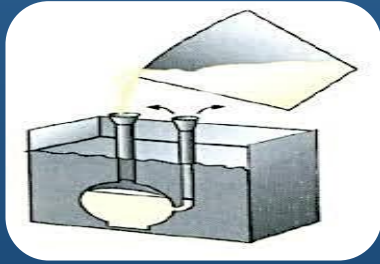


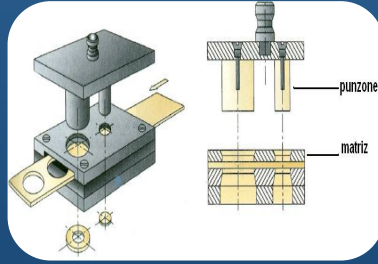
# UF-1: ANÁLISIS DE ELEMENTOS PARA EL DISEÑO DE HERRAMIENTAS DE PROCESADO DE CHAPA Y ESTAMPACIÓN

1. GENERALIDADES
2. FUNDAMENTO DEL FORMADO DE METALES
3. CONFORMADO POR DEFORMACIÓN Y CORTE

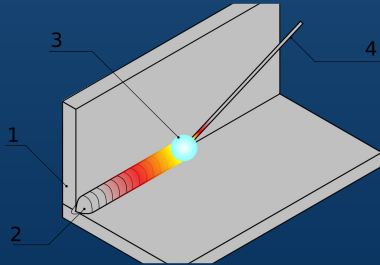




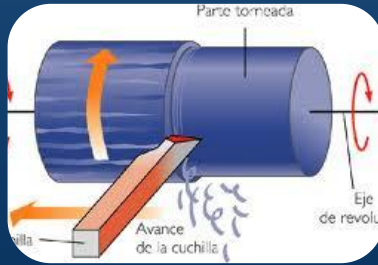
Por moldeo



Por deformación y corte



Por soldadura



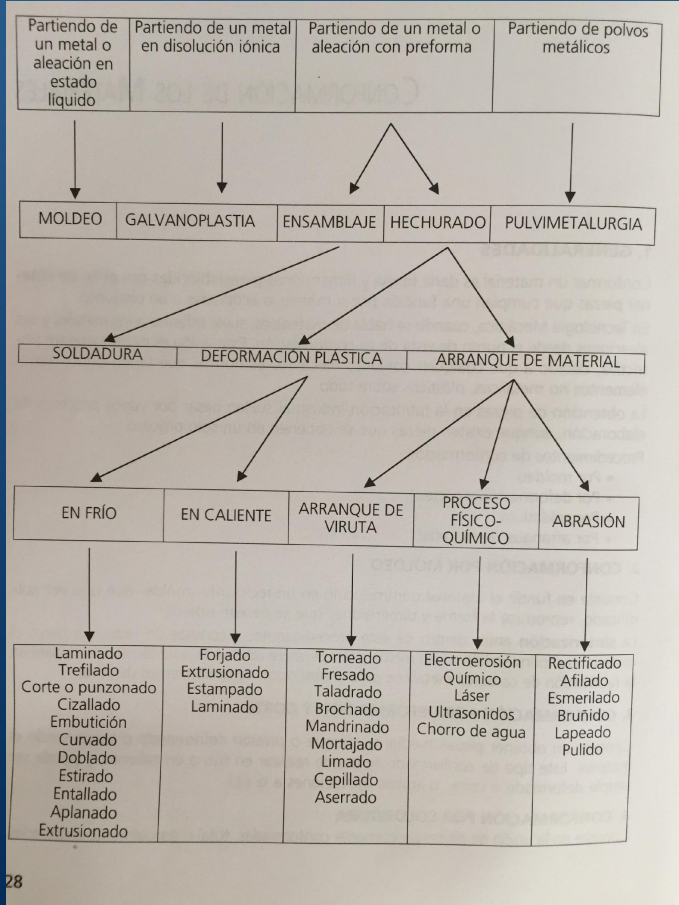
Por arranque de material

## GENERALIDADES

Conformar un material es darle forma y dimensiones para conseguir piezas que cumplan una función individualmente o en conjunto.

Tipos de conformado:





# CONFORMADO DE METALES

Esquema sobre los tipos de conformado.

# UF-1: ANÁLISIS DE ELEMENTOS PARA EL DISEÑO DE HERRAMIENTAS DE PROCESADO DE CHAPA Y ESTAMPACIÓN

1. GENERALIDADES
2. FUNDAMENTO DEL FORMADO DE METALES
  1. PANORAMA DEL FORMADO DE METALES
  2. COMPORTAMIENTO DEL MATERIAL EN EL FORMADO DE METALES
  3. EFECTO DE LA TEMPERATURA EN EL FORMADO DE METALES
  4. EFECTO SOBRE LA VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN
  5. FRICCIÓN Y LUBRICACIÓN EN EL FORMADO DE METALES
3. CONFORMADO POR DEFORMACIÓN Y CORTE

# INTRODUCCIÓN

El formado de metales incluye varios procesos de manufactura en los cuales se usa la deformación plástica para cambiar la forma de las piezas metálicas. La deformación es el resultado del uso de una herramienta que generalmente es un troquel para formar metales, el cual aplica esfuerzos que exceden la resistencia a la fluencia del metal. Por tanto, el metal se deforma para tomar la forma que determina la forma del troquel.

En general, se aplica el esfuerzo de compresión para deformar plásticamente el metal. Sin embargo, algunos procesos de formado estiran el metal, mientras que otros lo doblan y otros más lo cortan. Para formar exitosamente un metal, éste debe poseer ciertas propiedades. Las propiedades convenientes para el formado son por lo general una baja resistencia a la fluencia y alta ductilidad. Estas propiedades las afecta la temperatura.

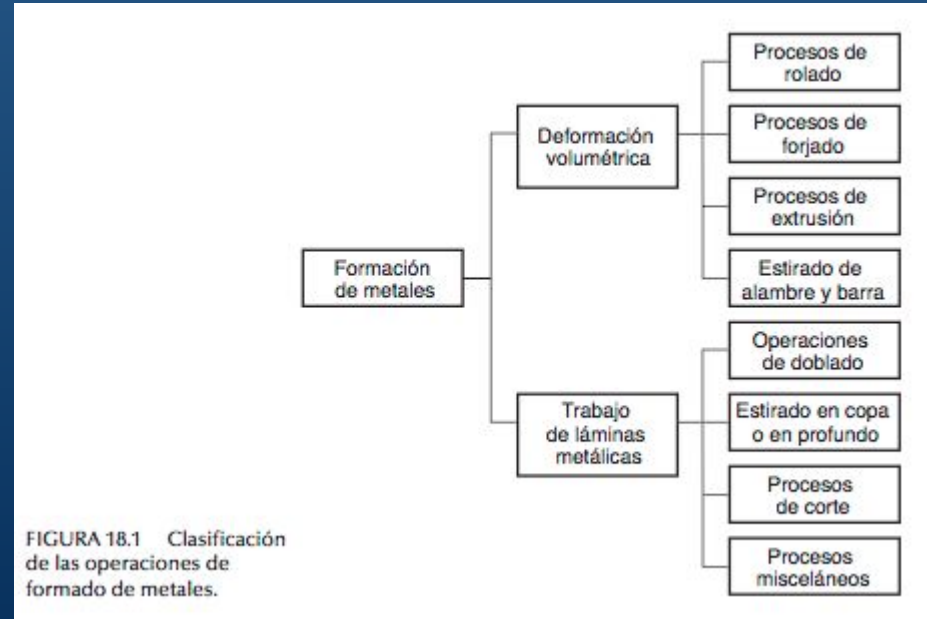
La ductilidad se incrementa y la resistencia a la fluencia se reduce cuando aumenta la temperatura de trabajo. El efecto de la temperatura da lugar a la distinción entre trabajo en frío, trabajo en caliente por debajo de la temperatura de recristalización y trabajo en caliente. La velocidad de formación y la fricción son factores adicionales que afectan el desempeño del formado de metales. En este capítulo se examinarán dichos aspectos, pero primero se da una visión general de los procesos de formado de metales.

# PANORAMA DEL FORMADO DE METALES

Los procesos del formado se pueden clasificar en:

1. Procesos de deformación volumétrica
2. Procesos de trabajo de láminas metálicas.

Cada categoría incluye diferentes tipos de operaciones de formado, como se indica en la figura 18.1.



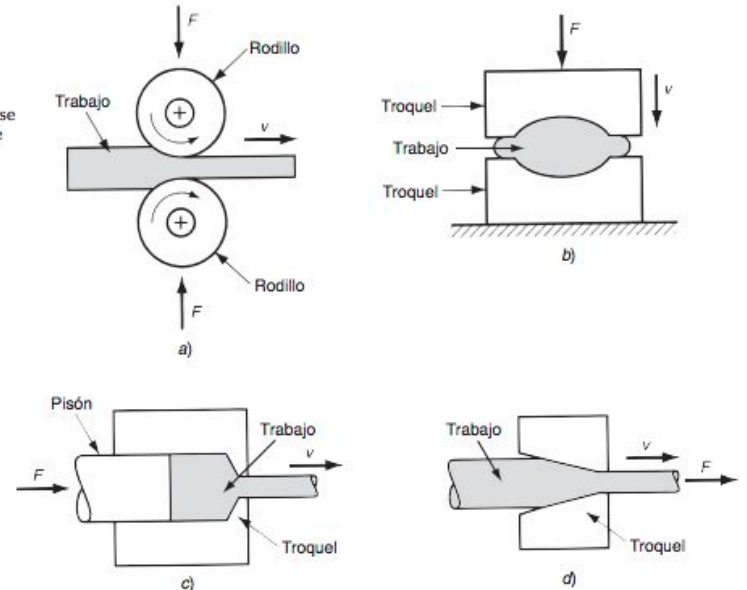
# PANORAMA DEL FORMADO DE METALES

## Procesos de deformación volumétrica

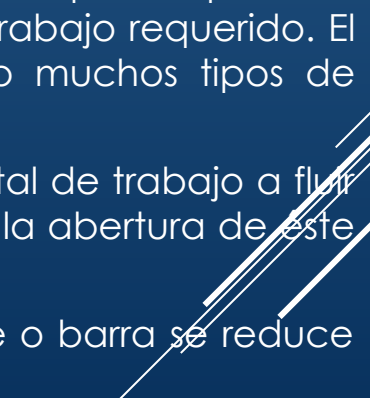
Los procesos de deformación volumétrica se caracterizan por deformaciones significativas y grandes cambios de forma, y la relación entre el área superficial y el volumen de trabajo es relativamente pequeña. El término volumétrico describe a las piezas de trabajo que tienen esta baja relación de área-volumen.

La forma del trabajo inicial para estos procesos incluye tochos cilíndricos y barras rectangulares. La operación básica en deformación volumétrica se ilustra en la figura 18.2 como sigue:

FIGURA 18.2 Procesos básicos de deformación volumétrica: a) rolado, b) forjado, c) extrusión y d) estirado. El movimiento relativo en las operaciones se indica por  $v$ , y las fuerzas se indican por  $F$ .



# PANORAMA DEL FORMADO DE METALES

- **Rolado.** Es un proceso de deformación por compresión en el cual el espesor de una plancha o placa se reduce por medio de dos herramientas cilíndricas opuestas llamadas rodillos. Los rodillos giran para estirar y realizar el trabajo dentro de la abertura entre ellos y comprimirla.
  - **Forjado.** En el forjado se comprime una pieza de trabajo entre dos troqueles opuestos, de manera que la forma del troquel se imprima para obtener el trabajo requerido. El forjado es un proceso tradicional de trabajo en caliente, pero muchos tipos de forjado se hacen también en frío.
  - **Extrusión.** Es un proceso de compresión en el cual se fuerza el metal de trabajo a fluir a través de la abertura de un troquel para que tome la forma de la abertura de este en su sección transversal.
  - **Estirado.** En este proceso de formado, el diámetro de un alambre o barra se reduce cuando se tira del alambre a través de la abertura del troquel.
- 



# PANORAMA DEL FORMADO DE METALES

## Trabajo de láminas metálicas

Los procesos de trabajo de láminas metálicas son operaciones de formado o preformado de láminas, tiras y rollos de metal. La razón entre el área superficial y el volumen del material inicial es alta; por lo que esta relación es un medio útil para distinguir la deformación volumétrica de los procesos de láminas metálicas. **Prensado** es el término que se aplica frecuentemente a las operaciones de láminas metálicas, debido a que las máquinas utilizadas para desempeñar estas operaciones son prensas (se usan también prensas de varios tipos en otros procesos de manufactura). La pieza producida en una operación de laminado metálico se llama frecuentemente **estampado**.

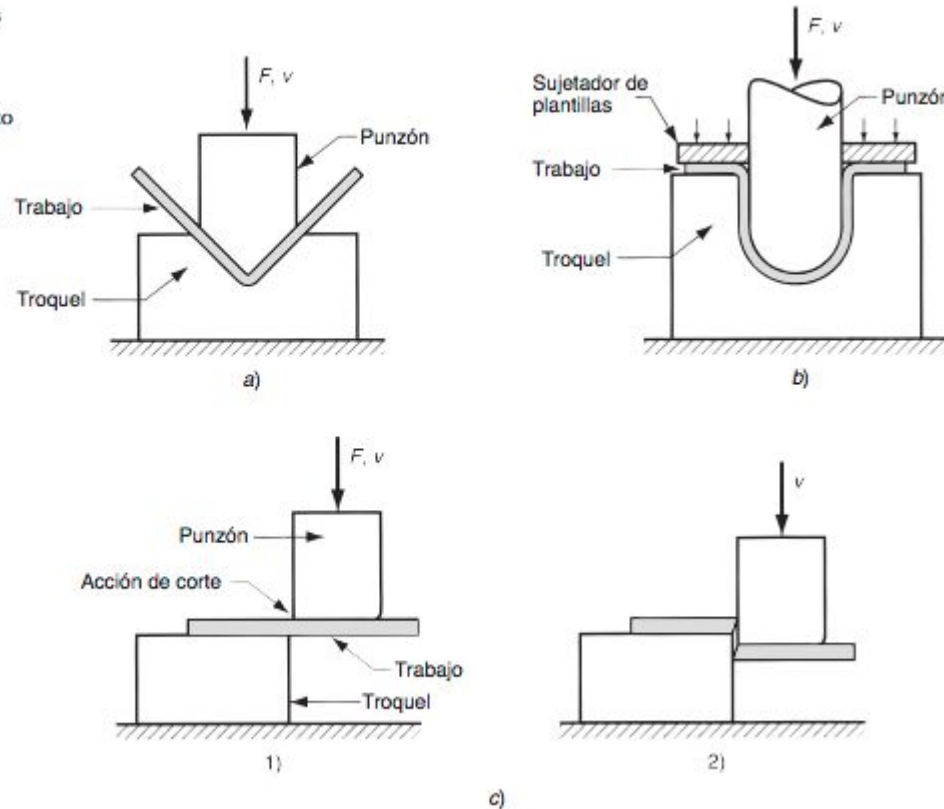
Las operaciones de láminas metálicas se ejecutan siempre en frío y se utiliza un juego de herramientas llamadas punzón y troquel. El punzón es la porción positiva y el troquel es la porción negativa del juego de herramientas. Las operaciones básicas de láminas metálicas se describen en la figura 18.3 y se definen como sigue:

# PANORAMA DEL FORMADO DE METALES

- **Doblado.** El doblado implica la deformación de una lámina metálica o placa para que adopte un ángulo respecto a un eje recto, en la mayoría de los casos.
- **Estirado.** En el trabajo de láminas metálicas, el estirado se refiere a la transformación de una lámina plana de metal en una forma hueca o cóncava, como una copa, mediante el estirado del metal. Se usa un sujetador para mantener fija la plantilla, mientras el punzón empuja la lámina de metal, como se muestra en la figura 18.3b). Para distinguir esta operación del estirado de barras y alambres, se usan frecuentemente los términos estirado en copa o estirado profundo.
- **Corte.** Este proceso queda de alguna manera fuera de lugar en nuestra lista de procesos de deformación, debido a que implica más el corte que el formado del metal. En esta operación se corta la pieza usando un punzón y un troquel, como se muestra en la figura 18.3c). Aunque éste no es un proceso de formado, se incluye aquí debido a que es una operación necesaria y muy común en el trabajo de láminas metálicas.

# PANORAMA DEL FORMADO DE METALES

FIGURA 18.3 Operaciones básicas en el trabajo de láminas metálicas:  
a) doblado, b) estirado y c) corte; 1) al primer contacto del punzón con la lámina y 2) después del corte. La fuerza y el movimiento relativo se indican por  $F$  y  $v$ .



# COMPORTAMIENTO DEL MATERIAL EN EL FORMADO DE METALES

La curva de esfuerzo-deformación ofrece una visión que permite comprender el comportamiento de los metales durante su formación. La curva típica de esfuerzo-deformación para la mayoría de los metales se divide en una región elástica y una región plástica. En el formado de un metal, la región plástica es de interés primordial debido a que en estos procesos el material se deforma plástica y permanentemente.

La relación típica esfuerzo-deformación exhibe elasticidad por debajo del punto de fluencia, y endurecimiento por deformación arriba de dicho punto. Las figuras 3.4 y 3.5 muestran este comportamiento en ejes lineales y logarítmicos. En la región plástica, el comportamiento del metal se expresa por la curva de fluencia:

$$\sigma = K \cdot \epsilon^n$$

donde  $K$  = coeficiente de resistencia, MPa (lb/in<sup>2</sup>), y  $n$  es el exponente de endurecimiento por deformación. El esfuerzo  $\sigma$  y la deformación  $\epsilon$  en la curva de fluencia son el esfuerzo real y la deformación real. La curva de fluencia es generalmente válida como una relación que define el comportamiento plástico de un metal en el trabajo en frío. Los valores típicos de  $K$  y  $n$  para diferentes metales a temperatura ambiente se enlistan en la tabla 3.4.

# COMPORTAMIENTO DEL MATERIAL EN EL FORMADO DE METALES

## Esfuerzo de fluencia

La curva de fluencia describe la relación esfuerzo-deformación en la región donde tiene lugar el formado del metal. También indica el esfuerzo de fluencia del metal, la propiedad de resistencia que determina las fuerzas y la potencia requerida para realizar una operación particular de formado. La gráfica esfuerzo-deformación de la figura 3.5 muestra que cuando la mayoría de los metales se deforma a temperatura ambiente, aumentan su resistencia debido al endurecimiento por deformación. El esfuerzo requerido para continuar la deformación debe incrementarse para contrarrestar este incremento de la resistencia. El esfuerzo de fluencia se define como el valor instantáneo del esfuerzo requerido para continuar la deformación del material o mantener "fluyendo" al metal. Ésta es la resistencia a la fluencia del metal en función de la deformación, que puede expresarse como:

$$Y_f = K \cdot \epsilon^n$$

donde  $Y_f$  = esfuerzo de fluencia, MPa (lb/in<sup>2</sup>)

# COMPORTAMIENTO DEL MATERIAL EN EL FORMADO DE METALES

## Esfuerzo de fluencia

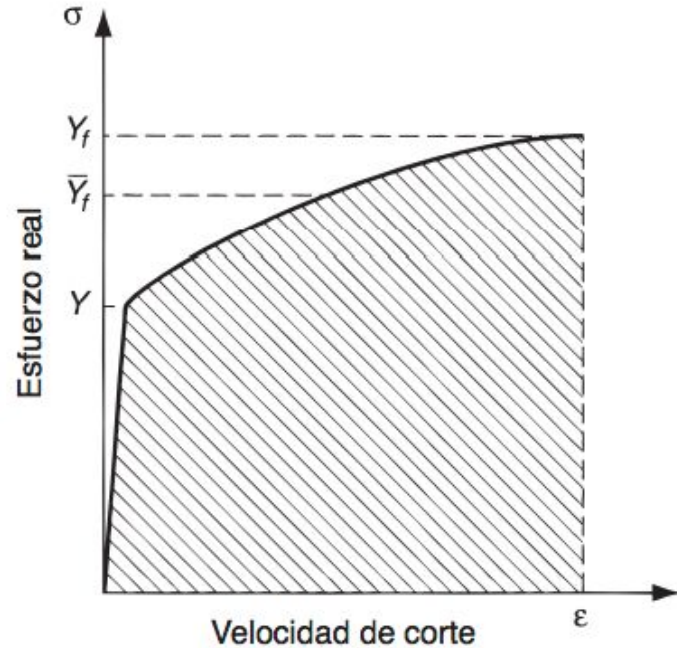


FIGURA 18.4 Curva de esfuerzo-deformación que indica la localización del esfuerzo de fluencia promedio  $\bar{Y}_f$  en relación con la resistencia a la fluencia  $Y$  y el esfuerzo de fluencia final  $Y_f$ .

# COMPORTAMIENTO DEL MATERIAL EN EL FORMADO DE METALES

## Esfuerzo de fluencia promedio

El esfuerzo de fluencia promedio (también llamado esfuerzo de fluencia medio) es el valor promedio de los esfuerzos sobre la curva esfuerzo-deformación desde el comienzo de la deformación hasta el valor final (máximo) que ocurre durante este proceso. El valor se ilustra en la gráfica esfuerzo-deformación de la figura 18.4.

El esfuerzo de fluencia promedio se determina integrando la ecuación de la curva de fluencia (ecuación 18.1) entre cero y el valor final de deformación que define el rango de interés. Esto genera la ecuación:

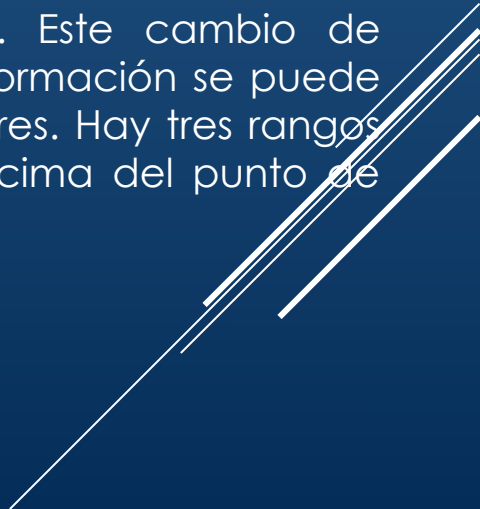
$$\bar{Y}_f = \frac{K \cdot \epsilon^n}{1 + n}$$

donde  $Y_f$  = esfuerzo de fluencia promedio, MPa (lb/in<sup>2</sup>); y  $\epsilon$  = máximo valor de deformación durante el proceso de deformación

# TEMPERATURA EN EL FORMADO DE METALES

La curva de fluencia es una representación válida del comportamiento esfuerzo-deformación de un metal durante su deformación plástica, particularmente en operaciones de trabajo en frío. Para cualquier metal, los valores de  $K$  y  $n$  dependen de la temperatura. Tanto la resistencia como el endurecimiento por deformación se reducen a altas temperaturas.

Además, la ductilidad se incrementa a altas temperaturas. Este cambio de propiedades es importante porque cualquier operación de deformación se puede alcanzar a temperaturas elevadas con fuerza y potencia menores. Hay tres rangos de temperatura: trabajo en frío, caliente por debajo o por encima del punto de recristalización.

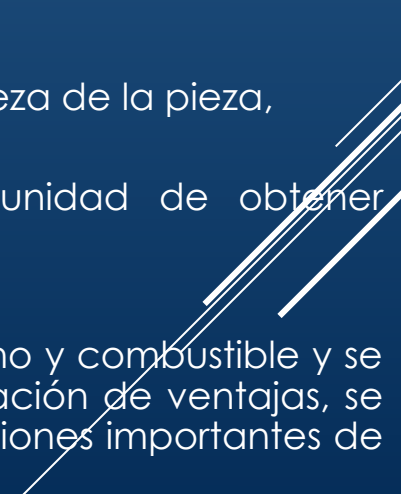




# TEMPERATURA EN EL FORMADO DE METALES

## Trabajo en frío

El trabajo en frío, también conocido como formado en frío, es el formado de metal que se realiza a temperatura ambiente o ligeramente arriba. Las ventajas significativas del formado en frío comparado con el trabajo en caliente son:

- 1) proporcionar mejor precisión, lo que significa tolerancias más estrechas, 2) mejorar el acabado de la superficie,
  - 3) el endurecimiento por deformación aumenta la resistencia y la dureza de la pieza,
  - 4) el flujo de granos durante la deformación brinda la oportunidad de obtener propiedades direccionales convenientes en el producto resultante y
  - 5) al no requerir calentamiento del trabajo, se ahorran costos de horno y combustible y se logran mayores velocidades de producción. Debido a esta combinación de ventajas, se han creado muchos procedimientos de formado en frío para operaciones importantes de producción en masa.
- 

# TEMPERATURA EN EL FORMADO DE METALES

## Trabajo en frío

Estos procedimientos proporcionan tolerancias estrechas y buenas superficies, minimizan la cantidad de maquinado y permiten que estos procedimientos se clasifiquen como procesos de forma neta o casi neta (sección 1.3.1).

Hay ciertas desventajas o limitaciones asociadas con las operaciones de formado en frío: 1) se requiere mayores potencia y fuerzas para desempeñar las operaciones, 2) se debe tener cuidado para asegurar que las superficies de la pieza de trabajo inicial están libres de incrustaciones y suciedad, 3) la ductilidad y el endurecimiento por deformación del metal de trabajo limitan la cantidad de formado que se puede hacer sobre la pieza. En algunas operaciones debe recocerse el metal (sección 8.1) para permitir la realización de formados posteriores. En otros casos el metal no es lo suficientemente dúctil para ser trabajado.

Para superar el problema de endurecimiento por deformación y reducir los requerimientos de fuerza y potencia, muchas operaciones de formado se ejecutan a temperaturas elevadas. Se involucran dos rangos de temperaturas elevadas que dan lugar a los términos trabajo en caliente por debajo y por encima de la temperatura de recristalización.

# TEMPERATURA EN EL FORMADO DE METALES

## **Trabajo en caliente por debajo de la temperatura de recristalización**

Debido a que las propiedades de deformación plástica se mejoran normalmente con el aumento de la temperatura en la pieza de trabajo, las operaciones de formado se realizan algunas veces a temperaturas algo más elevadas que la temperatura ambiente, pero por debajo de las temperaturas de recristalización. Se aplica el término trabajo en caliente a este segundo rango de temperatura. La línea divisoria entre el trabajo en caliente y el trabajo en frío se expresa frecuentemente en términos del punto de fusión del metal. La línea divisoria usual es de  $0.3T_m$ , donde  $T_m$  es el punto de fusión del metal particular (temperatura absoluta).

Menores resistencia y endurecimiento por deformación, así como la mayor ductilidad del metal a temperaturas intermedias confieren al trabajo por debajo de la temperatura de recristalización las siguientes ventajas sobre el trabajo en frío:

1. Fuerzas más bajas y menores requerimientos de potencia.
2. Son posibles trabajos más intrincados.
3. Se puede eliminar o reducir la necesidad de recocido.

# TEMPERATURA EN EL FORMADO DE METALES

## Trabajo en caliente

El trabajo en caliente (también llamado formado en caliente) implica la deformación a temperaturas por encima de la temperatura de recristalización. La temperatura de recristalización de un metal es aproximadamente la mitad de su punto de fusión en la escala absoluta. En la práctica, el trabajo en caliente se lleva a cabo usualmente a temperaturas por encima de  $0.5T_m$ . El metal de trabajo se suaviza más conforme la temperatura se incrementa más allá de  $0.5T_m$ , mejorando así la ventaja del trabajo en caliente por arriba de este nivel. Sin embargo, el proceso de deformación genera el calor que incrementa la temperatura de trabajo en algunas regiones de la pieza. Esto puede causar la fusión en estas regiones, lo cual es altamente indeseable. Las incrustaciones en la superficie de trabajo se aceleran también a temperaturas más altas. Por consiguiente, las temperaturas de trabajo en caliente se mantienen normalmente dentro del rango de  $0.5T_m$  a  $0.75T_m$ .

# TEMPERATURA EN EL FORMADO DE METALES

## Trabajo en caliente

La ventaja más significativa del trabajo en caliente es la capacidad de producir deformaciones plásticas sustanciales del metal, más de las que son posibles con el trabajo en frío o el trabajo que se lleva a cabo por debajo de la temperatura de recristalización. La razón principal es que la curva de fluencia del metal trabajado en caliente tiene un coeficiente de resistencia sustancialmente menor que a temperatura ambiente, el exponente de endurecimiento por deformación es cero (al menos en teoría) y la ductilidad del metal se incrementa de manera significativa. Todo esto da por resultado las siguientes ventajas respecto al trabajo en frío:

- 1) la forma de la pieza de trabajo se puede alterar de manera significativa,
- 2) se requiere menor fuerza y potencia para deformar el metal,
- 3) los metales que usualmente se fracturan en el trabajo en frío pueden formarse en caliente,
- 4) las propiedades de resistencia son generalmente isotrópicas debido a la ausencia de una estructura orientada de granos que se crea en el trabajo en frío,
- 5) el trabajo en caliente no produce fortalecimiento de la pieza.

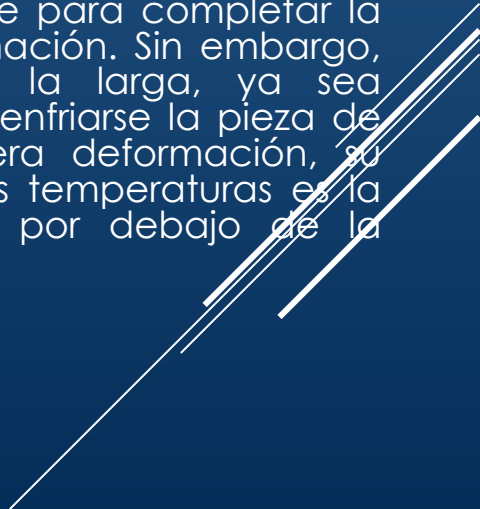
Esta última ventaja puede parecer inconsistente, ya que el aumento en la resistencia del metal se considera frecuentemente una ventaja del trabajo en frío. Sin embargo, hay aplicaciones en las cuales es indeseable que el metal se endurezca por trabajo debido a que reduce su ductilidad, por ejemplo, cuando la pieza tiene que procesarse posteriormente en frío.

# TEMPERATURA EN EL FORMADO DE METALES

## Trabajo en caliente

Sus desventajas son: precisión dimensional más baja, mayores requerimientos de energía (energía térmica para calentar la pieza de trabajo), oxidación de la superficie de trabajo (incrustaciones), acabado superficial más deficiente y menor duración en la vida de las herramientas.

La recristalización del metal en el trabajo en caliente involucra difusión atómica, proceso que depende del tiempo. Las operaciones de formado del metal se desempeñan frecuentemente a altas velocidades que no dejan tiempo suficiente para completar la recristalización de la estructura granular durante el ciclo de deformación. Sin embargo, debido a las altas temperaturas, la recristalización ocurre a la larga, ya sea inmediatamente después del proceso de formado o más tarde, al enfriarse la pieza de trabajo. Aun si la recristalización ocurre después de la verdadera deformación, su ocurrencia final junto con el suavizado sustancial del metal a altas temperaturas es la característica que distingue al trabajo en caliente del trabajo por debajo de la temperatura de recristalización o en frío.



# TEMPERATURA EN EL FORMADO DE METALES

## Formado isotérmico

Ciertos metales como los aceros altamente aleados, muchas aleaciones de titanio y las aleaciones de níquel para altas temperaturas poseen buena dureza en caliente, propiedad que los hace útiles para el uso a altas temperaturas. Y aunque dichas propiedades los hacen atractivos para estas aplicaciones, también los hace difíciles de formar por métodos convencionales. El problema es que cuando estos metales se calientan a las temperaturas de trabajo en caliente y entran en contacto con las herramientas de formado relativamente frías, el calor es transferido de manera rápida fuera de la superficie de la pieza, elevando la resistencia en estas regiones. La variación en la temperatura y la resistencia en diferentes regiones de la pieza de trabajo producen patrones de flujo irregular en el metal durante la deformación; esto conduce a la formación de esfuerzos residuales y al posible agrietamiento superficial.

El formado isotérmico se refiere a las operaciones de formado que se llevan a cabo de tal manera que eliminan el enfriamiento superficial y los gradientes térmicos resultantes en la pieza de trabajo. Se realiza por precalentamiento de las herramientas que entran en contacto con la pieza a la misma temperatura de trabajo del metal. Esto desgasta las herramientas y reduce la vida, pero evita los problemas descritos cuando los metales difíciles se forman por métodos convencionales. En algunos casos el formado isotérmico representa la única forma en que pueden formarse estos materiales de trabajo. El procedimiento se asocia más estrechamente con el forjado y en el capítulo siguiente se revisará el formado isotérmico.

# SENSIBILIDAD A LA VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN

En teoría, un metal en trabajo en caliente se comporta como un material perfectamente plástico, con un exponente de endurecimiento por deformación  $n = 0$ . Esto significa que una vez que se alcanza el nivel de esfuerzo de fluencia, el metal debe continuar fluyendo bajo el mismo nivel de esfuerzo de fluencia. Sin embargo, un fenómeno adicional caracteriza el comportamiento de los metales durante su deformación, especialmente a las temperaturas elevadas del trabajo en caliente. Este fenómeno es la sensibilidad a la velocidad de deformación. En esta revisión, se empezará por definir la velocidad de deformación.

La rapidez a la que se deforma el metal en un proceso de formado se relaciona directamente con la velocidad de deformación  $v$ . En muchas operaciones de formado, la velocidad de deformación es igual a la velocidad del pistón o de cualquier otro elemento móvil del equipo. Esto se visualiza más fácilmente en un ensayo de tensión, como la velocidad del cabezal de la máquina respecto a su base fija. Dada la rapidez de deformación, la velocidad de deformación se define:

$$\dot{\epsilon} = \frac{v}{h}$$

donde  $\dot{\epsilon}$  = velocidad de deformación real, m/s/m (in/s/in), o simplemente  $s^{-1}$ ; y  $h$  = altura instantánea de la pieza de trabajo que se deforma, m (in).

Si la velocidad de deformación  $v$  es constante durante la operación, entonces ésta varía al cambiar  $h$ . En la mayoría de las operaciones prácticas de formado, la valoración de la velocidad de deformación se complica por la forma de la pieza de trabajo y las variaciones en la velocidad de deformación en diferentes regiones de la pieza. La velocidad de deformación puede alcanzar  $1\ 000\ s^{-1}$  o más para algunos procesos de formado de metal, como rolado y forjado a alta velocidad.



# SENSIBILIDAD A LA VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN

Ya se ha observado que el esfuerzo de fluencia de un metal es una función de la temperatura. En las temperaturas de trabajo en caliente, el esfuerzo de fluencia depende de la velocidad de deformación. El efecto de la velocidad de deformación sobre las propiedades de resistencia se conoce como sensibilidad a la velocidad de deformación. El efecto se puede ver en la figura 18.5. Al aumentar la velocidad de deformación, se incrementa la resistencia a la deformación. Esto se representa de manera usual como una línea aproximadamente recta en una gráfica log-log, lo cual conduce a la relación siguiente:

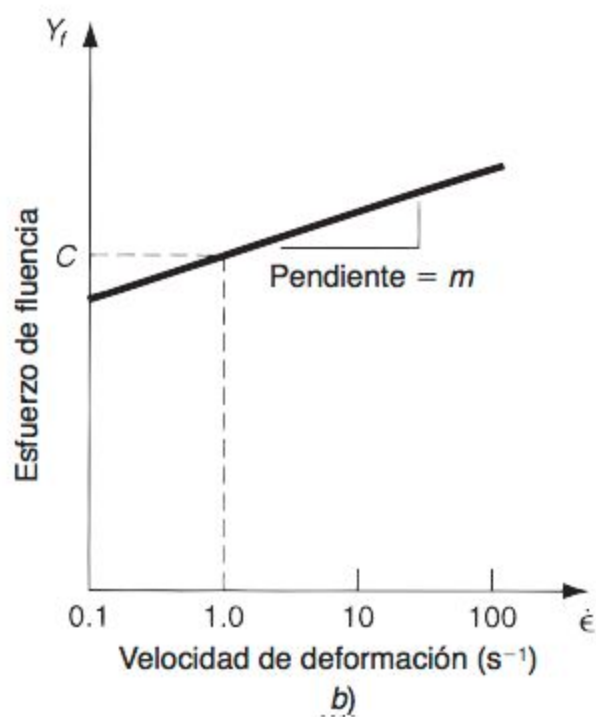
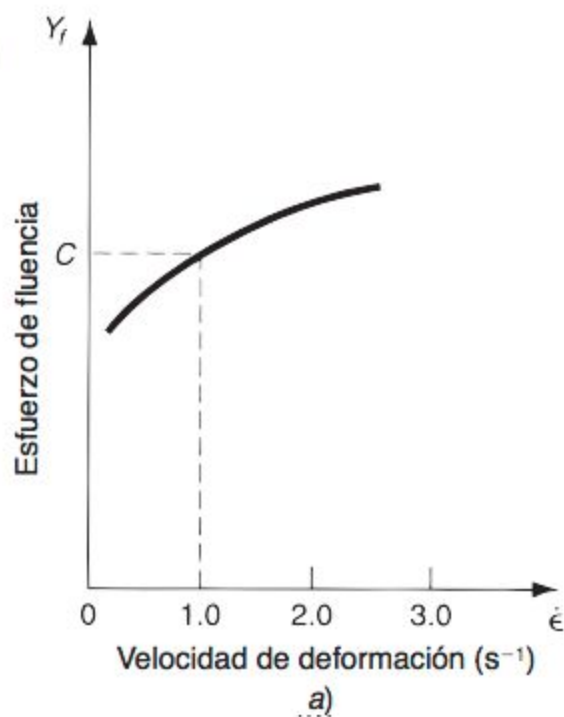
$$Y_f = C \cdot \dot{\epsilon}^m$$

donde C es la constante de resistencia (similar pero no igual al coeficiente de resistencia en la ecuación de la curva de fluencia) y m es el exponente de sensibilidad a la velocidad de deformación. El valor de C se determina a una velocidad de deformación de 1.0, y m es la pendiente de la curva en la figura 18.5b).

# SENSIBILIDAD A LA VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN

El efecto de la temperatura sobre los parámetros de la ecuación (18.4) es notable. Al incrementar la temperatura, decrece el valor de  $C$  (consistente con su efecto sobre  $K$  en la ecuación de la curva de fluencia) y aumenta el valor de  $m$ . El resultado general se puede ver en la figura 18.6. A temperatura ambiente el efecto de la velocidad de deformación es casi despreciable, e indica que la curva de fluencia es una buena representación del comportamiento del material. A medida que aumenta la temperatura, la velocidad de deformación juega un papel más importante en la determinación del esfuerzo de fluencia, como se indica por las pendientes más grandes de las relaciones deformación-velocidad. Esto es importante en el trabajo en caliente porque la resistencia a la deformación del material aumenta drásticamente con el incremento de la velocidad de deformación. Para dar una idea del efecto, en la tabla 18.1 se proporcionan los valores típicos de  $m$  para los tres rangos de temperatura del trabajo en metales.

FIGURA 18.5 a) Efecto de la velocidad de deformación sobre la resistencia a la fluencia a temperatura de trabajo elevada, b) la misma relación graficada en coordenadas log-log.



# SENSIBILIDAD A LA VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN

Se puede observar que aun en el trabajo en frío la velocidad de deformación puede tener un efecto mínimo sobre el esfuerzo de fluencia. En el trabajo en caliente el efecto puede ser significativo. Una expresión más completa para el esfuerzo de fluencia como función de la deformación y de la velocidad de deformación podría ser la siguiente:

$$Y_f = A \cdot \dot{\epsilon}^n \cdot \epsilon^m$$

donde A = un coeficiente de resistencia que combina los efectos de los valores previos de K y de C. Por supuesto, A, n y m podrían ser funciones de la temperatura, y el enorme trabajo de ensayar y recopilar los valores de estos parámetros para diferentes metales y varias temperaturas podría ser prohibitivo.

Se verá que muchos procesos de deformación volumétrica se realizan en caliente, y se desprecia el efecto de la velocidad de deformación en el análisis de las fuerzas y la potencia. Para las operaciones de trabajo en frío, trabajo en caliente por debajo de la temperatura de recristalización y trabajo en caliente por arriba de la temperatura de recristalización, a velocidades de deformación relativamente bajas, esta subestimación representa una suposición razonable.

# SENSIBILIDAD A LA VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN

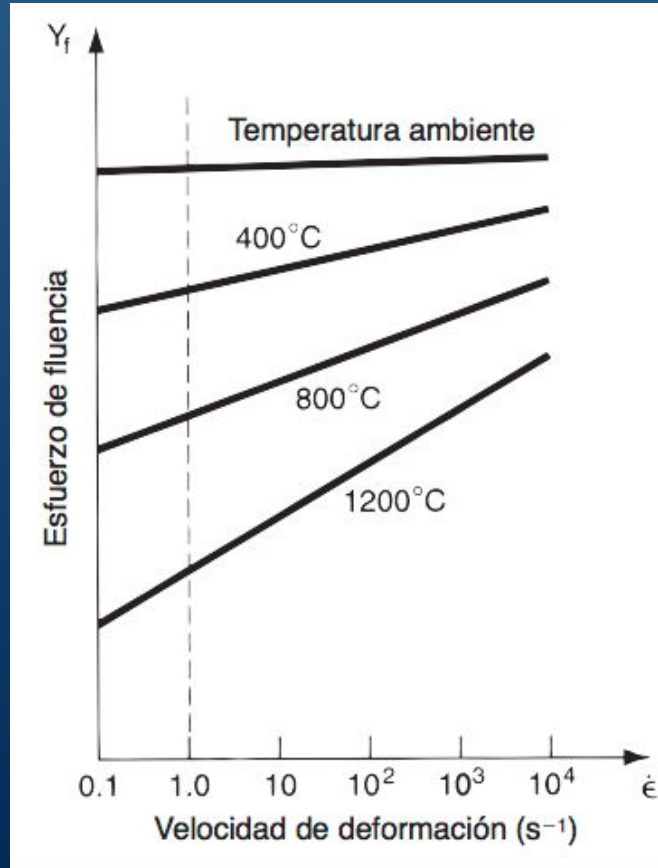


FIGURA 18.6 Efecto de la temperatura sobre el esfuerzo de fluencia para un metal típico. La constante  $C$  en la ecuación (18.4), indicada por la intersección de cada línea continua con la línea punteada vertical a una velocidad de deformación = 1.0, decrece, y  $m$  (pendiente de cada línea) aumenta al incrementarse la temperatura.

# FRICCIÓN Y LUBRICACIÓN EN EL FORMADO DE METALES

La fricción en el formado de metales surge debido al estrecho contacto entre las superficies de la herramienta y el material de trabajo, y a las altas presiones que soportan las superficies en estas operaciones. En la mayoría de los procesos de formado, la fricción es inconveniente por las siguientes razones:

1. Retarda el flujo del metal en el trabajo, ocasionando esfuerzos residuales y algunas veces defectos del producto.
2. Se incrementan las fuerzas y la potencia para desempeñar la operación.
3. El desgaste de las herramientas puede conducir a la pérdida de la precisión dimensional, lo cual da por resultado piezas defectuosas y el remplazo de las herramientas. Como las herramientas para formado de metales son generalmente costosas, su desgaste es de una mayor importancia. La fricción y el desgaste de las herramientas son más severos en el trabajo en caliente, debido a las condiciones más rudas.

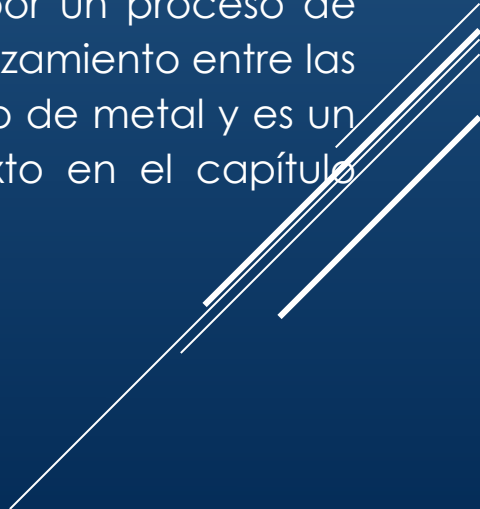
# FRICCIÓN Y LUBRICACIÓN EN EL FORMADO DE METALES

La fricción en el formado de metales es diferente a la que se encuentra en la mayoría de los sistemas mecánicos, como trenes de engranajes, flechas, cojinetes y otros componentes que involucran un movimiento relativo entre las superficies. Estos casos se caracterizan generalmente por bajas presiones de contacto, temperaturas entre bajas y moderadas, y una lubricación amplia para minimizar el contacto entre los metales.

Por el contrario, las condiciones en el formado de metales representan presiones altas entre la superficie dura de la herramienta y la pieza de trabajo suave, deformación plástica del material más suave y altas temperaturas (al menos en el trabajo en caliente). Estas condiciones pueden generar coeficientes de fricción relativamente altos en el metal de trabajo, incluso con la adición de lubricantes. Los valores típicos del coeficiente de fricción para las tres categorías de formado de metales aparecen en la tabla 18.1.

# FRICCIÓN Y LUBRICACIÓN EN EL FORMADO DE METALES

Si el coeficiente de fricción llega a ser lo suficientemente grande, ocurre una condición conocida como adherencia. La **adherencia** en el trabajo de metales (también llamada **fricción por adherencia**) es la tendencia de las dos superficies en movimiento relativo a pegarse una a la otra en lugar de deslizarse. Esto significa que el esfuerzo de fricción entre las superficies excede al esfuerzo de flujo cortante del metal de trabajo, ocasionando que el metal se deforme por un proceso de corte por debajo de la superficie, en lugar de que ocurra un deslizamiento entre las superficies. La adherencia ocurre en las operaciones de formado de metal y es un problema prominente en el rolado; se estudia en ese contexto en el capítulo siguiente.





# FRICCIÓN Y LUBRICACIÓN EN EL FORMADO DE METALES

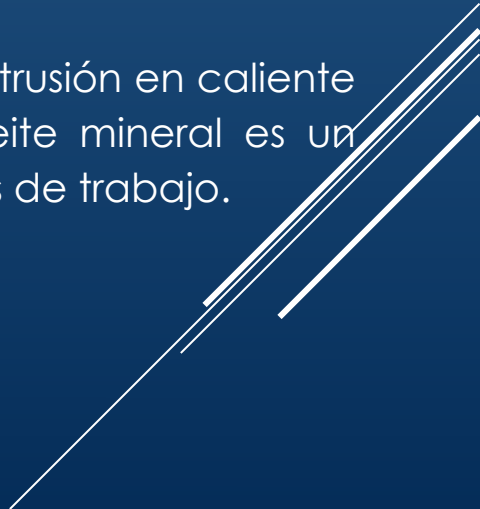
Los lubricantes para el trabajo de los metales se aplican en la interfaz herramienta-trabajo en muchas operaciones de formado para reducir los perjudiciales efectos de la fricción. Los beneficios que se obtienen de su aplicación incluyen una reducción en la adherencia, en las fuerzas, en la potencia y en el desgaste de las herramientas, así como un mejor acabado de la superficie en el producto final. Los lubricantes tienen también otras funciones, como reducir el calor en las herramientas.

Las consideraciones para escoger un lubricante apropiado para el trabajo de metales incluyen el tipo de procesos de formado que se va a utilizar (rolado, forjado, estirado de lámina metálica u otros), ya sea trabajo en caliente o trabajo en frío, así como el material de trabajo, la reactividad química con la herramienta y con los metales de trabajo (por lo general, es deseable que los lubricantes se adhieran a las superficies para que sean más efectivos en la reducción de la fricción), facilidad de aplicación, bajas toxicidad, inflamabilidad y escaso costo.

# FRICCIÓN Y LUBRICACIÓN EN EL FORMADO DE METALES

Los lubricantes usados para operaciones de trabajo en frío incluyen aceites minerales, grasas y aceites grasos, emulsiones en agua, jabones y otros recubrimientos. El trabajo en caliente se realiza algunas veces en seco para ciertas operaciones y materiales (por ejemplo, el laminado en caliente del acero y la extrusión de aluminio). Cuando los lubricantes se usan para trabajo en caliente incluyen aceites minerales, grafito y vidrio.

El vidrio fundido se convierte en un lubricante efectivo para la extrusión en caliente de aleaciones de acero. El grafito contenido en agua o aceite mineral es un lubricante común para el forjado en caliente de varios materiales de trabajo.



# FRICCIÓN Y LUBRICACIÓN EN EL FORMADO DE METALES

TABLA 18.1 Valores típicos de temperatura, sensibilidad a la velocidad de deformación y coeficiente de fricción en trabajo en frío, en caliente por debajo y por encima de la temperatura de recristalización.

Categoría	Rango de temperatura	Exponente de sensibilidad a la velocidad de deformación	Coficiente de fricción
Trabajo en frío	$\leq 0.3T_m$	$0 \leq m \leq 0.05$	0.1
Trabajo en caliente por debajo de la temp. de recrist.	$0.3T_m - 0.5T_m$	$0.05 \leq m \leq 0.1$	0.2
Trabajo en caliente por encima de la temp. de recrist.	$0.5T_m - 0.75T_m$	$0.05 \leq m \leq 0.4$	0.4 - 0.5