



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO  
FACULTAD DE INGENIERÍA

# DISEÑO DE ESTAMPAS PARA FORJA

## TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO

PRESENTA

LEONARDO ESTRADA DÍAZ

DIRECTOR DE TESIS  
DR. ARMANDO ORTIZ PRADO



MÉXICO, D. F. 2007



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **AGRADECIMIENTOS**

A mis padres, por todo su apoyo, confianza y principalmente por haberme inculcado el sentido de responsabilidad que es lo que me permitió lograr esta meta, sin su apoyo no hubiera sido posible.

A mi hermano, por todo su apoyo y comprensión durante la carrera.

Al Dr. Armando Ortiz Prado, por la confianza, por sus conocimientos, experiencia y aportación a este trabajo

Al Ing. Edgar Isaac Ramírez Díaz, por todas las ideas aportadas para la realización de este trabajo y principalmente en el desarrollo de las simulaciones de Elemento Finito.

A mis amigos, Gerardo, Ramón, Arturo, Eder, Víctor, Sam, Daniel, Esquivelzeta, Martín, Enrique y Eduardo, por brindarme su amistad durante mi estancia en la Facultad.

Leonardo Estrada Díaz

# ÍNDICE

<b>1. CONCEPTOS GENERALES DE FORJA</b> .....	1
1.1 FUNDAMENTOS DEL FORMADO DE METALES.....	1
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FORJA .....	4
1.3 DESCRIPCIÓN DE LOS TIPOS DE FORJA.....	5
1.3.1 FORJA EN CALIENTE .....	6
1.3.2 FORJA EN FRÍO .....	6
1.3.3 FORJA EN DADO ABIERTO.....	7
1.3.4 FORJA EN DADO CERRADO (ESTAMPA) .....	7
1.4 EQUIPOS UTILIZADOS EN EL PROCESO DE FORJA .....	8
1.4.1 MARTINETES.....	8
1.4.2 PRENSAS .....	8
<b>2. DISEÑO DE ESTAMPAS PARA FORJA</b> .....	10
2.1 MATERIALES UTILIZADOS PARA LA FABRICACIÓN DE ESTAMPAS.....	10
2.1.1 INSERTOS .....	11
2.1.2 TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE ESTAMPAS .....	12
2.1.3 TRATAMIENTOS SUPERFICIALES DE ESTAMPAS .....	13
2.2 CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DE ESTAMPAS .....	14
2.2.1 SOBRESPEORES DE MECANIZADO .....	15
2.2.2 DEFORMACIÓN ELÁSTICA DE LA ESTAMPA .....	15
2.2.3 CONTRACCIÓN EN EL MATERIAL DE TRABAJO .....	16
2.2.4 DISEÑO DE LA REBABA.....	16
2.3 MANUFACTURA DE LAS ESTAMPAS.....	20
<b>3. CONSIDERACIONES PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA VIDA DE LA ESTAMPA</b> .....	22
3.1 GEOMETRÍA DE LA ESTAMPA .....	22
3.2 RECUBRIMIENTOS Y TRATAMIENTOS LOCALIZADOS .....	26
3.2 TRIBOLOGÍA .....	27
3.4 TRANSFERENCIA DE CALOR EN LA ESTAMPA .....	29
<b>4. SOLUCIÓN POR ELEMENTO FINITO DEL MODELO DE ESTAMPA</b> .....	31
4.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	31
4.1.1 DETERMINACIÓN DE DIMENSIONES DE LA ESTAMPA.....	33
4.1.2 DISEÑO DE LA CAVIDAD DE REBABA .....	34
4.1.3 PROPIEDADES DEL MATERIAL .....	35
4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	37
<b>5. CONCLUSIONES</b> .....	48
<b>6. REFERENCIAS</b> .....	51

## PRÓLOGO

El diseño de los procesos de forja es de gran importancia, ya que si éste se realiza correctamente, los costos de producción se pueden ver reducidos de manera considerable, mediante la optimización de la vida útil del dado, además una mejora de las propiedades mecánicas de los productos.

El diseño de un proceso de forja en estampa es complejo, ya que existen varios factores que afectan el proceso, con la utilización de paquetería de elemento finito el diseño se puede realizar de manera más sencilla y económica, ya que con esta herramienta se puede conocer en primera instancia el flujo del metal mientras se está deformando y así evitar la formación de defectos, permite saber si la cavidad se llena en su totalidad, así como también cuantifica la fuerza requerida para poder llevar a cabo la operación. Por todos estos factores, es que el método de elemento finito se ha convertido en una poderosa herramienta para el modelado de los procesos de forja.

En el capítulo 1, se realiza un resumen de los conceptos más importantes en el formado de metales, así como una breve explicación del proceso de forja y su clasificación, además de la mención del equipo de trabajo utilizado en estos procesos.

En el capítulo 2, se mencionan los materiales y tratamientos térmicos utilizados para la manufactura de la estampa, además de algunas consideraciones que se realizan en el diseño, tales como los espesores de sobremecanizado, las contracciones del material de trabajo y principalmente la obtención de las dimensiones de la zona de rebaba, este paso es de gran importancia, ya que el diseño de esta zona afecta de manera importante a todo el proceso, ya que es la que permite el completo llenado de la estampa mediante la utilización de fuerzas razonables.

En el capítulo 3, se presentan los factores que afectan de manera importante la vida útil de la estampa y las soluciones utilizadas para mitigar estos efectos, entre los cuales se pueden mencionar las modificaciones geométricas para evitar el desgaste excesivo, la utilización de recubrimientos y tratamientos localizados, las condiciones tribológicas del proceso para disminuir el coeficiente de fricción mediante la utilización del lubricante idóneo y la transferencia de calor que puede provocar la fatiga térmica y por consiguiente la falla de la estampa.

En el capítulo 4, se estudia el caso en el cual el objetivo final es el de obtener las dimensiones ideales de la zona de rebaba para la manufactura de una biela mediante forja en estampa, utilizando paquetería de elemento finito. Con este estudio, se puede apreciar el papel determinante que tienen las preformas en el proceso, ya que el correcto diseño de estas permite que la cavidad de la pieza se llene completamente, además de garantizar la nula presencia de defectos. El estudio consiste en variar el espesor del cordón de rebaba y observar los cambios en el proceso, principalmente en lo que respecta a la fuerza requerida.

Leonardo Estrada Díaz

# CAPÍTULO 1

## CONCEPTOS GENERALES DE FORJA

### 1.1 FUNDAMENTOS DEL FORMADO DE METALES

El formado de metales abarca diversos procesos de manufactura, en los cuales el principio que se utiliza es el de deformación plástica para modificar la geometría de diferentes piezas. En la forja se presenta debido al uso de una herramienta (dado), la cual aplica cargas (de compresión) que rebasan la resistencia a la fluencia de los distintos materiales, lo cual da como resultado final que el material adquiera la geometría que le proporciona el dado.

La plasticidad se define como la propiedad de un material de cambiar su forma de manera permanente debido a la acción de fuerzas, que cuando el correspondiente estado de esfuerzos alcanza los valores de cedencia, provoca la deformación. Por lo visto en los ensayos de tracción, cuando un esfuerzo es menor que el de cedencia, la deformación desaparece una vez retirada esta carga, se dice que el material se comporta de manera elástica. Si el esfuerzo excede al de cedencia, se da como resultado una deformación permanente, aun después de retirada la carga. (Lange, 1985)

Las propiedades idóneas para que se presente un formado de metales, son un bajo esfuerzo de fluencia y una alta ductilidad. Estas dos propiedades características de los metales se pueden modificar mediante la temperatura de trabajo. De esta característica es que se desprende que el formado de metales se puede llevar a cabo bajo dos condiciones: trabajo en frío (temperaturas menores a 0.4 la temperatura absoluta de fundición) y trabajo en caliente (temperaturas por encima de 0.75 la temperatura absoluta de fundición), temperatura a la cual la recristalización dinámica permite la idealización del material rígido-plástico sin endurecimiento.

La curva esfuerzo-deformación permite comprender el comportamiento de los metales durante su deformación. La curva más común de esfuerzo-deformación para los metales, presenta la existencia de una zona elástica y una plástica (Figura 1.1). En el conformado de los metales, la zona que mas llama la atención es la plástica, ya que es en esta donde se presentan los cambios de geometría permanentes. En la región plástica, el comportamiento del metal se expresa por la relación:

$$\sigma = K \varepsilon^n$$

$\sigma$  = Esfuerzo [MPa]

$K$  = Coeficiente de endurecimiento [MPa]

$\varepsilon$  = Deformación efectiva

$n$  = Exponente de endurecimiento por deformación

La relación típica esfuerzo-deformación muestra elasticidad por debajo del punto de fluencia y endurecimiento por deformación por arriba de dicho punto.

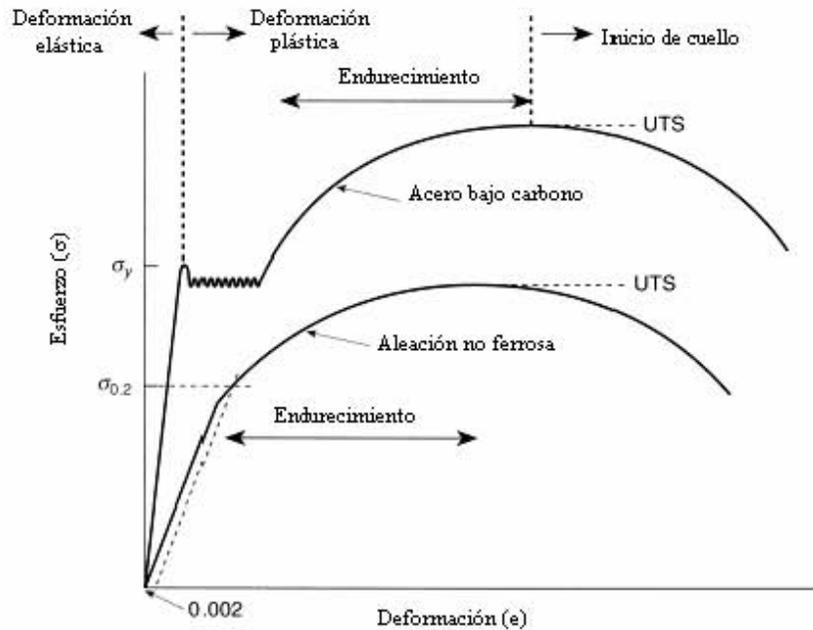


Figura 1.1 Curvas esfuerzo-deformación (Beddoes, 1999)

Varias de las propiedades asociadas con la curva de esfuerzo-deformación, como lo son el esfuerzo de cedencia y la elongación total, han sido utilizadas para evaluar la capacidad de formado de un material. La utilización del esfuerzo de cedencia presenta la desventaja de ser sensible a la velocidad de deformación. Los ensayos de tracción se realizan por lo regular a velocidades menores que las de operaciones de producción, por lo tanto, el esfuerzo de cedencia obtenido del ensayo será menor que el desarrollado por el material en los procesos de formado, este factor tiene que ser tomado en cuenta en el diseño de un proceso de manufactura.

Los límites del formado de metales se encuentran relacionados con la desaparición de la ductilidad de estos. Para alcanzar un mejor grado de deformación, un material debe ser capaz de deformarse de manera uniforme. Las investigaciones en materiales arrojan que son dos las propiedades que alteran de manera importante la capacidad de los materiales a ser formados: el coeficiente de endurecimiento ( $n$ ) y el coeficiente de anisotropía ( $r$ ). El coeficiente de endurecimiento determina la capacidad del material a ser estirado uniformemente. El coeficiente de anisotropía representa que tan distintas son las propiedades mecánicas de una pieza en sus distintas direcciones.

El movimiento de dislocaciones es el mecanismo básico de deformación plástica. Estas permiten que los planos cristalinos se deslicen entre si a fuerzas de menor magnitud que las que nominalmente se necesitan para provocar la deformación. Las fuerzas externas provocan campos de esfuerzos que son superpuestos a los inherentes a las dislocaciones, si los esfuerzos alcanzan cierta magnitud, las dislocaciones comienzan a moverse. Cuando en su movimiento una dislocación se encuentra con un obstáculo que produce su detención, ocurre que las dislocaciones que la siguen tienden a apilarse en sus proximidades, conformando así zonas de alta densidad de dislocaciones. La deformación plástica se desarrolla en los planos de alta densidad en direcciones de empaquetamiento compacto.

Durante el formado de un metal, la densidad de dislocaciones se incrementa en varios órdenes de magnitud. Mientras éstas se desplazan, tienden a estirar el material en sentido contrario al área donde se lleva a cabo la deformación, por lo tanto, la deformación se extiende a través de la pieza. Posteriormente, las dislocaciones solo pueden pasar por otra zona a un esfuerzo de mayor magnitud. Los esfuerzos internos, también causan la activación de las fuentes de dislocaciones a esfuerzos mayores.

Un metal cuya microestructura y propiedades mecánicas son la mismas en todas las direcciones es denominado isotrópico. Si un metal es laminado continuamente, la estructura del grano es orientada y se le denomina anisotrópico. El factor de presentar distintas orientaciones en la microestructura, repercute que no se tengan las mismas propiedades mecánicas en todas las direcciones, por lo tanto, este es un factor a considerar durante la manufactura de la pieza. En el formado de metales, la anisotropía del material afecta el flujo plástico de este y las propiedades de la pieza de trabajo. Es deseable que el material presente un alto valor en el coeficiente de anisotropía, ya que esto implica una buena resistencia al adelgazamiento.

En el trabajo en caliente, un metal se comporta teóricamente como un material perfectamente plástico, con un exponente de endurecimiento por deformación  $n = 0$ . Esto implica que una vez que se alcanza el nivel de esfuerzo, el metal deberá seguir fluyendo bajo la misma carga, es decir, no sufrirá de endurecimiento. Estrictamente esta suposición no es cierta, lo que ocurre es que el endurecimiento originado por la deformación plástica es eliminado totalmente por la recuperación y recristalización del material que trascurren a la temperatura de deformación, la velocidad de recristalización es superior a la de deformación. Sin embargo, un fenómeno adicional se presenta en el comportamiento de los metales durante su deformación, especialmente a temperaturas elevadas del trabajo en caliente. Este fenómeno es la sensibilidad a la velocidad de deformación. Este tipo de parámetros son difíciles de cuantificar, ya que entre mayor es la complejidad de la figura, mayor es la dificultad para determinarla. En el trabajo en caliente, el esfuerzo de fluencia dependerá de la velocidad de deformación, al aumentar esta, se incrementa la resistencia a la deformación (Figura 1.2).

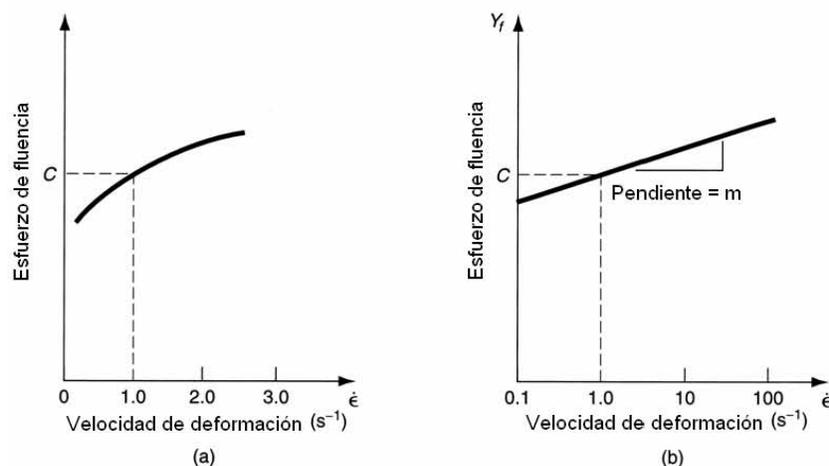


Figura 1.2 (a) Efecto de la velocidad de deformación sobre el esfuerzo de fluencia a una temperatura elevada, (b) la misma relación graficada en coordenadas log-log (Groover, 1997)

## 1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE FORJA

El proceso de formado de metales mas antiguo es el de forja. Este consiste en que una pieza de trabajo es deformada plásticamente entre los dados para obtener la geometría deseada de la pieza. En otras palabras, el proceso consiste en transformar una pieza de una geometría sencilla en una compleja, donde las estampas (dados) tienen la forma deseada en forma de cavidades, se aplica una presión sobre la pieza de trabajo a través de la interfase de material-estampa para que este fluya a través de las cavidades y de esta manera obtener la pieza con la geometría deseada.

El forjado es el método principal utilizado para conformar piezas de gran tamaño y también para mejorar sus propiedades metalúrgicas y mecánicas. Esta técnica precisa de grandes cargas y con frecuencia el equipo es muy pesado, lo cual provoca cambios microestructurales significativos que se traducen en un patrón de flujo de grano a través de toda la pieza, esto se debe a que durante la compresión de material en caliente, la estructura dendrítica del lingote se elimina y las dendritas se alargan en dirección de la deformación. Los espacios interdendríticos, que contienen una gran cantidad de impurezas e inclusiones no metálicas, también se deforman y dan origen a las fibras características del proceso de forja (Figura 1.3). La dirección de las fibras debe coincidir con la dirección de las tensiones máximas a las cuales va a estar sometida la pieza para obtener el mejor desempeño.



Figura 1.3 Líneas de flujo en un gancho de acero 4340 (ASM International, 1988)

Todos los procesos de forja, comienzan con la preparación de la materia prima, estos consisten en el dimensionamiento idóneo de la pieza, su calentamiento y posicionamiento, por mencionar solo algunas. Un proceso de forja puede constar de varias etapas, ya que en ocasiones las deformaciones pueden ser demasiado grandes y se pueden provocar daños al dado, además de que también se afecta la calidad de la pieza, es por eso que son necesarias las preformas en los dados, ya que esto permite que en el paso final se llene correctamente la cavidad (Figura 1.4). Otros de los parámetros que puede dictar el número de pasos, se encuentra en la capacidad del equipo con el cual se cuenta, así como las velocidades de producción que se pretenden obtener.

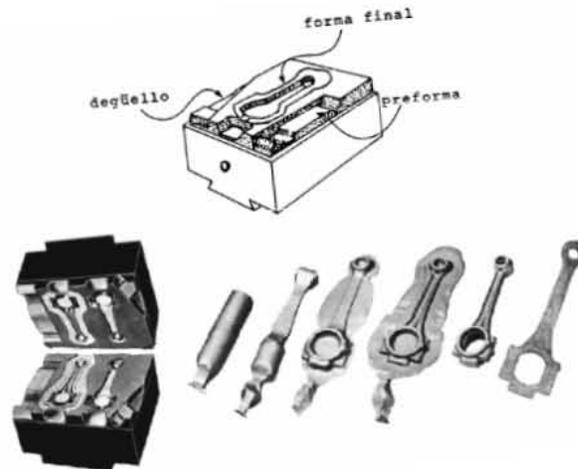


Fig. 1.4 Diseño detallado de las fases de un proceso de forja (Ortiz, 2006)

Una vez realizados los pasos intermedios del proceso, se llega a la etapa final de la forja, es donde se aplica el último paso y donde se obtiene la pieza terminada, por lo tanto, es en esta etapa donde las cargas tienden a ser de mayor magnitud, ya que es aquí donde se tiene que asegurar el correcto llenado de la estampa. Después del proceso de forja, se tiene que llevar una etapa de desbarbado y acabado final, en esta etapa se tienen que alcanzar las dimensiones y tolerancias deseadas, en la actualidad, se busca que este proceso sea mínimo, debido a que es costoso y puede dañar los productos finales.

Durante el proceso de forja, ya sea preliminar o de acabado, el flujo del metal es afectado por el grado de deformación, la velocidad de deformación y la temperatura. Estos factores determinan principalmente la resistencia del metal a la deformación. El flujo de metal también se ve afectado por la naturaleza del metal, su estructura metalúrgica, sus fases, tamaño de grano, sollicitaciones a las que estuvo sometido antes, segregación y, por supuesto, su composición. (American Machinist Magazine, 1988)

Además de estos factores, los encargados de diseñar un proceso de forja deben de tomar en cuenta otras cuestiones, tales como el tamaño y forma de la pieza, la producción de piezas, tolerancias requeridas, capacidad instalada con la que se cuenta y disponibilidad del herramental.

### 1.3 DESCRIPCIÓN DE LOS TIPOS DE FORJA

Las operaciones de forja se pueden llevar a cabo de diversas maneras, por lo tanto, existen diferentes formas de clasificar este tipo de procesos. Una primera clasificación se puede dar en torno a la temperatura de trabajo del metal, de ahí se desprenden los términos de forja en frío y forja en caliente. Otra clasificación se puede dar en torno a los dados a utilizar (Figura 1.5), estos pueden ser planos o con un geometría sencilla, por lo cual se refiere a este proceso como forja libre, o por el contrario, cada dado puede llevar grabada en bajorrelieve la semiforma de la pieza a conseguir, de manera que entre los dos, al ponerse en contacto, conformen la geometría completa de la pieza. En este caso, el proceso se le llama forja en estampa.

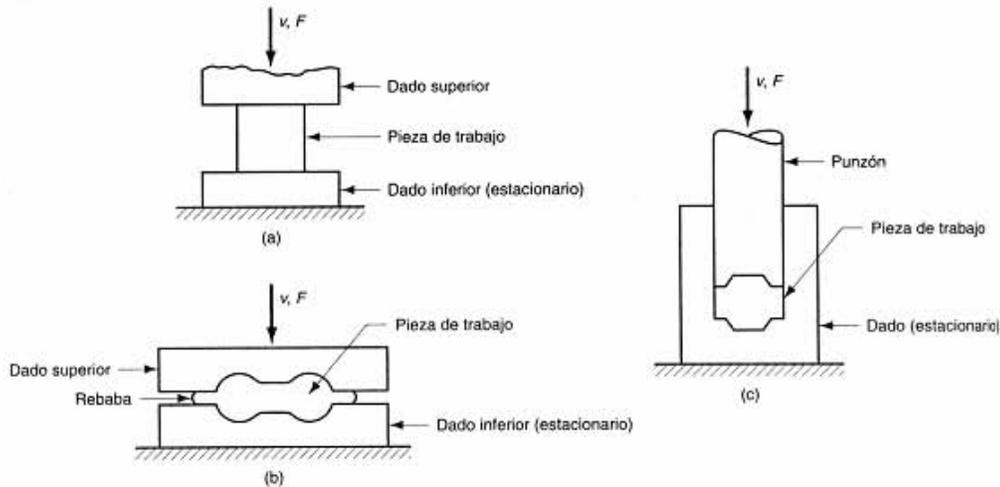


Figura 1.5 Tipos de forja: a) Forja en dado abierto, b) Forja en estampa, c) Forja sin rebaba (Groover, 1997)

### 1.3.1 FORJA EN CALIENTE

La mayoría de las operaciones de forja se realizan en caliente en los materiales que presentan un alto punto de fusión. Como este proceso se realiza a una alta temperatura de trabajo, la pieza es sometida a grandes deformaciones plásticas, usualmente se utiliza para producir la pieza con su geometría final. Debido a que los materiales a altas temperaturas tienen un decremento importante en las magnitudes de sus esfuerzos de fluencia, por lo tanto, las fuerzas requeridas para llevar a cabo el proceso de deformación disminuyen considerablemente, además, no se tiene que someter a las piezas tratamientos térmicos para aliviar esfuerzos residuales debido a la deformación.

La vida del dado influye de manera importante en los costos de manufactura, en la productividad y en la calidad del producto. Durante el proceso de forja en caliente, la vida del dado se ve dramáticamente afectada por las condiciones de temperatura, el excesivo flujo de metal, las condiciones de rozamiento y la disminución de la dureza del dado, por lo tanto, esta se convierte en una de las desventajas del proceso.

### 1.3.2 FORJA EN FRÍO

En la forja en frío, el formado se realiza a temperatura ambiente o ligeramente arriba de esta, es un proceso de forja especial donde el metal frío es forzado a fluir plásticamente bajo fuerzas de compresión en una variedad de formas.

Algunas de las ventajas de este proceso son:

- 1) Tolerancias más estrechas, mayor precisión.
- 2) Acabado superficial superior.
- 3) El endurecimiento provoca un aumento en la resistencia.
- 4) El acomodo de granos brinda la oportunidad de obtener propiedades direccionales convenientes.
- 5) Ahorro en costos, debido a la no utilización de hornos para el calentamiento de las piezas, así como un ahorro significativo de material y maquinado posteriores.

### 1.3.3 FORJA EN DADO ABIERTO

La forja en dado abierto se realiza entre dados planos o dados que presentan una geometría simple. Este proceso es utilizado principalmente para objetos grandes o cuando el número de piezas a producir es pequeño. Con cierta regularidad, la forja en dado abierto es utilizada para dar la forma a la pieza de trabajo que va ser deformada en la forja en dado cerrado. El ejemplo más común de este tipo de forja se da cuando se comprime una pieza de trabajo cilíndrica entre dos dados planos. Como el metal fluye lateralmente entre las superficies del dado en movimiento, existe una deformación menor en la interfase dado-material debido a que las fuerzas de fricción no permiten el desplazamiento del material. Por lo cual, los lados de la pieza de trabajo presentan una forma abarrilada (Figura 1.6c). Como una regla general, el metal fluirá con mayor facilidad en las cercanías de las superficies libres, por que es en estos puntos donde se presenta la menor fricción.

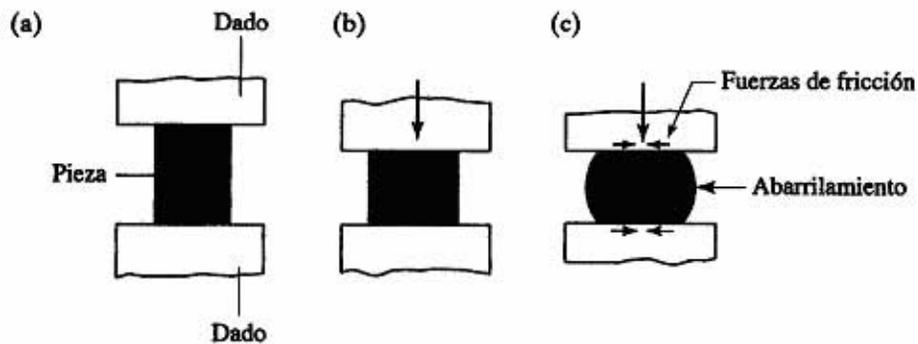


Fig. 1.6 (a) Cilindro sólido comprimido entre dos dados planos. (b) Deformación uniforme del material sin fricción. (c) Deformación con fricción. (Kalpakjian, 2002)

### 1.3.4 FORJA EN DADO CERRADO (ESTAMPA)

En la forja en dado cerrado, la pieza de trabajo es deformada entre los dos dados, cada uno de ellos contiene la impresión de la forma final de la pieza (Figura 1.7). En este tipo de forja, el flujo de metal está restringido a que debe llenar la cavidad de la estampa. La pieza de trabajo es deformada mediante una alta presión en una cavidad cerrada, por lo tanto, con este método se pueden obtener piezas que se asemejen más a su geometría final y donde las tolerancias dimensionales obtenidas son superiores a los demás métodos.

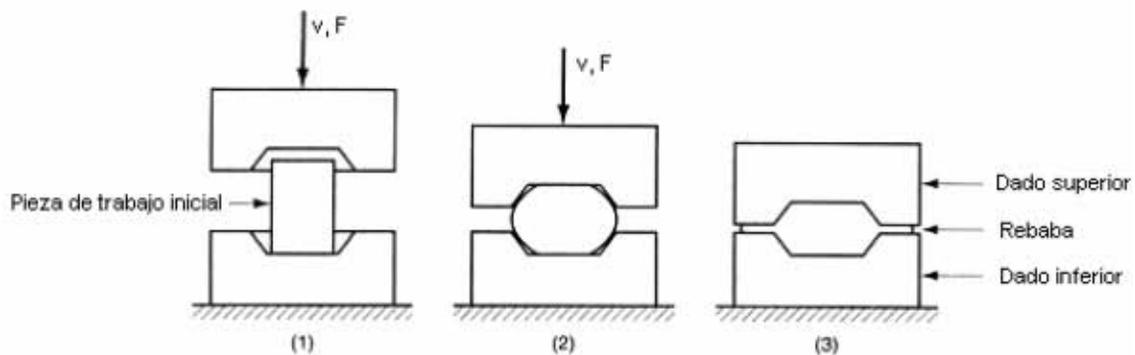


Figura 1.7 Diagrama esquemático de forja en estampa (Groover, 1997)

En esta clase de procedimientos, es importante utilizar la cantidad necesaria de material, para garantizar que la cavidad de la estampa se llenará correctamente. Debido a la complejidad de colocar la cantidad correcta de material en los diferentes lugares durante las distintas etapas del formado, es común la utilización de un despreciable exceso de material, este se aloja en una cavidad llamada rebaba.

Usualmente la deformación en estampas es muy compleja y el diseño de las etapas intermedias para obtener el producto final requiere de una considerable experiencia. Para que un proceso de forja en estampa sea llevado a cabo con éxito, se requiere tener conocimiento del esfuerzo de fluencia del material, de las condiciones de fricción y del flujo del material. Para la utilización de este procedimiento se requiere que el lote de producción sea grande, debido a que es necesario justificar el alto costo de las estampas.

#### **1.4 EQUIPOS UTILIZADOS EN EL PROCESO DE FORJA**

La selección de un equipo para un cierto proceso de manufactura se encuentra influenciada por una serie de factores, como lo son el tiempo de producción, la calidad de las piezas y la carga característica de esa máquina, el tamaño de lote de producción, las condiciones de la planta, el grado de automatización y los requerimientos de mantenimiento. Existen dos clases de equipo que son utilizados en forja y pueden ser clasificados con respecto a su principio de operación. Estos consisten en los martinets y las prensas. El martillo, proporciona un impacto en la superficie del metal que produce la deformación, mientras que las prensas someten al metal a una lenta fuerza de compresión.

##### **1.4.1 MARTINETES**

En los martinets (martillos), la fuerza es aplicada mediante la caída de una masa. Los martillos son las máquinas de formado de metales mas económicas, desde del punto de vista de generación de fuerza y transmisión de energía. Durante el golpe del martinete, la deformación se lleva a cabo hasta que toda la energía cinética es disipada por la deformación plástica del material y por la deformación elástica de la base cuando las superficies de los dados contactan entre si. La utilización de martillos es aconsejable para series cortas por su mayor facilidad para el cambio de dados y de su flexibilidad. El uso de este tipo de equipos ha disminuido de manera considerable, debido en gran parte a las ventajas que brindan las prensas en comparación con estos. Para el martinete (martillo), la carga inicial de forja es mayor debido a los efectos de la deformación, pero la carga máxima es menor que la desarrollada por las prensas, esto debido a la temperatura de la zona de rebaba.

##### **1.4.2 PRENSAS**

Las prensas de forja en la actualidad son los equipos mas utilizados, ya que proporcionan una gran ayuda en aplicaciones de forjas especiales, y por lo tanto han desplazado a los martinets. Se utilizan esencialmente cuando deben de fabricarse grandes cantidades de piezas iguales, independientemente de que la puesta a punto del proceso precisa de más tiempo, presentan un mayor rendimiento, además que son fácilmente automatizables y

permiten mayor precisión en los productos forjados. Las prensas permiten implementación de mecanismos para alimentar, levantar y mover la pieza de trabajo de un dado al siguiente, de ahí su importancia en los procesos de manufactura en la actualidad.

En las prensas de forja, la aplicación de la carga se da de manera gradual, y no de golpe como en el martinete. En contraste con la acción de los martinetes, las prensas comprimen el material de trabajo, ya que el impacto es mínimo o no existe. Las prensas se clasifican en dos grupos básicos: hidráulicas o mecánicas. El principio de operación de prensas hidráulicas es relativamente simple y se encuentra basado en el movimiento de un pistón hidráulico guiado por un cilindro. En las prensas mecánicas, el sistema utilizado en la mayoría está basado en un mecanismo manivela-biela-corredera, que transforma el movimiento rotatorio en lineal. El eje excéntrico es conectado a través de un sistema de transmisión directamente al volante.

## CAPÍTULO 2

# DISEÑO DE ESTAMPAS PARA FORJA

### 2.1 MATERIALES UTILIZADOS PARA LA FABRICACIÓN DE ESTAMPAS

El rendimiento y duración de estampas en operaciones de forja son afectados básicamente por tres factores interrelacionados: las cargas a las que se encuentran sometidas, la abrasión y la temperatura; todos estos factores influyen de manera individual o combinada para acabar con la utilidad de una estampa. De lo anterior se observa que los dados de forja pueden ser reemplazados por varias razones, como los cambios en las dimensiones debido a la deformación plástica, el deterioro de la superficie y la fractura, por lo tanto, la selección del material para el dado debe considerar todos estos factores para obtener así el mejor desempeño. Las propiedades que determinan la selección de un material para una estampa de forja en caliente son:

- Dureza uniforme
- Resistencia al desgaste (capacidad de resistir la acción abrasiva del metal caliente que esta siendo forjado)
- Resistencia a la deformación plástica (capacidad de resistir cargas sin presentar deformaciones permanentes)
- Resistencia al agrietamiento a causa de las altas temperaturas
- Resistencia a la fatiga térmica
- Resistencia a la fatiga mecánica

A consecuencia de que la temperatura de forja se encuentra alrededor de 1000°C para los aceros, la temperatura de la superficie de la herramienta temporalmente excede los 500°C, y con esto se alcanzan temperaturas de recocido de los aceros para herramientas. En tal caso, la dureza del dado se ve reducida y los impactos mecánicos durante el proceso pueden provocar fácilmente deformación plástica así como el desgaste en el dado.

La forja con dado abierto, emplea dados planos que no cuentan con impresiones que obligan al metal a obtener la forma exacta y dimensiones requeridas. En este tipo de forja, el tiempo en el que se encuentran en contacto el dado y el material es mínimo, por lo tanto no es necesaria la utilización de un acero con elevada resistencia en caliente.

El impacto en la forja con martinete es intermitente, los dados deben presentar elevada resistencia en caliente, pero las propiedades principales requeridas son alta tenacidad para soportar el impacto y ausencia de agrietamientos y de esta forma evitar concentradores de esfuerzos. Las matrices para forja con martinete se hacen por lo regular de acero cromo-níquel-molibdeno con alrededor de 0.40% de carbono.

En la forja en prensa, la elevada presión de compresión implica la utilización de dados con alta resistencia en caliente y resistencia al agrietamiento por calor. Tanto el acero con 9% de tungsteno como el de 5% de cromo son usados para todas las herramientas que estarán

en contacto con metal caliente. Los materiales utilizados para los dados en un proceso de forja en caliente incluyen los aceros para herramientas para trabajo en caliente (serie AISI H) y algunos aceros aleados tales como los de las series AISI 4300 o 4100 (Tabla 2.1).

Tabla 2.1 Composición de aceros utilizados para la fabricación de dados de forja en caliente (ASM International, 1988)

Designación	Composición nominal, %								
	C	Mn	Si	Co	Cr	Mo	Ni	V	W
<b>Aceros para trabajo en caliente AISI base cromo</b>									
H10.....	0.40	0.40	1.00	...	3.30	2.50	...	0.50	...
H11.....	0.35	0.30	1.00	...	5.00	1.50	...	0.40	...
H12.....	0.35	0.40	1.00	...	5.00	1.50	...	0.50	1.50
H13.....	0.38	0.30	1.00	...	5.25	1.50	...	1.00	...
H14.....	0.40	0.35	1.00	...	5.00	...	...	...	5.00
H19.....	0.40	0.30	0.30	4.25	4.25	0.40	...	2.10	4.10
<b>Aceros para trabajo en caliente AISI base tungsteno</b>									
H21.....	0.30	0.30	0.30	...	3.50	...	...	0.45	9.25
H22.....	0.35	0.30	0.30	...	2.00	...	...	0.40	11.00
H23.....	0.30	0.30	0.30	...	12.00	...	...	1.00	12.00
H24.....	0.45	0.30	0.30	...	3.0	...	...	0.50	15.00
H25.....	0.25	0.30	0.30	...	4.0	...	...	0.50	15.00
H26.....	0.50	0.30	0.30	...	4.0	...	...	1.00	18.00
<b>Aceros de baja aleación</b>									
ASM 6G.....	0.55	0.80	0.25	...	1.00	0.45	...	0.10	...
ASM 6F2.....	0.55	0.75	0.25	...	1.00	0.30	1.00	0.10	...
ASM 6F3.....	0.55	0.60	0.85	...	1.00	0.75	1.80	0.10	...

Estos materiales contienen cromo, tungsteno y, en algunos casos, vanadio y molibdeno o ambos. Estos elementos aleantes proveen al acero de un aumento en su dureza, así como una resistencia a la abrasión y reblandecimiento. Un alto contenido de molibdeno proporciona a los materiales la resistencia al reblandecimiento; el vanadio incrementa la resistencia a la abrasión y reblandecimiento, debido a que este combinado con un contenido alto de carbono tiende a formar carburos resistentes al desgaste; el tungsteno incrementa la dureza en caliente, ya que al combinarse químicamente con el carbono forma un carburo cuyas propiedades son una extremada dureza y resistencia al desgaste. Los aceros para herramientas en caliente con altos contenidos de tungsteno proveen una resistencia al reblandecimiento a altas temperaturas mientras mantiene una adecuada dureza, pero también provoca que el enfriamiento con agua sea imposible debido a que no son resistentes a los choques térmicos.

### 2.1.1 INSERTOS

Los insertos en los dados de forja son utilizados para reducir costos en la producción de algunas forjas. En general, estos prolongan la vida del bloque en donde se encuentran. El uso de insertos puede reducir los costos de producción cuando varios de estos pueden ser fabricados por el mismo costo de hacer un solo dado sólido. El tiempo requerido para reemplazar los insertos es mínimo, esto debido a que un segundo juego de insertos puede ser fabricado mientras un primer juego esta siendo utilizado, además de que al reemplazarlos no se pierde la puesta a punto del proceso, ya que no se tiene que retirar de manera completa la matriz.

Finalmente, una mayor cantidad de forjas con tolerancias dimensionales de mejor calidad pueden ser fabricadas con dados con insertos, esto debido a que los materiales utilizados para fabricar los insertos son aceros con un contenido de aleación mayor, lo cual repercute en mejores propiedades que las de un dado sólido, algunos materiales utilizados para la fabricación de insertos son los aceros H11, H12 y H13.

Los insertos pueden contener la impresión de solo una porción de la forja, que se encuentra sometida a un gran desgaste, o pueden tener también la impresión de toda la forja. Un ejemplo del primer tipo es el utilizado para forjar cavidades profundas, es decir, se utilizan cuando es necesaria una gran deformación (Figura 2.1).

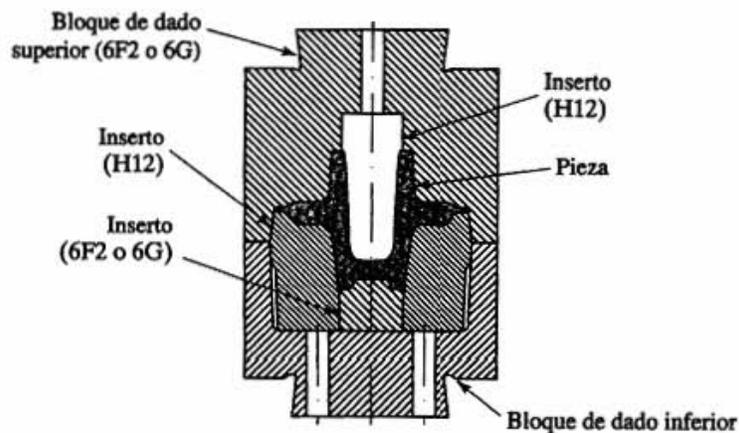


Figura 2.1 Insertos de dado, usados para forjar una caja de eje automotriz (Kalpakjian, 2002)

Los insertos ofrecen varias ventajas tales como: gran dureza, reducción de la factibilidad de falla, los costos en el rediseño de un proceso de forja son menores, el mismo dado puede ser utilizado para diferentes forjas cambiando solamente los insertos, todo lo anterior aunado a la rapidez con la cual pueden ser sustituidos.

### 2.1.2 TRATAMIENTOS TÉRMICOS DE ESTAMPAS

En servicio, la mayoría de las herramientas de forja están sujetas a cargas extremadamente elevadas que son aplicadas rápidamente. Por lo tanto, deben ser capaces de soportar estas cargas un gran número de veces sin presentar fractura, deformación o un excesivo desgaste. Ningún material utilizado para herramientas de forja combina una resistencia al desgaste, dureza y resistencia al reblandecimiento. Por lo tanto, la selección del adecuado material de herramienta para una aplicación dada, siempre requiere de un proceso extra que le permita alcanzar la óptima combinación de estas propiedades. Usualmente los materiales para dados deben ser endurecidos lo suficiente para soportar condiciones de servicio severas, pero también necesitan tener la suficiente ductilidad para prevenir su falla o fractura.

En este caso, lo más común es que el dado sea sometido a diversos tratamientos térmicos para alcanzar dichas propiedades, de lo anterior se desprende que todos los dados para forja al menos deben cumplir con dos tratamientos térmicos, el primer tratamiento consiste en un temple, la severidad y el medio están acorde con la composición del material y la aplicación

de la herramienta, por lo regular, estos aceros son templados al aire o sumergidos en aceite o en soluciones poliméricas (Tabla 2.2). El temple del acero se realiza con la finalidad de endurecer considerablemente la estampa, se tiene que poner énfasis en los siguientes factores para obtener los resultados deseados: la adecuada temperatura para alcanzar el rango de austenita, la prevención de la transformación de perlita y la transformación de martensita o bainita que son los componentes que inducen el endurecimiento.

Posteriormente a este proceso, se lleva a cabo un revenido, este se puede llevar a cabo en dos etapas. El tiempo y la temperatura de revenido se encuentran dados por la composición del material y las propiedades que se desean alcanzar, con el revenido se busca que aumente la tenacidad de la estampa y se reduzcan los esfuerzos residuales, este proceso presenta el inconveniente de que la dureza de la estampa decrece.

Tabla 2.2 Práctica recomendada para el tratamiento térmico de algunos aceros de dados de forja en caliente (ASM International, 1988)

Acero(s)	Recocido				Temple							
	Temperatura,		Razón de enfriamiento,		Dureza HB	Temperatura				Tiempo, min	Medio de temple	Dureza, HRC
	°C	°F	°C/h	°F/h		Precalentamiento	Austenización					
<b>Aceros para trabajo en caliente AISI base cromo</b>												
H10.....	845-900	1550-1650	22	40	192-229	815	1500	1010-1040	1850-1900	15-40	A	56-59
H11.....	845-900	1550-1650	22	40	192-229	815	1500	995-1025	1825-1875	15-40	A	53-55
H12.....	845-900	1550-1650	22	40	192-229	815	1500	995-1025	1825-1875	15-40	A	52-55
H13.....	845-900	1550-1650	22	40	192-229	815	1500	995-1040	1825-1900	15-40	A	49-53
H14.....	870-900	1600-1650	22	40	207-235	815	1500	1010-1065	1850-1950	15-40	A	55-56
H19.....	870-900	1600-1650	22	40	207-241	815	1500	1095-1205	2000-2200	2-5	A, O	52-55
<b>Aceros para trabajo en caliente AISI base tungsteno</b>												
H21.....	870-900	1600-1650	22	40	207-235	815	1500	1095-1205	2000-2200	2-5	A, O	43-52
H22.....	870-900	1600-1650	22	40	207-235	815	1500	1095-1205	2000-2200	2-5	A, O	48-57
H23.....	870-900	1600-1650	22	40	212-255	815	1500	1205-1260	2200-2300	2-5	O	33-35
H24.....	870-900	1600-1650	22	40	217-241	815	1500	1095-1230	2000-2250	2-5	A, O	44-55
H25.....	870-900	1600-1650	22	40	207-235	815	1500	1150-1260	2100-2300	2-5	A, O	46-53
H26.....	870-900	1600-1650	22	40	217-241	870	1600	1175-1260	2150-2300	2-5	A, O, S	64-64
<b>Aceros de baja aleación</b>												
ASM 6G.....	790-815	1450-1500	22	40	197-229	No es requerido		845-855	1550-1575	....	O	63 min
ASM 6F2....	780-795	1440-1460	22	40	223-235	No es requerido		845-870	1550-1600	....	O	63 min
ASM 6F3....	760-775	1400-1425	22	40	235-248	No es requerido		900-925	1650-1700	....	A	63 min

Nota: A, aire; O, aceite; S, salmuera.

### 2.1.3 TRATAMIENTOS SUPERFICIALES DE ESTAMPAS

Las actuales exigencias en los procesos de manufactura, ponen de manifiesto la necesidad de disponer de materiales con mejores propiedades y que soporten condiciones de trabajo más exigentes, por lo tanto, los dados de forja necesitan una elevada dureza superficial, especialmente a altas temperaturas. Los tratamientos superficiales de las estampas tienen por objeto el endurecimiento de la superficie y, por consiguiente, el aumento de la resistencia al desgaste conservando la tenacidad del núcleo. Otros beneficios derivados del endurecimiento superficial incluyen una mayor resistencia a la formación de grietas (esto debido a que la mayoría se originan en la superficie), resistencia a la deformación y a los repetidos impactos a la cual está sometida y proveen a la pieza de una superficie lisa.

Este endurecimiento superficial se puede obtener mediante dos métodos: modificando la composición de la superficie al agregar elementos aleantes (carbono, nitrógeno, etcétera) mediante difusión o modificando la microestructura de la superficie por medio de un tratamiento térmico, este consiste en el calentamiento de la superficie por inducción o flama y su posterior enfriamiento brusco.

## 2.2 CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DE ESTAMPAS

El diseño es primordial para asegurar una adecuada vida del dado, un pobre diseño puede resultar en una fractura prematura. El diseño de una pieza para producción mediante forja en estampa involucra la determinación de:

1. Volumen y peso de la pieza de trabajo
2. Número de pasos intermedios y su configuración
3. Dimensiones de la rebaba en dados intermedios y finales
4. La carga y energía necesaria para cada operación

La forja en estampa, ya sea con martinete o prensa, es un proceso por demás complejo. La fricción en la interfase estampa-material, el flujo de metal y la transferencia de calor entre las piezas y dados cambian durante el desarrollo del proceso. Para el diseño de un proceso de forja en estampa para cierto material, el número de pasos a llevarse a cabo, el tamaño de lote y las tolerancias de la pieza están determinados principalmente por la complejidad de la geometría de la pieza a fabricar.

Diseñar correctamente el proceso de fabricación de una pieza es fundamental para obtener piezas mediante procedimientos racionales, económicos y que permitan además maximizar la utilización del material empleado, desperdiciando la menor cantidad posible. La calidad del producto de forja depende de diversos factores como la forma inicial de la materia prima, la temperatura inicial de los dados y la pieza, la velocidad de formado, el coeficiente de fricción y el número y forma de los dados intermedios.

La problemática del proceso de forja puede ser resumida como el diseño de un patrón de deformación con la finalidad de obtener la figura con las propiedades deseadas al menor costo. Los patrones de deformación no son únicos y pueden estar compuestos de varias etapas o fases, debido a que en ocasiones la deformación no se puede llevar a cabo en una sola etapa. En forja, la forma no es lo único que importa al fabricante, las propiedades mecánicas son de similar importancia. En la industria, la experiencia acumulada por el diseñador es el primer método para determinar estas etapas, el segundo método utilizado está basado en técnicas de optimización, éstas han sido desarrolladas en las recientes décadas.

Cuando la deformación se lleva a cabo en dados, la deformación ocurre de igual manera que en la forja en dado abierto, hasta el momento en que el material entra en contacto con las paredes. Es necesario proyectar troqueles de manera que conduzcan los materiales sin contradecir de manera considerable sus tendencias naturales de deformación, ya que de caso contrario pueden producirse represamientos y movimientos de materia que provoquen pliegues, grietas y malformaciones.

Las dimensiones de la rebaba en el proceso son de gran importancia, debido a que esta zona puede provocar que las cargas necesarias para llenar completamente la estampa aumenten de forma considerable y se vea afectada la vida útil de la estampa, por lo cual es importante encontrar el valor ideal que permita el completo llenado de la estampa a un menor requerimiento de carga.

### 2.2.1 SOBRESPEORES DE MECANIZADO

Para el diseño de un proceso de forja, se parte del plano de la pieza ya mecanizada, por lo tanto, es importante considerar un exceso de material que va ser removido en los procesos de acabado, es decir, se proyectan sobreespesores en las caras de la pieza forjada. Esto se hace así, para que en el mecanizado se alcancen las dimensiones deseadas y que sean removidos los defectos superficiales (descarburaciones, incrustaciones de óxidos, pequeñas fisuras, etcétera) de las piezas forjadas. Los sobreespesores aconsejables se pueden observar en la tabla 2.3.

Tabla 2.3 Sobreespesores de mecanizado (Del Río, 1980)

<b>Espesor, longitud anchura o diametro [mm]</b>	<b>&lt; 30</b>	<b>31 a 60</b>	<b>61 a 120</b>	<b>121 a 250</b>	<b>251 a 500</b>	<b>&gt; 500</b>
<b>Sobreespesores (en cada cara) [mm]</b>	<b>1</b>	<b>1.5</b>	<b>2</b>	<b>2.5</b>	<b>3 a 4</b>	<b>5 a 8</b>

### 2.2.2 DEFORMACIÓN ELÁSTICA DE LA ESTAMPA

Debido a que no existen los materiales absolutamente rígidos, los dados de forja son deformados en el régimen elástico bajo las presiones de forja, el comportamiento de la deformación elástica en los dados de forja es un factor a considerar para mejorar la precisión dimensional de los productos forjados. La deformación elástica de la estampa se presenta principalmente en la forja en frío, donde las cargas a las que se encuentra sometido el material son extremadamente altas, por lo tanto, se busca que el material para estas aplicaciones presente un valor de módulo de Young bastante elevado.

Durante la forja, la cavidad del dado se expande en el rango elástico y provoca que la pieza de trabajo adquiera el tamaño de los dados expandidos. Durante el retiro de la carga, la dimensión de la cavidad regresa a su tamaño original debido a las fuerzas de equilibrio. Una vez retirada la pieza de trabajo de la estampa, la pieza forjada se vuelve a expandir debido a la recuperación elástica después de ser expulsada. Finalmente, se obtiene que por estos factores, las dimensiones de la pieza forjada no presentan las mismas del dado maquinado, lo cual puede llegar a ser un problema en las piezas que requieran una mayor precisión dimensional.

Con la finalidad de obtener piezas forjadas que presenten tolerancias más estrechas y que la etapa de maquinado sea mínima o nula, el diseño y manufactura del dado se tiene que realizar considerando la deformación elástica de la estampa y de la pieza de trabajo. En la actualidad, el Análisis por Elemento Finito permite predecir las características elásticas del dado bajo ciertas condiciones de trabajo, mientras que la recuperación de la pieza forjada es determinada cuantitativamente, debido a estos conceptos, el diseño de un dado para una pieza que no requiera maquinado puede ser desarrollado sobre mejores bases teóricas, lo cual conlleva la producción de piezas de mejor calidad.

### 2.2.3 CONTRACCIÓN EN EL MATERIAL DE TRABAJO

Cuando se lleva a cabo un proceso de formado en caliente, es necesario considerar las contracciones que la pieza sufrirá cuando se enfríe, y por lo tanto, deben preverse con dimensiones superiores a las deseadas para la pieza, realizando la consideración de la contracción del material de trabajo se pueden manufacturar piezas con mejores tolerancias dimensionales, ya que si no se consideran estas contracciones, se puede tener el caso que la pieza obtenida no cumple con las especificaciones. El cuantificar este efecto es complejo, es por ello que se recurre a la experiencia del diseñador, pero en general, se puede hacer uso de tablas para cuantificarla, estas presentan el valor del coeficiente de dilatación lineal ( $\alpha$ ) para cada metal, y se encuentran en función de la temperatura de trabajo (Tabla 2.4). El cálculo de la contracción se realiza de la siguiente forma:

Para un acero forjado a 1200 °C

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \alpha \times \Delta T = 11 \times 10^{-6} \times 1200 = 1.32 \times 10^{-2} = 1.32\%$$

lo que implica que la estampa de forja se debe manufacturar aumentando aproximadamente 1.32 % la magnitud de esa cota para prever las contracciones de la pieza al enfriarse.

Tabla 2.4 Coeficientes de dilatación lineal de algunos materiales (Del Río, 1980)

Material	Coefficiente de Dilatación Lineal ( $\alpha$ )(° C <sup>-1</sup> )
Acero	11.0x10 <sup>-6</sup>
Aluminio	23.8x10 <sup>-6</sup>
Bronce	17.5x10 <sup>-6</sup>
Cobre	16.5x10 <sup>-6</sup>
Latón	18.5x10 <sup>-6</sup>

### 2.2.4 DISEÑO DE LA REBABA

Es de gran relevancia el utilizar la cantidad suficiente de material en la pieza de trabajo para garantizar el completo llenado de la cavidad. Debido a lo complejo de solo colocar la cantidad justa de metal en los lugares correctos durante el formado, se vuelve necesaria la utilización de un exceso de metal. Cuando los dados se cierran completamente en el paso final, el material fluye hacia una cavidad que es tan delgada como una cinta de metal llamada rebaba. Con la finalidad de prevenir la formación de una rebaba demasiado ancha, se coloca un canal, conocido como cordón de rebaba. Un propósito de la rebaba consiste en actuar como una válvula de seguridad para el exceso de metal en la cavidad del dado, la rebaba regula el escape de material. El cordón de la matriz se comporta mecánicamente como un dique de contención del material plástico, que en un momento determinado de la deformación sirve como rebosadero de ese mismo material.

El reto en el diseño de la rebaba se encuentra en ajustar su dimensión de tal manera que el flujo de metal a través del cordón de la rebaba presente una mayor dificultad que el llenado en las partes críticas del dado. Pero este fenómeno no debe ser tan severo, debido a que acarrearía la utilización de cargas excesivas que conllevan problemas de desgaste y fractura en el dado. El diseño ideal se presenta cuando se alcanza la mínima cantidad de rebaba para realizar el proceso, esto debido en una primera instancia al ahorro de material, pero principalmente a que la carga aumenta entre mayor sea la cantidad de material que se aloja en la zona de rebaba. La presión de forja se incrementa cuando disminuye el grosor de la rebaba, debido a que esta zona presenta una menor temperatura, y por lo tanto las fuerzas de forja aumentan de manera considerable.

En las estampas para forja se localizan dos zonas: el cordón de matriz, que sigue el contorno de la pieza, y que se define por su espesor ( $\epsilon$ ) y por su anchura ( $\lambda$ ); y el alojamiento de rebaba, que sigue en su contorno al cordón de la matriz, y que se define por su espesor ( $e$ ), por su anchura ( $l$ ), y por el ángulo ( $\alpha$ ), entre el cordón y el alojamiento (Figura 2.2). Tanto el cordón como la rebaba son el desperdicio que es necesario separar de la pieza.

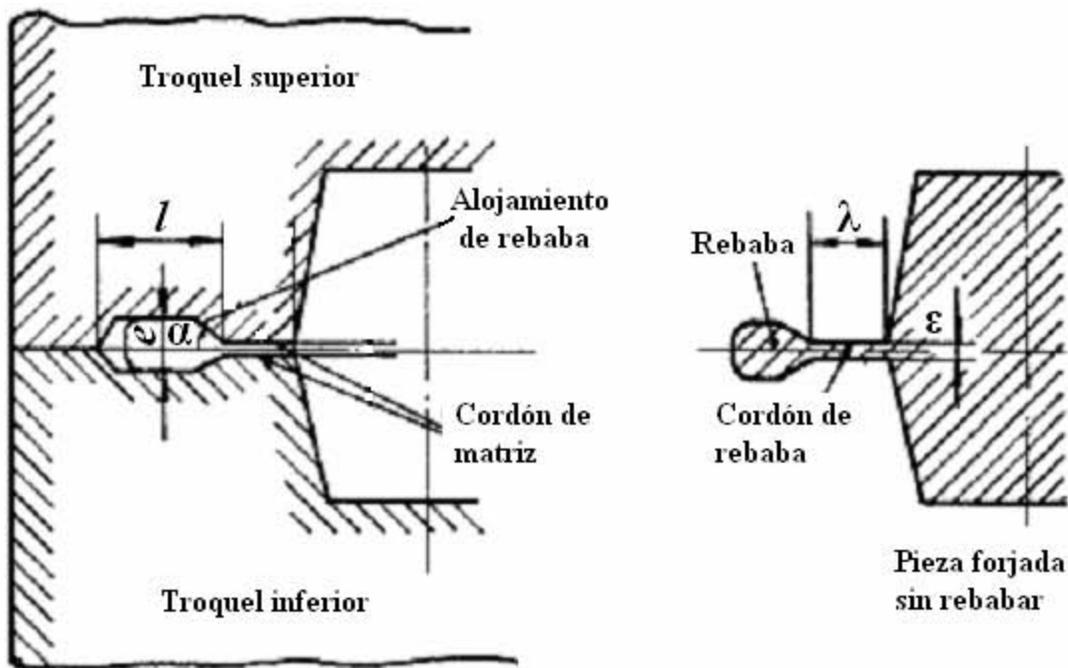


Fig. 2.2 Definiciones en la zona de rebaba (Del Río, 1980)

El alojamiento de la rebaba tiene un mayor grosor que el cordón de la rebaba y provee una cavidad en los dados para el exceso de material. El alojamiento deberá ser lo suficientemente largo para evitar que se llene completamente con el exceso de material. Existen varias geometrías para el alojamiento, pero los cuatro principales se ilustran en la figura 2.3. La elección del tipo de alojamiento de rebaba está determinado principalmente por el equipo a emplear, las propiedades del material a ser forjado, la temperatura de forja y las presiones ejercidas en la cavidad del dado.

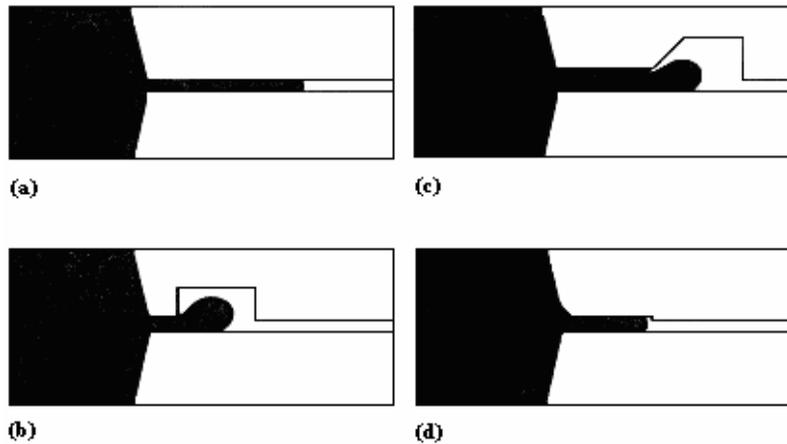


Fig. 2.3 Cuatro diseños utilizados comúnmente para el alojamiento de la rebaba. (a) Paralela, (b) Convencional, (c) Cónico abierto y (d) Cónico cerrado (American Machinist Magazine, 1988)

En los procesos de forja, son normales valores de 1 [mm] a 6 [mm] para el espesor del cordón de rebaba ( $\epsilon$ ), este se obtiene de manera analítica mediante la siguiente expresión:  $8 < (2 \cdot \lambda / \epsilon) < 14$ , se puede calcular una vez determinado el valor de la anchura del cordón ( $\lambda$ ) mediante la tabla 2.5. Para el alojamiento de rebaba, los valores comunes para la anchura y espesor son  $e \approx (2 \cdot \epsilon)$  a  $(3 \cdot \epsilon)$ ,  $l > (8 \cdot e)$  y  $\alpha \approx 30^\circ$ .

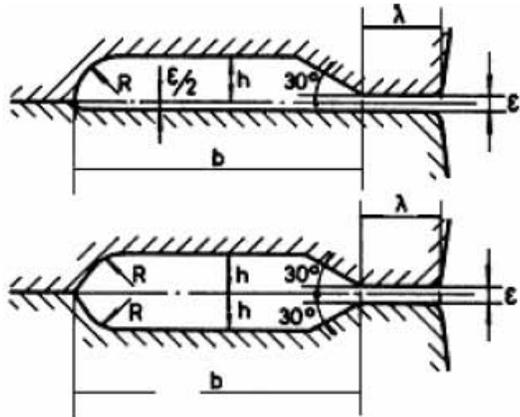
Los valores de  $\epsilon$  y  $\lambda$  deben ser tales, que el rozamiento del material, al atravesar el cordón de la matriz, sobre todo en momentos finales de la deformación, haga aumentar la presión motriz lo suficiente para poder rellenar los huecos y aristas mas complicadas. Una primera aproximación para conocer el valor de  $\lambda$  se puede obtener de la tabla 2.5, donde esta se encuentra en función del ancho de la pieza.

Tabla 2.5 Valores de anchura del cordón en función del diámetro o ancho de la pieza (Del Río, 1980)

Valor del diámetro o anchura mínima [mm]	Valor de anchura del cordón de la matriz $\lambda$ [mm]	
	Prensa	Martillo
40	4	6
50	4.5	6.5
60	5	7
70	5.5	7.5
80	6	8
90	6.5	8.5
100	7	9
120	7.5	9.5
140	8	10
160	8.5	11
180	9	11.5
200	9.5	11.5
220	10	12
240	11	12.5
260	12	13
280	13	14
300	14	15
350	15	16
400	16	18
450	18	19

Otra de las partes fundamentales del proceso es determinar la dimensión del alojamiento de rebaba, lo cual se puede apreciar en la tabla 2.6, de manera que sea suficiente para contener todo el material sobrante.

Tabla 2.6 Dimensiones normales de alojamiento de rebaba (Del Río, 1980)



$\lambda$ (mm)	$h$ y $R$ (mm)	$b$ (mm)
4 a 6	3	20
7	3	22
8	3	24
9	3,5	26
10	4	28
12	5	32
14	6	36
16	8	42

Existen varias formas de determinar las dimensiones del cordón de rebaba, un breve resumen de estas expresiones se puede apreciar en la tabla 2.7, donde el principal factor a considerar en el diseño es la geometría o masa de la pieza a forjar.

Tabla 2.7 Expresiones para determinar las dimensiones del cordón de rebaba (Tomov, 2004)

$\left. \begin{aligned} h_f &= 0.015 D_F \\ \frac{b_f}{h_f} &= \left( 1.34 - \frac{D_F}{600} \right) \left( 3.7 + 0.25 \frac{h_f}{b_f} + 0.44 \frac{h_f^2}{b_f^2} + 0.21 \alpha \right) \end{aligned} \right\} (1)$
$\left. \begin{aligned} h_f &= \frac{0.01 D_F + 1}{0.03 + 100/D_F} \\ b_f &= 5(1 + 0.01 D_F) \end{aligned} \right\} (2)$
$\left. \begin{aligned} h_f &= 0.016 D_F \\ \frac{b_f}{h_f} &= \frac{63}{\sqrt{D_F}} \end{aligned} \right\} (3)$
$\left. \begin{aligned} h_f &= 0.017 D_F + \frac{1}{\sqrt{D_F + 5}} \\ \frac{b_f}{h_f} &= \frac{30}{\sqrt[3]{D_F [1 + 2D_F^2/H_F(2R_C + D_F)]}} \end{aligned} \right\} (4)$
$\left. \begin{aligned} h_f &= 1.13 + 0.089 \sqrt{m_F} - 0.017 m_F \\ \frac{b_f}{h_f} &= 3 + 1.25 \exp(-1.09 m_F) \end{aligned} \right\} (5)$
$\left. \begin{aligned} h_f &= 2.17 + 1.39 m_F^{0.2} \\ \frac{b_f}{h_f} &= -1.985 + 5.258 m_F^{0.1} + 0.0256 \frac{D_F}{H_F} \end{aligned} \right\} (6)$

Donde  $h_f$  es el espesor del cordón de rebaba ( $\epsilon$ ),  $b_f$  es la anchura del cordón de rebaba ( $\lambda$ ),  $D_f$ ,  $H_f$  y  $m_f$  el diámetro, la altura y la masa de la parte a ser forjada respectivamente,  $R_c$  es la distancia del eje de simetría a el centro de gravedad de la sección media,  $h_F$  en la máxima profundidad en la cavidad del dado y  $b_F$  es el ancho de la máxima profundidad en la cavidad del dado.

### 2.3 MANUFACTURA DE LAS ESTAMPAS

La selección apropiada del material del dado y la técnica para la manufactura de este son factores que afectan de manera importante la vida del dado. En la manufactura de los dados de forja, existen tres objetivos principales: la generación de la cavidad en el dado con la mayor rapidez posible, la generación de la superficie requerida en el dado y que la manufactura consiga las tolerancias deseadas. Estos tres puntos son los que se requieren alcanzar con el proceso de manufactura más económico. Sin embargo, estos tres puntos no pueden ser alcanzados de manera simultánea por un proceso de manufactura en particular. Uno de los puntos a considerar para satisfacer estos requerimientos es el tamaño del dado, entre menor es el tamaño del dado, mayor será la dificultad para manufacturarlo.

La mayoría de los dados de forja son fabricados maquinando las impresiones en lingotes de acero. Para algunas aplicaciones, sin embargo, los dados fabricados por fundición han probado ser una alternativa económica. La principal ventaja de los dados por fundición es la disminución de los costos por la manufactura del dado, y esto puede ser alcanzado debido a que la etapa de maquinado puede verse disminuida considerablemente. Usualmente, solo una operación de pulido es necesaria para este tipo de dados. Otra de las ventajas de estos dados, es que las fundiciones no presentan anisotropía, por lo que sus propiedades son mas uniformes. Las desventajas de estos dados se dan sobre las secciones cerca de la cavidad que deben presentar un grosor uniforme para evitar la existencia de altos esfuerzos residuales en la fundición del dado. Además, debido a su baja resistencia, las secciones cercanas a la cavidad deben ser gruesas, y por lo tanto los dados pueden adquirir un tamaño considerable. En la manufactura de dados por fundición se le da una preferencia mayor a los aceros que muestren una tendencia menor a la formación de cristales grandes y a la segregación.

El método mas común para manufacturar los dados son los procesos mecánicos de maquinado, tales como torneado, fresado y esmerilado, el completo maquinado de las cavidades o superficies de trabajo de una estampa solo son posibles de alcanzar con el fresado. Todas las formas básicas pueden ser maquinadas por este método. La cantidad de material a ser removido depende principalmente de la geometría del dado, la geometría de la herramienta de corte (plana, bola, etcétera), de la profundidad y ancho de corte. Mientras que grandes volúmenes de material pueden ser removidos con un mayor eficiencia utilizando herramientas robustas rígidas capaces de altos volúmenes de remoción, superficies con radios pequeños o rápidos cambios en la geometría solo pueden ser maquinados utilizando cortadores largos y delgados, lo cual implica bajos volúmenes de remoción de metal.

Los avances en la Manufactura Asistida por Computadora (CAM), han provocado que los procesos de corte presenten tolerancias mas estrechas, además de que se pueden realizar prácticamente todas las formas posibles. La generación del código CNC permite que los productos obtenidos del fresado sean de una calidad aceptable, en términos de acabado y tolerancias.

Otro proceso que permite la obtención de cavidades para estampas, es el EDM (Electric Discharge Machining). Esta técnica es la más importante de los procesos de corte por remoción eléctrica. La remoción del material esta basado en el efecto erosivo de las descargas eléctricas entre el electrodo y la pieza de trabajo, lo que implica que el material es fundido -en algunos casos evaporado- y removido por la acción simultanea de fuerza mecánicas y eléctricas. La geometría de la estampa es obtenida de la forma final del dado. Todos los materiales que conducen electricidad pueden ser maquinados por electroerosión, independientemente de sus propiedades mecánicas, esta técnica se utiliza cuando los demás procesos no son una opción viable, debido a que la resistencia del material es muy elevada o por que la geometría es difícil de maquinar mediante el fresado. El tiempo necesario para la electroerosión está determinado principalmente por la propiedades físicas del material (materiales con punto de fusión bajos son maquinados con mayor facilidad), la exactitud de la geometría y la superficie requerida.

Una de las ventajas sobre el fresado es que este se puede llevar a cabo una vez que el bloque ya ha sido tratado térmicamente, lo cual reduce el riesgo de distorsión o la aparición de fallas por el calor en áreas críticas. Pero este proceso presenta ciertos inconvenientes, debido al desgaste que sufre el electrodo y que las variaciones dimensionales son altas, además de que el acabado superficial es pobre.

En la actualidad, la tecnología HSC o HSM (High Speed Manufacturing), ha venido a revolucionar la manufactura de las estampas para forja, ya que han venido a sustituir o complementar el proceso de EDM. La comparativa de ambos procesos puede apreciarse en la tabla 2.8.

Tabla 2.8. Comparación de tecnologías de manufactura (Kecelj, 2004)

<b>Criterio</b>	<b>EDM</b>	<b>Fresado HSC</b>
Materiales	Todos los materiales conductores	Todos los materiales
Geometría	Libre	Radios y profundidades limitadas
Dimensiones alcanzables	Radios <0.1 mm pueden obtenerse	Radios en el fondo >0.3 mm, radios en pared >0.1 mm
Profundidades alcanzables	Depende del electrodo	De la relación L/D <10
Acabado de superficie	Siempre requiere de acabados posteriores	+, parcialmente no requiere de acabados posteriores
Costos de maquinado adicionales	Alto	Bajo
Contaminación de superficie	Si	No
Modificación de textura	Micro grietas	Compresión
Precisión geométrica	+	++
Pre-maquinado	EDM de desbaste	Economía = f (costos de maquinado, volumen)
Herramienta de maquinado	Costoso (Fresado)	Bajo, producto standard

Las ventajas que presenta la tecnología HSC en lo referente al fresado contra la técnica de EDM se encuentran el ahorro de energía, el ahorro del constante monitoreo del electrolito con el EDM. La introducción de esta técnica reduce drásticamente los tiempos de manufactura.

## CAPÍTULO 3

# CONSIDERACIONES PARA LA OPTIMIZACIÓN DE LA VIDA DE LA ESTAMPA

### 3.1 GEOMETRÍA DE LA ESTAMPA

La vida de servicio de la estampa influye de manera importante en los costos de manufactura, en la productividad y en la calidad del producto. Durante la forja en caliente, la vida del dado se ve dramáticamente afectada por los ciclos térmicos, el excesivo flujo de metal y la disminución de la dureza del dado. En la industria de la forja, los costos de herramienta pueden alcanzar hasta un 50 % del costo total del producto.

Los dados de forja pueden presentar varias fallas, tales como abrasión, desgaste, fatiga térmica y mecánica, deformación plástica y la formación de grietas (Figura 3.1). Una investigación estadística de fallas en dados de forja, arrojó como resultado que aproximadamente el 60% de las fallas se deben a los distintos tipos de desgaste, la formación de grietas aproximadamente un 25% y la deformación plástica un 5%. El desgaste es un cambio gradual en las dimensiones o forma de los componentes causadas por corrosión, abrasión, remoción y transporte de productos del desgaste.

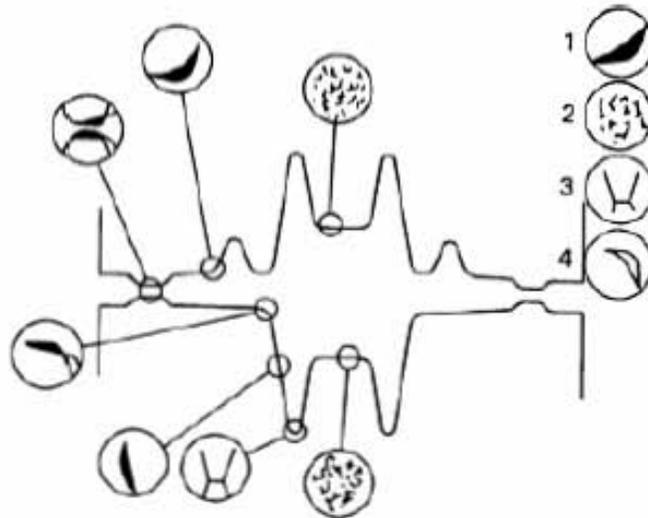


Figura 3.1 Fallas comunes en un dado de forja. 1. Abrasión, 2. Fatiga térmica, 3. Fatiga mecánica, 4. Deformación plástica (ASM International, 1988)

La fatiga térmica se presenta principalmente por la expansión no uniforme del dado debido a los gradientes de temperatura de la superficie al centro del dado. Un material con alto coeficiente de conductividad térmica hace a los dados menos propensos a este efecto debido a que retira rápidamente el calor en la superficie, reduciendo de manera considerable los gradientes de temperatura y por consiguiente los esfuerzos de expansión/contracción.

La abrasión resultante de la fricción es el mecanismo más importante de desgaste. Entre mayor sea la resistencia y dureza del dado cerca de la superficie, mayor será la resistencia a la abrasión.

La fatiga mecánica de las estampas se encuentra afectada por las cargas aplicadas, la temperatura promedio del dado y la condición de la superficie del dado. Las fallas de fatiga mecánica principalmente tienen su origen en las zonas donde los esfuerzos son mayores, como lo son las cavidades con radios de curvatura agudos, cuyo efecto en el proceso de fatiga es similar al de las muescas.

La deformación plástica en los dados se debe a que los aceros disminuyen su esfuerzo de fluencia a altas temperaturas. Sin embargo, el esfuerzo de fluencia depende también del tratamiento térmico, la composición y la dureza. Por lo tanto, entre mayor sea su dureza inicial, mayor será el esfuerzo de fluencia a diferentes temperaturas. En las aplicaciones de formado de metales, el dado es endurecido a un nivel en el cual tenga la suficiente tenacidad para evitar la formación de grietas en la superficie.

Las consideraciones geométricas que se realizan en el proceso de forja son de gran relevancia, ya que con éstas se busca optimizar la vida de la estampa y reducir las presiones de trabajo, esto se puede lograr evitando que en el dado existan zonas que puedan actuar como concentradores de esfuerzos.

El flujo de metal está influenciado de gran manera por la geometría de la pieza. En la medida de lo posible, el juego de dados debe ser diseñado para influenciar un flujo de metal suave. Formas con secciones delgadas y largas o proyecciones (costillas y membranas) son de mayor dificultad para llenar debido a que presentan una mayor superficie por unidad de volumen, y por lo tanto los efectos de temperatura y fricción se hacen más evidentes. La terminología utilizada para describir un dado se encuentra en la figura 3.2.

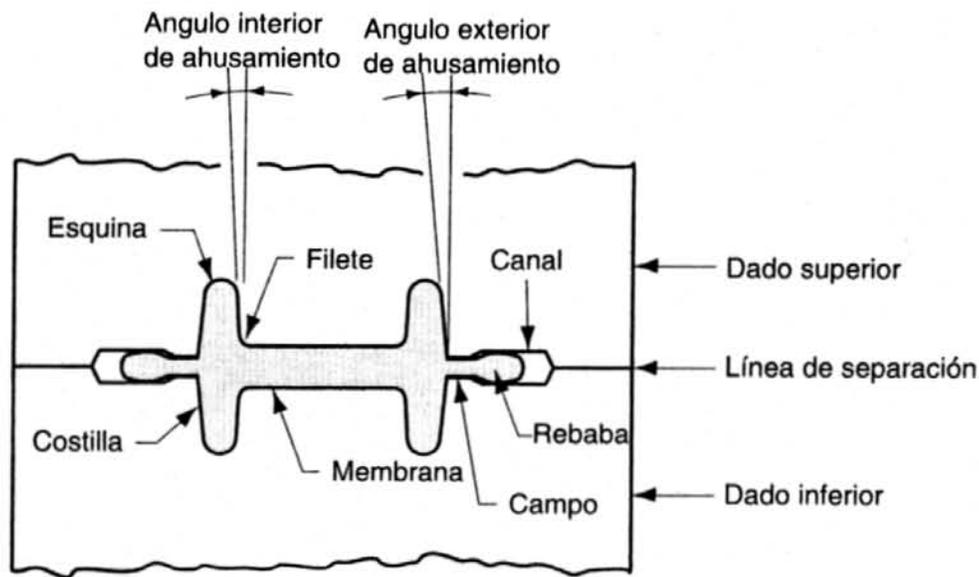


Figura 3.2 Terminología para un dado convencional en forjado (Groover, 1997)

Son varias las consideraciones geométricas que se tienen que tomar en cuenta para el correcto diseño de una estampa, el diseño de la cavidad en los dados de preforma es el paso de mayor dificultad en el proceso. Un correcto diseño asegura que el flujo de metal no presente defectos, un completo llenado y una mínima pérdida de material en la rebaba. El éxito en esta etapa, depende de la capacidad del diseñador de entender el flujo de metal durante el proceso. De tal manera, que el flujo de metal se puede dividir en dos tipos: extrusión (flujo en dirección del movimiento del dado) y aplastamiento (flujo perpendicular a la dirección del dado en movimiento).

Para el diseño del dado, en primer lugar se tiene la elección de la línea de separación o partición, que consiste en el plano que divide la parte superior del dado de la parte inferior, la importancia del posicionamiento de la línea es realmente considerable y requiere de la experiencia del diseñador. Para su posicionamiento se tienen que tomar en cuenta los siguientes puntos: la línea debe dividir la forja en dos mitades de igual profundidad, tiene que facilitar la operación de desbarbado, debe de estar en un plano cuando es posible, ya que esto facilita la manufactura del dado, debe de ser colocada de tal manera que facilite el flujo de metal y reduzca los posibles defectos.

Los filetes y los radios de las esquinas tienden a limitar el flujo de metal e incrementar la resistencia en la superficie del dado cuando son muy pequeños, por lo tanto se tiene que realizar el pertinente ajuste geométrico, con la ayuda de Elemento Finito se puede cuantificar este efecto y se puede tomar una mejor decisión. El ángulo de salida o ahusamiento es el grado de inclinación que se requiere en los lados de la pieza para poder retirarla del dado. Los ángulos típicos de salida son  $5^\circ$  a  $7^\circ$  para partes de acero. Estos ángulos pueden ser disminuidos si el proceso cuenta con extractores, además de que las forjas que pretenden reducir los procesos de maquinado tienen que lograr que estos ángulos tiendan a cero.

En la figura 3.3 se observan las consideraciones que se tienen que realizar en el dado desde el punto de vista geométrico, la imagen ha sido generada por un software llamado *KBE hot forging*®, su función es que al proveerle una figura, éste genera la geometría del dado en el cual se puede llevar a cabo la forja, toma en cuenta todas las consideraciones relacionadas a la geometría y se puede convertir en una herramienta indispensable para los diseñadores.

En la figura 3.3.0 se observa la pieza que se quiere obtener mediante el proceso de forja ya maquinada; en la figura 3.3.1 se realiza un corte transversal a la pieza para observar a detalle las modificaciones que se realizan; en la figura 3.3.2 se observa el primer cambio, se suprime la zona el color rojo debido a que esta no permitiría la salida del dado una vez terminado el proceso; en las figuras 3.3.3 y 3.3.4 se agregan las tolerancias de maquinado y de forja respectivamente; en la figura 3.3.5 se suprimen las secciones estrechas, esto debido a la complejidad de llenar las cavidades mediante el proceso, se opta por generarlas posteriormente mediante el maquinado, además del hecho de que el llenado de estas secciones genera un aumento de la fuerza de forja; en la figura 3.3.6 se agregan los ángulos de salida; en la figura 3.3.7 se añaden los radios y filetes que permitan un flujo de metal suave y favorezcan el completo llenado de la cavidad; en la figura 3.3.8 se agregan las costillas y finalmente en la figura 3.3.9, se puede observar la geometría de la pieza que puede ser forjada.

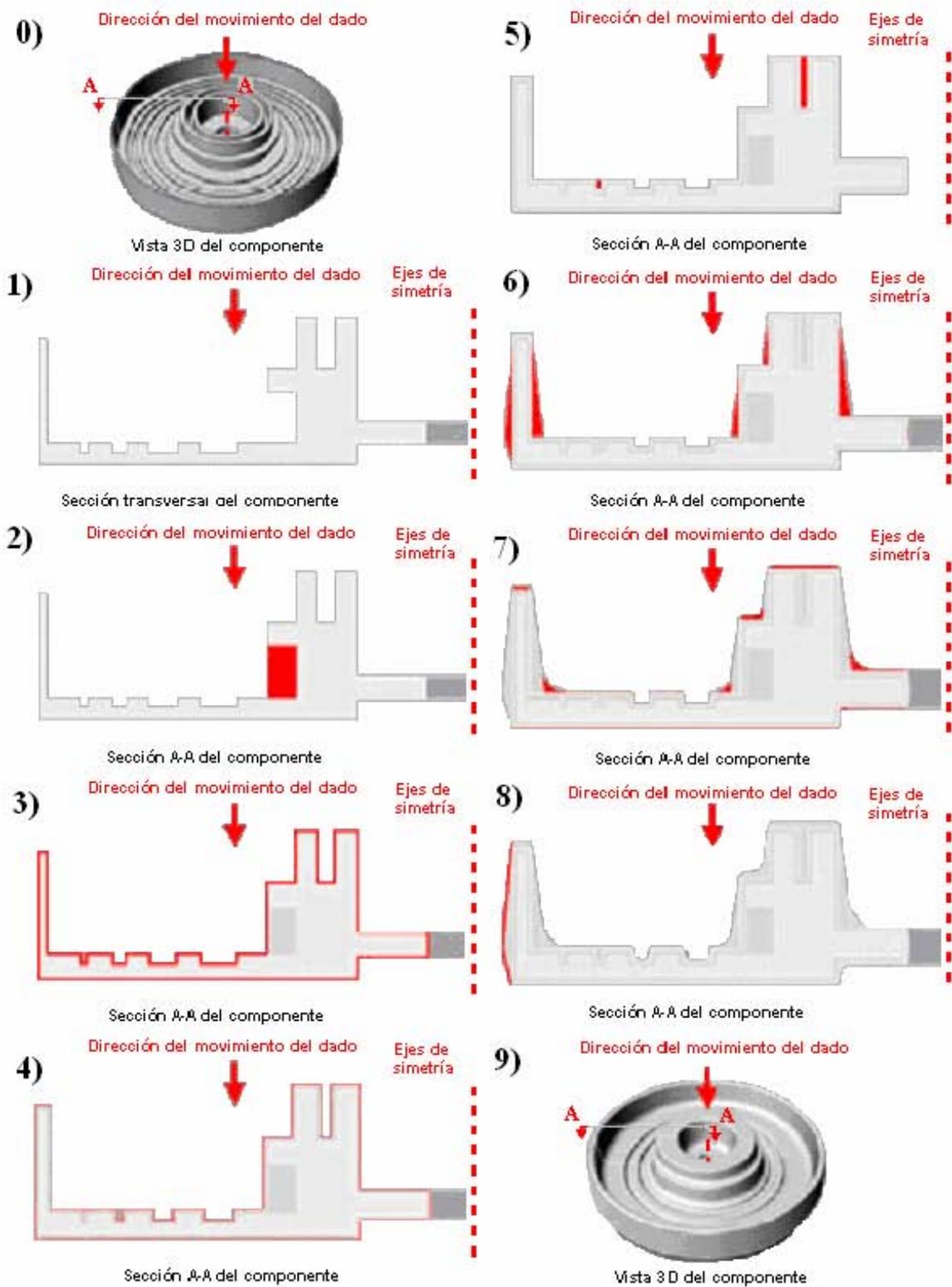


Figura 3.3 Transformaciones geométricas, (0) Componente geométrica, (1) Sección transversal A-A, (2) Corte, (3) Tolerancia de maquinado, (4) Tolerancias de forja, (5) Secciones estrechas, (6) Ángulos de salida, (7) Radios y filetes, (8) Costillas y (9) Geometría que puede ser forjada (Mynors, 2006)

### 3.2 RECUBRIMIENTOS Y TRATAMIENTOS LOCALIZADOS

En la actualidad, uno de los procedimientos más utilizados en la industria para alargar la vida de servicio del dado, consiste en la adición de recubrimientos en la superficie, esto se ha logrado realizar con la técnica llamada PVD (Deposición Física de Vapor), que consiste en que estos recubrimientos pueden evaporarse con la aplicación del calor suficiente, y los átomos y moléculas liberadas se alejan de la fuente en todas direcciones, cuando llegan al rango de atracción atómica de la pieza de trabajo (sustrato) se condensan en ésta.

Capas delgadas y duras de recubrimientos son empleadas hoy en día en una gran cantidad de aplicaciones con el objetivo de reducir la fricción y desgaste de herramientas. Por algunos años, recubrimientos tales como TiN y CrN han sido aplicados a herramientas, dados y partes mecánicas para aumentar la vida útil y su desempeño, ya que proporcionan una alta dureza, buena resistencia y estabilidad química. Otros recubrimientos utilizados en los dados para forja son: TiN/Ti(C,N), (Ti,Cr)N, (CrN/TiN)X3, (Cr, CrN)X3, (TiN/(Ti,Al)N) entre otros. Recientemente, el recubrimiento TiN/(Ti, Al)N se perfila como un candidato para producir capas de recubrimiento duro, debido a que ha mostrado excelentes propiedades, especialmente a altas temperaturas.

La combinación de nitruración y los recubrimientos PVD consisten en la técnica que en el futuro será el próximo paso para la mejora de las estampas, a esta técnica se le conoce como tratamiento duplex. La nitruración de la superficie de la estampa provee un mejor soporte mecánico para el recubrimiento que la superficie original de la herramienta. La combinación de nitruración y los recubrimientos PVD incrementan la resistencia a la fatiga térmica debido a los altos esfuerzos residuales. Una forma posible de alcanzar una alta dureza en combinación con una alta resistencia a la fractura es el uso de varias capas de diferentes recubrimientos. Estos presentan una mayor resistencia a la fractura que la correspondiente capa inicial, debido a que las fallas tienden a bifurcarse en las intercaras (Panjan, 2002).

En aras de mejorar el desempeño de los dados de forja mediante el incremento de la vida de la herramienta, el objetivo es hallar una superficie optimizada de la herramienta que sea adaptada localmente. Una forma de alargar la vida de la estampa, es mediante el uso de FEM o en experiencias previas. Una vez localizadas las zonas donde se presentan los mayores esfuerzos y donde se prevé que pueda presentarse el máximo desgaste en la herramienta, se trata de mejorar las propiedades de esas zonas en particular, esto se puede lograr mediante recubrimientos o tratamientos superficiales por láser, pero también existen los tratamientos mecánicos uno de ellos es el “Hard Roller Burnishing” (Figura 3.4), que consiste en hacer pasar una esfera de cerámico sobre la superficie a optimizar a una velocidad constante, con esto se logra un endurecimiento ya que se inducen esfuerzos residuales de compresión altos en la superficie, las investigaciones arrojan que este tipo de procedimiento es capaz de aumentar la vida útil del dado en un porcentaje considerable, claro que esto depende de las características del proceso, la opción de este tipo de tratamiento superficial es interesante, pero la ventaja de los recubrimientos se encuentra también en que inhiben el desgaste en la herramienta, así que la elección del tratamiento superficial a utilizar se encuentra determinado por las necesidades del proceso.

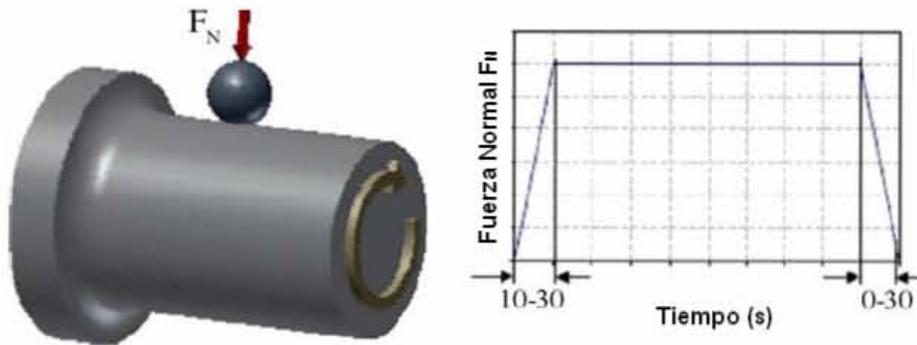


Figura 3.4 Hard Roller Burnishing (Wagner, 2006)

### 3.3 TRIBOLOGÍA

Los factores que estudia la tribología son la fricción entre dos cuerpos en movimiento, el desgaste como efecto natural de la fricción y la lubricación como un medio para evitar el desgaste. En el formado de metales, el flujo de metal es provocado por la presión transmitida de los dados a la pieza de trabajo, por lo cual, las condiciones de fricción en la superficie de contacto pieza-dado tienen una gran influencia en la manera en la cual se comportará el flujo de metal, la formación de la superficie y defectos internos, los esfuerzos a los cuales se tiene que someter el material y a los requerimientos de carga y energía. Fricción se define como la resistencia cuando un cuerpo se desliza sobre otro. En los procesos de formado de metales, esto se presenta cuando la pieza de trabajo se desliza contra el dado.

Los factores principales que afectan la vida del servicio del dado son los tratamientos superficiales y los lubricantes. El papel de los lubricantes es reducir la fricción entre el dado y la pieza de trabajo, además de reducir la transferencia de calor entre la pieza de trabajo y el dado durante el proceso de formado. Los factores a considerar para la selección del lubricante y su aplicación son los siguientes:

- La separación de las superficies de la herramienta y la pieza de trabajo
- La capacidad de controlar la fricción
- La prevención de la adhesión de las superficies
- El control del acabado superficial
- El control de las temperaturas de la superficie
- No tener acción abrasiva, así como reducir la erosión en la superficie.
- La facilidad de aplicación y remoción
- Un bajo costo, un manejo sencillo y la seguridad

La presión requerida para la deformación genera un esfuerzo normal a la superficie del dado, y el movimiento de la pieza de trabajo relativo a la superficie del dado genera un esfuerzo cortante. Por lo tanto, una clásica situación de tribología surge, con la fricción en la superficie de contacto, y el potencial desgaste en los materiales del dado y la pieza de trabajo. La mitigación de estos efectos implica la introducción de un lubricante.

El éxito o fallo del lubricante tiene consecuencias importantes en la calidad de la producción de la pieza, así como también en las presiones, fuerzas y requerimientos de energía. Por estas razones, el campo de fricción, lubricación y desgaste (tribología) en el trabajo de metales ha sido objeto de diversas investigaciones. Si se presenta el caso en el cual la fricción pueda llegar a tomar valores considerables, esto repercute de manera directa en la calidad de la pieza y en las presiones requeridas por el proceso, ya que mucha de la energía se utilizaría para vencer estas fuerzas y por consiguiente las necesidades del proceso serían mayores.

Cuando la geometría del proceso de deformación es favorable, un lubricante viscoso puede formar una capa continua de lubricante que separa la superficie de la herramienta y la pieza de trabajo. La mayoría de los lubricantes en los procesos de formado son líquidos o están disueltos o dispersos en un líquido por una variedad de razones, entre las cuales destaca la complejidad de agregar de manera uniforme un lubricante sólido. La generación de calor en el proceso tiene que ser retirada, y los sólidos lubricantes presentan el inconveniente de que tiene que ser colocado en la superficie de contacto de la herramienta y la pieza de trabajo, por lo tanto, la utilización de los líquidos en estos procesos es mayor, debido a su facilidad de poder producir capas de lubricante.

El lubricante mas utilizado para el proceso de forja es el grafito, un lubricante sólido, que es rociado dentro del dado o pieza de trabajo antes del proceso, o bien, puede estar disuelto en un líquido, como puede ser agua o aceite, esto debido a lo expuesto con anterioridad, por lo regular, en los procesos de forja el grafito se encuentra disuelto en agua. El coeficiente de transferencia de calor de la pieza de trabajo al dado, tiene distintos valores de acuerdo con el tipo de grafito.

Para determinar la eficiencia de un lubricante y para ser capaces de predecir las presiones de formado, es necesario expresar la fricción en términos cuantitativos, en términos de un factor. Este factor es conocido como coeficiente de fricción ( $\mu$ ), que puede tomar los siguientes valores:  $0 \leq \mu \leq 1$ , este coeficiente de fricción para el formado en caliente de aceros con la utilización de grafito como lubricante (ya sea en base agua o aceite) presenta un valor de  $m$  que va de 0.2 a 0.4.

La fricción y el desgaste se encuentran en función de la topografía de la superficie. En el caso de lubricación, especialmente con líquidos, las superficies de la pieza de trabajo y de la herramienta tienen que transportar el suficiente lubricante en la zona de formado. Al mismo tiempo, tiene que ser capaz de retener el suficiente lubricante para evitar la formación de efectos hidrostáticos e hidrodinámicos de lubricación que permiten al lubricante fluir en las zonas de contacto de la herramienta y la zona de trabajo. Las superficies extremadamente lisas son utilizadas por lo regular en los dados de forja en frío, aunque esto no favorezca la transportación y distribución del lubricante, pero debido a que este tipo de forja se utiliza como un paso final, se busca que el acabado sea el mejor posible.

En este contexto, una superficie ideal debe presentar valles con una microgeometría apropiada en donde el lubricante pueda ser retenido. Esto implica la entrega de lubricante durante la deformación, actuando así como bolsas de lubricante. La textura de la superficie

puede mejorar el estado tribológico por la aparición de estas bolsas. En la actualidad, se ha logrado producir estas bolsas en la superficie de la herramienta mediante la utilización de un láser (Figura 3.5), esto se puede lograr en superficies con o sin la presencia de recubrimiento.

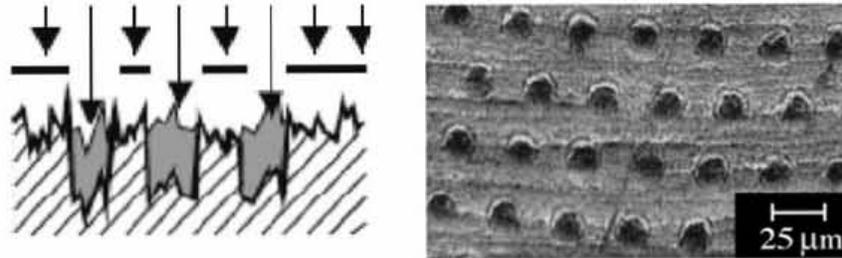


Figura 3.5. Bolsas de lubricante generadas en la superficie de la herramienta (Wagner, 2006)

Los factores más importantes que afectan la vida de servicio de un dado son el tratamiento superficial, así como la elección y aplicación del lubricante, ya que estos se encuentran relacionados con el reblandecimiento. En adición, la selección del lubricante ideal para extender la vida del dado tiene como consecuencia la reducción de la transferencia de calor de la pieza del trabajo hacia el dado.

### 3.4 TRANSFERENCIA DE CALOR EN LA ESTAMPA

La temperatura máxima así como la distribución de la temperatura tienen una influencia significativa en el desgaste. La máxima temperatura determina la dureza de la superficie de la herramienta, mientras que el gradiente de temperaturas provoca variación dimensional, lo cual genera esfuerzos y deformaciones.

Durante la forja en caliente, la superficie del dado es calentada en parte por la conducción entre la herramienta y la pieza de trabajo, y en parte por la fricción entre el dado y la pieza de trabajo. Una parte del calor generado permanece en el material deformado, una cantidad fluye hacia la herramienta, mientras que una cantidad fluye hacia la parte del material que no presenta deformación.

La máxima temperatura en la superficie de la herramienta está influenciada por los siguientes parámetros:

- Temperatura inicial del material y del dado
- Generación de calor provocada por la deformación plástica y la fricción existente en la interfase material-dado
- Transferencia de calor entre el material a deformar y las estampas

El valor del choque térmico en servicio es de extrema importancia. Por choque térmico, se entienden los repetidos y abruptos calentamientos y enfriamientos que ocurren en ciertas herramientas. Hay algunas operaciones, por ejemplo la penetración, en la cual las temperaturas son tan altas y el tiempo de contacto tan prolongado, que la herramienta se

calentaría rápidamente por encima de su temperatura de recocido si no fuera enfriada. Ningún acero permanecería duro bajo tal servicio y por lo tanto es necesario enfriar la herramienta después de producir cada pieza, por lo general con agua. Dado que el calentamiento más intenso está en la superficie extrema, este calentamiento y enfriamiento repetido provoca el efecto de dilatar y contraer rápidamente la capa superficial. De lo anterior se puede llegar a tener como consecuencia el desarrollo en la superficie de la herramienta de grietas por calor, esta es una forma de la llamada fatiga térmica. (Palmer, 1986)

La expansión no uniforme, causada por los gradientes de temperatura desde la superficie hasta el centro del dado, es el principal factor que contribuye al agrietamiento por calor. Por lo tanto, un material con una alta conductividad térmica provocará que los dados estén menos propensos a este fenómeno por la rápida conducción de la temperatura desde la superficie del dado, reduciendo los gradientes de temperatura y disminuyendo los esfuerzos de expansión y contracción. Las magnitudes de los esfuerzos térmicos causados por la expansión no uniforme o los gradientes de temperatura también dependen del coeficiente de expansión térmica del acero, entre mayor sea este coeficiente, mayores serán los esfuerzos. Un método utilizado para mitigar este efecto se da en torno al calentamiento de los dados, por lo tanto, se recomienda que estos sean precalentados a una temperatura que se encuentre en el rango de 260 a 315 °C.

Las temperaturas desarrolladas en el proceso influyen en las condiciones de lubricación, la vida del dado y las propiedades finales del producto, y la más determinante es que determina la máxima velocidad de deformación a la que se puede llevar a cabo el proceso sin causar daño excesivo en el dado. Por lo tanto, las temperaturas generadas durante la deformación plástica influyen de manera importante en la productividad del proceso de formado.

## CAPÍTULO 4

# SOLUCIÓN POR ELEMENTO FINITO DEL MODELO DE ESTAMPA

### 4.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La aplicación de softwares de diseño y manufactura en ingeniería (CAE/CAD/CAM), es esencial en el formado de metales en la actualidad. Por lo tanto, el modelado del proceso y la comprensión de la deformación se han posicionado como las variables principales de la investigación, el Método de Elemento Finito (FEM) ha adquirido una gran importancia, ya que se ha convertido en una herramienta en el modelado de los procesos de formado. La aplicación de FEM en los problemas de formado de metales comenzaron como extensión del análisis estructural para el rango de deformación plástica.

En esta parte del trabajo se busca ejemplificar la importancia del FEM en el análisis de los procesos de deformación plástica, tratando de diseñar la zona de rebaba de una pieza mecánica (biela) que es fabricada mediante forja en estampa, con este ejemplo se pretende obtener las dimensiones ideales de la zona de rebaba que permitan garantizar el completo llenado de la cavidad, la nula presencia de defectos (pliegues, grietas o malformaciones) y la optimización del equipo empleado.

Las bielas son componentes que están sometidos a altas cargas dinámicas utilizadas para la transmisión de potencia en los motores de combustión interna. Debido a las exigencias a las cuales se encuentran sometidas, su producción mediante el proceso de forja es lo más común, aunque también se pueden obtener de fundición y actualmente mediante la metalurgia de polvos. Los materiales más comunes utilizados para estos componentes son los aceros AISI 1040, 3141 y 4340. El proceso de manufactura de estos componentes está configurado por una serie de pasos (Figura 4.1). Se parte de una barra sólida, posteriormente ésta se somete a un proceso de forja con rodillos, una vez terminado se lleva a cabo el proceso de forja en estampa, que se encuentra dividido en 3 etapas, es en esta parte en la cual se centrará el estudio.

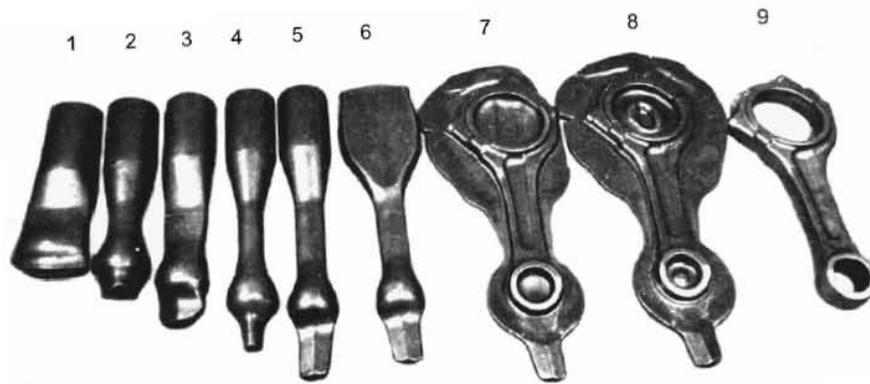


Figura 4.1 Pieza de trabajo después de su etapa de formado (de derecha a izquierda) 1-5: forja con rodillo, 6: recalcado, 7-8, Forja, 9: remoción de rebaba (Krempaszky, 2005)

El diseño de un proceso de forja en estampa es complejo, en este caso se parte de la premisa de obtener la geometría deseada en tres etapas, mediante procesos racionales que eviten la formación de defectos, por lo cual la geometría de los dados formadores adquiere una gran relevancia. Durante el diseño de las preformas se tiene que establecer la adecuada distribución del metal. Con el correcto diseño de estos dados se presenta un flujo de metal libre de defectos y el completo llenado de la estampa puede ser alcanzado en la operación de acabado, además de que la pérdida de metal mediante la rebaba puede ser minimizada, lo cual trae como consecuencia que la etapa de maquinado sea reducida.

En la fabricación de una biela, el proceso de forja se divide en tres etapas: recalcado, preparación y acabado (Figura 4.2). En la etapa de recalcado el propósito principal consiste en reducir las alturas para la próxima etapa, en la etapa de bloqueo, que es la que precede inmediatamente de la impresión final, sirve para proporcionar una forma final, omitiendo aquellos detalles que restringe el flujo de metal en el acabado e incluyendo aquellos que permitan un flujo de metal suave y se garantiza el llenado de la impresión final. En el acabado se brinda la forma final total de la pieza de trabajo, es en esta etapa en donde cualquier exceso de metal es desalojado en la rebaba.

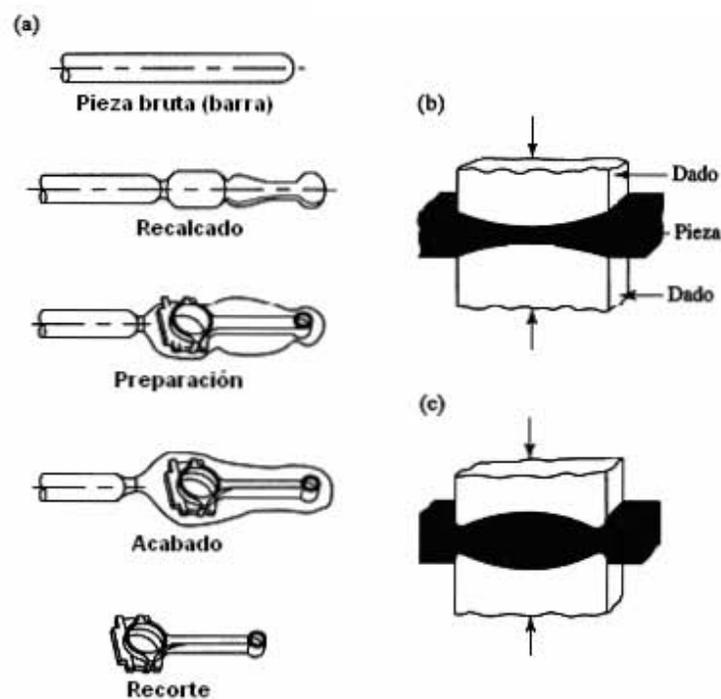


Figura 4.2 Etapas de forjado de una biela para motor de combustión interna. Obsérvese la cantidad de rebaba que se requiere para asegurar el buen llenado de las cavidades del dado. (b) Operaciones con dado convexo y (c) con dado cóncavo para distribuir el material (Kalpakjian, 2002)

La determinación de la configuración de preformas tiene una dificultad considerable, una forma de solucionarlo es mediante la experiencia del diseñador, en la actualidad, esto se puede lograr mediante la utilización de paquetería de elemento finito, ya que con esta herramienta se conoce el comportamiento del flujo de metal durante el conformado, lo cual conlleva la eliminación de defectos en la pieza.

#### 4.1.1 DETERMINACIÓN DE DIMENSIONES DE ESTAMPA

Para la determinación de las dimensiones ideales de la zona rebaba, se considera la sección transversal en el cuerpo de la biela (Figura 4.3).

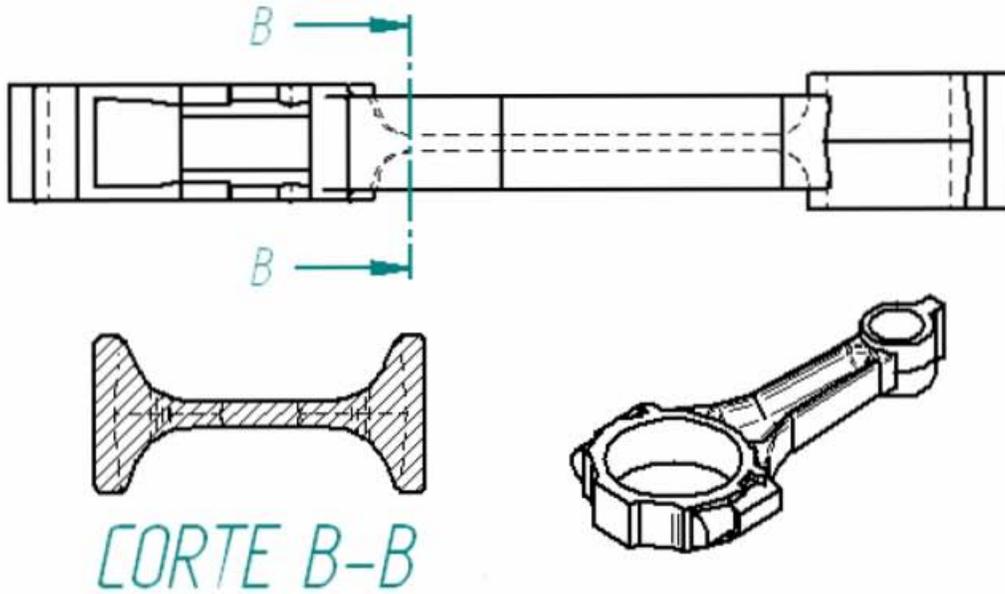


Figura 4.3 Sección de estudio

Para la determinación de las contracciones del material de trabajo en la zona B-B, se utiliza la figura 4.4, estas contracciones tendrán que estar consideradas en el maquinado de la estampa.

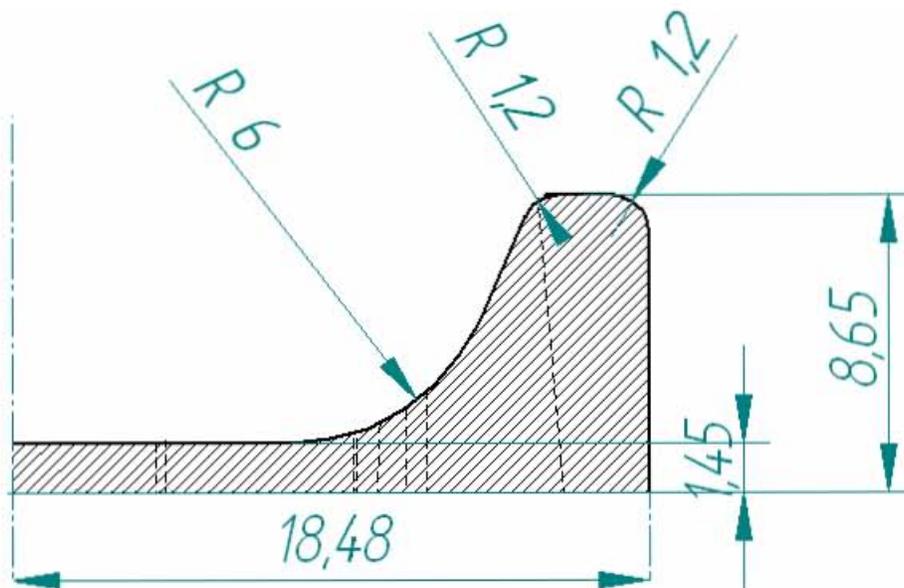


Figura 4.4 Dimensiones de la sección B-B

Para la manufactura de la biela, se considera que la temperatura en la etapa inicial del proceso es de alrededor de 1100 °C, mientras que en la última etapa es de 900 °C. Se calculan las contracciones lineales que presentará el material a esta temperatura, para poder compensarlas con la manufactura de la estampa, esto se calcula con la siguiente relación:

$$\Delta l = l_0 \times (\alpha) \times (\Delta T)$$

Donde:

$\alpha$  = Coeficiente de expansión térmica a 1000 °C = 14.7 [ $\mu\text{m}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ ]

$\Delta T$  = 900 [ $^\circ\text{C}$ ]

$$l_1 = 8.65 \times (14.7 \times 10^{-6}) \times (900)$$

$$l_1 = 0.1144$$

$$l_{1c} = 8.65 + 0.1144 = 8.76[\text{mm}]$$

$$l_2 = 18.48 \times (14.7 \times 10^{-6}) \times (900)$$

$$l_2 = 0.2444$$

$$l_{2c} = 18.48 + 0.2444 = 18.72[\text{mm}]$$

$$l_3 = 1.45 \times (14.7 \times 10^{-6}) \times (900)$$

$$l_3 = 0.0191$$

$$l_{3c} = 1.45 + 0.0191 = 1.47[\text{mm}]$$

#### 4.1.2 DISEÑO DE LA CAVIDAD DE LA REBABA

Para la determinación de las dimensiones del cordón de rebaba, de la tabla 2.5 se obtiene  $\lambda$  en función de la anchura mínima de la pieza, dando como resultado  $\lambda = 4$  [mm]. Utilizando la siguiente relación:

$$8 < (2 \cdot \lambda / \varepsilon) > 14$$

Se obtiene que  $\varepsilon = 1$  [mm] en el límite inferior y  $\varepsilon = 0.571$  [mm] en el superior. De lo anterior se considera el valor de  $\varepsilon = 1$  [mm] como el valor a utilizar, debido a que no son recomendables valores de  $\varepsilon < 1$ . Dado el caso de que el valor de  $\varepsilon$  en ambos límites sean menores a 1, se recomienda la utilización de  $\varepsilon = 1$ .

Para el alojamiento de rebaba, se utiliza la tabla 2.6, donde se obtienen h, R y b en función de  $\lambda$ , de lo cual se obtiene que h = 3 [mm], R = 3 [mm] y b = 20 [mm]. Las dimensiones de la zona de rebaba se pueden apreciar en la figura 4.5.

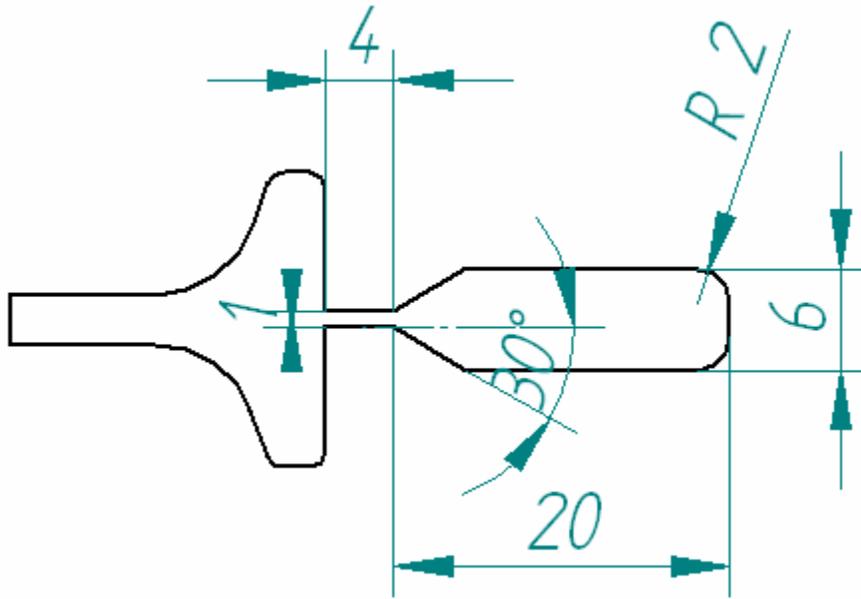


Figura 4.5 Dimensiones de la zona de rebaba

El propósito del trabajo es determinar las dimensiones de rebaba ideales, se presenta el caso en el que de manera analítica se obtiene que  $\varepsilon = 1$  [mm], mientras que en la pieza forjada, se presenta un valor de  $\varepsilon = 3$  [mm]. Debido a esta diferencia, se realizará la simulación del proceso considerando un valor de  $\varepsilon = 1, 2$  y  $3$  [mm]. Independientemente del espesor del cordón de rebaba, las demás dimensiones de la zona no varían.

#### 4.1.3 PROPIEDADES DEL MATERIAL

Para el caso de estudio, se determinó la utilización de un acero SAE 1151, debido a que es uno de los materiales utilizados para la manufactura de las bielas. La composición y propiedades del acero utilizadas en la simulación se enlistan en las tablas 4.1 y 4.2:

Tabla 4.1. Componentes del acero SAE 1151

Componente	Valor Min	Valor Max
Carbono, C	0.48	0.55
Manganeso, Mn	0.7	1.0
Fósforo, P		0.045
Azufre, S	0.08	0.13

Tabla 4.2. Propiedades del acero SAE 1151

Propiedades	Valor
<b>Físicas</b>	
Densidad, kg/m <sup>3</sup>	7870
<b>Mecánicas</b>	
Modulo de Elasticidad [GPa]	200
Coefficiente de Poisson	0.3

Los datos de plasticidad del material a la temperatura de trabajo de 1000 °C, se obtienen de la siguiente figura:

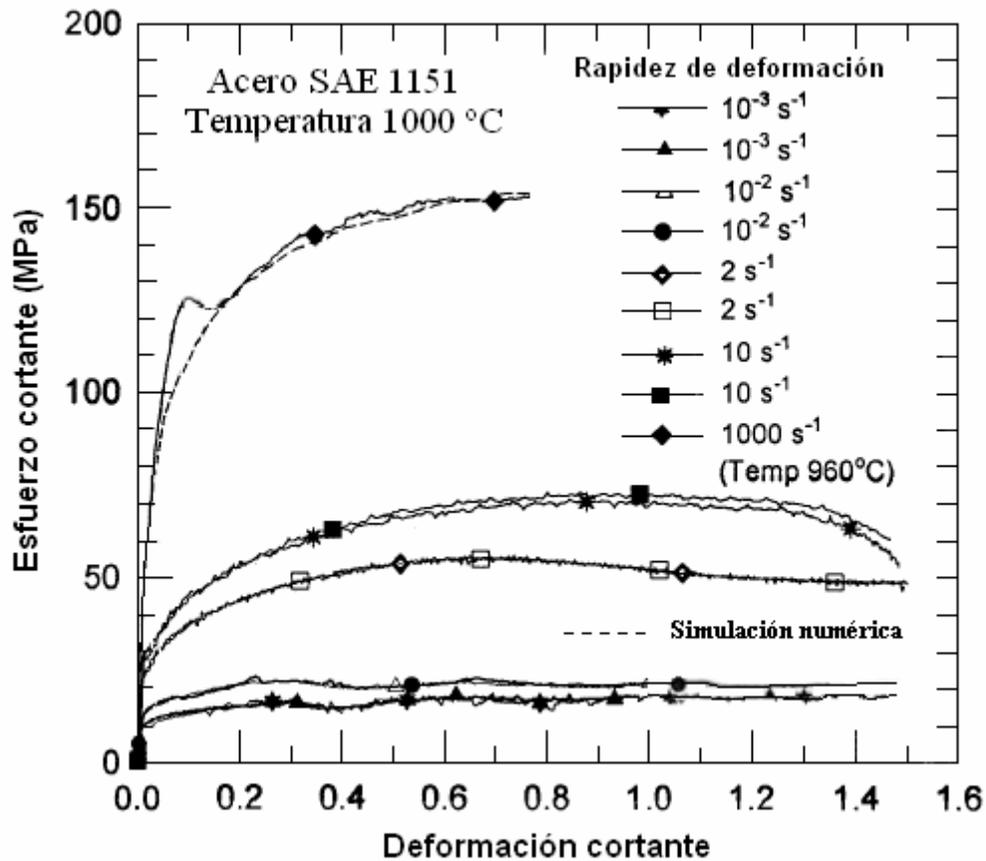


Figura 4.6 Curvas esfuerzo-deformación del acero SAE 1151 a distintas rapidez de deformación (Gilat, 1994)

La curva esfuerzo-deformación de la figura 4.6, se obtuvo mediante un ensayo de torsión. Se utiliza este ensayo debido a que no presenta la problemática de la formación del cuello en la probeta, por lo tanto, deformaciones mayores pueden ser alcanzadas. El estado de esfuerzos en torsión puede ser representativo del estado típico de esfuerzos en los procesos de conformado. Debido a estas condiciones, el ensayo de torsión es utilizado frecuentemente para obtener el esfuerzo de fluencia y la curva esfuerzo-deformación bajo las condiciones de trabajo en caliente.

Estos valores de esfuerzo cortante ( $\tau$ ) y deformación cortante ( $\Gamma$ ) son convertidos típicamente en esfuerzo efectivo,  $\bar{\sigma}$ , y deformación efectiva  $\bar{\varepsilon}$ , por medio del criterio de von Mises:

$$\bar{\sigma} = \sqrt{3}\tau$$

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\Gamma}{\sqrt{3}}$$

La tabla utilizada para modelar el proceso es la siguiente:

Tabla 4.3 Valores de esfuerzo-deformación a 1000 [°C] y 10 [1/s]

Esfuerzo efectivo [MPa]	Deformación efectiva [%]
520	0
779	0.06
901	0.12
104	0.17
109	0.23
116	0.29
121	0.35
125	0.40
125	0.46
125	0.52
125	0.58
123	0.64
121	0.69
118	0.75

## 4.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las simulaciones se realizaron con la paquetería de elemento finito llamada ABAQUS/CAE. En todos los casos, la simulación consideró la geometría en 2D y simetría con respecto al eje y. El material a deformar se considera rígido-plástico sin endurecimiento e isotrópico, mientras que los dados se consideran rígidos, esto debido a que en este caso, no se consideran las deformaciones y los esfuerzos a los cuales se encuentran sometidos los dados. Se asume un coeficiente de fricción constante en las superficies de contacto y con un valor de 0.2, considerando que se utiliza como lubricante grafito disuelto en agua y este es el valor característico. Para la solución se generaron 3600 elementos cuadriláteros, se utilizó la opción de remallado, debido a que las deformaciones a las cuales se somete al material son severas, y de esta forma se evita que el mallado colapse.

La simulación del proceso de forja en estampa para el formado de la biela se realiza en tres etapas: recalcado, preparación y acabado. En todos los casos, las primeras dos etapas de la simulación son iguales, en el paso final se encuentra la variación en la estampa en lo concerniente al espesor de la rebaba ( $\epsilon$ ). La configuración del proceso de forja en estampa se observa en la siguiente figura:

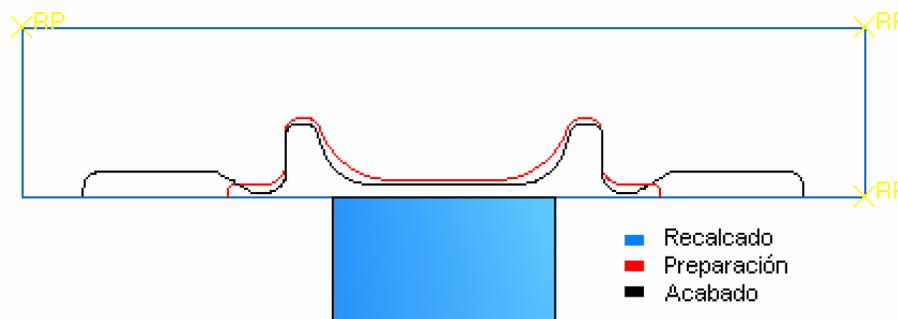


Figura 4.7 Configuración del proceso de forja en estampa

La geometría inicial del material de trabajo es rectangular con dimensiones de 15x26 [mm]. Las dimensiones del dado de la preforma y de la forma final son las siguientes:

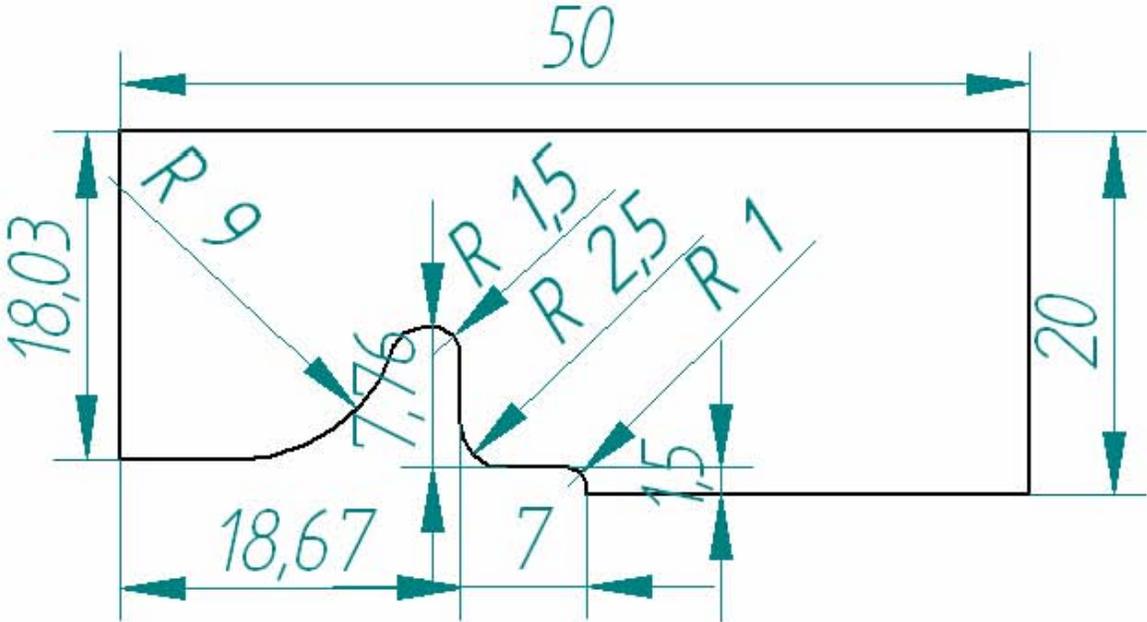


Figura 4.8 Dimensiones del dado de preforma [mm]

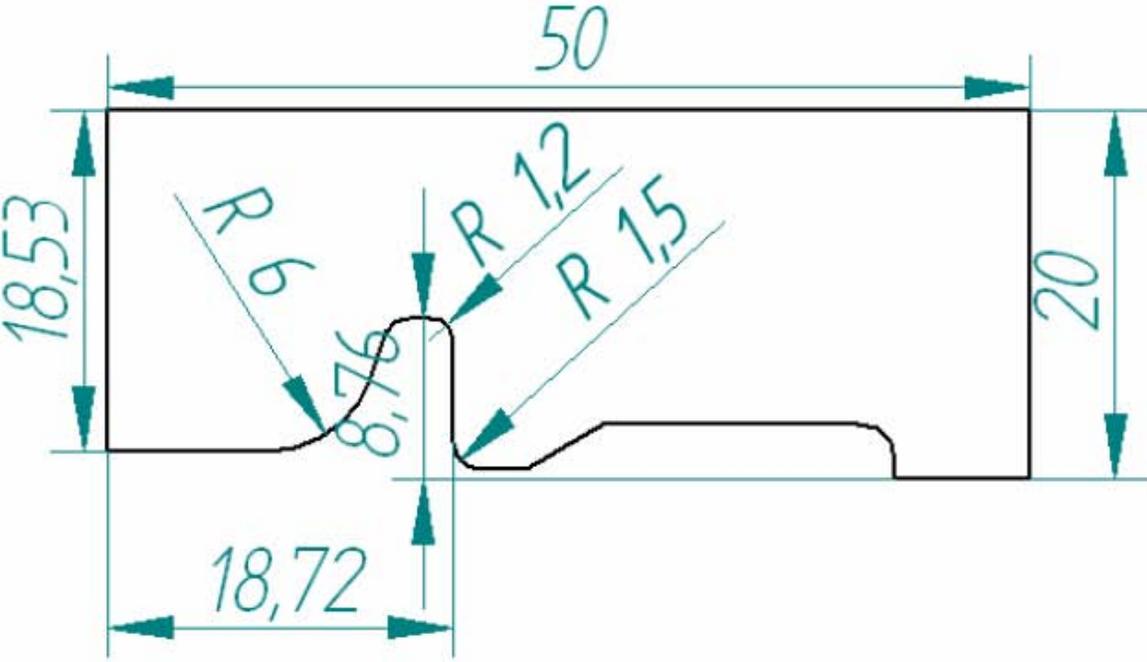


Figura 4.9 Dimensiones del dado de forma final [mm]

De la simulación en la sección B-B para los diferentes valores de  $\epsilon$ , se obtuvieron los siguientes campos de deformación y de esfuerzos:

Para  $\epsilon = 1$

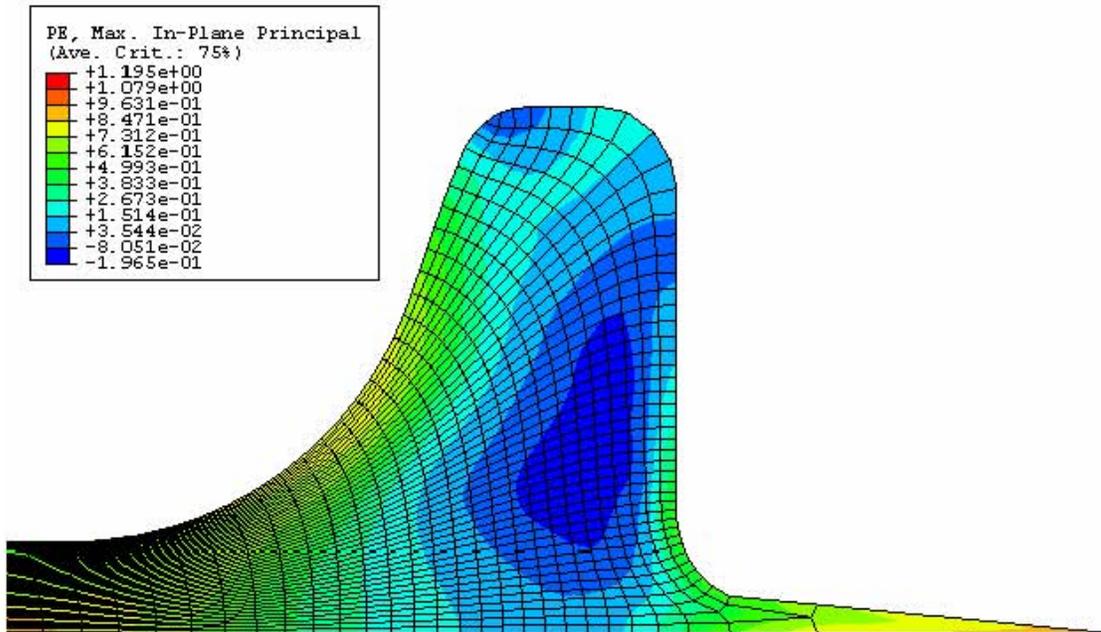


Figura 4.10 Campo de deformaciones

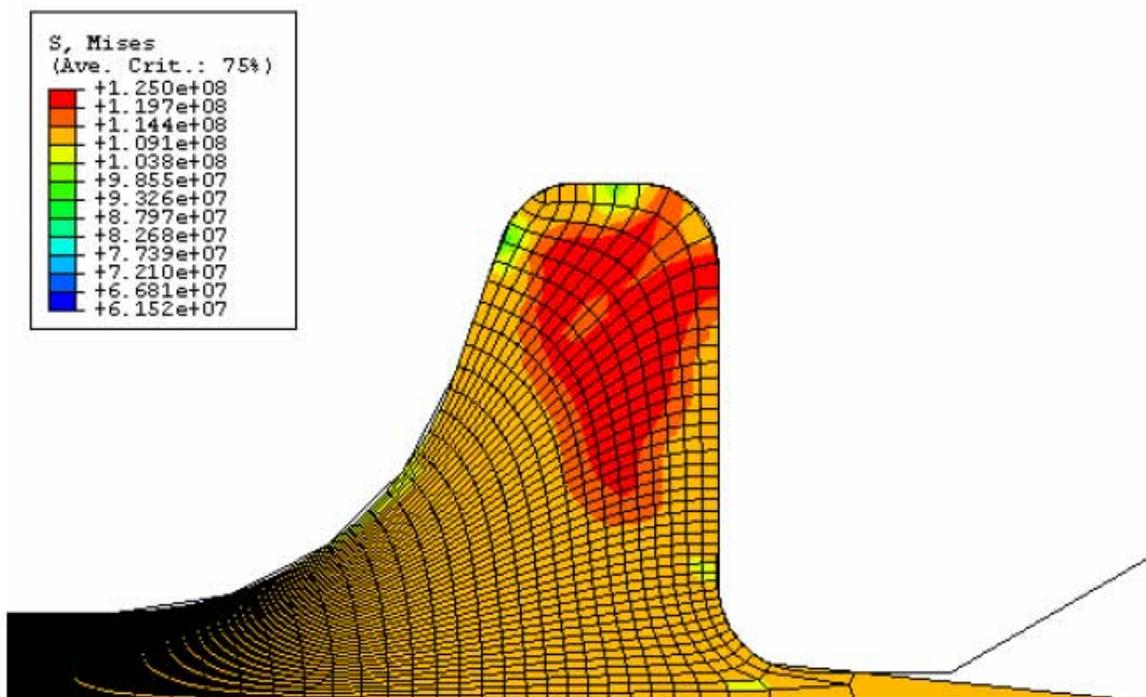


Figura 4.11 Campo de esfuerzos en la última etapa del proceso

Para  $\varepsilon = 2$

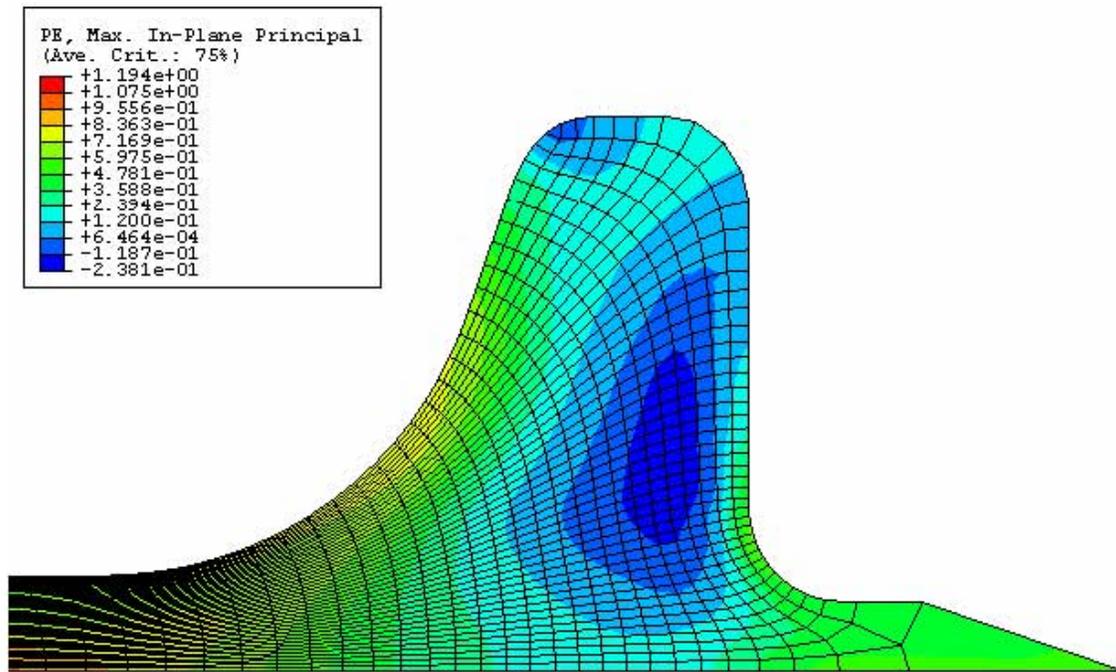


Figura 4.12 Campo de deformaciones

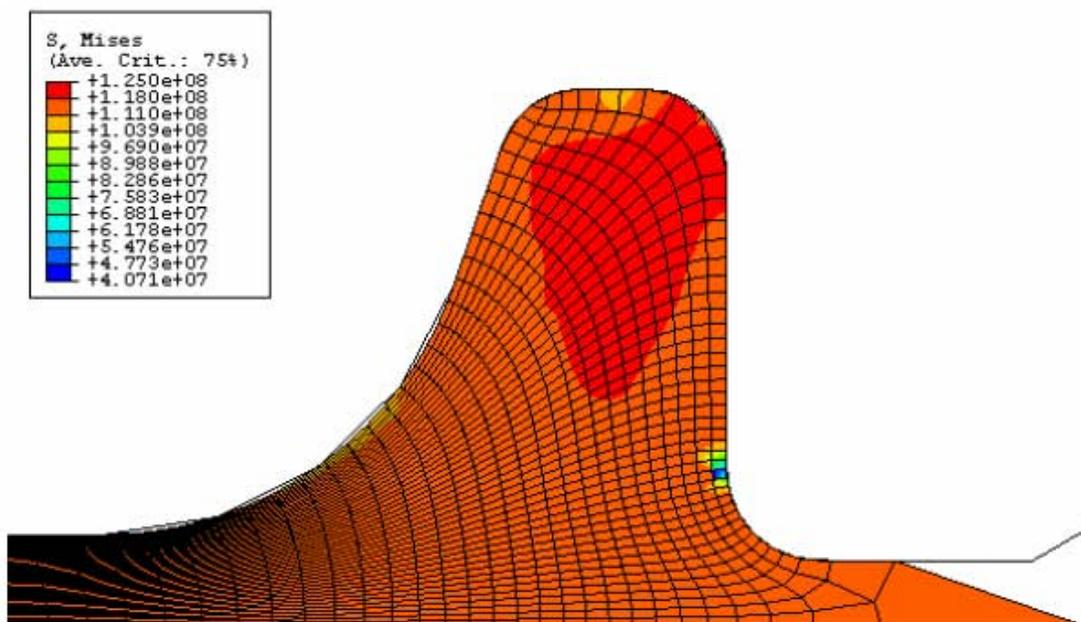


Figura 4.13 Campo de esfuerzos en la última etapa del proceso

Para  $\varepsilon = 3$

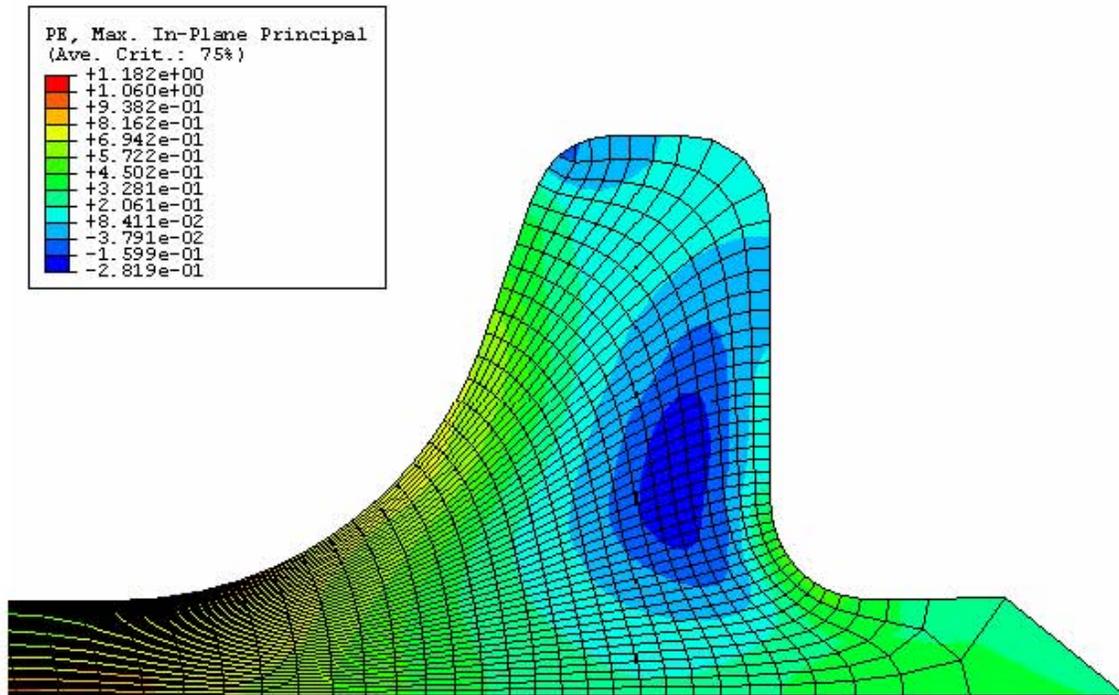


Figura 4.14 Campo de deformaciones

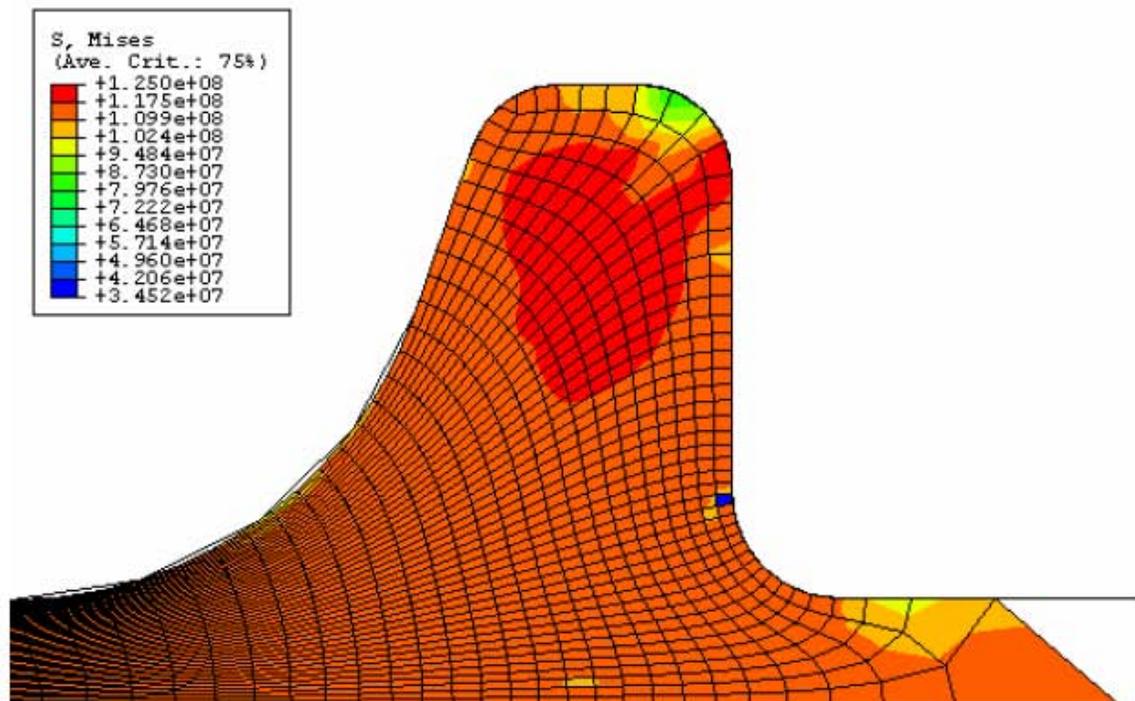


Figura 4.15 Campo de esfuerzos en la última etapa del proceso

Para el campo de deformaciones, se puede observar que las máximas deformaciones se presentarán en la zona en la cual existe una mayor reducción de altura, es decir, en la parte central del cuerpo de la biela (Figura 4.16). El campo de deformaciones para los tres casos presenta el mismo comportamiento, con respecto a los valores numéricos, las deformaciones cuando  $\varepsilon = 3$  son de menor magnitud, lo cual se puede atribuir al hecho de que el flujo de material no es tan restringido como en los otros dos casos. Cuando  $\varepsilon = 1$ , la zona de rebaba presenta una mayor deformación.

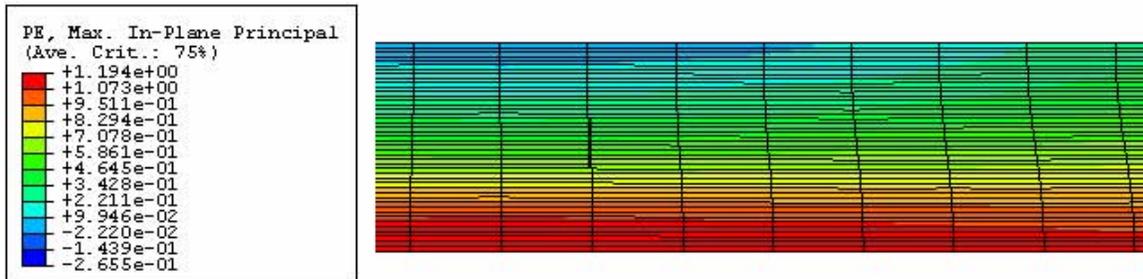


Figura 4.16 Campo de deformaciones en la parte central de la biela

Con respecto al campo de esfuerzos, estos son uniformes a lo largo de la pieza, con excepción de una zona superior de la biela donde son mayores, debido a que esta zona es la última en tener interacción con el dado de la forma final. Los casos cuando  $\varepsilon = 2$  y  $\varepsilon = 3$ , se presenta un campo de esfuerzos similar con valor de 118 [MPa] a lo largo de la pieza, mientras que para  $\varepsilon = 1$ , se presenta que los esfuerzos son de una magnitud menor, de alrededor de 115 [MPa]. Cuando  $\varepsilon = 2$ , el material se encuentra sometido a un nivel de esfuerzos de 118 [MPa] con excepción de la zona superior, donde el nivel de esfuerzos es de 125 [MPa]. Para el caso cuando  $\varepsilon = 3$ , es prácticamente lo mismo con la excepción de la presencia de un zona en la parte superior donde el nivel de esfuerzos es de 94 [MPa].

Para cuantificar el efecto de zona de rebaba en la fuerza necesaria para poder formarla, se consideran las fuerzas de reacción en la base del material, arrojando los siguientes resultados:

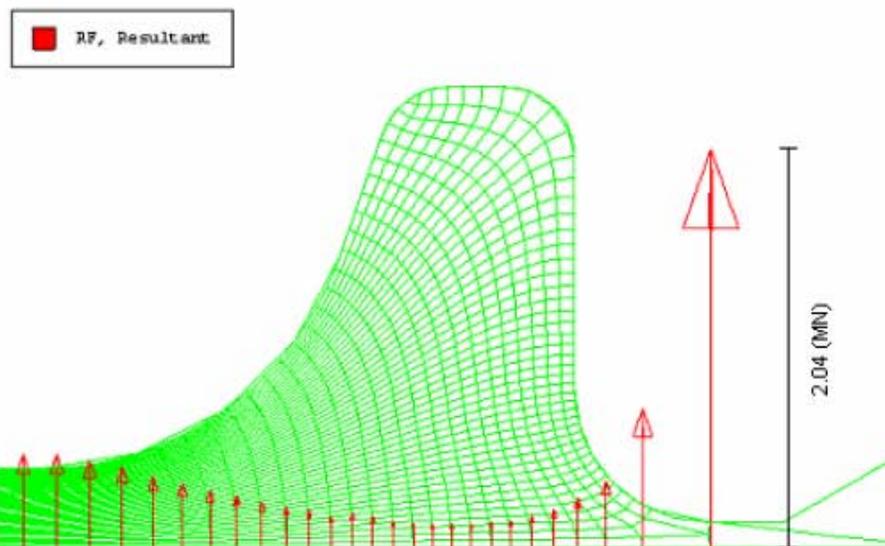


Figura 4.17 Fuerzas de reacción en la etapa de acabado considerando  $\varepsilon = 1$

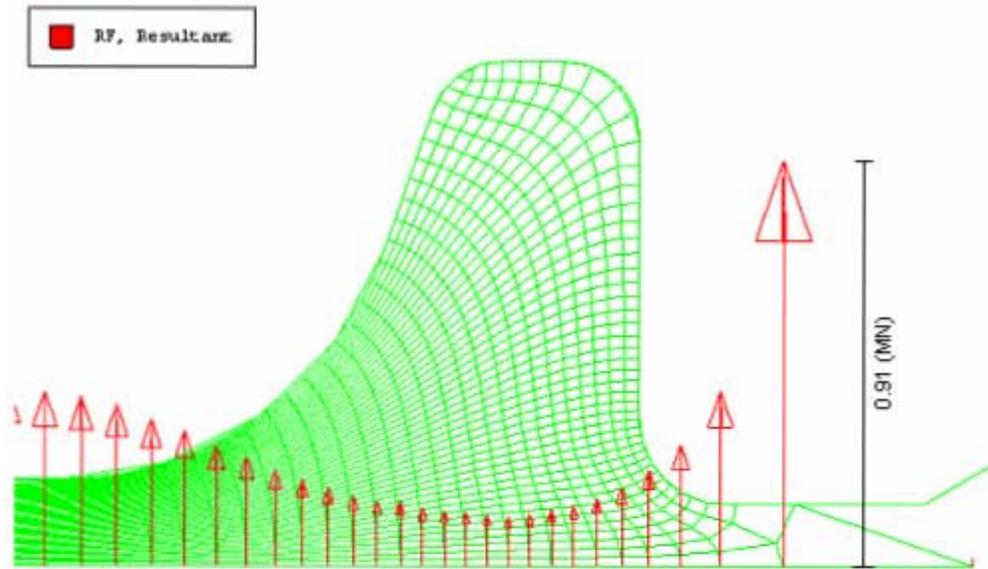


Figura 4.18 Fuerzas de reacción en la etapa de acabado considerando  $\varepsilon = 2$

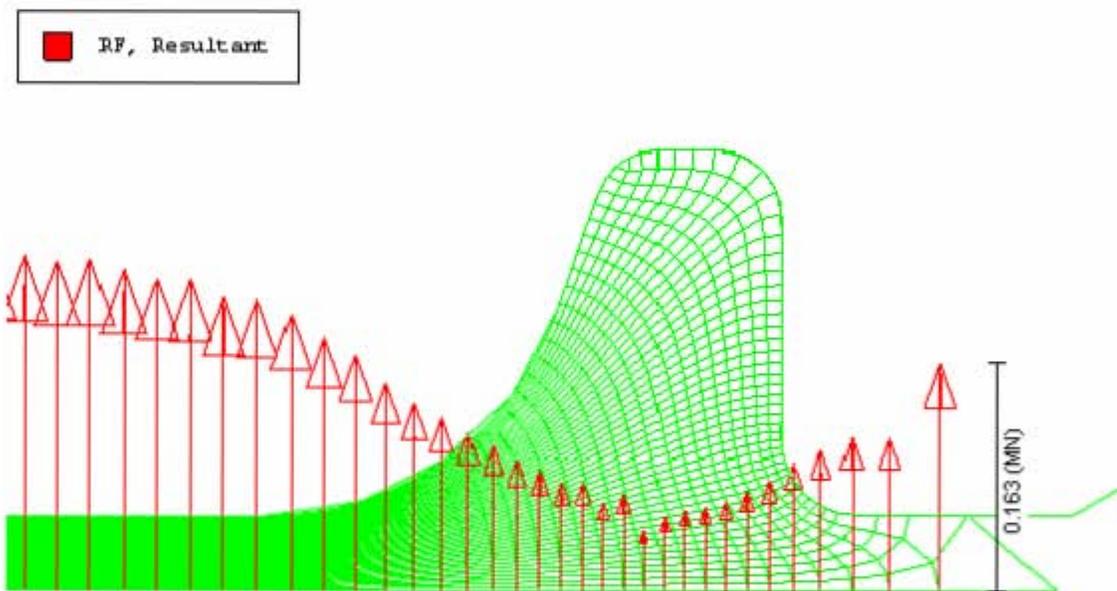


Figura 4.19 Fuerzas de reacción en la etapa de acabado considerando  $\varepsilon = 3$

Para los valores de  $\varepsilon = 1$  y  $\varepsilon = 2$ , se puede apreciar que las mayores fuerzas de reacción se presentan en la zona de rebaba, para el primer caso se observa que este efecto es de mayor magnitud, en los valores numéricos se puede observar que el valor máximo de la fuerza de reacción cuando  $\varepsilon = 1$  es el doble de la obtenida considerando  $\varepsilon = 2$ . En el caso de  $\varepsilon = 3$ , se puede observar que el perfil de las fuerzas de reacción es completamente diferente, es decir, las fuerzas de reacción en la zona de rebaba son de menor magnitud a las que se presentan en la parte central de la biela, existe una redistribución de carga debido principalmente a que el espesor del cordón de rebaba es mayor a la altura de la zona central de la biela.

El cálculo de la fuerza necesaria para llevar a cabo la operación de forja se puede realizar con la siguiente expresión:

$$F = K_f Y_f A$$

Donde:

F = Fuerza de forja [N]

$K_f$  = Factor de forma del forjado

$Y_f$  = Esfuerzo de fluencia del material [MPa]

A = Área proyectada de la base, incluyendo la rebaba [mm<sup>2</sup>]

El valor de  $K_f$  se obtiene de la tabla 4.4:

Tabla 4.4 Valores de  $K_f$  en forja con estampa (Kalpakjian, 2002)

<b>Valores de <math>K_f</math> en forja con estampa</b>	
Formas simples, sin rebaba	3-5
Formas simples con rebaba	5-8
Formas complejas, con rebaba	8-12

Se considera un valor de  $K_f = 12$ , debido a la complejidad de la pieza y la utilización de la rebaba. La complejidad se da en torno a la diferencia de alturas (espesores) que existen en la biela, la altura máxima es de 25.4 [mm], mientras que la altura mínima es la de la parte central de la biela, que presenta un valor de 2.9 [mm].

El área proyectada de la biela es de 7391 [mm<sup>2</sup>], se considera que el área de la rebaba es de un 15% del área de la biela, obteniendo un área total de 8500 [mm<sup>2</sup>].

El esfuerzo de fluencia del material se obtiene de la tabla 4.3 ( $\sigma = 125$  [MPa]). De tal manera que la ecuación queda de la siguiente manera:

$$F = (12) (125) (8500) = 12.75 \text{ [MN]} = 1300 \text{ [Ton]}$$

Es decir, se presenta el caso en el cual se necesita de una carga de 1300 [Ton] para poder llevar a cabo la manufactura de la estampa.

Mediante la paquetería de elemento finito, se pueden conocer las fuerzas de reacción a las cuales se encuentran sometidos los dados de forja, con esta opción se puede conocer la fuerza necesaria para deformar al material y además observar el comportamiento de la carga a lo largo del proceso a través de las distintas etapas.

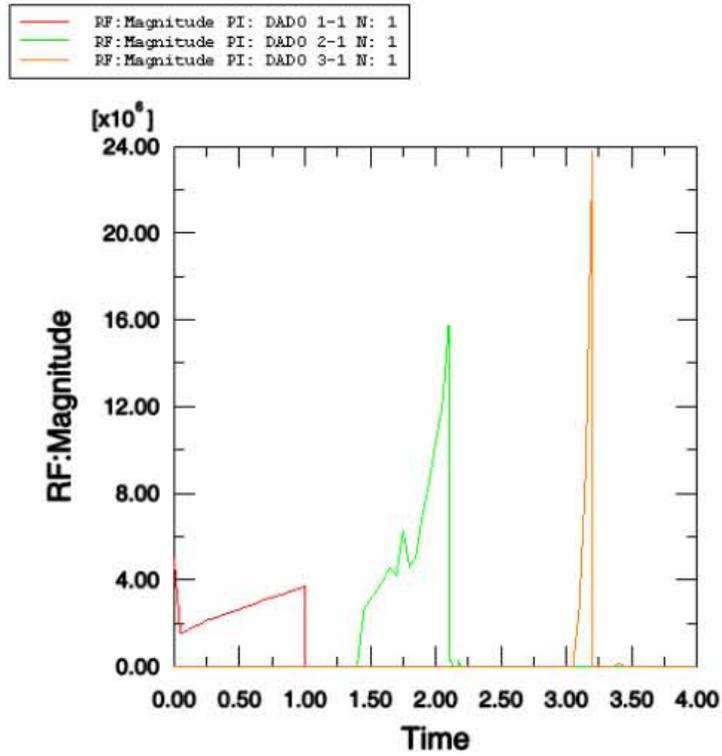


Figura 4.20 Fuerzas de reacción de los dados considerando  $\varepsilon = 1$

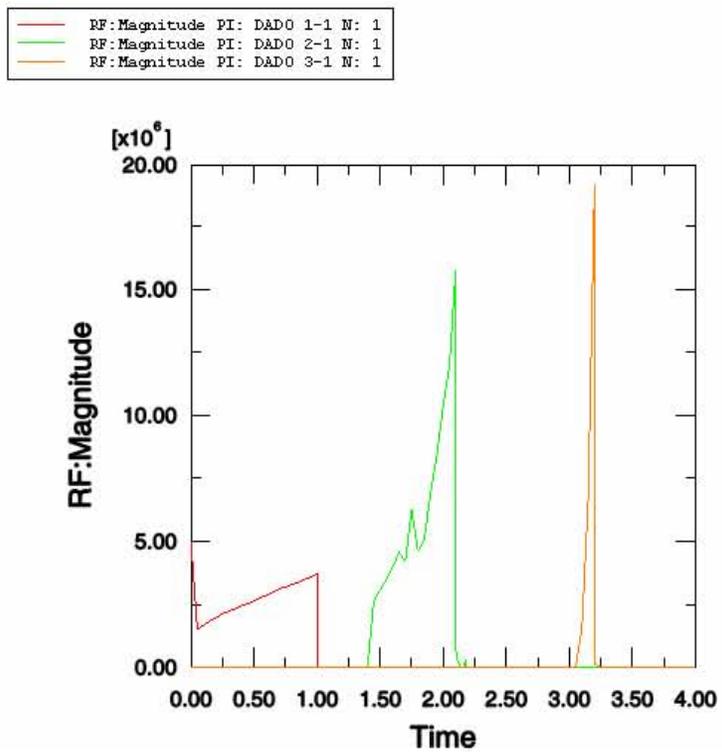


Figura 4.21 Fuerzas de reacción de los dados considerando  $\varepsilon = 2$

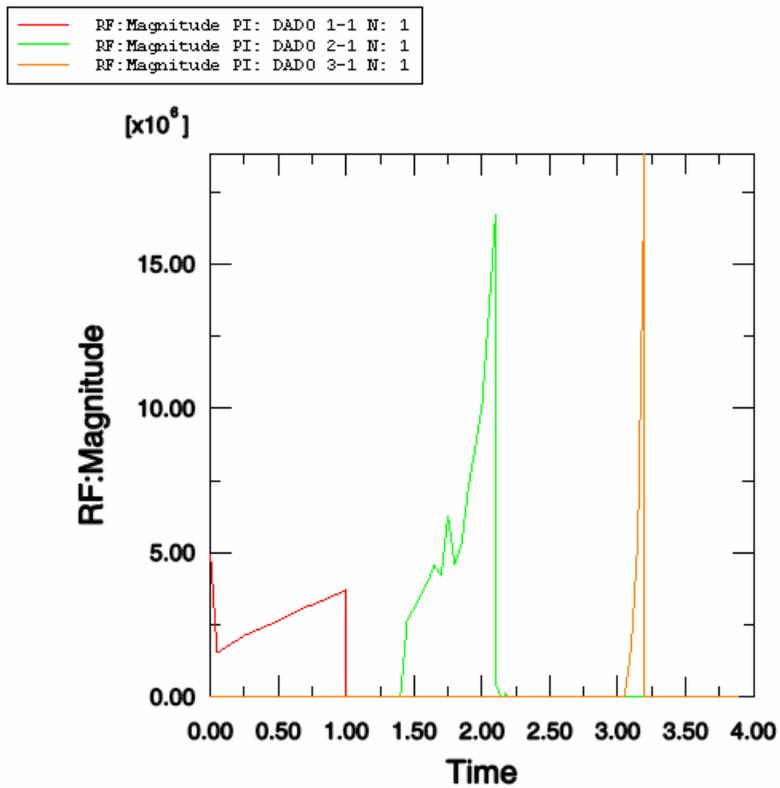


Figura 4.22 Fuerzas de reacción de los dados considerando  $\epsilon = 3$

La carga en los primeros pasos es la misma en los tres casos, la diferencia se encuentra cuando el dado de la forma final entra en interacción con el material de trabajo, donde se puede comprobar que el valor máximo de la carga se presenta en esta etapa, cuando se lleva a cabo la formación de la rebaba. También se puede comprobar que la carga requerida para el conformado de la biela cuando  $\epsilon = 1$  [mm], es de mayor magnitud a la que se presenta en los casos cuando  $\epsilon = 2$  y  $\epsilon = 3$  [mm]. Para estos espesores, el comportamiento de carga es el prácticamente el mismo, con la variación de que cuando  $\epsilon = 2$ , la carga es de mayor magnitud, debido a que la restricción del flujo en la zona de rebaba es mayor. Los valores máximos de carga se encuentran enlistados en la siguiente tabla:

Tabla 4.5 Valores máximos de carga considerando diferentes espesores de rebaba

Espesor ( $\epsilon$ ) [mm]	Fuerza [MN]	Fuerza [Ton]
1	23.78	2424.057085
2	19.22	1959.22528
3	18.82	1918.450561

Uno de los factores que afecta de manera importante el requerimiento de la fuerza de forja en la etapa final del proceso es el radio que entra en contacto con la rebaba, así que se realizó la simulación considerando diferentes valores de este radio en el modelo que considera  $\varepsilon = 2$ , obteniéndose los siguientes resultados:

Tabla 4.6 Valores máximos de carga para  $\varepsilon = 2$  considerando diferentes radios

Radio [mm]	Fuerza [MN]	Fuerza [Ton]
5	26.36	2687.054027
10	19.45	1982.670744
15	19.22	1959.22528
20	19.89	2027.522936
25	18.02	1836.901121

De lo anterior se puede determinar que este radio es de gran importancia en el diseño del proceso, ya que la diferencia entre el radio de 5 [mm] y el de 25 [mm] es de 850 [Ton]. La relevancia de este radio esta demostrada, por lo cual la elección de esta dimensión es determinante para el diseño para el proceso, existe la limitante de que entre mayor sea este radio, la etapa de maquinado se dificulta de manera considerable.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSIONES

En la actualidad, el Método de Elemento Finito (FEM) se ha convertido en una herramienta primordial para el modelado de los procesos de manufactura. En el caso de la forja en estampa, en una primera instancia permite saber si la estampa se llenará en su totalidad una vez acabado el proceso, además de que se puede conocer con certeza cual será el patrón flujo del material cuando se está deformando, con lo cual se puede evitar la formación de pliegues o grietas que afecten la calidad de la pieza.

En una segunda instancia, el FEM permite conocer cuantitativamente el efecto de las variables que intervienen en el proceso (esfuerzos, deformaciones, fuerzas de reacción, etcétera). En este caso se cuantificaron las fuerzas de reacción a las cuales se encuentran sometidas las estampas, ya que con estas se puede estimar la fuerza necesaria para llevar a cabo el conformado de la biela. El parámetro que se modificó en el proceso es el espesor del cordón de rebaba, el efecto de este cambio se aprecia en la tabla 4.5, donde se comprueba el hecho de que entre mayor es el espesor, menor será la fuerza necesaria para el formado. Considerando el valor de 1300 [Ton] calculado mediante la fórmula como valor comparativo, se observa que los valores obtenidos mediante la simulación son de mayor magnitud, para el caso de  $\varepsilon = 2$  y  $\varepsilon = 3$  [mm], los valores son aproximadamente un 50% mayores.

Debido a la mayor magnitud de la fuerza de forja cuando  $\varepsilon = 1$ , ésta se puede descartar como opción para el proceso, ya que implica un mayor requerimiento en el equipo empleado, además de que se somete a las estampas a mayores esfuerzos, lo cual puede repercutir en una falla temprana o a la utilización de un material con mejores propiedades y por consiguiente con un mayor costo.

La fuerza de forja cuando  $\varepsilon = 2$  y  $\varepsilon = 3$  [mm] es prácticamente la misma, se podría decir que cualquiera de las dos configuraciones cumple de manera satisfactoria con el formado de la pieza. La diferencia se aprecia en las figuras 4.18 y 4.19, donde se puede observar que las fuerzas de reacción de mayor magnitud en el caso cuando  $\varepsilon = 2$  se encuentran en la zona de rebaba, mientras que en el caso cuando  $\varepsilon = 3$ , estas se encuentran en la parte central de la biela, esto debido a que el espesor del cordón es mayor a la altura mínima de la pieza, lo que provoca que la restricción de flujo de material en la rebaba se vea reducido.

De los resultados obtenidos, se puede concluir que el modelo mas viable para la manufactura de la biela es aquel cuando se utiliza  $\varepsilon = 2$ , debido a que la zona de rebaba si funciona como una válvula de presión, ya que las fuerzas de reacción mayores en la zona implican que esta será la última región en llenarse, es decir, que primero se llenará toda la cavidad. En el caso cuando  $\varepsilon = 3$ , la cavidad se llena, pero la zona de rebaba no cumple estrictamente con su función, por lo cual se elige la opción de  $\varepsilon = 2$  como la ideal para la manufactura de la biela, siempre teniendo en cuenta que cuando  $\varepsilon = 3$  también se puede conformar la pieza a una menor carga.

Los valores obtenidos mediante la simulación por elemento finito, son mayores a los determinados de manera analítica, este hecho se puede deber a que los patrones de deformación obtenidos mediante las estampas no es el idóneo. Las modificaciones que se sugieren al modelo para mejorarlo se encuentran relacionadas en el primer paso del proceso, ya que en lugar de solo reducir la altura del material, se podría realizar una distribución de material hacia los extremos, para que el llenado de la preforma se realice de manera mas sencilla y requiera de un fuerza menor, además de que con este cambio se podría reducir la cantidad de material a utilizar y por lo consiguiente el material en la zona de rebaba será menor.

En el caso de estudio, son dos los factores que afectan de manera importante la fuerza requerida para llevar a cabo la operación, estos son la cantidad de material en la zona de rebaba cuando se utiliza la preforma y el radio del dado de forma final que entra en contacto con la rebaba.

La cantidad de material que se aloja en la zona de rebaba aumenta de manera considerable la carga de forja, esto se debe a que el flujo de material se encuentra restringido y que al ser una sección de menor espesor, la transferencia de calor entre los dados y el material permite que la rebaba se enfríe de manera rápida, lo que trae consigo un aumento del esfuerzo de fluencia del material. En un proceso ideal de forja, la formación de una especie de rebaba en la etapa de preforma no es lo ideal, pero debido a la complejidad de lograr el llenado de la preforma sin la aparición de esta zona, se considera como normal la aparición de ésta. Entre mayor sea la cantidad de material en esta zona, mayor será la fuerza de formado requerida en la etapa de preforma y en la de acabado, por esta razón, es importante reducir la cantidad de material, ésta es una de las modificaciones a considerar en el diseño obtenido para obtener mejores resultados.

El radio que entra en contacto con la rebaba tiene un efecto primordial en la fuerza requerida para deformar el material. Por obvias razones, entre mayor es este radio, el flujo de material se vera favorecido, mientras que si el radio es pequeño, las restricciones para que el material fluya son mayores, lo cual conlleva un mayor requerimiento de fuerza de forja. En el caso de estudio, este efecto se puede apreciar de manera clara en la tabla 4.6, para el caso cuando el radio del dado de forma final es de 5 [mm], la fuerza requerida es de 26.36 [MN], mientras que cuando el radio es de 25 [mm], la fuerza es de 18.02 [MN], la disminución de la fuerza es evidente. Este radio no puede crecer de manera desproporcionada, se tiene que encontrar un balance que permita el flujo de metal a una fuerza de forja razonable y que a la vez permita que la etapa de maquinado no requiera de grandes cantidades de energía para poder retirar la rebaba, ya que esto repercute en los costos pero principalmente se pueden provocar daños a las bielas.

El diseño de las preformas es la clave para tener un proceso de manufactura exitoso, la correcta geometría de las preformas permite que en la etapa final la estampa se llene totalmente y con cargas mínimas. Las mayores deformaciones plásticas del material se dan en estas etapas, es de gran relevancia que no se contradigan de manera importante su tendencia natural de deformación, ya que de lo contrario se presentan problemas de defectos en la pieza, así como en sus propiedades mecánicas.

Se concluye que las reglas utilizadas para modelar la zona de rebaba para este caso no son las más viables, estas pueden servir para ciertos casos, pero no para una generalidad de problemas. La importancia de la experiencia del diseñador es de gran relevancia, con la ayuda de elemento finito este factor puede reducir su importancia de manera considerable, ya que se tiene la oportunidad de realizar un diseño de manera más sencilla y económica. Con la utilización de elemento finito se pueden alterar de manera sencilla varias condiciones que puedan afectar al proceso, tales como el material a deformar, el coeficiente de fricción entre las superficies de contacto y la geometría de las estampas, y así ser capaces de cuantificar los efectos que conllevan en el aumento o disminución de la carga requerida.

## REFERENCIAS

- 1) Altan, Taylan, Soo-Ik Oh, Harold Gegel. *Metal forming, Fundamentals and Applications*, ASM, USA, 1983.
- 2) Altan, Taylan y Victor Vazquez. *Die design for flashless forging of complex parts*, 2000.
- 3) American Machinist Magazine. *Formado de metales*, McGraw-Hill, México, 1988.
- 4) ASM INTERNATIONAL. *Metals Handbook, Ninth Edition, Volume 14, Forming and forging*, ASM Internacional, USA, 1988.
- 5) Beddoes, J. y M.J. Bibby. *Principles of metal manufacturing processes*, Arnold, USA, 1999.
- 6) Bernhart, Gérard, Véronique Garat, Laurence Hervy. *Influence of design and process parameters on service life of nut hot forging die*, 2004.
- 7) Boher, C., O. Barrau, R. Grass, F. Rezai-Aria. *Analysis of the friction and wear behaviour of hot work tool steel for forging*, 2003.
- 8) Bohnsack, R. y E. Doege. *Closed die technologies for hot forging*, 2000.
- 9) Cetlin, P.R., M.T.P Aguilar, H.B. Campos, A.E.M. Pertence, C.A. Santos. *Failure analysis of the die in the third hot forging stage of a gear blank*, 2005.
- 10) Chastel, Yvan, Nicolas Caillet, Pierre-Oliver Bouchard. *Quantitative analysis of the impact of forging operations on fatigue properties of steel components*, 2006.
- 11) Chen, Fuh-Ku y Yi-Che Lee. *Fatigue life of cold-forging dies with various values of hardness*, 2001.
- 12) Del Río, Jesús. *Deformación plástica de los materiales: La forja y la laminación en caliente*, Editorial Gustavo Gili, España, 1980.
- 13) Dieter, George. *Mechanical Metallurgy*, Third Edition, McGraw-Hill, USA, 1986.
- 14) Dobrzanski, L.A., M. Adamiak, M. Polok. *Structure and properties of wear resistance PVD coatings deposited onto X37CrMoV5-1 type hot work steel*, 2005.
- 15) Douglas, Richard y David Kuhlmann. *Guidelines for precision hot forging with applications*, 2000.
- 16) Farrahi, G.H. y H. Ghadbeigi. *An investigation into the effect of various surface treatments on fatigue life of a tool steel*, 2006.
- 17) Gilat, A., R.C. Batra, X. Wu, X.T. Zhang. *Dynamic hot forging of a steel connecting rod*, 1994.
- 18) Groover, Mikell. *Fundamentos de manufactura moderna*, Pearson Education, México, 1997.
- 19) Hamouda, A.M.S., M.M. Hamdan, M. Jolgaf, S. Sulaiman. *Development of a CAD-CAM system for the closed-die forging process*, 2003.
- 20) Kalpakjian, Serope. *Manufactura, ingeniería y tecnología, Cuarta Edición*, Pearson Education, México, 2002.
- 21) Kecelj, B., Z. Kampus, J. Kopac, K. Kuzman, . *Speciality of HSC in manufacturing of forging dies*, 2004.
- 22) Kim, B.M., T.A. Dean, D.J. Jeong, D.J. Kim, J.H. Kim. *Effects of surface treatments and lubricants for warm forging die life*, 2001.
- 23) Kim, D. H., B.M. Kim, K.H. Kim, H.C. Lee. *Estimation of die service life against plastic deformation and wear during hot forging processes*, 2004.

- 24) Kobayashi, Shiro, Taylan Altan, Soo-Ik Oh. *Metal forming and the finite-element method*, Oxford University Press, USA, 1989.
- 25) Kremaszky, C., H. Grass, E. Werner. *3-D FEM-simulation of hot forming processes for the production of a connecting rod*, 2005.
- 26) Lange, Kurt. *Handbook of metal forming*, McGraw-Hill, USA, 1985.
- 27) Lee, Youngseon, T. Ishikawa, Junghwan Lee. *Analysis of the elastic characteristics at forging die for the cold forged dimensional accuracy*, 2002.
- 28) Lindberg, Roy. *Processes and materials of manufacture*, Fourth Edition, Allyn and Bacon, USA, 1990.
- 29) Min, Dong-Kyun y Min-Eung Kim. *A study on precision cold forging process improvements for the steering yoke of automobiles by the rigid-plastic finite-element method*, 2003.
- 30) Mynors, D.J., P. Broomhead, J. Kulon. *A knowledge-based engineering design tool metal forging*, 2006.
- 31) Ortiz, Armando. *Apuntes de la materia Modelado de Procesos de Manufactura*, 2006.
- 32) Palmer, Frank. *Acero para herramientas*, Representaciones y servicios de ingeniería, México, 1986
- 33) Panjan, P., M. Cekada, V. Leskovsek, R. Turk, I. Urankar. *Improvement of hot forging tools with duplex treatment*, 2002.
- 34) Smolik, Jerzy, Michael Gulde, Jan Suchanek, Jan Walkowicz. *Influence of the structure of the composite: 'nitrided layer/PVD coating' on the durability of forging dies made of steel DIN-1.2367*, 2003.
- 35) Summerville, E., C. Subramanian, K. Venkatesan. *Wear processes in hot forging press tools*, 1996.
- 36) Tomov, B., V. Gagov, R. Radev. *Influence of flash design upon process parameters of hot die forging*, 2004.
- 37) Wagner, K., U. Engel, A. Putz. *Improvement of tool life in cold forging by locally optimized surfaces*, 2006.