámetro en 1,5 mm para mejorar el acabado superficial y las tolerancias dimensionales. En muchos tamaños más pequeños de redondos, se estiran hasta conseguir reducciones del 50 %, y en los alambres se pueden conseguir reducciones del 90 % en pasadas sucesivas, partiendo de material en estado recocido y antes de que sea necesario un nuevo recocido con el fin de eliminar su acritud. Se fabrican alambres, que terminan con diámetros de 0,025 mm incluso menores, haciéndoles pasar a través de un gran número de hileras antes de conseguir el tamaño final y con varios recocidos intermedios durante el proceso (figura

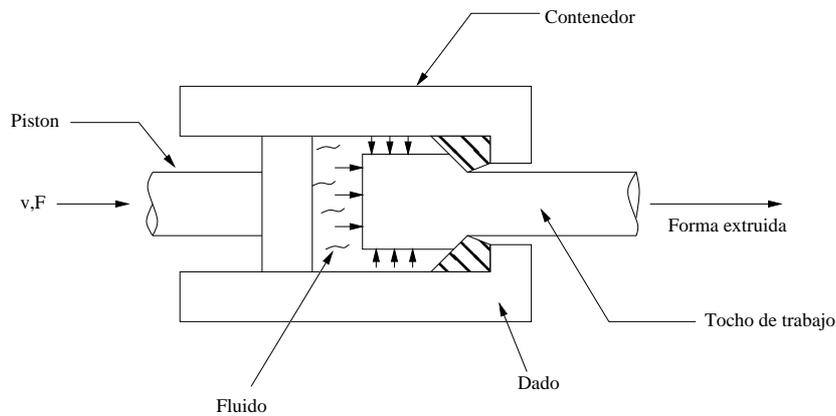


Figura 2.20: Extrusión hidrostática.

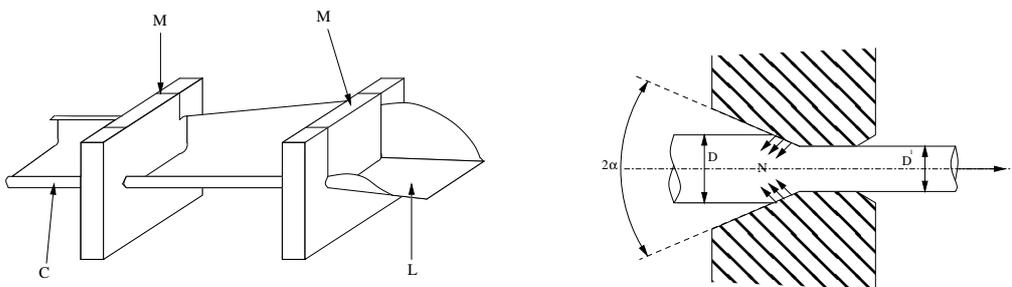


Figura 2.21: Descripción esquemática de los procesos.

2.24).

Podemos encontrarnos con estirado de perfiles, barras y tubos. El proceso de estirado se puede usar para reducir el diámetro o el espesor de la pared de tubos sin costura, después de producido el tubo inicial por medio de alguna otra operación como extrusión. El estirado del tubo se puede llevar a cabo con o sin mandril (figuras 2.25 y 2.26).

El estirado es también un término que se utiliza para el trabajo en láminas metálicas.

Materiales empleados: Los materiales y aleaciones que se someten a conformación por estirado deben ser:

1. Suficientemente dúctiles.
2. De suficiente resistencia a la tracción, para que no se rompan al estirar.

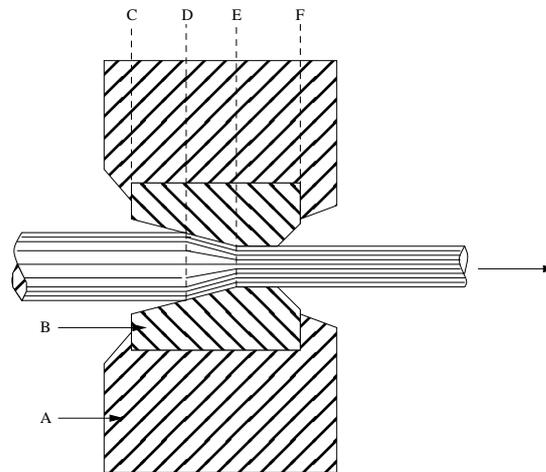


Figura 2.22: Proceso de estirado o trefilado.

3. De excelente calidad en cuanto a la uniformidad de composición y estructura, ya que cualquier defecto puede provocar la rotura de la barra.

Los materiales más indicados son: aceros, latones, cobre, aluminio y sus aleaciones y magnesio y sus aleaciones.

Operaciones: Las operaciones realizadas durante estos procesos son:

- Decapado. Consiste en limpiar y preparar el material, eliminando de él las escamas y óxidos que pueden haberse formado en las superficies, en las laminaciones previas. En general suele hacerse por ataques químicos y una posterior limpieza con agua a presión.
- Estirado y trefilado propiamente dicho. Los factores decisivos son los lubricantes y tipos de máquinas. Como lubricantes se utilizan normalmente, parafina, grafito finamente dividido y grafito en solución coloidal.
- Acabado. Una vez que el material sale de la hilera, generalmente se le somete a las operaciones de enderezamiento, recocido de afino de grano o de eliminación de tensiones y algunas veces tratamientos isotérmicos a fin de conseguir mejorar las características mecánicas del producto.

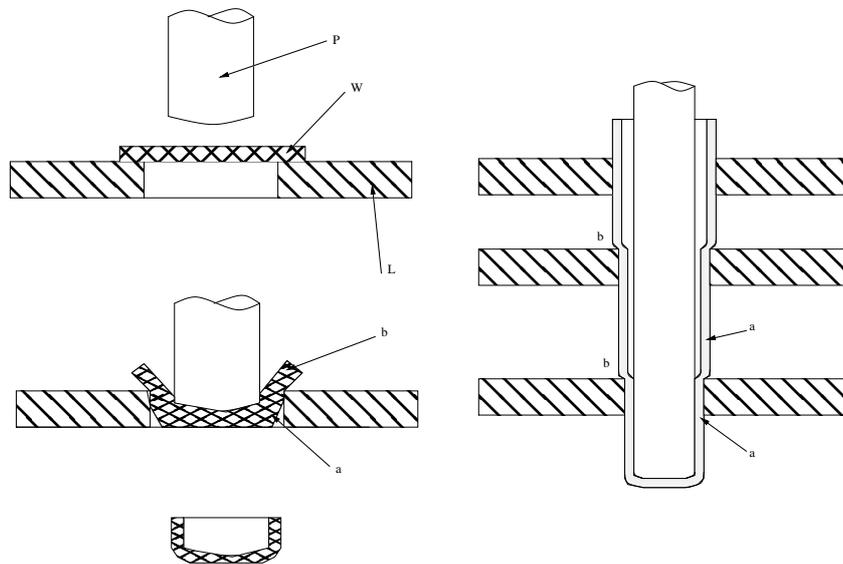


Figura 2.23: Proceso de estirado en caliente.

2.5. Repujado por deslizamiento

Fundamentos: En el repujado por deslizamiento (figura 2.27), la conformación se realiza a partir de un disco plano en rotación, por aplicación localizada de presión mediante un mandril en una de las caras del mismo, obligando al metal a deformarse, reduciéndose el espesor de la chapa según el ángulo agudo del mismo. La conformación plástica del metal se efectúa totalmente bajo cizalladura. El espesor de la pared es función de la inclinación.

Aplicación: Se suelen repujar espesores de hasta varios centímetros para conformar tapas abombadas de recipientes a presión y cisterna. Los planchas gruesas de metales de conformación difícil, tales como el Titanio, se trabajan de este modo.

Características de los productos repujados por deslizamiento: En general presentan buenas tolerancias y acabados superficiales.

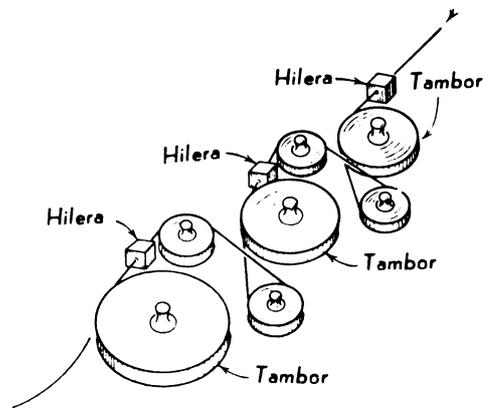


Figura 2.24: Proceso de trefilado de alambres.

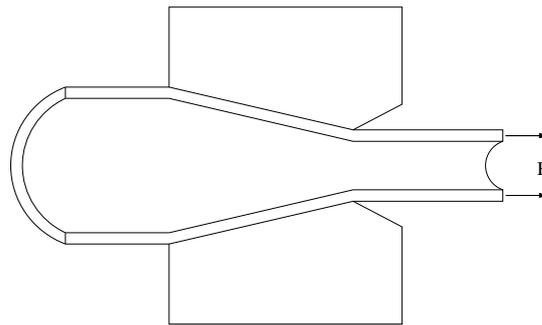


Figura 2.25: Proceso de estirado de tubo sin mandril.

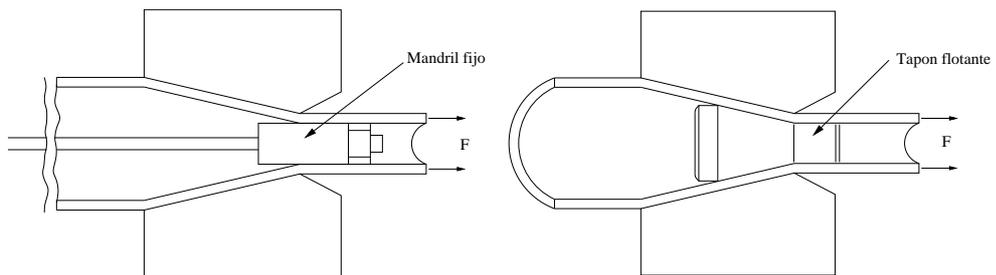


Figura 2.26: Proceso de estirado de tubo con mandril o tapon.

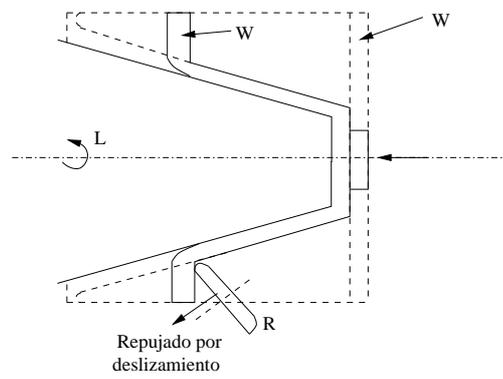


Figura 2.27: Proceso de repujado por deslizamiento.

C A P Í T U L O 3

Procesos de conformación de chapa metálica

Son procesos de conformación en los que el material de partida es chapa metálica. En estos procesos se trata de transformar la chapa en piezas modeladas por estirado, compresión o corte, unas veces actuando aisladamente y otras en conjunto. La importancia comercial del trabajo con láminas es significativa. Solo es necesario considerar el número de productos industriales y de consumo que incluyen piezas de lámina metálica para darse cuenta de su importancia: carrocerías de automóviles y camiones, aviones, carros de ferrocarril y locomotoras, equipo de construcción, equipos agrícolas, muebles para oficina, computadoras, etc. Las piezas de láminas de metal se caracterizan generalmente por su alta resistencia, buena precisión dimensional, buen acabado superficial y bajo costo relativo. La mayoría de los procesos con láminas metálicas se realizan a temperatura ambiente (trabajo en frío). Para su estudio podemos agruparlas en dos tipos:

1. Procesos en los que hay separación de material.
2. Procesos en los que hay deformación de material.

3.1. Conformación con separación de material

Se incluyen aquí todas las operaciones en las que el material se desprende total o parcialmente por cizallamiento. Cuando la separación se realiza a lo largo de una línea que no se cierra sobre sí misma se llama simplemente corte, denominándose punzonado cuando la línea de corte es cerrada.

3.1.1. Corte

Se ejecuta en flejes, pletinas, chapas de pequeño espesor, mediante tijeras, cizalla, guillotina o cizalla rotativa de discos. Cuando la separación del material es parcial, en piezas que han de doblarse posteriormente, se llama incisión (figura 3.1). En cualquiera de los casos la herramienta (cizalla) consta

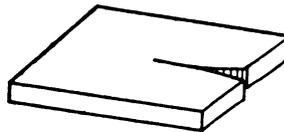


Figura 3.1: Incisión en una chapa metálica.

de dos hojas o cuchillas, superior e inferior con bordes afilados un determinado ángulo. Colocada la chapa a cortar entre ambas, las cuchillas actúan en principio como cuñas, provocando una deformación plástica, hasta que en un determinado instante se produce la fractura. La figura (3.2) describe los cuatro pasos esquematizados de la acción de cizalla.

3.1.2. Punzonado y perforado

El punzonado (“blanking”) implica el corte de una lámina de metal a lo largo de una línea cerrada en un solo paso para separar la pieza del material circundante. La parte que se corta es el producto deseado en la operación. El perforado (“punching”), es muy similar al punzonado, excepto que la pieza que se corta se desecha. El corte se realiza (figura 3.3) apoyando la chapa en una matriz y presionando con un punzón.

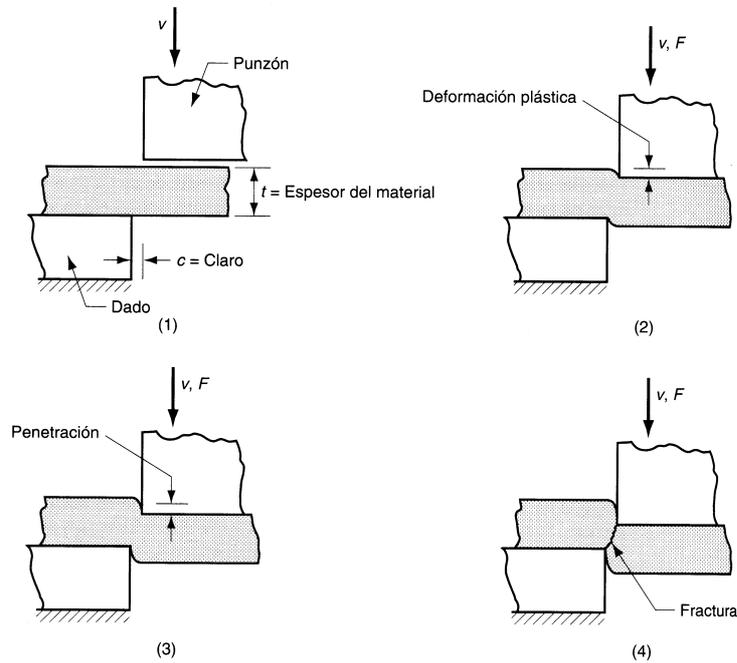


Figura 3.2: Cizallado o corte de una lámina metálica entre dos bordes cortantes: (1) inmediatamente antes de que el punzón entre en contacto con el material, (2) el punzón comienza a causar deformación plástica en el material, (3) el punzón comprime y penetra formando una superficie lisa de corte y (4) se inicia la fractura entre los dos bordes de corte que separan la lámina.

3.2. Conformación sin separación de material

Aplicado a la chapa se llama estampación, incluyéndose bajo ese concepto un conjunto de procesos sencillos que se realizan por compresión, por tracción o por compresión y tracción simultáneas (doblado, embutido, estirado, entallado, etc.). La estampación se produce por deformación permanente del material para cuyo fin es necesario sobrepasar el límite de fluencia. Es necesario, sin embargo, tener en cuenta que deformación permanente no significa que el material conserve exactamente la forma que tenía al final de la deformación, sino que hay una cierta recuperación elástica del material.

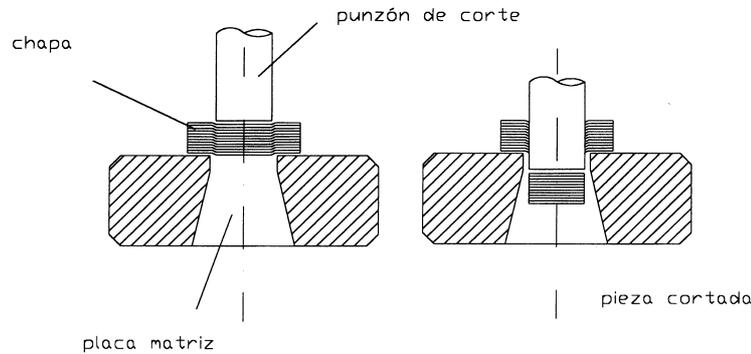


Figura 3.3: Aspecto esquemático del proceso de punzonado.

3.2.1. Doblado

Esta operación provoca alargamiento en las fibras exteriores y acortamiento en las interiores, es decir tracción en aquéllas y compresión en éstas, consecuencia de ello es:

1. La resistencia del material doblado, medida en su punto más débil, es menor que la esperada de las dimensiones originales.
2. El ángulo de doblado ha de calcularse teniendo en cuenta que el material produce una recuperación elástica, la pieza trata de recuperar la forma primitiva y se “abre” resultando un ángulo de doblado menor que el propuesto.
3. La longitud de la pieza resulta modificada como consecuencia de la deformación.

Según la forma de realizarse el doblado podemos distinguir entre los siguientes procesos

3.2.1.1. Doblado por rodillos

Fundamentos: Consiste en conformar chapa metálica al introducirla entre un rodillo superior ajustable y dos rodillos inferiores fijos, induciendo un estado flexor de esfuerzos en la chapa dependiendo de la posición del rodillo ajustable con relación a los otros dos fijos (figura 3.4).

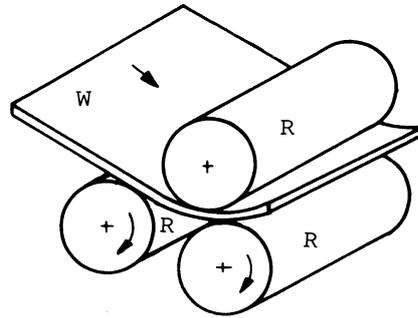


Figura 3.4: Doblado por rodillos.

Aplicación: Se usa para producir anillos, recipientes, etc. Este tipo de máquinas se pueden controlar mecánicamente (CN) para facilitar la producción de formas irregulares.

Características de las piezas producidas: Las tolerancias se sitúan entre 0.1 y 0.2% del diámetro. Las calidades superficiales coinciden con las de la chapa original.

3.2.1.2. Doblado con prensas plegadoras

Fundamentos: Los curvados angulares de chapas se llevan a cabo en prensas plegadoras. En ellas, el material de trabajo se sitúa en una matriz y el punzón baja conformando la chapa según la geometría de la matriz y el punzón (figura 3.5).

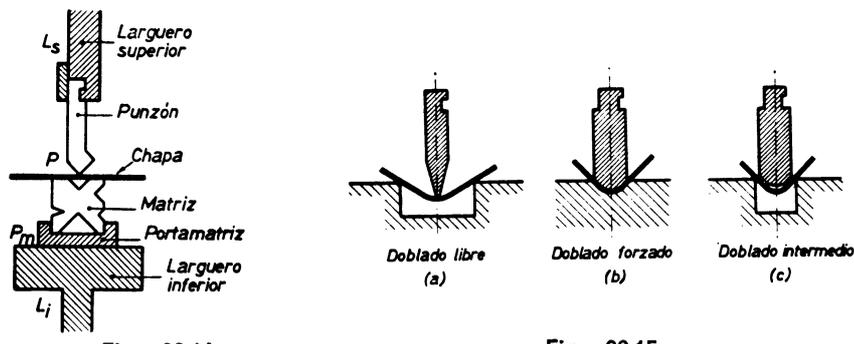


Figura 3.5: Doblado de chapa.

Aplicación: Este proceso se utiliza para la producción de muchos perfiles estructurales. Se usa extensamente en la industria aeronáutica y automotriz, y en las industrias eléctrica y mecánica más ligeras. En los talleres pequeños existen plegadoras accionadas manualmente y habitualmente miden menos de 2,5 m de longitud.

Características de los productos plegados: Las tolerancias son función del espesor de la chapa y la geometría del plegado, y las calidades superficiales coinciden con las de la chapa original.

Según el fin al que se destinan y la forma en que se realiza el doblado tenemos las siguientes clases de doblado:

- **Rebordonado** Es un doblado que se realiza simultáneamente en todo lo ancho de un producto acabado, que se ha sometido previamente a un proceso de estampado o embutición. En las figuras 3.6 y 3.7 se pueden observar dos ejemplos.

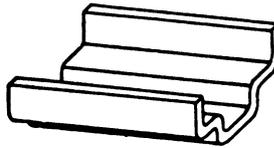


Figura 3.6: Rebordonado.

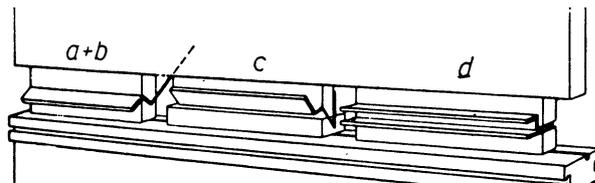


Figura 3.7: Ejemplo de rebordonado.

- **Redondeado** Es un doblado progresivo de la chapa en sentido axial (figura 3.8). En general es necesario hacer un trabajo de estampado previo en los bordes de las entradas con el fin de que estas tengan la curvatura precisa. Se suele realizar con rodillos (figura 3.4). Estas máquinas pueden utilizarse para enderezar la chapa utilizando un número mayor de rodillos superiores.

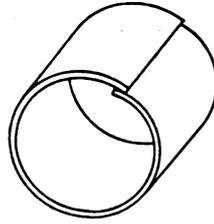


Figura 3.8: Redondeado.

- **Plegado** Consiste en un doblado continuo que se utiliza para unir chapas en recipientes o para darles más rigidez (figura 3.9b).

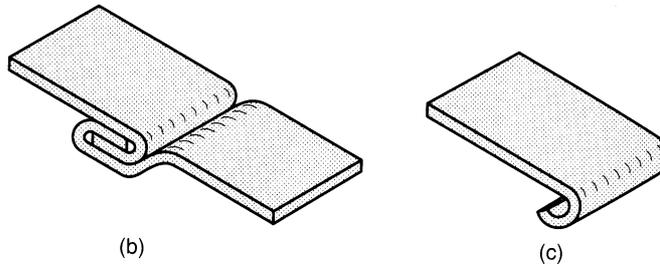


Figura 3.9: Arrollado y plegado.

- **Arrollado** Es un proceso de curvado o redondeado en una pletina o banda con objeto de obtener un borde cilíndrico hueco (figura 3.9c).
- **Engargolado** Consiste en producir en la chapa ondulaciones longitudinales con objeto de darles más rigidez (cajas, recipientes, carrocerías, etc.) o en tubos, unas veces para sujetar en ellos otra pieza interiormente (figuras 3.10a y b) o para unir tubos (figuras 3.10c).

3.2.2. Embutición

Fundamentos: La embutición es una operación de conformación plástica mediante la cual una chapa metálica adopta una forma ahuecada tridimensional de una profundidad varias veces el espesor del metal original (figura 3.11).

Las distintas etapas en la embutición de una pieza se pueden esquematizar según la figura 3.12. a) Se coloca el disco de chapa sobre la matriz. b)

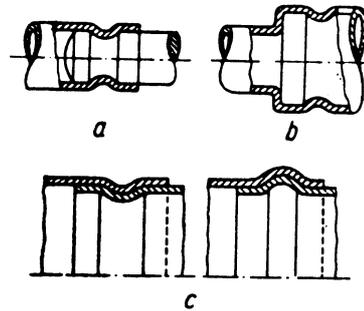


Figura 3.10: Engargolado.

Desciende el punzón y pisador de modo que éste alcanza primero la chapa y la sujeta por su periferia, impidiendo que se pliegue. Una vez sujeta la pieza actúa el punzón comenzando el estirado. c) El punzón embute la chapa convirtiéndola en un cuerpo hueco. d) Retrocede el punzón y el pisador, y el expulsor empuja la pieza embutida hacia fuera.

Se usan extensamente prensas hidráulicas de doble acción, pero también otros tipos (hidráulico y mecánico) dependiendo del propósito.

Aplicación: La embutición en caliente se utiliza para conformar piezas de paredes relativamente gruesas y geometría sencilla (habitualmente cilíndricas). La embutición en frío emplea chapas relativamente finas consiguiendo piezas de gran diversidad de formas. Se usa frecuentemente para producir una amplia variedad de blindajes o carcasas, piezas cilíndricas o prismáticas, etc. (formas de botellas, paneles de automóvil, tanques, cubiertas y cajas de aparatos, latas para alimentos, etc.).

Características de las piezas embutidas: Las tolerancias son buenas y la calidad superficial corresponde casi exactamente a la de la chapa original.

3.2.3. Conformado por estirado

Fundamentos: Este proceso consiste en someter a la pieza de trabajo a un estado traccional de esfuerzos por la acción de dos mordazas que estiran y doblan la chapa sobre una matriz hasta alcanzar la forma final deseada (figura 3.13).

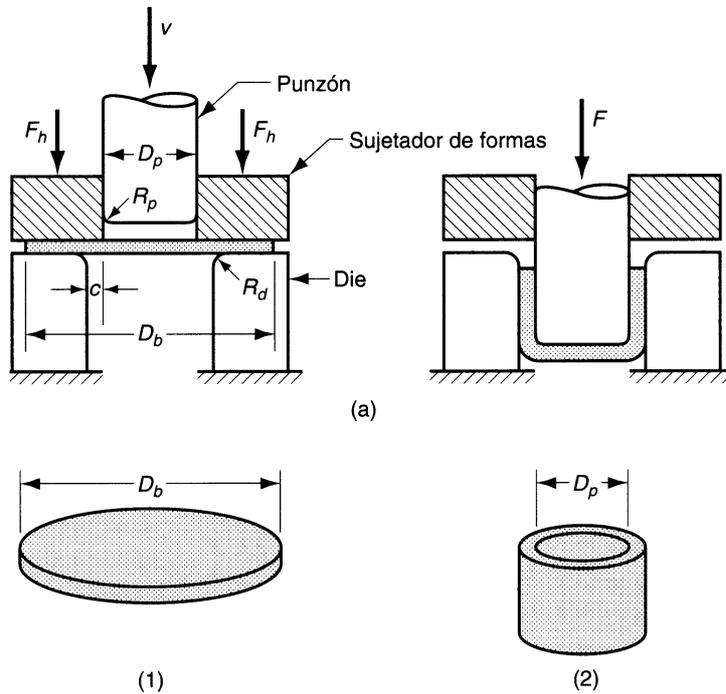


Figura 3.11: a) Embutición de una pieza acopada: (1) inicio de la operación y (2) cerca del final de carrera; y (b) piezas de trabajo correspondientes: (1) forma inicial y (2) pieza embutida.

Aplicación: Se desarrolló en la industria aeronáutica con el fin de conformar pequeñas cantidades de determinadas piezas de chapa, especialmente de gran tamaño, en condiciones económicas; extremidades de alas, alerones, grandes secciones de fuselaje de aviones, etc. Este proceso se usa extensamente en la industria aeronáutica y automotriz para producir grandes paneles curvados de formas variadas (cubiertas de motor, marcos de puertas y ventanas, etc.)

Características de las piezas estiradas: Las tolerancias son función del esfuerzo (recuperación elástica), la geometría y el material utilizado. Las calidades superficiales corresponden aproximadamente a la de la chapa original.

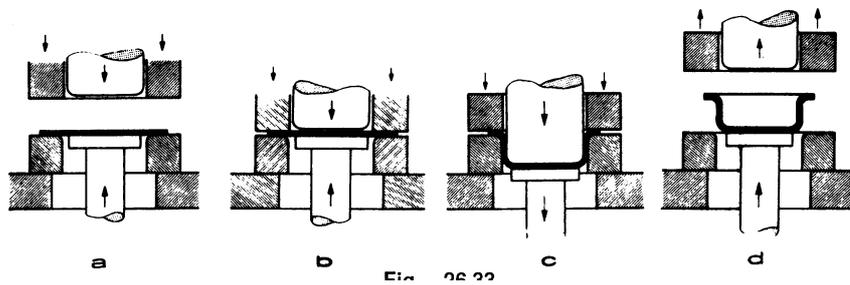


Figura 3.12: Etapas en la embutición de una pieza.

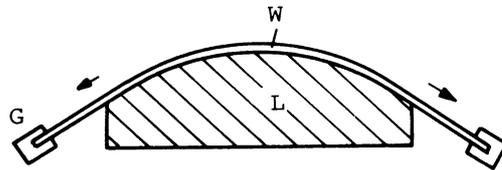


Figura 3.13: Conformación de chapa por estirado.

3.2.4. Repujado al torno convencional

Fundamentos: Se trata de una operación de trabajo en frío, en la que se estira un disco plano de chapa, redondo, giratorio por la aplicación de una presión localizada mediante una herramienta (que gira) de punta redondeada (de madera o metálica), sobre un molde que gira también a gran velocidad, convirtiéndose mediante este procedimiento en una pieza hueca (figura 3.14). Los costes de utillaje son bajos y el proceso resulta económico para cantidades reducidas. Para aprovechar estas ventajas económicas, han aparecido máquinas de repujar en las que la herramienta está comandada automáticamente (CN) con un programa para cada pieza concreta.

Aplicación: Es un proceso que se aplica en numerosas ocasiones en producción continua, para producir piezas tales como reflectores de lámparas, utensilios de cocina, cuencos y palanganas, etc.

Características de los productos fabricados: Las tolerancias son buenas (0,1-0,2% del diámetro), y las características superficiales dependen de parámetros como avance, velocidad, geometrías de los rodillos, etc.

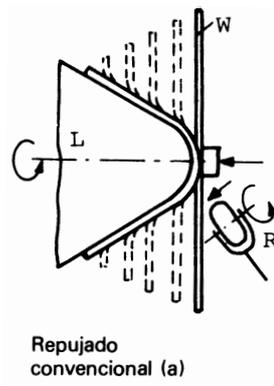


Figura 3.14: Repujado convencional.

3.3. Bibliografía

- [1] Alting.: “Procesos para Ingeniería de Manufactura”. Ed. Alfaomega, 1990.
- [2] Calvo, E.; Faura, F; Garrido, J.; López, J; Ojados, J.. “Fundamentos de ingeniería de procesos de fabricación”. E.T.S.I.I. Universidad de Murcia.
- [3] Coca, P; Rosique, J.: “Tecnología mecánica y Metrotécnia”. Ed. Pirámide, 1989.
- [4] Groover, Mikell P.: “Fundamentos de Manufactura Moderna”. Prentice Hall, 1997.
- [5] Kalpakjian, S.: “Manufacturing Engineering and Technology”. Addison-Wesley, 1995.
- [6] Rowe, G.W. Conformado de los metales. Ediciones Urmo, 1972.

CAPÍTULO 4

Curvas de tensión y deformación

El objetivo que perseguimos es conocer el grado de deformación que experimenta una pieza sometida a esfuerzos externos, o viceversa, conocida nuestra capacidad de producir esfuerzos, calcular la deformación que podemos producir en una pieza de un material específico. Es evidente que lo primero que tenemos que conocer son las características de deformación del material. Estas características las podemos determinar a partir de un ensayo con un sistema de tensiones sencillo, como son los de tracción y compresión uniaxial, de deformación plana o de torsión. Con la información obtenida en el ensayo aplicando la teoría del conformado, podremos estudiar sistemas más complejos. Las curvas de esfuerzo-deformación son la fuente de información más importante al evaluar la idoneidad de un material para ser sometido a deformación plástica. A continuación se van a definir los conceptos de tensión y deformación y posteriormente se describirán los resultados de un ensayo de tracción que pueden ser convertidos en un diagrama de tensión-deformación.

4.1. Curvas de tensión y deformación nominal

La figura 4.1 ilustra una barra de sección transversal uniforme en condiciones de ausencia de carga (línea discontinua) y con carga (línea continua). Sin carga, la longitud de la barra es l_1 y su sección transversal es A_1 . Cuando se carga con la fuerza P la longitud se convierte en l_2 , lo cual significa un

alargamiento de $\Delta l = l_2 - l_1$. El alargamiento por unidad de longitud se llama “*deformación unitaria o nominal*” y se designa con la letra e .

$$e = \frac{l_2 - l_1}{l_1} = \frac{\Delta l}{l_1} = \frac{l_2}{l_1} - 1 \quad (4.1)$$

La fuerza P , distribuida uniformemente sobre la sección transversal original,

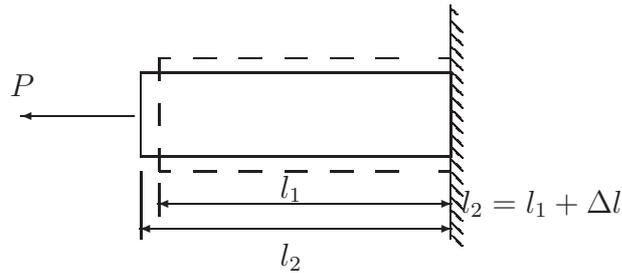


Figura 4.1: Alargamiento de una barra de sección transversal uniforme por la aplicación de una carga P

genera la “*tensión nominal*” que se designará por σ_{nom} :

$$\sigma_{\text{nom}} = \frac{P}{A_1} \quad (4.2)$$

Cuando la carga aplicada tiende a alargar la probeta, la tensión es positiva y se denomina de tracción y cuando la carga tiende a comprimir la probeta la tensión es negativa y se denomina de compresión.

El diagrama de fuerza-alargamiento de la figura 4.2, obtenido en un ensayo de tracción, puede ser transformado en un diagrama de tensión-deformación cambiando las unidades de los ejes: $\sigma_{\text{nom}} = P/A_1$ y $e = \Delta l/l_1$. Consecuentemente, el diagrama de la figura 4.2 puede ser usado tanto como diagrama $P - \Delta l$ o como diagrama $\sigma_{\text{nom}} - e$.

Cuando se carga una probeta, la deformación será elástica hasta el punto **B**, lo cual significa que si se quita la carga en esta región, la probeta regresará a su longitud original l_1 . El esfuerzo es proporcional a la deformación hasta el punto **A**, es decir, que el material cumple la ley de Hooke, la cual se expresa mediante la ecuación

$$\sigma = Ee, \quad (4.3)$$

donde E se conoce como *módulo de elasticidad* o *módulo de Young*. Este módulo es un número característico para cada material o grupo de materiales. Si la deformación continúa de **A** a **B**, seguirá siendo elástica, pero ya no

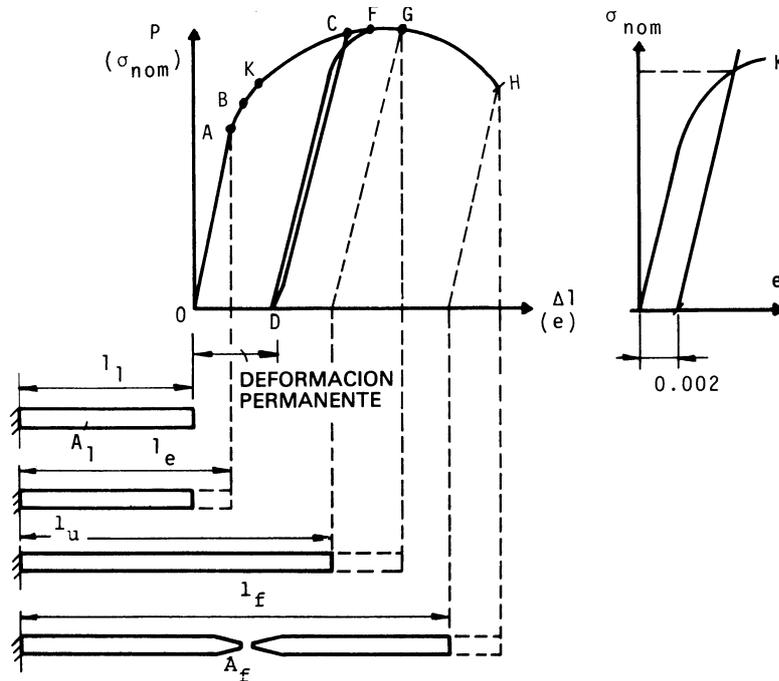


Figura 4.2: Diagrama de fuerza alargamiento/esfuerzo deformación derivado de una prueba de tracción.

será válida la proporcionalidad definida por la ecuación. El **punto A** es llamado *límite de proporcionalidad* y el **punto B** *límite de elasticidad*. Para la mayoría de materiales el límite de elasticidad está ligeramente por encima del límite de proporcionalidad.

Cuando la deformación rebasa el punto **B**, la probeta no regresa a su longitud original debido a que ya ha sido deformada plásticamente (esto es, la longitud ha sido incrementada permanentemente). El *límite elástico B* se define en la práctica como la tensión donde la deformación permanente alcanza un valor estandarizado, generalmente entre 0.001 y 0.03% de la longitud calibrada. Si la deformación continúa después hasta el **punto C**, la deformación permanente o plástica después de quitar la carga será **OD**.

Si la probeta se carga nuevamente se obtendrá la curva **DF**, y después del **punto F** se generará la curva que se hubiera obtenido de no interrumpirse la carga. La línea **DF** tiene la misma pendiente que **OA**. Esta pendiente es igual al módulo E de Young sobre un diagrama de tensión-deformación. Normalmente se pierde una pequeña cantidad de energía en el proceso de descarga y recarga, lo cual se indica mediante el exagerado *ciclo de histéresis* entre **D** y **C**. Como se muestra en la figura, la probeta inicia nuevamente

su deformación plástica en el punto **F**, lo cual significa que el material se ha vuelto más duro y menos dúctil que en su condición original. Este incremento de carga se debe a lo que se llama “*endurecimiento por trabajo en frío*”.

Si la deformación continúa después del **punto F**, la carga crece hasta el **punto G**, donde alcanza su máximo valor, después de lo cual disminuye hasta el **punto H**, donde ocurre la fractura.

Se ha verificado experimentalmente que durante la deformación plástica de los metales no ocurren cambios volumétricos; esto significa que el alargamiento plástico debe ir acompañado por una disminución correspondiente en la sección transversal (o una contracción en la dimensión lateral). Para deformaciones menores que la del punto **G** (Fig. 4.2), la sección transversal disminuye continuamente mientras aumenta la carga necesaria para continuar la deformación debido al endurecimiento por trabajo en frío. En el punto **G**, el incremento de carga debido al endurecimiento por trabajo en frío se equilibra exactamente con la disminución de carga debida a la reducción de área transversal (esto es, los efectos de la reducción de área y el endurecimiento por trabajo en frío se equilibran entre sí). Para deformaciones más grandes que la del punto **G** domina la contracción de área, la deformación se vuelve inestable y ocurre una estricción localizada (reducción de la sección transversal). La estricción o cuello se presenta en la parte más débil de la probeta y los alargamientos posteriores de la longitud calibrada se deben totalmente al alargamiento local del cuello (Fig. 4.2).

Es evidente que la “*tensión real o verdadera*” σ en la probeta se obtendrá dividiendo la carga P entre el área A , de la sección transversal verdadera. Así,

$$\sigma = \frac{P}{A}. \quad (4.4)$$

Por tanto, la tensión verdadera σ es más grande que la tensión nominal σ_{nom} (Fig. 4.3), puesto que $A < A_1$. Para deformaciones mayores que la del punto **G**, la tensión deja de ser uniaxial debido a la estricción y en consecuencia la ecuación anterior no se puede usar sin una corrección.

El diagrama para acero aleado que se muestra en la figura 4.3 es típico de los materiales que no se pueden deformar plásticamente, o que sólo se pueden deformar ligeramente (esto es, la fractura ocurre antes de que surja la estricción o la inestabilidad). En muchos materiales plásticos la inestabilidad no origina estricción (esto es, la probeta se deforma uniaxialmente hasta que ocurre la fractura).

La figura 4.3 muestra algunos diagramas típicos de carga-alargamiento, obtenidos a temperatura ambiente y con baja velocidad de alargamiento (condiciones estáticas), para diferentes materiales. Los cuatro ejemplos de la figura 4.3 ilustran cómo varía con el material la relación entre carga y

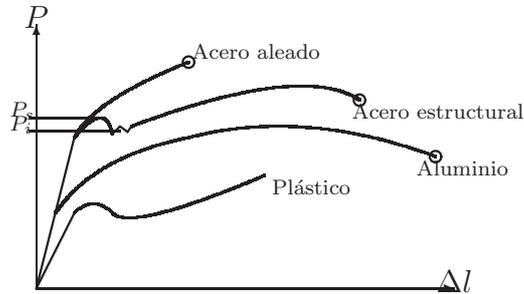


Figura 4.3: Diagrama de carga-alargamiento para algunos materiales.

alargamiento. La curva para el acero dulce o estructural es poco usual en los materiales metálicos, en el sentido de que una vez desviada del comportamiento elástico a una carga P_u , se presenta una fluencia no uniforme a una carga inferior P_i . La mayoría de metales presentan un comportamiento similar al del aluminio, donde en la fluencia no ocurre ninguna reducción de carga. La gráfica mostrada en la figura 4.2 es típica para materiales plásticos.

A menudo es conveniente determinar las propiedades del material en una *prueba de compresión*, debido a que numerosos procesos de fabricación se realizan bajo cargas de compresión, con lo cual la prueba da información más cercana a la realidad. La prueba de compresión también es útil para materiales de baja ductilidad (materiales frágiles tales como hormigón, vidrio, madera y fundición), para los cuales la prueba de tracción produce fracturas con una deformación unitaria muy pequeña. La probeta cilíndrica para la prueba de compresión toma forma de barril, cuando es de un material dúctil, debido al rozamiento entre los extremos de la probeta y las placas de compresión. Por tanto, debe evitarse o minimizarse la influencia del rozamiento para determinar las propiedades verdaderas del material.

Un ensayo de compresión muy útil para el estudio de los procesos de conformación por deformación plana es aquel en el que la condición de deformación es plana (ensayo *Ford*), es decir, la deformación en una de las direcciones es nula. Este tipo de deformación ocurre en procesos tan importantes como el laminado de chapa fina. En este ensayo de compresión, una chapa de espesor h (véase la figura 4.4) se comprime entre dos punzones planos de anchura b . La anchura w de la chapa debe ser al menos cinco veces superior a la anchura b para asegurar que la deformación lateral pueda ser considerada despreciable, y la relación h/b se debe encontrar entre 0,25 y 0,5.

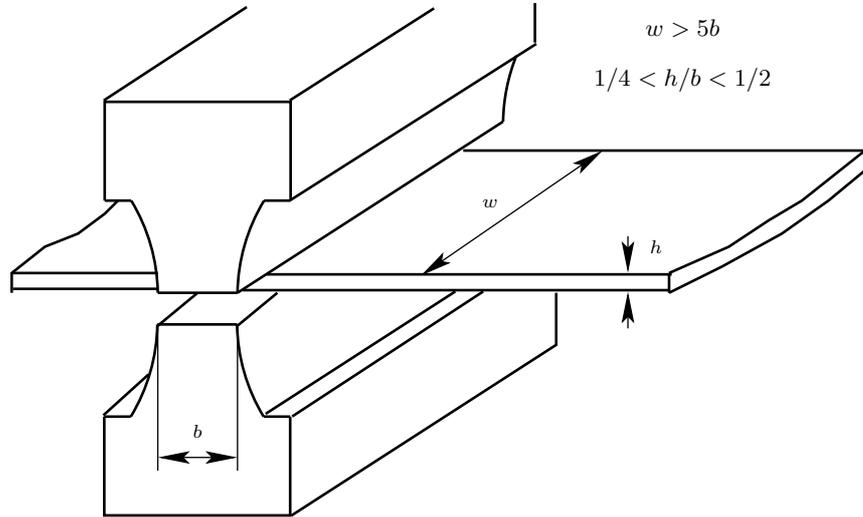


Figura 4.4: Representación esquemática de un ensayo de compresión en condiciones de deformación plana.

Existen procesos en los que las deformaciones son tan grandes que ninguno de los ensayos anteriores permite proporcionar información del comportamiento del material bajo tales condiciones. En estos casos se suele emplear el ensayo de torsión, para el que las dimensiones externas de la probeta ensayada permanecen prácticamente inalterables. El esfuerzo aplicado en este tipo de ensayos es de cortadura pura. A la tensión de fluencia por esfuerzo cortante puro será denotada en adelante como k y, como será demostrado más adelante, su relación con la tensión de fluencia Y obtenida en el ensayo de tracción uniaxial y la tensión de fluencia S obtenida en el ensayo de deformación plana es, respectivamente:

$$k = Y/\sqrt{3} = S/2. \quad (4.5)$$

4.1.1. Efecto de la velocidad de deformación, la temperatura y otros factores

Como se muestra en la figura 4.5, la forma de la curva tensión-deformación se ve afectada tanto por la tasa de deformación como por la temperatura. La tasa de deformación está definida por

$$\dot{\epsilon} = \frac{de}{dt} = \frac{\frac{\Delta l}{l_1}}{dt} = \frac{1}{l_1} \frac{\Delta l}{dt} = \frac{v}{l_1}, \quad (4.6)$$

donde v es la velocidad de prueba. Esto significa que la tasa de deformación unitaria es la velocidad de prueba dividida entre la longitud original de la probeta. La figura 4.5a muestra que con una tasa de deformación creciente se requiere mayor tensión para obtener la misma deformación (al aumentar la tasa de deformación, se incrementa la resistencia a la deformación y disminuye la ductilidad). A medida que aumenta la temperatura, la tasa de deformación desempeña un papel más importante en la determinación del esfuerzo de fluencia. Esto es importante en el trabajo en caliente, puesto que muchos materiales tienen una tasa de deformación unitaria muy sensible a las altas temperaturas. A temperatura ambiente, el efecto de la tasa de deformación unitaria generalmente es casi despreciable.

La figura 4.5b ilustra cómo afecta la temperatura a la forma de la curva tensión-deformación. Como vimos en secciones anteriores al incrementarse la temperatura disminuye la resistencia y aumenta la ductilidad (o sea, un efecto opuesto al del incremento en la tasa de deformación unitaria). A cierta temperatura la tensión de fluencia se vuelve independiente de la deformación unitaria.

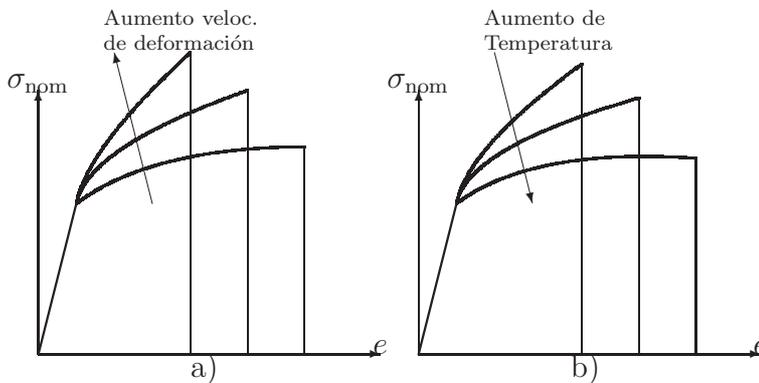


Figura 4.5: Influencia de la velocidad de deformación a) y de la temperatura b).

Otros factores importantes que pueden influir sobre el proceso de conformación por deformación plástica son: la geometría y superficie de las herramientas, la fricción y la lubricación.

4.2. Curvas de tensión real-deformación natural e inestabilidad

4.2.1. Tensión real y deformación natural

Anteriormente se estudiaron las curvas de tensión-deformación obtenidas de las pruebas de tracción. Las tensiones nominales fueron definidas como

$$\sigma_{\text{nom}} = \frac{P}{A_{\text{original}}},$$

esto es, la carga se distribuyó uniformemente sobre el área transversal original. La tensión nominal no siempre describe la tensión que experimenta el material, ya que el área transversal disminuye conforme se alarga plásticamente la probeta. Para poder efectuar cálculos razonables concernientes a la deformación de materiales, es necesario conocer la *tensión real* (esto es, la tensión que el material experimenta). La tensión real está definida como

$$\sigma = \frac{P}{A_r}, \quad (4.7)$$

donde A_r es el área transversal actual o instantánea. La tensión real se obtiene, por tanto, dividiendo la fuerza instantánea entre el área instantánea (esto es, la fuerza y el área transversal se deben medir simultáneamente).

La deformación nominal o de ingeniería se definió anteriormente como

$$e = \frac{l_2 - l_1}{l_1} 100 \%,$$

donde l_1 es la longitud original y l_2 la longitud final. Las deformaciones nominales, al igual que las tensiones nominales, generalmente son inadecuadas para cálculos que incluyan deformaciones plásticas, donde ocurren grandes deformaciones. Con objeto de evitar esta limitación se introduce el concepto de *deformación natural, real o logarítmica*, a veces llamada también deformación incremental.

Supóngase que a una probeta de tracción que ha sido alargada plásticamente una longitud l se le da ahora un alargamiento adicional dl . Este aumento extra de deformación está definido por:

$$d\epsilon = \frac{dl}{l}.$$

Si la probeta se deforma de la longitud l_1 a la l_2 , la deformación total se obtiene por integración:

$$\epsilon_{1-2} = \int_{l_1}^{l_2} \frac{dl}{l} = \ln \frac{l_2}{l_1}, \quad (4.8)$$

donde “ln” denota el logaritmo en base e. Esta deformación (4.8) es la “*deformación natural*” y se designa por ϵ , mientras que la deformación nominal fue designada por e .

Algunas de las ventajas de la deformación natural comparada con la deformación nominal son:

1. Las deformaciones naturales son aditivas.
2. La deformación natural tiene los mismos valores numéricos en compresión y en tracción, lo cual no es el caso de la deformación nominal.

Las deformaciones natural y nominal están relacionadas, por debajo de la carga máxima, como sigue:

$$e = \frac{l_2 - l_1}{l_1} = \frac{l_2}{l_1} - 1,$$

esto es,

$$\frac{l_2}{l_1} = 1 + e \Rightarrow \ln \frac{l_2}{l_1} = \ln(1 + e),$$

o alternativamente,

$$\epsilon = \ln(1 + e) \text{ (hasta la inestabilidad)} \quad (4.9)$$

Para pequeñas deformaciones, e y ϵ tienen aproximadamente el mismo resultado (esto es, $\epsilon \simeq e$).

Si las curvas de tensión-deformación se trazan ahora como curvas de tensión real-deformación natural, se obtendrán las líneas de trazo continuo de la figura 4.6. Las líneas punteadas son las curvas de tensión nominal-deformación nominal. En la figura 4.6 se puede ver que las curvas de tensión real-deformación natural no muestran un máximo como en los casos de las curvas de tensión nominal. En M el endurecimiento por deformación y la disminución de área transversal se equilibran exactamente entre si. Más allá de M predomina la disminución de área, lo que da por resultado una estricción que conduce en este caso a un sistema tridimensional de tensiones. Dividiendo la fuerza instantánea entre el área instantánea más pequeña se obtiene una tensión “real” media; esto es, después de que empiece la estricción, la tensión “real” verdadera sólo se puede determinar corrigiendo la tensión “real” media para el sistema tridimensional de tensiones. En los procesos de conformación por deformación plástica sólo son de interés las deformaciones que ocurren hasta el principio de la estricción, donde se presenta la inestabilidad; consecuentemente no se analizará en este contexto la corrección de la tensión “real”.

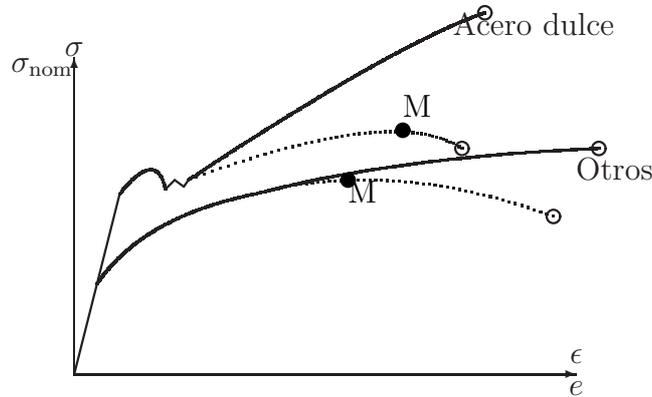


Figura 4.6: Curvas de tensión-deformación real y nominal.

En adelante se usarán normalmente la tensión real y la deformación natural (σ, ϵ), ya que como se mencionó, reflejan las condiciones que experimenta el material durante la mayoría de los procesos de conformación por deformación plástica que serán estudiados.

4.2.2. Constancia del volumen

Basándose en observaciones experimentales se encontró que, para los metales, el volumen del material es prácticamente constante durante la deformación plástica. La constancia de volumen puede ser expresada del siguiente modo

$$\frac{dV}{d\epsilon} = 0, \quad (4.10)$$

donde V es el volumen del material sometido a deformación plástica y ϵ es la deformación natural.

Considérese un paralelepípedo con las dimensiones l_1, l_2 y l_3 , las cuales son deformadas a $l_1 + \Delta l_1, l_2 + \Delta l_2$ y $l_3 + \Delta l_3$. La constancia de volumen exige que,

$$(l_1 + \Delta l_1)(l_2 + \Delta l_2)(l_3 + \Delta l_3) = l_1 l_2 l_3.$$

Esto puede ser expresado como

$$\left(1 + \frac{\Delta l_1}{l_1}\right) \left(1 + \frac{\Delta l_2}{l_2}\right) \left(1 + \frac{\Delta l_3}{l_3}\right) = 1,$$

o

$$(1 + e_1)(1 + e_2)(1 + e_3) = 1,$$

donde e es la deformación nominal. Tomando logaritmos,

$$\ln(1 + e_1) + \ln(1 + e_2) + \ln(1 + e_3) = 0,$$

y usando la ecuación 4.9, ésta se convierte en

$$\epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 = 0. \quad (4.11)$$

En el ensayo de tracción, la constancia de volumen puede ser expresada también como $Al = A_1l_1 = A_2l_2$, donde A es el área transversal y l la longitud. Esto, combinado con la ecuación (4.8), permite obtener la siguiente expresión

$$\epsilon_{1-2} = \ln \frac{l_2}{l_1} = \ln \frac{A_1}{A_2}. \quad (4.12)$$

La ecuación (4.12) permite calcular las deformaciones naturales incluso después de iniciada la estricción, lo cual hace que la deformación de área sea muy significativa. Además de la relación entre deformación natural y nominal (ecuación (4.9)), también se puede encontrar la siguiente relación entre la tensión nominal y real

$$\sigma = \frac{P}{A} = \frac{P}{A_1} \frac{A_1}{A} = \sigma_{\text{nom}} \frac{A_1}{A} = \sigma_{\text{nom}} \frac{l}{l_1},$$

donde A es el área transversal y el subíndice 1 denota el estado original. Ya que $1 + e = \frac{l}{l_1}$, la ecuación precedente puede ser expresada como

$$\sigma = \sigma_{\text{nom}}(1 + e). \quad (4.13)$$

Esta relación es válida solamente hasta que se inicia la estricción.

4.2.3. Inestabilidad

Como se mencionó previamente, el punto donde el endurecimiento por deformación y la disminución de área durante la deformación plástica se equilibran se llama punto de inicio de inestabilidad. Más allá de este punto ocurre la estricción en un sitio débil de la probeta y la deformación deja de estar uniformemente distribuida a lo largo de la longitud de referencia para convertirse en deformación local en la región de estricción.

El punto de inicio de la inestabilidad está donde la pendiente de la curva carga-deformación llega a cero (esto es, tiene lugar un incremento de deformación sin ningún incremento de carga). Esto se puede expresar como

$$\frac{d\sigma_{\text{nom}}}{de} = 0 \Rightarrow \frac{dP}{dl} = 0 \Rightarrow \frac{dP}{l \cdot d\epsilon} = 0 \Rightarrow \frac{1}{l} \frac{dP}{d\epsilon} = 0 \Rightarrow$$

$$\frac{dP}{d\epsilon} = 0 \Rightarrow \frac{d(\sigma A)}{d\epsilon} = A \frac{d\sigma}{d\epsilon} + \sigma \frac{dA}{d\epsilon} = 0. \quad (4.14)$$

Ya que $d\epsilon = dl/l$, y debido a la constancia del volumen,

$$\frac{dV}{d\epsilon} = 0 \Rightarrow \frac{d(A l)}{d\epsilon} = A \frac{dl}{d\epsilon} + l \frac{dA}{d\epsilon} = 0;$$

luego,

$$\frac{dA}{d\epsilon} = -A.$$

Operando adecuadamente, la condición de inestabilidad resulta:

$$\frac{d\sigma}{d\epsilon} = \sigma. \quad (4.15)$$

Esta ecuación significa que la inestabilidad ocurre cuando la pendiente de la curva tensión-deformación (tasa de endurecimiento por trabajo) iguala la magnitud de la tensión aplicada. Debe mencionarse que el endurecimiento por deformación continúa más allá del punto de inestabilidad y por eso no hay un cambio repentino en la curva de tensión-deformación real en este punto. La figura 4.7 muestra cómo se determina gráficamente el punto de inestabilidad en una curva de tensión-deformación.

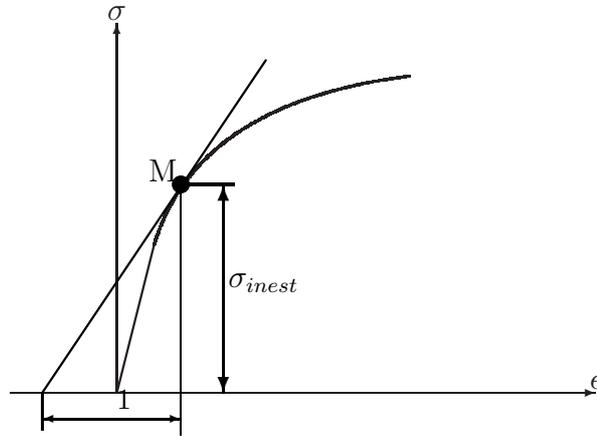


Figura 4.7: Punto de inestabilidad sobre la curva tensión real-deformación natural.

En muchos procesos de conformado por deformación plástica que tienen lugar bajo la acción de tensiones de tracción, la máxima cantidad de deformación que un material dúctil puede soportar sin producirse fallos está determinada por la deformación en el punto de inestabilidad. Esto se debe a

que el fenómeno de estricción normalmente arruina el producto. En consecuencia es importante poder predecir la tensión y la deformación al principio de la inestabilidad, de tal manera que se pueda especificar con seguridad los parámetros del proceso para evitar fallos. En la figura 4.7 se mostró cómo podía encontrarse el punto de inestabilidad sobre la curva de tensión real-deformación natural obtenida de la prueba de tracción. Sin embargo, sería mucho más conveniente que la curva de tensión-deformación pudiera expresarse analíticamente, ya que esto permitiría una fácil estimación tanto de la deformación como de la tensión en inestabilidad. A continuación, se examinan varios modelos analíticos de la curva de tensión-deformación.

4.3. Curvas analíticas de tensión-deformación

Pueden emplearse diferentes modelos analíticos de la curva de tensión-deformación, dependiendo del material y de la exactitud requerida. Aquí se describe el modelo más común para los materiales que endurecen por deformación (modelo 1) y un modelo para los materiales que no endurecen por deformación (modelo 2). Se debe mencionar que la disponibilidad de computadoras, las cuales pueden manejar fácilmente los datos numéricos de ensayo, han reducido la necesidad de las expresiones analíticas, aunque estas expresiones pueden ser de gran utilidad en la mayoría de cálculos aproximativos.

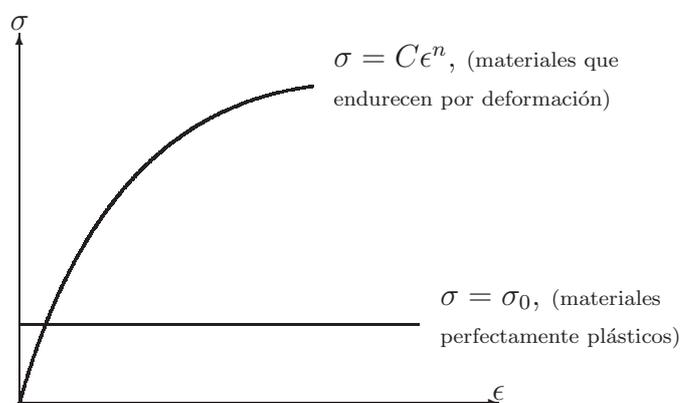


Figura 4.8: Modelos aproximados para la curva de tensión real-deformación natural.

El modelo 1 (Fig. 4.8)

$$\sigma = C\epsilon^n \quad (4.16)$$

se suele utilizar para describir, con exactitud razonable, el comportamiento

de los metales recocidos que tienen estructura reticular cúbica. Los símbolos C y n representan las constantes del material siendo n el exponente de endurecimiento por deformación.

El modelo 2 (Fig. 4.8)

$$\sigma = \sigma_0 \quad (4.17)$$

se utiliza para representar materiales plásticos perfectos. También puede ser utilizado con una exactitud razonable para materiales con muy poco o ningún endurecimiento por deformación ($n \simeq 0$). Este simple modelo se usa a menudo en cálculos aproximados de tensiones medias y fuerzas medias. La tensión σ_0 se define con frecuencia como la tensión media de fluencia $\sigma_{0m} = (\sigma_{01} + \sigma_{02})/2$, donde los sufijos 1 y 2 indican la tensión de fluencia antes y después de la deformación.

Ya que las deformaciones elásticas son muy pequeñas comparadas con las deformaciones plásticas, generalmente se consideran despreciables. El modelo 1 puede incluir deformaciones elásticas si ϵ se considera como $\epsilon = \epsilon_{\text{elástica}} + \epsilon_{\text{plástica}}$, pero el modelo 2 no puede incluir deformaciones elásticas. Es posible combinar el modelo 2 con la ley de Hooke $\sigma = E\epsilon$, de tal manera que se describa un material elástico perfectamente plástico.

Los valores de las constantes en los modelos analíticos generalmente son escogidos de tal manera que se obtenga el mejor acuerdo entre los modelos y las curvas experimentales. Considerando materiales que puedan ser representados por el modelo 1 (esto es, $\sigma = C\epsilon^n$), el punto de inestabilidad puede ser obtenido a partir de las condiciones que se cumplen en dicho punto:

$$\frac{d\sigma}{d\epsilon} = \sigma \Rightarrow \frac{d(C\epsilon^n)}{d\epsilon} = C\epsilon^n \Rightarrow Cn\epsilon^{n-1} = C\epsilon^n \Rightarrow$$

$$\epsilon_{\text{inest}} = n.$$

Esto significa que la deformación en inestabilidad es igual al exponente de endurecimiento por deformación. Lo anterior implica que n es una medida de la capacidad del material para experimentar deformación plástica sin fallar. La tabla 4.1 muestra ejemplos típicos de los valores de C y n para diferentes materiales del modelo 1. Estos valores pueden ser usados como primeras aproximaciones preliminares, pero en la situación real C y n deben ser determinados de la curva experimental de tensión-deformación, ya que podrían ocurrir variaciones bastante grandes para los mismos tipos de materiales.

Metal	$C(N/mm^2)$	n
Acero dulce	640	0,22
Acero inoxidable	1560	0,50
Aluminio suave	156	0,25
Cobre suave	525	0,38
Latón	745	0,48

Cuadro 4.1: Valores típicos de C y n en el Modelo 1 (ecuación (4.16))

CAPÍTULO

5

Teoría de la Plasticidad

El análisis de los PCDP se realiza mediante la “Teoría de la Plasticidad”. El objetivo fundamental de la teoría de la plasticidad, desde el punto de vista del análisis de procesos de fabricación, es el desarrollo de técnicas matemáticas que permitan calcular distribuciones de tensiones y deformaciones en cuerpos deformados permanentemente por algún medio. De esta forma se pueden prever posibles problemas para la puesta a punto de dichos procesos y acortar el tiempo necesario para esta actividad, haciéndolos más flexibles y competitivos. Este análisis puede aplicarse a la obtención de los esfuerzos necesarios para la conformación y por tanto al dimensionado de equipos y plantas para el desarrollo de estos procesos. Así, el análisis teórico de los procesos de conformado puede, aún con sus restricciones, contribuir haciendo más racional la toma de decisiones en este contexto.

A partir de la teoría de la plasticidad se podrá, mediante un razonamiento lógico, hacer la selección del equipo y la planificación de cada etapa para obtener una buena productividad, o las propiedades deseadas de un producto, en una planta ya existente. El conocimiento de las tensiones mecánicas y de la deformación puede ayudar a diagnosticar las causas de rotura y sugerir los procedimientos necesarios para superar estas limitaciones. La teoría puede también contribuir sustancialmente a proyectar el equipo, aunque se debe admitir que, para poderlos realizar de manera satisfactoria, muchos proyectos son demasiado complejos para cualquier estudio teórico. Por ejemplo, en el trefilado, la fuerza de estirado o la carga de la hilera puede incrementarse fácilmente un 30% si no se elige correctamente el ángulo de la hilera.

Tampoco es evidente la influencia exacta del lubricante. Para grandes reducciones de sección, el valor del coeficiente de rozamiento puede prácticamente no influir sobre la máxima pasada posible, pero en pasadas con pequeñas reducciones, el rozamiento puede suponer la mitad del esfuerzo de estirado, e influir notablemente sobre la homogeneidad del producto final. En ocasiones puede no ser conveniente reducir excesivamente el coeficiente de rozamiento. Por ejemplo, en operaciones de laminado de chapa en frío, si la lubricación es excesiva, los cilindros podrían deslizar sobre la chapa impidiendo que ésta sea deformada.

La teoría del conformado de metales, como también se la conoce, permite evaluar estos factores. Aunque se ha avanzado bastante en los últimos años en el estudio de estos procesos mediante técnicas numéricas todavía resulta complejo y laborioso dar soluciones precisas en términos cuantitativos a la mayoría de los procesos de conformado. A pesar de todo, el estudio completo de que se dispone para las versiones simplificadas de los procesos reales y las formas idealizadas de los materiales proporcionan un conocimiento, que puede tener un valor considerable para predecir la influencia de las variables reales sobre la carga de trabajo y la fluencia del metal, y para elegir las condiciones apropiadas para producir el resultado deseado. Las soluciones probablemente no serán las definitivas, pero casi con certeza reducirán el número de ensayos empíricos necesarios antes de poner a punto un proceso de fabricación.

Por otro lado, las publicaciones sobre la teoría de la plasticidad tienden, necesariamente, a ser algo especializadas y de difícil lectura para aquellos que se ocupan de esta técnica desde el punto de vista práctico. En consecuencia, los resultados no se aplican a la industria tan ampliamente como sería necesario. El propósito de este capítulo será mostrar una de estas técnicas, en concreto la del trabajo de deformación homogénea. La elección de dicha técnica ha estado motivada por su simplicidad, debido fundamentalmente por la limitación horaria de la que se dispone.

5.1. Situación real de los procesos: estados tensionales complejos

La mayor parte de la teoría de la plasticidad se ocupa finalmente de la predicción de las tensiones mecánicas o de los esfuerzos que actúan durante la deformación del metal y, en consecuencia, de las fuerzas que se deben aplicar. La carga de trabajo determina la potencia requerida y el tamaño del equipo necesario para realizar cada operación. La medida de las fuerzas también nos

da idea del rendimiento de la planta en unas condiciones determinadas.

Al enfocar el problema de la determinación teórica de las cargas de trabajo, dos factores son de importancia primordial. El primero es que cuando el esfuerzo aplicado a un metal es lo suficientemente grande, el metal empieza a deformarse plásticamente. Esto se considera como criterio de fallo en las estructuras de ingeniería. En el conformado de metales el estudio empieza exactamente donde termina la teoría de estructuras, es decir, con las tensiones que provocan la deformación plástica, y con frecuencia ignora la pequeña recuperación elástica que tiene lugar cuando desaparece la carga, tal y como se comentó en la lección anterior.

En segundo lugar, en un ejemplo sencillo como puede ser el ensayo a tracción descrito en la lección anterior, la fluencia está provocada por una tensión directa que actúa solamente en una dirección y, por lo tanto, se puede predecir fácilmente. Sin embargo, en la mayoría de las operaciones reales existe al menos dos tensiones que actúan sobre un elemento del metal en la zona de deformación. Así, en el trefilado hay una fuerza de estirado sobre el alambre, que produce una tensión de tracción y una de compresión en la cara de la hilera, junto con un esfuerzo cortante superficial debido a la resistencia de rozamiento sobre la hilera. No es posible establecer inmediatamente para qué carga tendrá lugar la deformación plástica dentro de la región de la hilera. La fluencia depende de la combinación de todas las tensiones que actúan y se puede predecir solamente considerando las relaciones entre ellas. Esto se realiza mediante los denominados “criterios de fluencia”. Se han sugerido diversos tipos de criterios de fluencia, de los cuales en este curso se verán dos, el de Tresca y el de von Mises, por su simplicidad y precisión, respectivamente.

Una característica de estos criterios de fluencia es que en su formulación no utilizan directamente las tensiones que actúan sobre el cuerpo que se deforma, en cualquier sistema de referencia, sino que utilizan las tensiones que aparecen eligiendo un determinado sistema de referencia denominado sistema de ejes principales. En dicho sistema, las tensiones (denominadas *tensiones principales*) simplifican enormemente la teoría del conformado de metales. Por lo tanto para poder estudiar los procesos sobre los que actúa un estado complejo de tensiones deberemos en primer lugar definir ese estado en términos de sus tensiones principales y luego establecer un criterio de fluencia. A continuación se verá qué son y cómo se determinan las tensiones principales y se definirán los criterios de fluencia mencionados anteriormente.

5.2. Tensiones y planos principales

Como se ha dicho, en la mayoría de procesos de conformación de metales, el material está sujeto a un sistema relativamente complejo de tensiones. El análisis general de la influencia combinada de las tensiones requiere nueve variables: tres tensiones directas que actúan normalmente a tres planos perpendiculares entre si en el punto considerado y 6 tensiones cortantes que actúan paralelamente a estos planos. Las ecuaciones son tan engorrosas de manejar que es frecuente utilizar la notación abreviada del análisis tensorial para ellas. Aunque para este curso se utilizará fundamentalmente un enfoque relativamente sencillo, es conveniente, especialmente cuando se presentan situaciones tridimensionales de tensiones, introducir la notación tensorial. Así, la matriz de la ecuación (5.1) representa el conjunto de las 9 tensiones que definen cualquier sistema que actúa sobre un cuerpo, por ejemplo sobre el cubo de la figura 5.1.

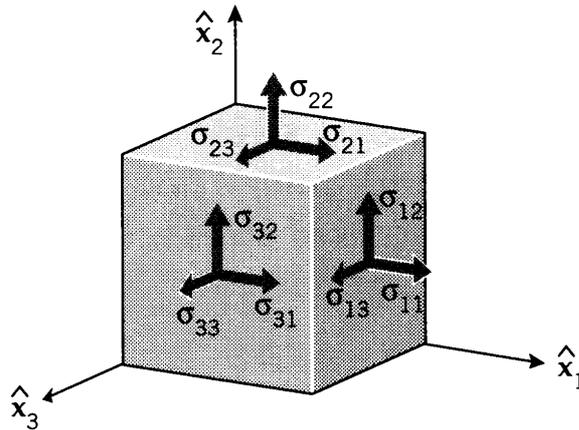


Figura 5.1: Sistema de tensiones sobre un cubo

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} \iff \begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{yx} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{zx} & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

Debe mencionarse que las tensiones cortantes se presentan siempre en pares iguales, ya que cualquier proceso de cizalladura provoca un esfuerzo complementario en sentido opuesto para mantener el equilibrio rotacional. De esta manera, solamente seis de las nueve tensiones son variables independientes. Así, $\tau_{xy} = \tau_{yx}$ ($\sigma_{12} = \sigma_{21}$) $\tau_{xz} = \tau_{zx}$ ($\sigma_{13} = \sigma_{31}$) y $\tau_{yz} = \tau_{zy}$

($\sigma_{23} = \sigma_{32}$), con lo que la matriz de la ecuación 5.1 podrá expresarse del siguiente modo

$$\begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{pmatrix} \quad (5.2)$$

Los valores de cada una de estas tensiones dependerá siempre del sistema de coordenadas elegido. Con la finalidad de simplificar al máximo el sistema de tensiones, el sistema de ejes se elegirán para definir nuestro problema el sistema de ejes principales. Las tensiones principales se definen como aquellas que actúan sobre ciertos planos, que suelen quedar definidos por la dirección de las fuerzas aplicadas, en los que la tensión cortante que actúa sobre ellos es nula. Una característica secundaria es que dos de las tres tensiones principales son las tensiones mayor y menor que actúan sobre la pieza. Estas actúan siempre en direcciones perpendiculares. El empleo de las tensiones principales simplifica enormemente la teoría del conformado de metales. De esta forma si los tres planos para un punto se eligen de manera que sean los planos principales, nos quedarán solo las tres tensiones directas, puesto que los tres pares de esfuerzos cortantes son por separado iguales a cero. Estas tensiones principales se representa con los subíndices 1, 2 y 3 de forma que $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$.

Con frecuencia, debido a la simetría u otras condiciones, se pueden considerar sólo dos tensiones directas, la mayor y la más pequeña. A diferencia de la teoría general de las elasticidad y de la plasticidad, la mayor parte de la teoría del conformado de metales se puede expresar en función de las tensiones principales sin necesidad de recurrir al análisis tensorial.

5.2.1. Situación bidimensional de tensiones

Con la finalidad de explicar el concepto físico de las tensiones principales y de introducir diversos métodos para poder calcularlas, se estudiará un sistema bidimensional de tensiones.

5.2.1.1. Método analítico

Consideramos, en primer lugar, un sistema en el que todas las tensiones actúan en direcciones paralelas a un plano.

Como se mencionó en la sección anterior, la descripción del estado de tensión depende del sistema de coordenadas escogido.

En la figura 5.2 se muestra un punto P rodeado por un elemento infinitesimal ABCD. El sistema de tensiones que actúa sobre este elemento debe estar en equilibrio si este elemento no va a cambiar de posición (esto es, a

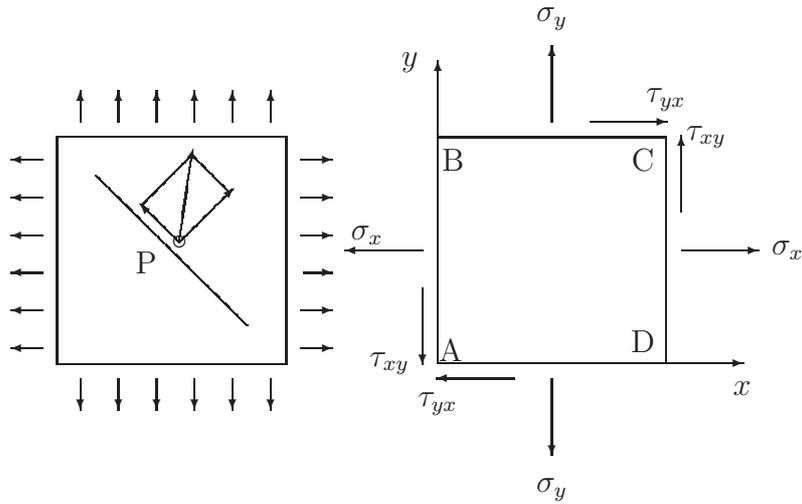


Figura 5.2: Sistema bidimensional de tensiones. Lámina cargada biaxialmente.

desplazarse o girar). A partir del equilibrio instantáneo se determina que las tensiones cortantes τ_{xy} y τ_{yx} deben ser complementarios y de igual magnitud. Se supone que el elemento $ABCD$ es tan pequeño que los esfuerzos no varían dentro del elemento.

En la figura 5.3 se muestra un sistema bidimensional de tensiones representado por las tensiones que actúan en un prisma recto. Se supone que se conocen las tensiones sobre los planos normales a x e y , y que se van a determinar las tensiones sobre el plano que está inclinado un ángulo θ respecto al eje y . Ya que el sistema debe estar en equilibrio, las fuerzas se pueden resolver e igualar en cualquier dirección.

$$\sigma_{\theta}AC = \sigma_x AB \cos\theta + \tau_{xy} BC \cos\theta + \tau_{xy} AB \sin\theta + \sigma_y BC \sin\theta$$

$$\sigma_{\theta}AC = \sigma_x AC \cos^2\theta + \tau_{xy} AC \sin\theta \cos\theta + \tau_{xy} AC \sin\theta \cos\theta + \sigma_y AC \sin^2\theta$$

simplificando:

$$\sigma_{\theta} = \sigma_x \cos^2\theta + \tau_{xy} \sin 2\theta + \sigma_y \sin^2\theta$$

como:

$$1 + \cos 2\theta = 2 \cos^2\theta$$

$$1 - \cos 2\theta = 2 \sin^2\theta$$

$$\sigma_{\theta} = \frac{1}{2} \sigma_x (1 + \cos 2\theta) + \tau_{xy} \sin 2\theta + \frac{1}{2} \sigma_y (1 - \cos 2\theta)$$

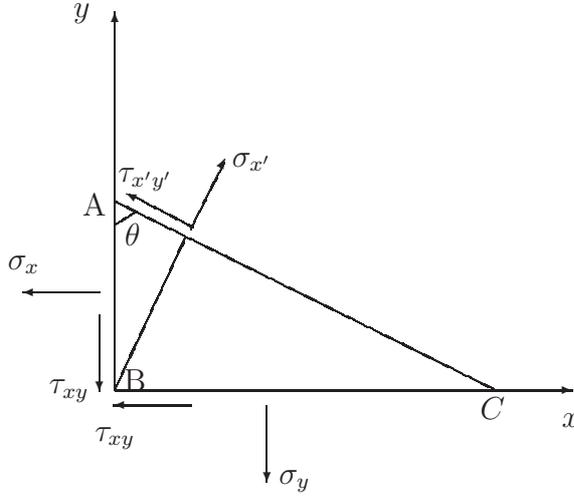


Figura 5.3: Sistema de tensiones sobre un plano inclinado un ángulo θ respecto al eje y .

y agrupando términos tenemos:

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\theta + \tau_{xy}\sin 2\theta \quad (5.3)$$

por otro lado:

$$\tau_\theta AC = -\sigma_x AB \sin \theta - \tau_{xy} BC \sin \theta + \tau_{xy} AB \cos \theta + \sigma_y BC \cos \theta$$

$$\tau_\theta = -\sigma_x \cos \theta \sin \theta - \tau_{xy} \sin^2 \theta + \tau_{xy} \cos^2 \theta + \sigma_y \cos \theta \sin \theta$$

$$\tau_\theta = \tau_{xy} \cos 2\theta - \frac{1}{2}\sigma_x \sin 2\theta + \frac{1}{2}\sigma_y \sin 2\theta$$

$$\tau_\theta = \frac{1}{2}(\sigma_y - \sigma_x) \sin 2\theta + \tau_{xy} \cos 2\theta \quad (5.4)$$

Estas dos ecuaciones constituyen la descripción completa del estado de tensiones sobre un plano inclinado un ángulo θ respecto al eje y (esto es, el sistema x', y' se gira un ángulo θ en sentido contrario a las manecillas del reloj con relación al sistema x, y). Debe notarse que ocurre un cambio de signo cuando θ está situada en el segundo y cuarto cuadrantes y consecuentemente

se recomienda que para evitar errores se escoja el sistema x', y' , de tal manera que θ esté situada en el primer cuadrante.

De la ecuación (5.4) se puede deducir que τ_θ se anula (es decir, que no existe tensión cortante en el plano AC) cuando se selecciona un valor de θ tal que:

$$\tan 2\theta^* = \frac{\tau_{xy}}{\frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)}. \quad (5.5)$$

La ecuación (5.5) define dos planos en los ángulos θ y $\theta + \frac{\pi}{2}$, donde la tensión cortante es nula. Esto significa que para cualquier sistema bidimensional de tensiones existen dos planos mutuamente perpendiculares en los cuales la tensión cortante es cero. Estos planos se llaman “planos principales”. Las tensiones normales que actúan sobre estos planos se llaman “tensiones principales”. Se puede demostrar por diferenciación de la ecuación (5.3) que las tensiones principales son las tensiones normales máxima y mínima del sistema:

$$\frac{d\sigma_\theta}{d\theta} = -\frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)\sin 2\theta \cdot 2 + 2 \cdot \tau_{xy}\cos 2\theta = 0 :$$

$$\tan 2\theta^* = \frac{\tau_{xy}}{\frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)}$$

Las tensiones principales se designan como σ_1 y σ_2 , y se eligen de tal manera que $\sigma_1 > \sigma_2$. Por tanto, las direcciones de tensiones principales se llaman 1 (máxima) y 2 (mínima).

De la ecuación (5.3) se determina las magnitudes de las tensiones principales cuando se sustituye la condición dada por la ecuación (5.5). De este modo

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_1 \\ \sigma_2 \end{array} \right\} = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) \pm \left[\left(\frac{(\sigma_x - \sigma_y)}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2 \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (5.6)$$

Las tensiones principales se usan a menudo para describir el estado de tensiones debido a las simplificaciones resultantes de los cálculos.

Por diferenciación en la ecuación (5.4), se puede demostrar que la máxima tensión cortante ocurre sobre dos planos mutuamente perpendiculares inclinados a 45° respecto de los planos principales:

$$\frac{d\tau_\theta}{d\theta} = \frac{1}{2}(\sigma_y - \sigma_x)\cos 2\theta \cdot 2 - 2 \cdot \tau_{xy}\sin 2\theta = 0,$$

$$\tan 2\theta^{**} = \frac{\frac{1}{2}(\sigma_y - \sigma_x)}{\tau_{xy}} = -\frac{\frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)}{\tau_{xy}} = -\cot 2\theta^*,$$

$$2\theta^{**} = 2\theta^* + \frac{\pi}{2} \Rightarrow \theta^{**} = \theta^* + \frac{\pi}{4}.$$

La magnitud de la máxima tensión cortante está dada por ¹:

$$\tau_{\text{máx}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2}. \quad (5.7)$$

De la misma forma, la tensión normal sobre los planos de la tensión cortante máxima se puede demostrar que es igual a $(1/2)(\sigma_1 + \sigma_2)$.

5.2.1.2. Método del círculo de Mohr

Las mismas condiciones de equilibrio de la sección anterior se pueden obtener gráficamente mediante el método siguiente. Mohr sugirió una representación gráfica del estado de tensiones que toma la forma de un círculo en un “plano de tensiones”. Los resultados obtenidos en la sección anterior se pueden ver de manera más rápida y directa utilizando este círculo ya que los resultados de tensiones principales y tensión cortante máxima, así como tensiones en cualquier otro plano, se pueden deducir de forma inmediata observando simplemente el diagrama de tensiones.

Si consideramos nuevamente el sistema de tensiones de la figura 5.3 representado por las ecuaciones (5.3) y (5.4)

$$\begin{aligned} \sigma_\theta &= \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) + \frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)\cos 2\theta + \tau_{xy}\sin 2\theta \\ \tau_\theta &= -\frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y)\sin 2\theta + \tau_{xy}\cos 2\theta, \end{aligned}$$

y las agrupamos elevándolas al cuadrado, se puede obtener:

$$\left[\sigma_\theta - \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) \right]^2 + \tau_\theta^2 = \left[\frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \right]^2 + \tau_{xy}^2. \quad (5.8)$$

Obsérvese que esta ecuación es de la forma

$$(\sigma - A)^2 + \tau^2 = B^2, \quad (5.9)$$

que es la ecuación de un círculo representado con ejes σ y τ , o de radio

$$B = \sqrt{\left[\frac{1}{2}(\sigma_x - \sigma_y) \right]^2 + \tau_{xy}^2}, \quad (5.10)$$

y con centro en el punto $(A, 0)$ tal que

$$A = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y).$$

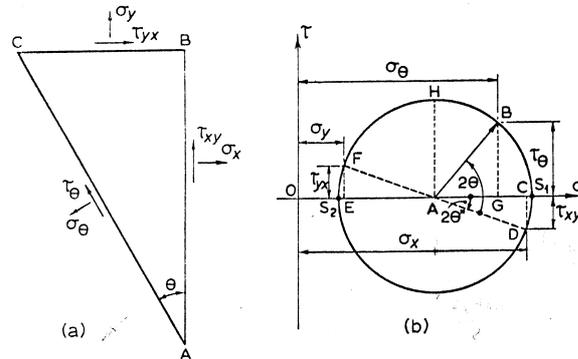


Figura 5.4: a) Sistema de tensiones que actúa sobre un prisma elemental con un ángulo recto, en tensión bidimensional; b) Círculo de Mohr que corresponde al sistema de tensiones anterior.

Éste es el círculo de Mohr, como se representa en la figura 5.4.

El plano sobre el que actúan σ_θ y τ_θ está inclinado un ángulo θ , medido en sentido contrario a las agujas del reloj, con el plano sobre el que se encuentran σ_x y τ_{xy} . Para definir estas posiciones sobre el círculo de Mohr es necesario adoptar algún convenio sobre el sentido de la tensión cortante. Si el esfuerzo cortante que actúa en el sentido de las agujas del reloj se supone que es positivo, τ_{xy} tiene el valor negativo representado por $-CD$ en figura 5.4. La componente σ de las coordenadas del punto D es OC , igual a σ_x . De forma similar $\tau_{xy} = +EF$, y $\sigma_y = OE$. Las tensiones principales son aquellas que actúan sobre los planos donde la tensión cortante es cero, por lo que vienen dadas por OS_1 y OS_2 .

Los resultados obtenidos en la sección anterior se pueden obtener observando el diagrama del círculo:

- Las tensiones principales viene dadas por:

$$\sigma_1 = OS_1 = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) + \left[\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

$$\sigma_2 = OS_2 = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) - \left[\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \right)^2 + \tau_{xy}^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

- El plano a través del cual actúa la tensión cortante es máxima está en un ángulo que forma $2\theta=90^\circ$ con el plano sobre el que actúa la tensión

¹En realidad la ecuación debería ser en todo caso $(1/2)(\sigma_1 + \sigma_3)$. En dos dimensiones las tensiones principales son realmente $(\sigma_1, \sigma_2, 0)$, cuando σ_1 y σ_2 son del mismo signo y positivas. Si las tensiones obtenidas son de distinto signo, como normalmente ocurre, las tensiones obtenidas serían $(\sigma_1, 0, \sigma_3)$

principal en el diagrama de tensiones. En consecuencia, estos planos se cortan con un ángulo $\theta=45^\circ$ en el espacio físico.

- La tensión cortante máxima es

$$\tau_{\text{máx}} = AH = B = \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}.$$

5.2.1.3. Método matricial

Las tensiones principales también se pueden obtener usando la notación tensorial. Aunque no entraremos en detalle con este tipo de notación, si que expondremos de forma resumida como obtener las tensiones principales. Como ya se expuso anteriormente (ecuación 5.2) el sistema de tensiones que actúa sobre un paralelepípedo se puede expresar como

$$\begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{pmatrix}$$

Este sistema de tensiones está definido sobre un sistema de ejes coordenados elegido de forma arbitraria. Si variamos la orientación de dichos ejes los valores que adopten estas tensiones irán variando. En concreto hay una orientación para la cual el tensor tensión adopta la forma de matriz diagonal, es decir las tensiones cortantes son nulas.

$$\begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{pmatrix} \iff \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix} \quad (5.11)$$

Dicha orientación será la de los planos principales y las tensiones que aparezcan en la diagonal se corresponderán a las tensiones principales. El problema consistirá pues, en resolver un problema de autovalores:

$$\begin{vmatrix} \sigma_x - \lambda & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y - \lambda & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z - \lambda \end{vmatrix} = 0, \quad (5.12)$$

lo que produce una ecuación cúbica en λ

$$\lambda^3 - J_1\lambda^2 - J_2\lambda - J_3 = 0, \quad (5.13)$$

donde a los J_i se les denomina invariantes del sistema y se definen como:

- Primer invariante de la tensión (Traza)

$$J_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z$$

- Segundo invariante de la tensión (Invariante de 2º grado)

$$J_2 = -(\sigma_x\sigma_y + \sigma_z\sigma_x + \sigma_y\sigma_z) + \tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2$$

- Tercer invariante de la tensión (Determinante de la tensión)

$$J_3 = \begin{vmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & \tau_{xz} \\ \tau_{xy} & \sigma_y & \tau_{yz} \\ \tau_{xz} & \tau_{yz} & \sigma_z \end{vmatrix}$$

Para el caso de bidimensional, las tensiones en cualquier sistema de referencia serán:

$$\begin{pmatrix} \sigma_x & \tau_{xy} & 0 \\ \tau_{xy} & \sigma_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

y los invariantes

$$\begin{aligned} J_1 &= \sigma_x + \sigma_y \\ J_2 &= -(\sigma_x\sigma_y) + \tau_{xy}^2 \\ J_3 &= 0 \end{aligned}$$

por lo que la ecuación cúbica en λ queda como

$$\lambda^3 - (\sigma_x + \sigma_y)\lambda^2 - [-(\sigma_x\sigma_y) + \tau_{xy}^2]\lambda = 0 \quad (5.14)$$

Las soluciones de dicha ecuación son:

$$\begin{aligned} \lambda &= 0 \\ \lambda &= \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x + \sigma_y)^2 - 4(\sigma_x\sigma_y - \tau_{xy}^2)} \\ \lambda &= \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{1}{2}\sqrt{(\sigma_x + \sigma_y)^2 - 4(\sigma_x\sigma_y - \tau_{xy}^2)} \end{aligned}$$

que operando sobre ellas se obtiene una expresión idéntica a la obtenida con los métodos anteriores

$$\begin{aligned} \lambda &= 0 \\ \lambda &= \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \\ \lambda &= \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \end{aligned}$$

5.2.2. Situación tridimensional de tensiones

Al igual como se hizo para describir un “sistema bidimensional” de tensiones (sistema biaxial de tensiones) con las tensiones principales, se puede demostrar, considerando en equilibrio un sistema de tensiones en tres dimensiones, que siempre hay tres planos perpendiculares entre sí sobre los cuales las tensiones cortantes son nulas. Hay así, tres tensiones principales σ_1 , σ_2 , σ_3 que nos permiten definir completamente este sistema de tensiones. Estas tensiones se pueden calcular también utilizando los círculos de Mohr o mediante la notación tensorial explicada anteriormente de una manera casi inmediata.

Las máximas tensiones cortantes correspondientes, que ocurren en planos inclinados a 45° respecto a los planos principales, son:

$$\begin{aligned} 1 - 2 : \tau_{1-2} &= \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2} (= \tau_3) \\ 1 - 3 : \tau_{1-3} &= \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} (= \tau_2) = \tau_{\text{máx}} \quad (\text{absoluta}) \\ 2 - 3 : \tau_{2-3} &= \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2} \end{aligned} \quad (5.15)$$

Los números 1, 2 y 3 se refieren a las direcciones principales y las tensiones principales están dispuestas, como se comentó anteriormente, de tal manera que $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ (véase la figura 5.5). Las tensiones cortantes que están entre paréntesis son llamadas a veces tensiones cortantes principales y los sufijos designan las direcciones de las tensiones. La tensión cortante máxima absoluta es $\tau_{\text{máx}}$ y está dada por $(\sigma_1 - \sigma_3)/2 (= \tau_2)$. Si el estado de tensiones está dado por $(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3 = 0)$, la tensión cortante máxima $\tau_{\text{máx}}$ está dada por $\sigma_1/2$. Por tanto, en un estado tridimensional de tensiones, la mayor tensión cortante ocurre en un plano que biseca el ángulo entre los planos sobre los cuales actúan las tensiones principales más grande y más pequeña.

5.3. Criterios de fluencia y tensiones y deformaciones efectivas

5.3.1. Criterios de fluencia

En los procesos de conformación por deformación plástica, la deformación ocurre en un material sujeto a una tensión de tracción a lo largo de su eje (tracción uniaxial), cuando ésta excede a la tensión de fluencia Y . La tensión de fluencia se puede determinar a partir de la curva tensión-deformación ya sea como un valor característico (el punto de fluencia) o como la resistencia a la fluencia, normalmente definida como la tensión que origina una deformación permanente del 0,2%. En adelante, Y se usará como la condición de fluencia para estados uniaxiales de tensión.

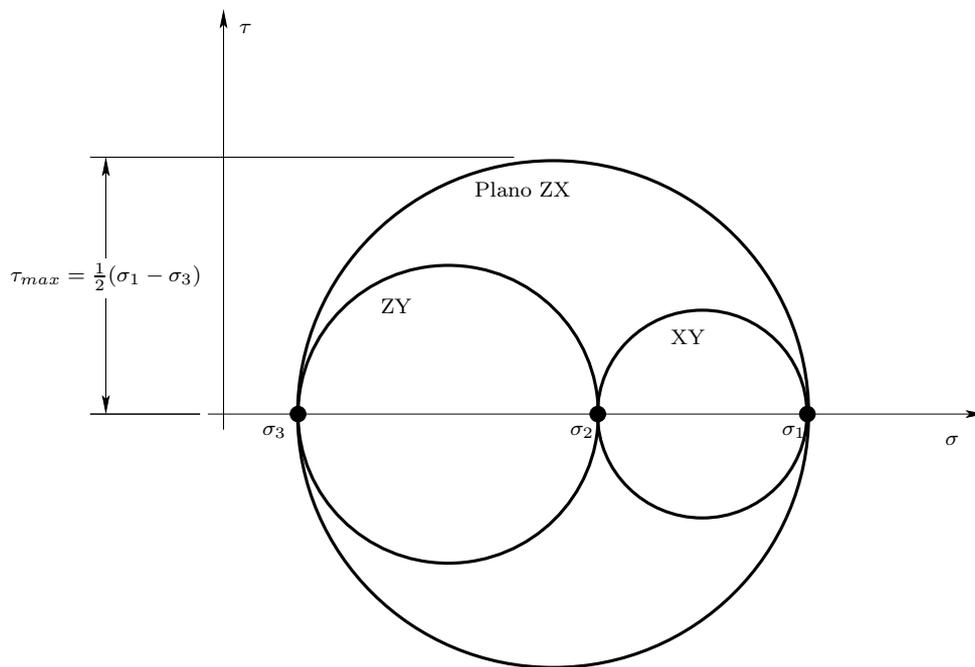


Figura 5.5: Representación mediante círculos de Mohr de un estado tri-dimensional de tensiones.

En la mayoría de los procesos de conformación y corte, la deformación tiene lugar bajo estados más complejos de tensión y, por tanto, es necesario poder predecir el estado tensional en el que se inicia y mantiene la fluencia. Esto significa que se debe establecer un criterio de fluencia que permita considerar todas las combinaciones de tensiones que producirán flujo plástico. El establecimiento de un criterio de fluencia se basa en las siguientes suposiciones y observaciones empíricas:

- Los metales son homogéneos, continuos e isotrópicos (esto es, tienen las mismas propiedades en todas direcciones).
- Los metales tienen la misma tensión de fluencia para compresión y tracción.
- Una presión hidrostática superpuesta no influye en la iniciación de la fluencia.

5.3.1.1. Criterio de fluencia de Tresca

En 1864, Tresca propuso su criterio diciendo que el flujo plástico ocurre cuando la tensión cortante máxima excede un valor determinado crítico. Ya que la tensión cortante máxima es igual a un medio de la diferencia entre la mayor y menor tensión principal, el criterio de Tresca puede ser expresado del siguiente modo

$$\tau_{\text{máx}} = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \geq \text{constante } k = \tau_{\text{crit}}. \quad (5.16)$$

Debe mencionarse que la constante k podrá obtenerse directamente del límite de fluencia obtenido del ensayo de torsión mencionado en el Cap. 4, ya que en dicho ensayo la probeta estará sometida a un estado tensional de cortadura pura.

Este criterio implica que la fluencia es independiente de la tensión principal intermedia, lo cual no es estrictamente cierto. A pesar de esto, la diferencia en términos de tensión entre el criterio de Tresca y el criterio más preciso de von Mises nunca excede un 15%. Introduciendo un factor corrector en el miembro derecho de la ecuación (5.16) (p. ej. 1,075), la diferencia entre ambos criterios pueden ser reducidas.

Ya que la ecuación (5.16) es aplicable a todos los estados tensionales, la constante k (el valor crítico) se podría encontrar, por ejemplo, a partir de la tensión de fluencia en tracción uniaxial. En este caso, el estado tensional en fluencia está dado por $\sigma_1 = Y, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$. La ecuación anterior resulta entonces:

$$\tau_{\text{máx}} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{Y}{2} \geq k(= \tau_{\text{crit}}),$$

lo cual significa que la tensión cortante crítica está relacionada con la tensión de fluencia en tracción simple por:

$$k = \frac{Y}{2}.$$

Esto es muy importante, ya que Y es la propiedad más fácil de obtener. El criterio de Tresca puede ser por tanto expresado del siguiente modo

$$\sigma_1 - \sigma_3 \geq Y. \quad (5.17)$$

5.3.1.2. Criterio de fluencia de von Mises

En 1913, von Mises propuso un criterio de fluencia estableciendo que la fluencia ocurre cuando el trabajo de deformación por unidad de volumen realizado por el sistema de tensiones excede un valor crítico para el material particular, lo cual puede ser expresado matemáticamente como

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \geq C.$$

Ya que la constante C es la misma para todos los sistemas de tensiones, la tensión uniaxial (estado tensional $\sigma_1 = Y, \sigma_2 = \sigma_3 = 0$ representado en la Fig. 5.6) puede ser usada para determinar C . Aplicando el criterio a este estado de tensiones:

$$\sigma_1^2 + \sigma_1^2 = 2Y^2 = C.$$

Por tanto, el criterio de von Mises puede ser expresado entonces como

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \geq 2Y^2. \quad (5.18)$$

Para el estado de tensión cortante pura (véase el estado tensional representado en el círculo de Mohr de la Fig. 5.7), los criterios de Tresca y de von Mises dan diferentes resultados. La tensión cortante pura es equivalente a $\sigma_1 = k, \sigma_2 = 0, \sigma_3 = -k$:

$$\begin{aligned} \text{Tresca: } k + k = Y &\implies k = \frac{Y}{2} \\ \text{von Mises: } 6k^2 = 2Y^2 &\implies k = \frac{Y}{\sqrt{3}}. \end{aligned} \quad (5.19)$$

Esto significa que la tensión cortante crítica en fluencia difiere, en $\frac{2}{\sqrt{3}} \simeq 1,15$; esto es, el criterio de von Mises requiere un valor de tensión cortante crítica 15% más alto para iniciar la fluencia que el criterio de Tresca. Para metales

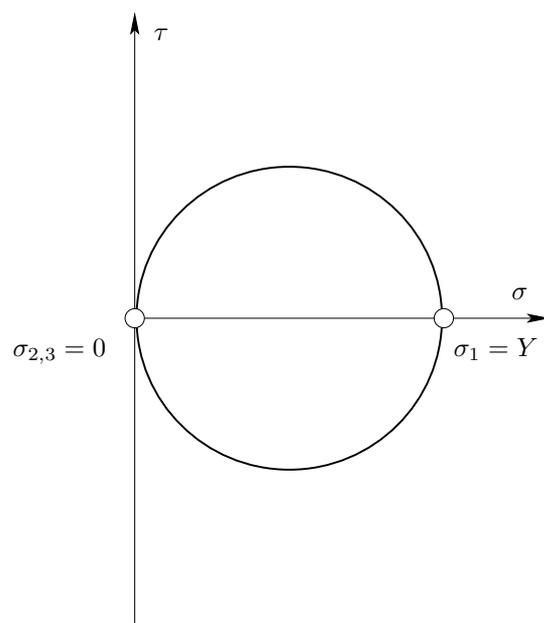


Figura 5.6: Estado tensional representado en un círculo de Mohr correspondiente a un ensayo de tracción simple uniaxial.

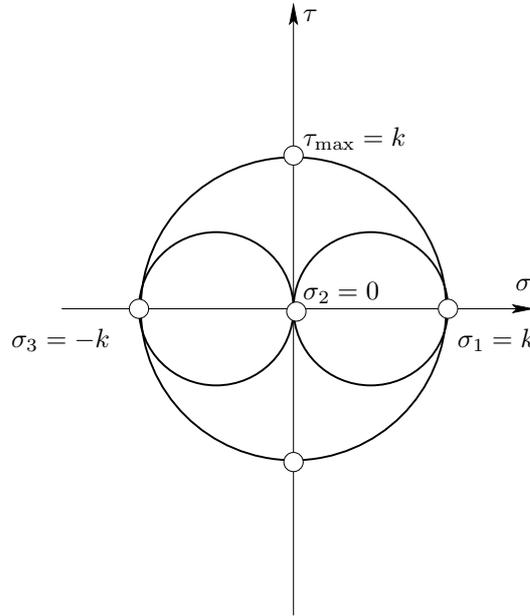


Figura 5.7: Estado tensional representado en un círculo de Mohr correspondiente a un ensayo de torsión.

dúctiles se ha demostrado experimentalmente que el criterio de von Mises es más preciso, aunque el criterio de Tresca sigue siendo aplicado en muchos casos, particularmente por ingenieros de diseño, debido a su simplicidad.

En un proceso de deformación plana (véase el estado tensional representado en el círculo de Mohr de la Fig. 5.8), en el que la deformación se produce siempre en un plano (por ejemplo, en el plano definido por los ejes principales 1 y 3), el incremento de deformación principal en el eje perpendicular al plano de deformación (por ejemplo, el eje 2) es nulo ($\epsilon_2 = 0$). Por tanto, si no hay cambio de volumen se ha de cumplir:

$$\epsilon_1 = -\epsilon_3,$$

lo que equivale a un estado de deformación de cortante puro (véase el ejemplo de la Fig. 5.9 de deformación de un elemento material sometido a un estado de tensión de cortadura pura). Así, el círculo de Mohr para una deformación plástica plana sin endurecimiento por deformación tiene siempre el radio $\tau_{\max} = k$. Puede existir una tensión hidrostática σ_2 intermedia que alterará los valores de las tensiones principales máximo y mínimo pero que no influirá sobre la fluencia. Así,

$$\sigma_1 = \sigma_2 + k; \quad \sigma_3 = \sigma_2 - k.$$

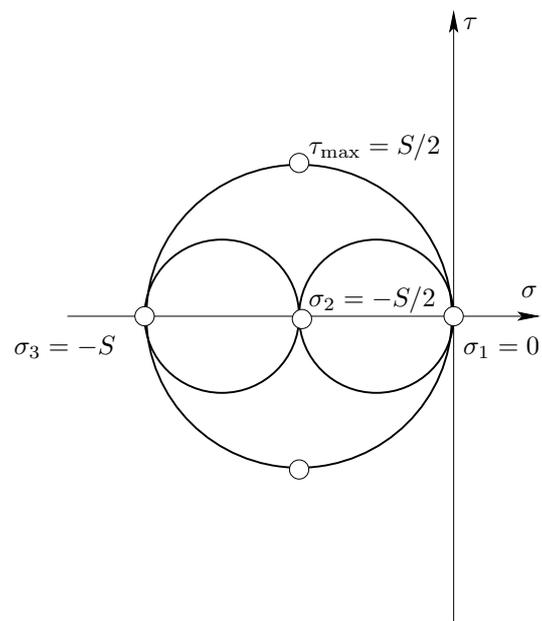


Figura 5.8: Estado tensional representado en un círculo de Mohr correspondiente a un ensayo de deformación plana.

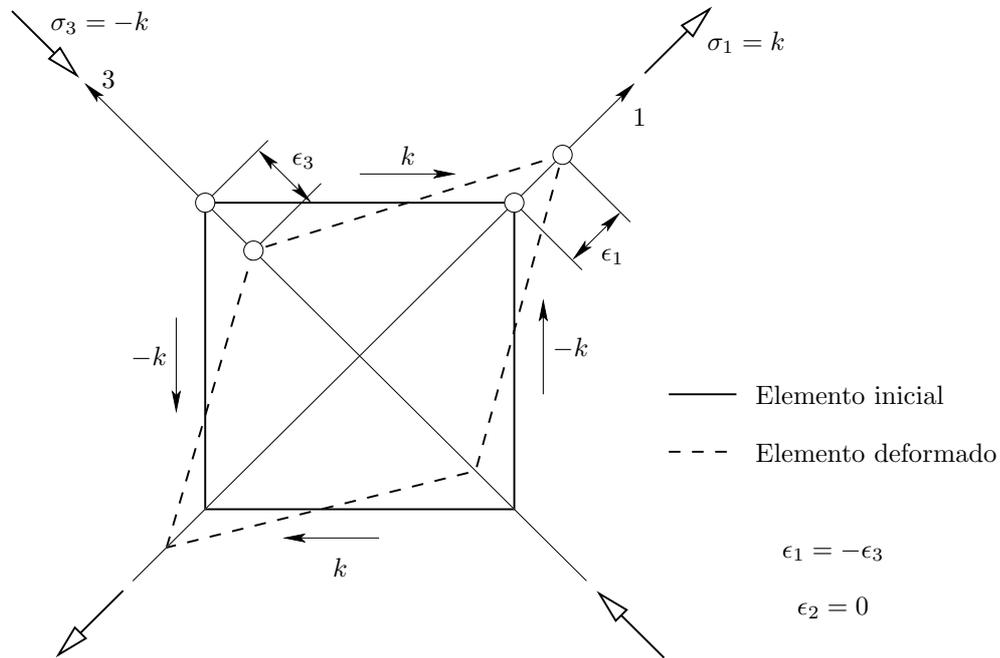


Figura 5.9: Ejemplo de deformación de un elemento material sometido a un estado de tensión de cortadura pura.

Luego:

$$\sigma_2 = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \text{ y } \sigma_1 - \sigma_3 = 2k.$$

A la tensión de fluencia obtenida en un ensayo de deformación plana la denotaremos con la letra S , por tanto $\sigma_1 - \sigma_3 = S$ y así,

$$S = 2k \simeq 1,15Y.$$

5.3.2. Tensión efectiva y deformación efectiva

El proposito de introducir estos términos es encontrar una forma conveniente de expresar los sistemas más complejos de tensiones y deformaciones que actúan en un elemento. Esto se hace definiendo las tensiones y deformaciones efectivas o equivalentes mediante las cuales los sistemas complejos se transforman en situaciones uniaxiales equivalentes. Una ventaja importante de esto es que ahora se puede emplear la curva de tracción uniaxial-

deformación para determinar, por ejemplo, las propiedades de endurecimiento por deformación.

La definición de tensión efectiva o equivalente o σ_e se basa en el criterio de fluencia de von Mises y está dada por:

$$\sigma_e = \left\{ \frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \right\}^{\frac{1}{2}}, \quad (5.20)$$

donde la constante $1/2$ se elige de tal manera que $\sigma_e = \sigma_1$ para tensión uniaxial $(\sigma_1, 0, 0)$. Esto se puede explicar básicamente como otra forma de expresar el criterio de fluencia de von Mises (o sea, el flujo ocurre cuando $\sigma_e \geq Y$).

De manera similar, la deformación efectiva o equivalente $\bar{\epsilon}$ está definida por

$$\epsilon_e = \left[\frac{2}{3} (\epsilon_1^2 + \epsilon_2^2 + \epsilon_3^2) \right]^{\frac{1}{2}}, \quad (5.21)$$

donde la constante $2/3$ está escogida de tal forma que $\epsilon_e = \epsilon_1$ para tensión uniaxial $(\epsilon_1, \frac{-\epsilon_1}{2}, \frac{-\epsilon_1}{2})$. Por tanto, en un diagrama de tipo $Y - \epsilon$ como el mostrado en la figura 5.10 se podrá identificar fácilmente la tensión efectiva σ_e que he de aplicar para conseguir una determinada deformación efectiva ϵ_e .

Las ecuaciones (5.20) y (5.21) constituyen un método simple para describir sistemas complejos de tensiones y deformaciones. La curva de tensión-deformación (σ, ϵ) obtenida de una prueba de tracción puede ser considerada como un caso especial de curva tensión efectiva-deformación efectiva (σ_e, ϵ_e) . Los resultados de prueba (σ_e, ϵ_e) obtenidos en situaciones complejas pueden de este modo compararse directamente con los resultados obtenidos en pruebas simples de tracción o compresión. Lo contrario es cierto en situaciones normales; esto es, las curvas de tracción uniaxial-deformación pueden ser usadas directamente en situaciones complejas cuando están expresadas en términos de σ_e y ϵ_e .

5.4. Cálculo de fuerzas y potencias

La deformación de un material requiere cierta cantidad de trabajo, que depende de las condiciones en las cuales tenga lugar dicha deformación. El trabajo de deformación es un dato importante, ya que permite determinar tanto la energía necesaria para llevar a cabo la deformación como las fuerzas implicadas en la misma. Ambos parámetros son necesarios para el diseño o

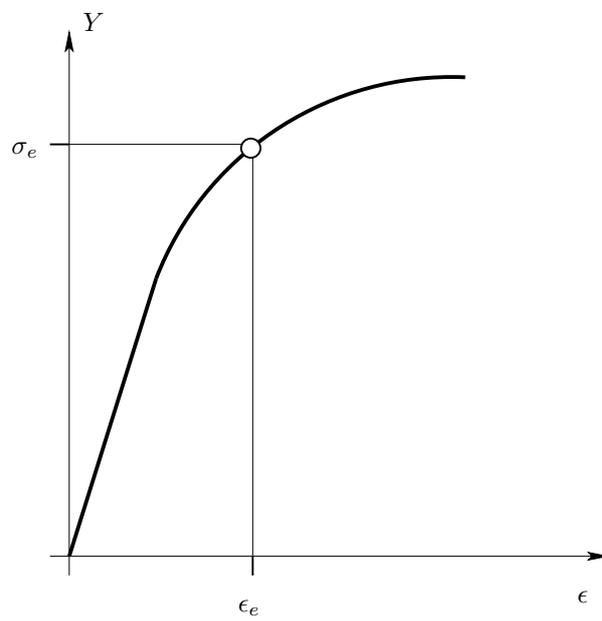


Figura 5.10: Obtención en un diagrama $Y - \epsilon$ de la tensión efectiva σ_e necesaria para provocar una deformación efectiva ϵ_e .

selección de la maquinaria. A continuación se va a exponer uno de los métodos más sencillos utilizados para estimar la fuerza, el trabajo y la potencia necesaria para llevar a cabo la operación de conformado. Este método se conoce con el nombre de “método del trabajo ideal” o “método del trabajo de deformación homogénea”

5.4.1. Método del trabajo de deformación homogénea

El método del trabajo ideal se basa en calcular el trabajo plástico ideal necesario para cambiar la forma de una pieza durante una determinada operación de conformado, para luego, usando un factor de eficiencia obtenido de la experiencia, modificar este resultado y de esta forma incluir las contribuciones no ideales al trabajo. Por lo tanto, este método es en parte analítico (predictivo) y en parte empírico, puesto que necesita de la práctica experimental para obtener los coeficientes que modifican el trabajo ideal calculado de forma analítica. El método se usará para estimar los requisitos de fuerza y potencia para una determinada operación de conformado cuando se hayan estudiado previamente otras operaciones de conformado similares.

Trabajo ideal u homogéneo en tracción simple. Para ilustrar el método, se va a calcular el trabajo ideal realizado durante la deformación de un redondo como el mostrado en la Fig. 5.11 sometido a un esfuerzo de tracción (básicamente el trabajo realizado sería similar al calculado en un ensayo a tracción realizado sobre una probeta de sección circular).

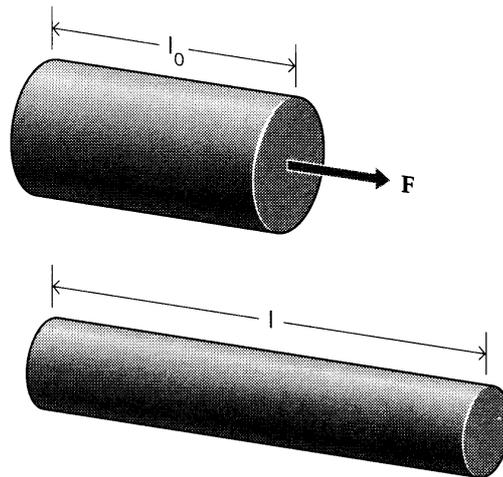


Figura 5.11: Redondo sometido a tracción.

El trabajo de deformación necesario para producir un incremento de longitud diferencial dl se puede expresar del siguiente modo

$$dw = A\sigma_e dl = A l \sigma_e d\varepsilon_e.$$

Por tanto, si observamos la curva de tensión-deformación de la Fig. 5.12, se puede ver que el trabajo de deformación por unidad de volumen para obtener un incremento de deformación de $d\varepsilon_e$ se puede expresar como

$$\frac{dw}{V} = \sigma_e d\varepsilon_e,$$

Integrando entre los estados de deformación 1 y 2, y suponiendo que la

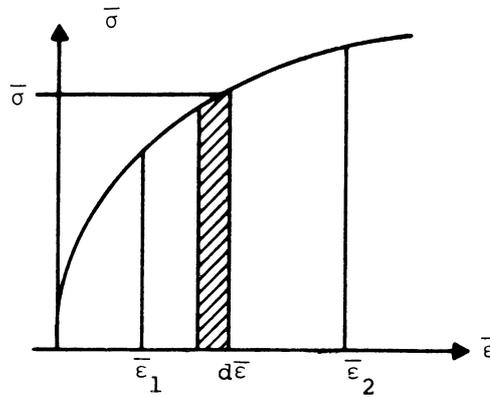


Figura 5.12: Determinación del trabajo de deformación.

deformación es homogénea, se puede obtener

$$\frac{w}{V} = \int_{\varepsilon_{e1}}^{\varepsilon_{e2}} \sigma_e d\varepsilon_e. \quad (5.22)$$

Si no existe una función analítica $\sigma_e(\varepsilon_e)$, se puede utilizar un valor medio de la tensión efectiva

$$\sigma_{em} = \frac{1}{2}(\sigma_e(\varepsilon_{e1}) + \sigma_e(\varepsilon_{e2})),$$

resultando

$$\frac{w}{V} = \sigma_{em}(\varepsilon_{e2} - \varepsilon_{e1}). \quad (5.23)$$

Si la tensión de fluencia puede ser expresada mediante el modelo $\sigma_e = C\varepsilon_e^n$, la ecuación del trabajo de deformación homogénea por unidad de volumen resulta

$$\frac{w}{V} = \frac{c}{n+1} (\varepsilon_{e2}^{n+1} - \varepsilon_{e1}^{n+1}). \quad (5.24)$$

Este trabajo total coincidirá según lo principios de la mecánica con el trabajo exterior realizado por la fuerza aplicada. Dicho trabajo externo se calculará como:

$$dw_{ext} = Fdl \Rightarrow w_{ext} = \int_{l=l_0}^{l=l} Fdl. \quad (5.27)$$

Para tracción simple la fuerza F la podemos descomponer como

$$F = \sigma A,$$

donde A es el área transversal verdadera sobre la que se aplica la fuerza necesaria para llevar a cabo la deformación (en este caso sería la sección del rodillo) y σ sería la tensión en dicha sección, y dl es

$$dl = l d\varepsilon.$$

Por lo que

$$dw_{ext} = Fdl = \sigma Ald\varepsilon = V\sigma d\varepsilon, \quad (5.28)$$

donde σ es la tensión en la dirección en la cual actúa la fuerza F y ε la deformación en dicha dirección.

Para calcular la potencia exterior (N) necesaria para efectuar el conformado se debe conocer la velocidad de accionamiento (v), o el tiempo (t) durante el cual es suministrada la fuerza. Luego:

$$N = Fv = \frac{w_{ext}}{t}. \quad (5.29)$$

Procesos de conformado por deformación plástica reales El trabajo ideal (para deformación homogénea) realizado durante una ensayo a tracción es, en realidad, el total del trabajo realizado, al menos mientras la deformación sea uniforme. Es decir, en el ensayo a tracción podemos considerar nulo el trabajo de fricción y el trabajo redundante, puesto que no hay contacto, no hay un trabajo superficial realizado y la suposición de deformación homogénea es correcta. Para procesos donde los coeficientes de fricción son bajos, la concordancia entre el trabajo y las fuerzas reales en general es aceptable.

Sin embargo para operaciones reales de conformado (tales como el trefilado o la extrusión, figura 5.14), tanto el contacto y la fricción como la deformación redundante estarán siempre presentes y por lo tanto afectarán al trabajo necesario para efectuar la deformación. Tal y como se comentó anteriormente el trabajo real podemos dividirlo en estos casos en tres tipos de trabajo:

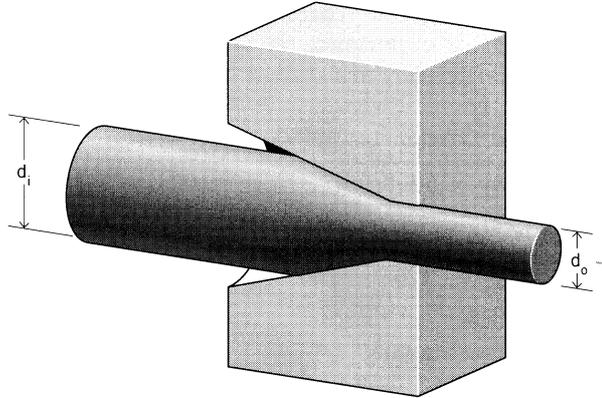


Figura 5.14: Proceso real de trefilado.

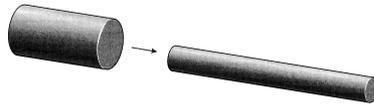


Figura 5.15: Deformación homogénea.

1. *Trabajo ideal.* Es el trabajo mínimo para completar el cambio de forma especificado w_i .
2. *Trabajo redundante.* Es el trabajo debido a las distorsiones internas del material para lograr el cambio de forma especificado w_r .
3. *Trabajo de fricción.* El trabajo necesario para vencer el rozamiento entre las superficies de contacto del material y la herramienta w_f .

Por lo tanto, para obtener el trabajo real necesario para realizar la deformación de la pieza habrá que estimar el trabajo de fricción y el trabajo redundante. Esta estimación generalmente se realiza introduciendo factores empíricos de corrección que relacionen el trabajo ideal para realizar el proceso y el trabajo realmente necesario. Así podemos definir una cantidad muy útil denominada eficiencia del proceso como

$$\eta = \frac{\text{Trabajo ideal}}{\text{Trabajo real}} \quad (5.30)$$

En la siguiente tabla se muestran valores típicos de la eficiencia de varias operaciones de conformado de metales³.

³La eficiencia muy baja en la forja tienen lugar en piezas delgadas, donde la disipación de energía se produce fundamentalmente por fricción.

Proceso	Valor de η
Tensión uniaxial	≈ 1
Forja	0.20-0.95
Laminado plano	0.80-0.90
Embutición profunda	0.75-0.80
Trefilado	0.55-0.70
Extrusión	0.5-0.65

A partir del trabajo ideal y conociendo la eficiencia del proceso o estimando el trabajo de fricción y redundante de datos obtenidos por la experiencia podemos calcular el trabajo, fuerza y potencia necesaria para realizar un determinada operación de conformado.

A la hora de aplicar y estimar fuerzas y potencias mediante este método es conveniente distinguir entre dos tipos de procesos:

- Procesos en los que la fuerza o carga externa necesaria para provocar la deformación se aplica directamente a toda la sección transversal de deformación de la pieza. Como ejemplos aquí tendríamos un ensayo a tracción o a compresión, el proceso de laminado o un proceso de forja libre. En este tipo de procesos, la fuerza se puede determinar por el procedimiento descrito anteriormente (trabajo homogéneo) o directamente y de una forma más sencilla, como veremos en la siguiente sección, a través del producto de la tensión provocada por dicha fuerza y del área transversal sobre la que actúa.
- Procesos en los que la fuerza o carga externa se aplica sobre una zona del material distinta a la que sufre en ese momento el proceso de deformación. Ejemplos sería el estirado, el trefilado o la extrusión. En los dos primeros la fuerza se aplica sobre el material que ya ha sido deformado y sirve de nexo de unión con el material que se está deformado. En la tercera (extrusión) la fuerza externa se aplica sobre el material que aún no ha sufrido la deformación. En este tipo de procesos la forma más conveniente de calcular la magnitud de la fuerza sería calcular el trabajo realizado en la deformación de un pequeño elemento de la pieza e integrarlo a lo largo de toda la región de deformación para a continuación igualarlo al trabajo exterior y despejar la fuerza o carga externa aplicada.

5.5. Análisis de ejemplos

Tal y como se comentó al final de la sección anterior, para el cálculo de fuerzas y potencias en procesos de conformado por deformación plástica,

vamos a distinguir dos grupos: en el primero englobaremos procesos como la forja o la laminación y en el segundo procesos como el trefilado, el estirado o la extrusión. Aunque las fuerzas necesarias para realizar todos estos procesos se pueden estimar o calcular con el método de trabajo para la deformación homogénea, la estimación de las fuerzas para el primer grupo se puede estimar de una forma más sencilla y directa y con el mismo resultado.

5.5.1. Forja libre y laminación

A continuación se analizan dos procesos de este primer grupo, utilizando para el primero de ellos (forja libre) tanto el método del trabajo como otro más sencillo basado en el cálculo de la fuerza a partir del producto de la tensión de fluencia en dicha dirección por el área sobre la que actúa.

5.5.1.1. Forja libre

La forja libre (forja en matriz abierta) es el proceso más antiguo de conformado de metales (figura 2.1a). Se caracteriza por no tener restricción alguna la herramienta en cuanto a forma y masa (no se confina el flujo del metal), en contraste con la estampa, que contiene la forma y dimensiones de la pieza a fabricar. Se trata de un proceso de conformación en caliente. El metal se calienta en toda su masa hasta la temperatura correcta antes de colocarse en el yunque; golpeando seguidamente el metal con un martillo accionado mecánicamente, con vapor o neumáticamente. La forma deseada la obtiene el operario cambiando entre golpes la posición de la pieza. Básicamente el material está sometido en este proceso a tensiones de compresión.

En la forja con grandes plataformas planas, el área de contacto con la pieza aumenta continuamente durante la operación, de manera que resulta apropiada la forma diferencial de la fórmula de trabajo. El incremento de trabajo llevado a cabo por la fuerza (pA) en un determinado instante es

$$dw_e = (pA) \cdot dh, \quad (5.31)$$

y el trabajo para una deformación homogénea es

$$dw_i = V\bar{\sigma}d\bar{\epsilon}. \quad (5.32)$$

Para relacionar la forma diferencial del trabajo externo con la del trabajo homogéneo se calcularán a continuación las deformaciones y tensiones efectivas. En este ejemplo de forja libre de pieza cilíndrica, el material (cilindro) va a sufrir una disminución de su altura, mientras que su diámetro va a

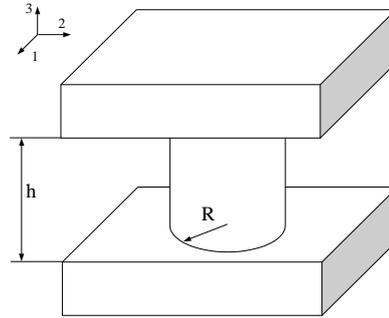


Figura 5.16: Proceso de forja de una pieza cilíndrica.

aumentar. Si establecemos el sistema de referencia tal y como aparece en la figura, las deformaciones naturales en dichos ejes serán las siguientes:

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{D_o}{D_i},$$

$$\varepsilon_2 = \ln \frac{D_o}{D_i},$$

$$\varepsilon_3 = \ln \frac{h_o}{h_i},$$

donde D representa el diámetro del cilindro, y h su altura. Puesto que el volumen permanece constante,

$$V = h_i \cdot \pi \frac{D_i^2}{4} = h_o \cdot \pi \frac{D_o^2}{4} \implies$$

$$\frac{h_o}{h_i} = \frac{D_i^2}{D_o^2} \implies \ln \frac{h_o}{h_i} = 2 \ln \frac{D_i}{D_o} \Leftrightarrow \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = -\frac{1}{2} \varepsilon_3.$$

La deformación equivalente será:

$$\varepsilon_e = \left[\frac{2}{3} (\varepsilon_1^2 + \varepsilon_1^2 + (-2\varepsilon_1)^2) \right]^{\frac{1}{2}} = 2\varepsilon_1 \quad \text{ó} \quad (= 2\varepsilon_2 = -\varepsilon_3).$$

En cuanto a las tensiones principales, este proceso de forja libre va a ser similar a un proceso de compresión uniaxial, siempre y cuando consideremos nulas o despreciables las tensiones de fricción. De esta forma $\sigma_1 = 0$ y $\sigma_2 = 0$, y la tensión efectiva es

$$\sigma_e = \left\{ \frac{1}{2} [0 + (-\sigma_3)^2 + (\sigma_3)^2] \right\}^{\frac{1}{2}} = \sigma_3.$$

Una vez obtenido que $\bar{\sigma} = \sigma_3$, y $\bar{\varepsilon} = -\varepsilon_3$, sustituimos en la fórmula de trabajo homogéneo (ecuación 5.32), obteniendo:

$$dw_i = V\sigma_3 d\varepsilon_3, \quad (5.33)$$

y como $d\varepsilon_3 = \frac{dh}{h}$ la fórmula de trabajo queda

$$dw_i = V\sigma_3 \frac{dh}{h} = Ah \cdot \sigma_3 \frac{dh}{h} \quad (5.34)$$

$$w_i = A \cdot \sigma_3 dh, \quad (5.35)$$

e igualando trabajo externo (ec. 5.31) y trabajo homogéneo (ec. 5.31)

$$(pA) \cdot dh = A \cdot \sigma_3 dh, \quad (5.36)$$

se obtiene que $p = \sigma_3$.

Este procedimiento no resulta útil, puesto que el mismo resultado se puede obtener de forma inmediata considerando que la fuerza que actúa para provocar la deformación es el producto de la tensión de fluencia en dicha sección por el área sobre la que actúa dicha fuerza.

$$F = A\sigma_3. \quad (5.37)$$

Por lo tanto, esta es la razón por la que, para procesos como la forja, el laminado o los casos más sencillos de un ensayo a tracción y un ensayo a compresión, la fuerza necesaria para deformar el material se calculará de un forma directa sin recurrir a la fórmula de trabajo homogéneo. A continuación se expondrá este método sencillo para un proceso de laminación.

5.5.1.2. Laminación

La laminación es un proceso de conformado por deformación plástica en el que el material fluye de modo continuo y en una dirección preferente, mediante fuerzas de compresión, ejercidas al pasar el metal entre cilindros, y de cizallamiento, originadas por el rozamiento entre los cilindros y el metal. Esencialmente la laminación consiste en hacer pasar un metal entre dos rodillos separados por un hueco algo menor que el grueso del metal entrante, y que rotan en sentido contrario, tal como se representa en la figura 5.17. Los rodillos giran con una velocidad superficial superior a la del metal entrante por lo que el rozamiento entre ambas superficies en contacto actúa impulsando el metal hacia delante.

Puesto que la anchura del material casi se mantiene constante durante la deformación, la reducción de espesor da por resultado un incremento correspondiente de longitud debido a la constancia de volumen. En la laminación

con buena lubricación, el rozamiento es pequeño ($\mu \approx 0,05$) y el proceso puede considerarse esencialmente una compresión, pero el sistema es ligeramente más complejo porque la deformación, y por lo tanto la tensión de fluencia del material, aumenta desde la entrada a la salida del espacio que queda entre los dos cilindros. Así, a la entrada, la tensión de fluencia en la dirección de la carga será $\sigma_{3,i}$ y a la salida, $\sigma_{3,o}$.

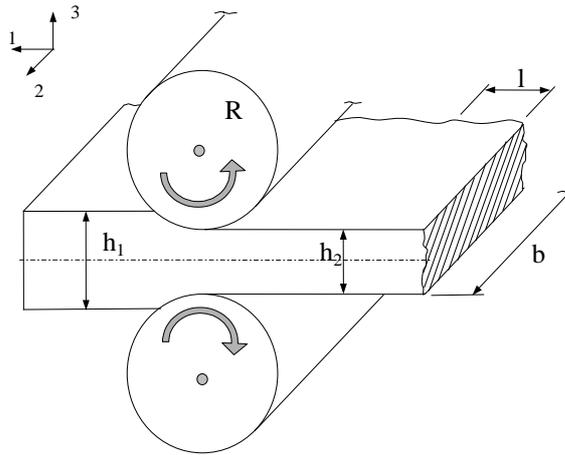


Figura 5.17: Proceso de laminación.

Para calcular la fuerza de laminación, lo primero que haremos, al igual que en cualquier otro proceso, será establecer el sistema de coordenadas (ejes principales) tal y como se indica en la figura 5.17. Suponiendo que la curvatura de los rodillos es lo suficientemente grande para ser ignorada, el área de contacto será $A = Lb$, y considerando una tensión de compresión media en el área de contacto ($\sigma_{3,m}$), la carga total del rodillo sobre la pieza que se está laminando será:

$$P = \sigma_{3,m} \cdot L \cdot b,$$

donde L es la longitud de la cuerda de contacto y está dado por

$$L^2 = R^2 - \left(R - \frac{\Delta h}{2}\right)^2 \simeq R\Delta h.$$

En esta fórmula Δh es la reducción de espesor y R es el radio de los rodillos del tren de laminación.

Para que se produzca la deformación de la probeta según el criterio de von Mises, la probeta debe estar sometida a un estado de tensiones tal que:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \geq 2Y^2,$$

o dicho de otra forma, la tensión efectiva debe ser mayor o igual que la tensión de fluencia del material.

$$\sigma_e = \left\{ \frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \right\}^{\frac{1}{2}} \geq Y. \quad (5.38)$$

El laminado, como se ha comentado anteriormente, lo consideraremos como un proceso de deformación plana⁴. En este tipo de procesos se suele suponer que la anchura prácticamente permanece constante, y que la reducción de sección que sufre el material de entrada se compensa con un aumento de la longitud de forma que el volumen permanece constante. De este modo las deformaciones naturales en estos ejes serán las siguientes:

$$\begin{aligned} \varepsilon_1 &= \ln \frac{l_o}{l_i}, \\ \varepsilon_2 &= \ln \frac{b_o}{b_i} \cong 0, \\ \varepsilon_3 &= \ln \frac{h_o}{h_i}, \end{aligned}$$

donde l representa la longitud de la pieza, b su anchura y h el espesor, mientras que los subíndices hacen referencia a diferentes etapas, i haría referencia a la magnitud antes de producirse ninguna deformación, y o haría referencia al material deformado. Puesto que el volumen permanece constante

$$V = l_i b_i h_i = l_o b_o h_o.$$

Si $b_i \simeq b_o$, entonces

$$l_i h_i \simeq l_o h_o \Rightarrow \frac{l_o}{l_i} \simeq \frac{h_i}{h_o} \Rightarrow \varepsilon_1 \simeq -\varepsilon_3.$$

La deformación equivalente será:

$$\varepsilon_e = \left[\frac{2}{3} (\varepsilon_1^2 + 0 + (-\varepsilon_1)^2) \right]^{\frac{1}{2}} = \frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_1 = -\frac{2}{\sqrt{3}} \varepsilon_3.$$

En cuanto a las tensiones principales en el proceso de laminado, la tensión σ_1 se suele considerar despreciable, debido a que no se ejercen esfuerzos externos en esa dirección y las fuerzas de fricción son pequeñas frente a las

⁴Este supuesto de deformación plana en el proceso de laminado se suele hacer cuando la anchura de la pieza es mucho mayor que su espesor (una relación tomada como referencia es $b > 10h$)

de compresión en el eje 3, y por otro lado como estamos en un proceso con deformación plana $\sigma_2 = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)$, las tensiones principales quedarían como sigue:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &\simeq 0 \\ \sigma_2 &= \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3) \simeq \frac{1}{2}(0 + \sigma_3) \\ &\sigma_3\end{aligned}$$

y la tensión efectiva será

$$\begin{aligned}\sigma_e &= \left\{ \frac{1}{2} \left[\left(0 - \frac{\sigma_3}{2}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_3}{2} - \sigma_3\right)^2 + (\sigma_3 - 0)^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} = \left\{ \frac{1}{2} \left[2\left(-\frac{\sigma_3}{2}\right)^2 + (\sigma_3)^2 \right] \right\}^{\frac{1}{2}} \\ \sigma_e &= \pm \frac{\sqrt{3}}{2} \sigma_3.\end{aligned}$$

Si despejamos la tensión σ_3

$$\sigma_3 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_e.$$

Puesto que como hemos comentado anteriormente la tensión de fluencia a la entrada es distinta de la tensión de fluencia a la salida, podemos considerar que en término medio (el subíndice m hace referencia a medio)

$$\sigma_{3,m} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{em},$$

donde σ_{em} es la tensión de fluencia media que deberá ser igual o superior a la resistencia media uniaxial a la fluencia (Y_m). Su valor se puede encontrar a partir de la curva de esfuerzo-deformación del material:

$$\sigma_{em} = \frac{1}{(\bar{\varepsilon}_o - \bar{\varepsilon}_i)} \int_{\bar{\varepsilon}_i}^{\bar{\varepsilon}_o} \bar{\sigma} d\bar{\varepsilon},$$

o más simplemente a partir de

$$\sigma_{em} = 0,5 \cdot (\sigma_{e_i} + \sigma_{e_o}),$$

donde σ_{e_i} y σ_{e_o} son las tensiones efectivas a la entrada y salida del tren de laminación respectivamente. Por tanto la fuerza o carga de laminación ejercida por los rodillos sobre la pieza se puede calcular como

$$P = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{em} b (R\Delta h)^{\frac{1}{2}}.$$

Si suponemos que la carga P actúa aproximadamente en la mitad de la longitud de la cuerda L , el momento necesario para mover uno de los rodillos será:

$$M = P \frac{L}{2}.$$

La potencia necesaria por rodillo está dada por

$$N = M\omega = P \frac{L}{2} \omega,$$

donde ω es la velocidad angular de los rodillos.

5.5.2. Extrusión y trefilado

Cuando la carga se aplica directamente a toda la sección transversal de deformación de la pieza, el método simplificado utilizado para la forja o la laminación es útil, pero para la mayoría de los procesos no es aplicable. Por ejemplo, en el trefilado, el esfuerzo de tracción se aplica al alambre estirado, pero su magnitud se determina mediante la carga requerida para provocar la deformación plástica en la zona de la hilera, no sobre la sección transversal del alambre estirado que ha sobrepasado la hilera. El esfuerzo de tracción sobre el alambre dependen del área proyectada del anillo de la hilera, más que de la sección transversal del alambre estirado. Un cálculo de la carga en sentido perpendicular a la dirección de estirado, como se hizo con el problema de laminado plano, daría la fuerza de compresión sobre la hilera, que es la carga de restricción necesaria para la operación, pero que no realiza ningún trabajo. Esto puede tener importancia, por ejemplo al considerar la rotura de la hilera, pero la fuerza de trabajo en la dirección del estirado es normalmente más importante.

Para este tipo de problemas es más conveniente utilizar el método de trabajo de deformación homogénea visto anteriormente, pues este método es aplicable tanto a las situaciones más sencillas como la del ensayo a tracción o los procesos de forja y laminación vistos anteriormente, como a procesos más complejos como el trefilado, la extrusión o el estirado. Para ilustrar la aplicación de este método a procesos de conformado, tales como el trefilado o la extrusión, se va a calcular cuáles son los requisitos de potencia y fuerza necesarios para un banco de trefilado y una máquina de extrusión en los que se pretende reducir el diámetro de un redondo de 6,30 mm a 3,80 mm. Se supone que el material del redondo sigue una ley exponencial $\sigma = c\varepsilon^n = 350\varepsilon^{0,25} \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$. Para ambos procesos se supondrá una eficiencia (η) del 75 %.

Los pasos a seguir para resolver este tipo de procesos serán los siguientes:

1. Hacer un esquema del dibujo y elegir un diferencial de volumen antes de que se deforma y su correspondiente después de deformado.
2. Elegir sistema de coordenadas y calcular deformaciones y tensiones efectivas del proceso.
3. Calcular trabajo ideal. Si se tienen datos experimentales sobre eficiencia del proceso o estimaciones del trabajo de fricción y el trabajo redundante, calcular el trabajo real.
4. Identificar fuerzas exteriores y zonas donde se aplican. Calcular trabajo externo.
5. Igualar ambos trabajos y obtener la fuerza exterior necesaria para realizar el proceso.
6. Calcular la potencia requerida.

5.5.2.1. Extrusión

La extrusión es un proceso de conformado de metales relativamente moderno, realizable en caliente o en frío, en el que mediante un émbolo o punzón, se presiona al material obligándole a fluir por compresión a través del orificio de una matriz, el cual da su forma a la pieza. Así se obtiene un producto de sección transversal reducida. En este tipo de operaciones es más común el trabajo en caliente con el fin de reducir la fuerza necesaria, eliminar los efectos del trabajo en frío y disminuir las propiedades direccionales. El dispositivo consiste, esencialmente, en un recinto en cuyo interior se dispone de un lingote metálico (palanquilla) y un punzón que avanza desde un extremo y provoca el flujo plástico del material a través de una hilera situada en el otro extremo. En el seno del metal se produce un estado de tensión triaxial. Un ejemplo de proceso de extrusión lo tenemos en la figura 5.18.

Se considera un elemento de volumen de material, $\pi(D_0/2)^2 dl_0$, en el lado de entrada a la matriz, el cual se corresponde con un elemento de volumen a la salida de matriz $\pi(D_f/2)^2 dl_f$. El trabajo interno ideal por unidad de volumen

$$\Delta w_{int} = \frac{W}{V} = \frac{c}{n+1} \varepsilon_e^{n+1}.$$

A partir del él y conociendo la eficiencia del proceso de conformado podemos obtener el trabajo verdadero:

$$\Delta w = \frac{\Delta w_{int}}{\eta}.$$

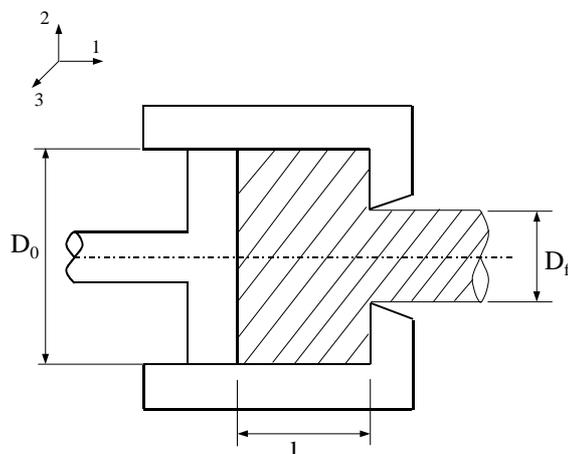


Figura 5.18: Proceso de extrusión directa.

Suponemos que la extrusión se realiza sobre una pieza de sección circular. Las deformaciones naturales en los ejes principales son:

$$\begin{aligned}\varepsilon_1 &= \ln \frac{l_o}{l_i}, \\ \varepsilon_2 &= \ln \frac{D_o}{D_i}, \\ \varepsilon_3 &= \ln \frac{D_o}{D_i},\end{aligned}$$

donde l representa la longitud de la pieza.

Puesto que el volumen no cambia durante la deformación plástica, estos dos elementos de volumen deben ser iguales $D_i^2 dl_i = D_o^2 dl_o$

$$V = l_i \cdot \pi \frac{D_i^2}{4} = l_o \cdot \pi \frac{D_o^2}{4} \implies$$

$$\frac{l_o}{l_i} = \frac{D_i^2}{D_o^2} \Rightarrow \ln \frac{l_o}{l_i} = 2 \ln \frac{D_i}{D_o} \Leftrightarrow \varepsilon_1 = -2\varepsilon_2 = -2\varepsilon_3.$$

La deformación equivalente será:

$$\varepsilon_e = \left[\frac{2}{3} \left(\varepsilon_1^2 + \left(-\frac{\varepsilon_1}{2}\right)^2 + \left(-\frac{\varepsilon_1}{2}\right)^2 \right) \right]^{\frac{1}{2}} = \varepsilon_1 \quad \text{ó} \quad (= -2\varepsilon_2 = -2\varepsilon_3)$$

$$\varepsilon_e = \varepsilon_1 = \ln \frac{l_o}{l_i} \quad \text{ó} \quad (= -2\varepsilon_2 = -2\varepsilon_3 = -2 \ln \frac{D_o}{D_i}).$$

Para calcular la fuerza externa necesaria para llevar a cabo el proceso de extrusión, debemos igualar el trabajo externo con el trabajo interno para un volumen de material dado. Para el caso de la extrusión, se aplica una fuerza de compresión (P_{extru}) que actúa sobre el área de entrada $\pi(D_i/2)^2$ a lo largo de una longitud dl_0 , de tal forma que el trabajo externo viene dado por:

$$\sigma_{extru}\pi(D_i/2)^2 dl_i = \frac{\Delta w_{int}}{\eta}\pi(D_i/2)^2 dl_i.$$

Luego

$$\sigma_{extru} = \frac{\Delta w_{int}}{\eta} = \frac{1}{\eta} \frac{c}{n+1} \varepsilon_e^{n+1}$$

$$\sigma_{extru} = \frac{1}{\eta} \frac{c}{n+1} \left(2 \ln \frac{D_i}{D_o}\right)^{n+1}.$$

La fuerza de extrusión será

$$P_{extru} = \sigma_{extru} \cdot \pi(D_0/2)^2 = \frac{1}{\eta} \frac{c}{n+1} \left(2 \ln \frac{D_0}{D_f}\right)^{n+1} \cdot \pi(D_0/2)^2.$$

5.5.2.2. Trefilado

El trefilado es un proceso de conformado por deformación plástica (figura 2.21) en el que la deformación permanente, es producida por fuerzas de tracción, con el consiguiente alargamiento del material, al hacer pasar el material a través de orificios calibrados denominados hileras. En el trefilado el interés se centra en conseguir grandes reducciones de sección, lo que exige realizar el trabajo en más pasadas. El material de trabajo que utiliza el trefilado son rondos obtenidos por laminación de 5 a 8 mm de diámetro, que se conocen con la denominación de fermachine. El trefilado tiene como finalidad normalmente la fabricación de alambre a partir de la reducción de diámetro de un perfil redondo de metal, sometido a un esfuerzo de tracción, haciéndole pasar a través de una matriz circular. En la figura 5.19 se representa un proceso de estirado.

Para resolver el problema se va a considerar un elemento de volumen de material, $\pi(D_0/2)^2 dl_0$, en el lado de entrada a la matriz, el cual se corresponderá con un elemento de volumen a la salida de matriz $\pi(D_f/2)^2 dl_f$. El trabajo interno ideal por unidad de volumen se calculará con la fórmula deducida anteriormente:

$$\Delta w_{int} = \frac{W}{V} = \frac{c}{n+1} \varepsilon_e^{n+1}.$$

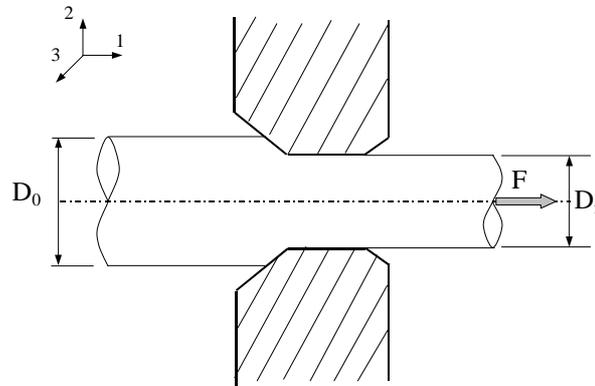


Figura 5.19: Proceso de trefilado.

A partir del él y conociendo la eficiencia del proceso de conformado podemos obtener el trabajo verdadero:

$$\Delta w = \frac{\Delta w_{int}}{\eta}$$

Las deformaciones naturales en los ejes principales son:

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{l_f}{l_0},$$

$$\varepsilon_2 = \ln \frac{D_f}{D_0},$$

$$\varepsilon_3 = \ln \frac{D_f}{D_0},$$

donde l representa la longitud de la pieza. Puesto que el volumen no cambia durante la deformación plástica, estos dos elementos de volumen deben ser iguales $D_0^2 dl_0 = D_f^2 dl_f$

$$V = l_0 \cdot \pi \frac{D_0^2}{4} = l_f \cdot \pi \frac{D_f^2}{4} \implies$$

$$\frac{l_f}{l_0} = \frac{D_0^2}{D_f^2} \implies \ln \frac{l_f}{l_0} = 2 \ln \frac{D_0}{D_f} \Leftrightarrow \varepsilon_1 = -2\varepsilon_2 = -2\varepsilon_3.$$

La deformación equivalente será:

$$\varepsilon_e = \left[\frac{2}{3} \left(\varepsilon_1^2 + \left(-\frac{\varepsilon_1}{2}\right)^2 + \left(-\frac{\varepsilon_1}{2}\right)^2 \right) \right]^{\frac{1}{2}} = \varepsilon_1 \quad \text{ó} \quad (= -2\varepsilon_2 = -2\varepsilon_3)$$

$$\varepsilon_e = \varepsilon_1 = \ln \frac{l_f}{l_0} \quad \text{ó} \quad (= -2\varepsilon_2 = -2\varepsilon_3 = -2 \ln \frac{D_f}{D_0}).$$

Para calcular la fuerza externa necesaria para llevar a cabo el proceso de estirado, debemos igualar el trabajo externo con el trabajo interno para un volumen de material dado. Para el caso del estirado, se aplica una fuerza de tracción (F_{estir}) que actúa sobre el área de salida $\pi(D_f/2)^2$ a lo largo de una longitud dl_f , de tal forma que el trabajo externo viene dado por:

$$\sigma_{estir} \pi(D_f/2)^2 dl_f = \frac{\Delta w_{int}}{\eta} \pi(D_f/2)^2 dl_f,$$

y finalmente,

$$\sigma_{estir} = \frac{\Delta w_{int}}{\eta} = \frac{1}{\eta} \frac{c}{n+1} \left(2 \ln \frac{D_0}{D_f} \right)^{n+1}. \quad (5.39)$$

La fuerza será

$$F_{estir} = \sigma_{estir} \cdot \pi(D_f/2)^2 = \frac{1}{\eta} \frac{c}{n+1} \left(2 \ln \frac{D_0}{D_f} \right)^{n+1} \cdot \pi(D_f/2)^2.$$

Limitación del proceso de estirado. Obviamente, la fuerza de estirado máxima que se podrá aplicar a la salida de la hilera estará limitada por la resistencia del material deformado; es decir, $\sigma_{estir_{max}} = Y_f$, donde Y_f es la resistencia a la fluencia del material a la salida de la hilera. Obsérvese que imponiendo esta condición en la Ecuación (5.39), es posible obtener la máxima reducción de área que se puede conseguir sin que el material se rompa.

