



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO Y ANÁLISIS DEL HERRAMENTAL PARA
UN PASO DE FORJA**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO MECÁNICO
PRESENTA:
JUAN MANUEL TORRES FLAMENCO**

**DIRECTOR DE TESIS:
M. EN. C. EDGAR ISAAC RAMÍREZ DÍAZ**



CIUDAD UNIVERSITARIA

2015

AGRADECIMIENTOS:

Doy infinitas gracias a Dios por las oportunidades y bendiciones que me ha brindado a lo largo de mi vida, que han hecho posible que el día hoy pueda cerrar una etapa más. Doy también gracias a Él por la vida de mis padres, hermanas, familiares, amigos, maestros, novia y la propia. Por ser sustento, guarda y apoyo.

Agradezco a mis padres María del Socorro y Juan Ramón por su apoyo, amor incondicional, sacrificios, esfuerzos, paciencia y empeño que han depositado en mí. Les doy gracias por estar conmigo en momentos buenos y darme ánimo e impulso en los malos; gracias a ellos por brindarme las herramientas necesarias para seguir creciendo y aprendiendo. Los amo.

También doy gracias a mis hermanas Diana y Zabdi, por cada momento compartido: travesuras, aventuras, juegos, peleas, etc. Doy gracias a Dios por darme el bonito regalo de poder crecer a su lado, se que siempre podré contar con ellas y ellas conmigo.

Agradezco a mis abuelitos: Mildred, Manuel (†), Dolores y Juan (†). Por su cariño, apoyo y amor. Les agradezco mucho sus sabios consejos, cuidados y atenciones. Gracias por todo.

Gracias a las familias: Flamenco Villaseñor, Flamenco Aguirre y Torres Hernández. A mis tías Rocío y Ana María por su cariño.

Agradezco a Sharon los momentos tan bonitos vividos, su amor, cariño y apapachos. Gracias también por ser impulso y apoyo para alcanzar más metas. Dios quiera podamos seguir caminando juntos. Te amo.

Agradezco mucho a mi Director de Tesis, el M. en C. Edgar Isaac Díaz Ramírez. Gracias por su tiempo, dedicación, paciencia, consejos, conocimientos compartidos, amistad, etc. Sin duda alguna éste trabajo no habría sido posible sin él.

Doy muchas gracias a todos los maestros y compañero que me apoyaron en la realización de éste trabajo: M. en C. Osvaldo Ruíz, Dr. Armando Ortiz, M. en C. Juan Ortiz, Dr. Álvaro Ayala, Mtro. Efraín Ramos, Ing. Jorge Romero. e Ing. Alan Saucedo.

A: Greg, Amalinalli, Roberto, Diego, Abraham, Héctor, Marisela, Karen, Karina, Andrea, Javier, Mariana y Josué; agradezco su amistad y experiencias vividas.

Doy gracias a la Universidad Nacional Autónoma de México y muy en especial a La Facultad de Ingeniería; por la formación, conocimientos adquiridos y ser plataforma a nuevas metas.

Agradezco también el apoyo de mis jefes: Ing. Alejandro Pelayo e Ing. Javier Guzmán.

De corazón, Gracias

PRÓLOGO

La forja de productos metálicos representa un papel muy importante dentro de los procesos de manufactura; es un vínculo entre los proveedores de metales y usuarios finales dentro de los diversos tipos de industrias que emplean piezas obtenidas mediante este proceso. Los productos forjados representan un 20% del Producto Interno Bruto de los Estados Unidos, se observa que ésta industria es esencial en su economía.

El proceso de forja proporciona ventajas que difícilmente son alcanzadas por otros métodos de manufactura, las principales son las siguientes: permite la manufactura mediante barras, casi todos los metales y aleaciones pueden ser forjados, existen pocas restricciones respecto al tamaño de la pieza a obtener, se obtienen piezas con altas tolerancias, los productos son reciclables, se genera una alta resistencia y confiabilidad a las piezas, además de que las forjas típicas presentan costos de producción relativamente bajos.

El presente trabajo propone una metodología de diseño de herramientas de forja, partiendo de la pieza final deseada; empleando como herramientas principales programas de diseño mecánico y de simulación en elemento finito. Se parte de la idea que el empleo de los mismos representa una reducción de costo y tiempo al proceso; permitiendo visualizar, analizar resultados y con base en ello tomar decisiones más certeras sobre el propio proceso o bien sobre el diseño. Se seleccionó la biela como pieza a obtener dada la importancia y frecuencia con que estos elementos son encontrados en los mecanismos que van desde los más sencillos a los más complejos como los motores de combustión.

El primer capítulo se da una breve introducción al proceso de forja, describiendo los distintos tipos de herramientas y máquinas que se emplean dentro de la industria, verificando las ventajas que ofrecen cada una de ellas. Se muestran las condiciones generales que se deben de considerar en el diseño de una estampa, así como las variables de la máquina y el diseño.

En el segundo capítulo se da un enfoque principal a la forja de bielas, describiendo las principales partes de la misma, con la finalidad de presentar explicaciones más claras. Los principales materiales empleados en la fabricación de estas piezas también son descritos, dado que las propiedades presentes en cada uno de ellos definen varias variables dentro del proceso. En la parte central de este capítulo se describe el proceso de manufactura de las bielas, dando una breve explicación de cada uno de los pasos seguidos; para finalizar con la descripción de una patente de fabricación de la mencionada pieza.

Dentro del tercer capítulo se presentan en una forma resumida algunos trabajos que se han desarrollado concernientes a la forja de bielas enfocados principalmente al diseño de las preformas, herramientas y simulaciones en elemento finito. El propósito es situar y dar a conocer los distintos trabajos de investigación que se han y están realizando, mostrando de alguna forma las necesidades que existen en el proceso de forja de bielas.

En el cuarto capítulo se propone una metodología de diseño del herramental para un paso de forja. Se seleccionó el paso considerado como más crítico, es decir, en el que se involucran las mayores deformaciones. Se debe tener en cuenta que para el desarrollo completo del proceso de forja de biela será necesario realizar lo propuesto seis o siete veces, o bien para el número de pasos considerados en el diseño del proceso completo. La metodología para el diseño de los herramientas es propuesta por Kulon en el año 2000 y el diseño de la preforma a emplear en el paso seleccionado, basa su diseño en lo propuesto por Vazquez en el mismo año.

Una vez realizado el diseño y elaborados el herramental y la preforma mediante el programa NX®, el capítulo 5, da una descripción de metodología seguida para realizar la simulación en elemento finito con la ayuda del programa Abaqus®, mostrando la selección de material, ensambles y parámetros necesarios. Se presentan los resultados obtenidos de la simulación y un análisis de los mismos, con la finalidad de generar un parámetro de evaluación para herramental y preforma propuestos en el capítulo 4 y con ello determinar tanto los puntos fuertes y posibilidades de mejora de la metodología de diseño propuesta.

ÍNDICE

| | <u>Página</u> |
|--|----------------------|
| Capítulo 1. Proceso de Forja | |
| 1.1 <i>Introducción al proceso de forja.</i> | 1 |
| 1.2 <i>Clasificación de tipos de forja</i> | 2 |
| 1.3 <i>Máquinas para forja</i> | 3 |
| 1.4 <i>Herramental</i> | 4 |
| 1.5 <i>Consideraciones en el diseño de estampas</i> | 6 |
| 1.6 <i>Precisión de la Forja</i> | 13 |
| 1.7 <i>Tolerancias para forja de precisión</i> | 16 |
| | |
| Capítulo 2. Manufactura de bielas | |
| 2.1 <i>Introducción al uso de la biela</i> | 17 |
| 2.2 <i>Partes de la biela y función</i> | 17 |
| 2.3 <i>Materiales empleados para la fabricación de bielas</i> | 18 |
| 2.4 <i>Fabricación de bielas</i> | 19 |
| 2.5 <i>Método para la fabricación de bielas de motores.</i> | 21 |
| | |
| Capítulo 3. Estado del arte de simulación de procesos de forja en elemento finito | |
| 3.1 <i>Introducción a la simulación de procesos de forja</i> | 26 |
| 3.2 <i>Flujo de metal y optimización de la preforma de una biela</i> | 27 |
| 3.3 <i>Simulación en elemento finito del proceso de forja</i> | 27 |
| 3.4 <i>Simulación de un proceso de formado en caliente de una biela</i> | 33 |
| 3.5 <i>Simulación del diseño de la zona de rebaba de forja en caliente</i> | 37 |
| | |
| Capítulo 4. Metodología para el diseño de un dado para forja | |
| 4.1 <i>Introducción de la metodología seguida</i> | 40 |
| 4.2 <i>Geometría a obtener</i> | 42 |
| 4.3 <i>Eliminación de geometrías no alcanzables por el proceso</i> | 42 |
| 4.4 <i>Sobredimensionamiento</i> | 43 |
| 4.5 <i>Eliminación de geometrías estrechas</i> | 46 |
| 4.6 <i>Adición de ángulos de salida o desmoldeo</i> | 46 |
| 4.7 <i>Adición de radios de transición</i> | 47 |
| 4.8 <i>Zona de rebaba</i> | 48 |
| 4.9 <i>Generación de la preforma anterior a la que se pretende obtener</i> | 51 |

| | |
|---|----|
| Capítulo 5. Modelado en elemento finito de un paso de forja de una biela | |
| <i>5.1 Introducción a la Simulación</i> | 52 |
| <i>5.2 Desarrollo del modelado</i> | 52 |
| <i>5.3 Análisis de Resultados</i> | 54 |
| | |
| Conclusiones | 62 |
| | |
| Referencias | 64 |

CAPÍTULO 1. PROCESO DE FORJA

1.1 INTRODUCCIÓN AL PROCESO DE FORJA

La forja es uno de los procesos de conformado de metales más antiguo. Consiste en dar forma a una pieza de trabajo mediante la aplicación de cargas compresivas, en una serie de pasos a lo largo de los cuales se van obteniendo diferentes preformas, para de esta manera al final obtener la forma deseada. (Lee et al.,2013)

El material de trabajo es transformado de una geometría sencilla a una compleja. Al aplicar la carga se busca sobrepasar la resistencia de fluencia del metal, para que el material fluya en las cavidades de los dados o estampas, además de mejorar sus propiedades mecánicas y metalúrgicas. El flujo del material ocasiona que los granos del material estén orientados de tal forma que mejoran la ductilidad e incrementa la resistencia a la fatiga.

La figura 1.1 muestra la diferencia entre la forma de forja final con preformado y sin él. La preforma es un producto semi-acabado y su forma es intermedia entre el lingote inicial y el producto final (Lee et al.,2013).

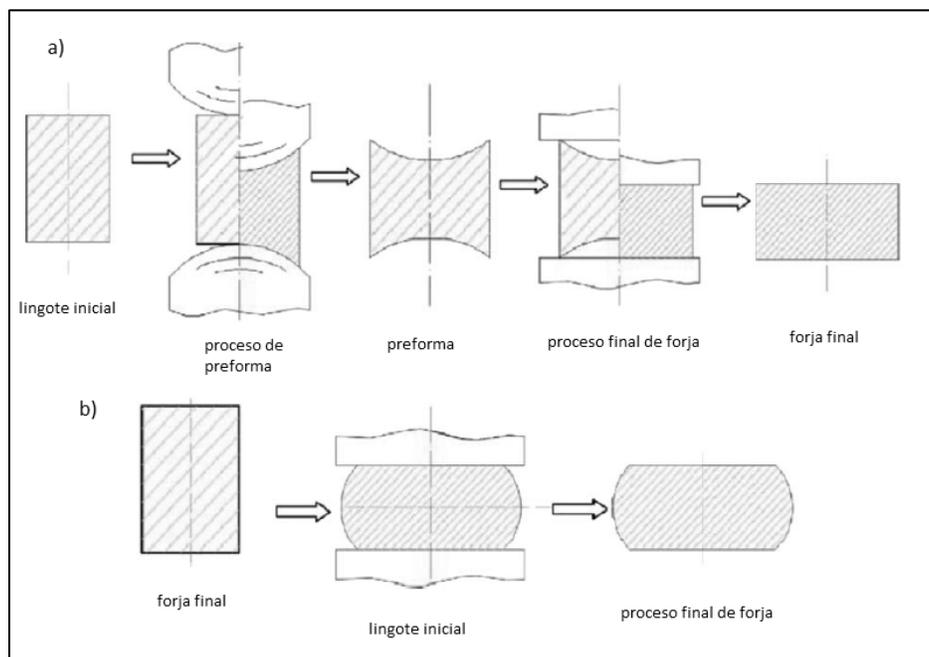


Figura1.1 a)Proceso de forja con preforma. b)Proceso de forja sin preforma (Lee et al., 2013).

1.2 CLASIFICACIÓN DE TIPOS DE FORJA

Generalmente, según como los dados limitan el flujo del metal de trabajo, el proceso de forja se clasifica en:

a) *Proceso de forja de dado abierto*

El material se comprime entre dos dados planos o de geometría simple, el flujo del metal se da sin restricción alguna en dirección lateral con respecto a las superficies del dado. En este tipo de forja los herramientas con geometría simple son los que realizan la mayor parte de operaciones, ya sea por prensas o martinets, dentro de las más comunes se encuentran las siguientes: formas planas, en v o semi-redondas. (Groover, 1997)

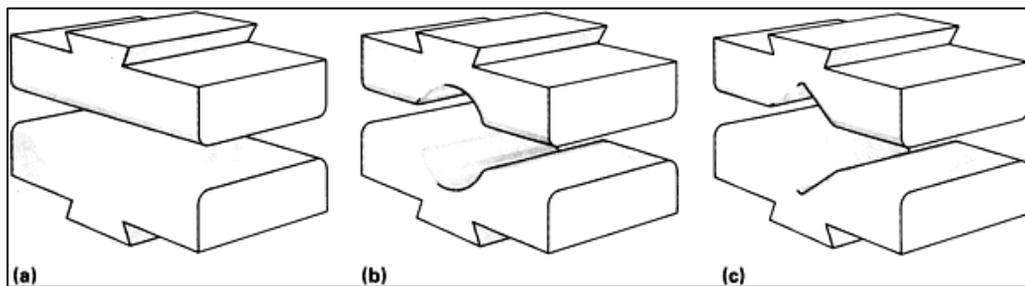


Figura 1.2 Principales forma de dados a) dados planos, b) dados semi-redondos, c) dados en V (ASM Handbook Vol 14, 1996)

Las forjas hechas con moldes abiertos no tienen la precisión dimensional de las realizadas en cavidades de moldes cerrados convencionales, por lo que requieren maquinado adicional. La ventaja de este tipo de moldes es su capacidad de producir una variedad de formas simples en poco tiempo, sin que se necesite invertir en dados especiales (Morales, 1987).

Existen muchos procesos de forjado en los cuales se utilizan moldes abiertos de geometría simple, generalmente cuando se trata de objetos grandes o donde el volumen de producción es pequeño.

b) *Proceso de forja de matriz cerrada o dado impresor.*

Las superficies de los dados cuentan con una forma o impresión que se transfiere al material de trabajo durante la compresión, lo cual restringe el flujo del material.

En muchas operaciones en molde cerrado se utilizan varias estampas para el forjado progresivo de la pieza, lo que hace posible que la configuración de cada una ellas permita la localización adecuada de la pieza en la siguiente estampa. Las estampas preformadoras y las que dan la forma final a la pieza de trabajo (las de acabado) son las más comunes. Hay estampas preformadoras de varios tipos.

A la reducción de la sección transversal del material con un consecuente aumento de su longitud se le conoce como forja de *dibujo*.

Otras acciones que se realizan mediante el proceso de forja son: doblar, torcer, extruir, penetrar, perforar o imprimir.



Figura 1.3 Dado de estampado.

Imagen tomada del sitio: http://mafercan94.files.wordpress.com/2013/11/74_estampa-para-forja-de-biela.jpg.

1.3 MÁQUINAS PARA FORJA

Las máquinas empleadas para realizar la forja son:

- a) Martillos o martinetes. Son menos caros que las prensas y presentan una amplia variedad, normalmente son clasificados de acuerdo al método empleado para mover el pistón: Martillos de caída por gravedad, de tablón, con elevadores neumáticos e impulsados. Son capaces de desarrollar grandes fuerzas y presentar periodos cortos en el contacto del dado. La tabla 1.1 describe varios tipos de martillo y compara las capacidades de los mismos.

| Tipos de martillo | Peso del pistón | | Máxima energía de impacto | | Velocidad de Impacto | | Número de impactos por minuto |
|--------------------------|-----------------|--------------|---------------------------|---------|----------------------|---------|-------------------------------|
| | kg | lb | KJ | ft*lb | m/s | ft/s | |
| Caída de tablón | 45-3,400 | 100-7,500 | 47.5 | 35,000 | 3-4.45 | 10.-15 | 45-60 |
| Aire o elevador de vapor | 225-7,250 | 500-16,000 | 122 | 90,000 | 3.7-4.9 | 12. -16 | 60 |
| Caída electrohidráulica | 450-9,980 | 1,000-22,000 | 108.5 | 80,000 | 3-4.5 | 10.-15 | 50-75 |
| Caída impulsada | 680-31,750 | 1,500-70,000 | 1153 | 850,000 | 4.5-9 | 15.-30 | 60-100 |

- b) Prensas. Proporcionan al material una fuerza de compresión de baja velocidad. La presión va aumentando conforme el material se va deformando, la máxima intensidad de presión se registra justo antes de ser liberada, alcanzan una penetración más profunda de la zona deformada. Existen principalmente dos tipos: mecánica o hidráulica. En la tabla 1.2 se muestra una comparación entre ambas.

| TABLA 1.2 Capacidad de prensas de forja (ASM Handbook Vol. 14, 1996) | | |
|---|-------------|-----------------------------|
| Tipo de prensa | Fuerza [MN] | Velocidad de prensado [m/s] |
| Mecánica | 2.2-142.3 | 0.06-1.5 |
| Hidráulica | 2.2-623 | 0.03-0.8 |

1.4 HERRAMENTAL

Las herramientas para el proceso de forja son dados y el material de trabajo es un lingote o la preforma. La pieza de trabajo se encuentra entre los dados. Un dado es fijo y el otro es impulsado por una fuerza específica, lo que provoca la deformación plástica y esto depende de la velocidad de deformación. La forma del producto se determina por esta deformación. A continuación se presenta una clasificación general de los tipos de dado.

- a) *Dado plano.* La superficie de los dados debe ser paralela para evitar el adelgazamiento en algunas zonas de la pieza de trabajo. Tienen un ancho que va de 305 a 510 mm, sin embargo, la mayoría de los dados existentes se encuentran en un rango de 405 a 455 mm de ancho. Los vértices de los dados son redondeados para prevenir pellizcos o rasgaduras a la pieza de trabajo en la etapa de deformación.
Los dados planos son usados para forjar barras, formas planas y redondas. Dados grandes son usados cuando el flujo cruzado es necesario o bien, cuando la pieza de trabajo es estampada mediante cargas repetidas. Dados más estrechos son empleados para cortar o rebajar secciones cruzadas.
- b) *Dado de estampa.* Son básicamente dados planos con forma semicircular insertada en sus centros. El radio del semicírculo corresponde al diámetro más pequeño de eje que es posible producir. Los dados para estampa ofrecen las siguientes ventajas sobre los dados planos en la formación de barras redondas: Mínimo lado de pandeo, movimiento longitudinal del metal, mayor deformación en el centro de la barra y una operación más rápida.
Algunas desventajas son la imposibilidad de forjar barras con más de una medida, en la mayoría de los casos y marcar o cortar las piezas.
- c) *Dados en V.* Llegan a ser usados para producir partes redondas, pero generalmente se emplean para forjar cilindros huecos, de tochos huecos. Un mandril es usado con los dados en V para formar el centro del cilindro. El ángulo normalmente usado se encuentra entre 90 y 120°.
- d) *Dados de impresión.* Los dados para el proceso de forja de dado cerrado son normalmente diseñados para forjar la pieza en un solo golpe, algunos mecanismos de eyección se usan y se incorporan en el mismo dado. Algunos dados contienen las impresiones de varias partes.

Los martinetes de forja generalmente usan varios golpes en sucesivas impresiones de dado. Estos dados contienen diferentes tipos de impresiones, cada una con una función específica.

- Canteadoras. El material se mueve para crear secciones gruesas que serán formadas en bloques o estampas de acabado. Las canteadoras pueden estar abiertas de un lado o cerradas. En ocasiones se emplean en combinación con un doblador, en un troquel común de estampa.
- Llenadoras. El propósito de ellas es reducir la sección transversal de una pieza, alargándola. Su acción es opuesta a la de la estampa canteadora. Para producir un flujo óptimo de material sin crear defectos como dobleces, traslapes o pliegues, estas estampas son ovales o elípticas en su sección transversal longitudinal. Pueden estar combinadas con estampas canteadoras o de rodillo o ser la única estampa antes de las etapas de bloqueo o acabado. Debido a que las estampas llenadoras con frecuencia son la primera etapa en la operación de forja, por lo común se encuentran localizadas en el extremo de la matriz.
- Niveladoras. Como el nombre lo indica, este tipo de estampas extienden la pieza de trabajo de tal forma que llene la siguiente estampa de la matriz. Otro de sus propósitos es reducir la anchura al tamaño de la siguiente matriz de la estampa, rotando el material con giros de 90°. Las estampas niveladoras producen exactamente la forma deseada o aplanan el área sobre la cara de la matriz.
- Redondeadores. Con este tipo de estampas, el material es redondeado a partir de una forma cuadrada o es formado para prepararlo para la siguiente etapa. Su acción es similar a la de la canteadora, pero en este caso el metal está encerrado por todos lados. El dado superior e inferior contienen cavidades parecidas a razones poco profundas.
- Dobladoras. Estas estampas doblan el material en dos o más planos, por lo general a lo largo de su eje longitudinal. Encierran el material o permiten el libre flujo del mismo. El primer tipo produce dobleces múltiples, sujetando ambos extremos de la pieza de trabajo cuando se aplica el golpe de la prensa. Casi siempre se produce un ensanchamiento debido a que los dos extremos se encuentran sujetos. Con las del tipo de libre flujo, uno o ambos extremos de la pieza de trabajo están libres para moverse y usualmente sólo se hace un doblez.
- Divisoras. Las forjas tipo trinche se suelen llevar a cabo en este tipo de estampas en las cuales se fuerza el material hacia afuera en el sentido del eje longitudinal. Para evitar la formación de dobleces, traslapes o pliegues se dejan radios amplios en el dado.
- Bloqueadoras. Esta estampa precede a la estampa de acabado y se encarga de refinar la forma de la pieza de trabajo para la última etapa y tienen casi la misma forma de la estampa de acabado. Esto ayuda a facilitar el flujo de metal y disminuye las posibilidades de defectos. De hecho algunas estampas bloqueadoras se hacen en la misma forma que las de acabado y después algunas proporciones se redondean para suavizar la transición (**ASM Handbook Vol. 14, 1996**).
- Acabadoras. En este tipo, el exceso de material en la pieza de trabajo sale por los rebordes. En otras máquinas, la pieza es desbarbada y en algunos casos, acuñada o dimensionada.

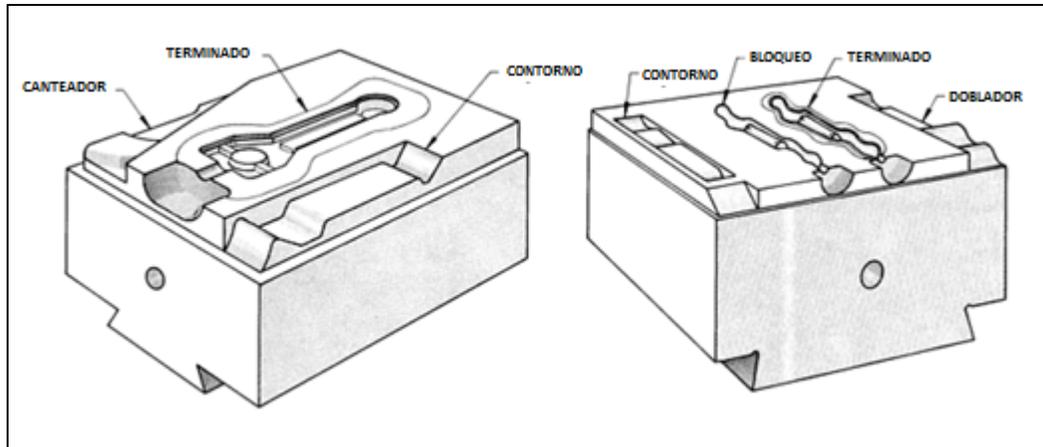


Figura 1.4 Dados de impresión (ASM Handbook Vol 14, 1996).

Algunas veces, la impresión de bloqueo es realizada para duplicar la impresión de terminado en el dado de bloqueo, y después redondeada, cuando se requiere un flujo suave del metal. Cuando esta práctica es llevada a cabo, el volumen del metal en la preforma bloqueadora es de mayor tamaño que la necesitada en la impresión de terminado. También la impresión de bloqueo es más grande en la línea de separación que en la impresión de terminado. El exceso de metal provoca que en el dado de impresión de terminado se tengan que emplear canales, para que dicho material sea extruido y forme rebordes.

Con el desgaste, el terminador llega a producir forjas que no pueden ser desbastadas apropiadamente o que se encuentran fuera de tolerancias. Este dado de impresión debe ser remaquinado constantemente, de manera contraria es desechado prematuramente.

Los aceros comúnmente usados en dados de forja caliente, se encuentran sujetos a temperaturas dentro de un rango de 315 a 650 °C. Estos contienen elementos como cromo, tungsteno, y en algunos casos vanadio o molibdeno, o ambos. Los materiales empleados para forja por encima de la temperatura de recristalización del material de trabajo incluyen aceros herramientales como los AISI H, algunas aleaciones de acero como las AISI 4300 o 4100 y un pequeño número de materiales de baja aleación, como los aceros con designación de ASM 6G, 6F2 y 6F3. Los materiales empleados para los dados deben presentar cierta dureza; así como resistencia al desgaste, a la deformación plástica, a la fatiga térmica, choque térmico, y fatiga mecánica. El diseño del dado es también un factor importante que determina su periodo de vida.

1.5 CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO DE ESTAMPAS

Una de las tareas principales en el procedimiento de diseño de forja es la conversión de la parte maquinada disponible en la parte final forjada. En el proceso de conversión, la cubierta de forja necesaria, radios de esquinas, bisel y los apropiados ángulos de salida son agregados a cada pieza maquinada en la sección transversal.

El diseño de cualquier proceso de forja comienza con la geometría de la pieza final. Los factores a considerar son los siguientes: la forma de la pieza, el material a ser forjado, el tipo de forja y equipo a ser empleado, el número de piezas a forjar, el uso de la pieza forjada y la economía del proceso diseñado

El dado de terminado es diseñado con tolerancias que incluyen rebaba, desmoldeo, contracción de material, biseles y radios de esquina, líneas de división y posicionamiento. En forjas de múltiple etapa, las geometrías de las preformas son seleccionadas, los dados de bloqueo son diseñados, y la geometría inicial del lingote es determinada. Al realizar estas selecciones, el diseñador de forja considera parámetros como flujo de grano, líneas divisoras, dimensiones de la rebaba, ángulos de desmoldeo, biseles y radio de las esquinas (Diko, 1992).

Las dimensiones de la rebaba y los lingotes, las medidas de la rebaba: material que fluye fuera de la cavidad, influyen en la energía de forja y la vida del dado.

El diseño global de un proceso de forja requiere de la predicción de la complejidad de la forma y volumen, el número de configuraciones de preforma o bloqueadores, las dimensiones de la rebaba en el dado, así como el volumen de material adicional para la preforma y las operaciones de terminado y la carga de forja, energía y centro de carga en cada operación de forjado (Altan, 2005).

La forja de estampa es uno de los procesos más complejos, ya que la fricción que existe entre la estampa y el material, el flujo del metal y la transferencia de calor; cambian durante el desarrollo del proceso.

a) Consideraciones geométricas.

Es importante seleccionar los radios de transición adecuados en las esquinas y los biseles, ya que 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 para asegurar el flujo uniforme del metal hacia la cavidad del dado.

En general, son indeseables los radios pequeños por su efecto adverso sobre el flujo del metal y su tendencia a desgastar con rapidez (como resultado de la concentración de esfuerzos). También los radios pequeños de bisel causan la fractura de los dados por fatiga. Como regla general, estos radios deben ser tan grandes como lo permita la pieza de forjada.

Los ángulos de salida son necesarios en casi todos los dados de forjado, para facilitar el desprendimiento entre la pieza y el dado. Al enfriarse, la pieza forjada se contrae en dirección radial y longitudinal a la vez, por lo que ángulos de salida internos se hacen mayores que los externos. Los ángulos internos son de 7 a 10°, y los externos de 3 a 5°. Estos ángulos son disminuidos si el proceso cuenta con extractores, además de que las forjas pretenden reducir los procesos de maquinado, haciendo que tiendan a cero. (Estrada, 2010)

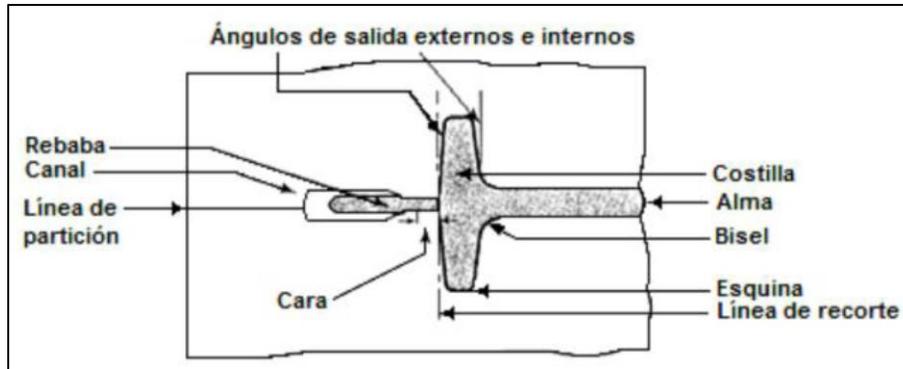


Figura 1.5 Diseño general de un dado por forja cerrada (Schey, 2002).

Tabla 1.3 Valores generales para los ángulos en una matriz de forja, de acuerdo al tipo de ángulo (Schey, 2002).

| Material | Bloqueo | | Convencional | | Precisión | |
|---------------------------------|----------|----------|--------------|----------|-----------|----------|
| | Exterior | Interior | Exterior | Interior | Exterior | Interior |
| Aleaciones de aluminio | 7 | 7 | 5 | 5 | 1 | 1 |
| Acero, aleaciones de Titanio | 7 | 9 | 5 | 7 | 2-4 | 3-5 |
| Aleaciones resistentes al calor | 7 | 10 | 7 | 10 | 5 | 7 |

La línea de partición es la que se presenta a lo largo de la forja donde los dados se encuentran. Las configuraciones posibles son planas, curvas, o irregular con respecto al plano de forja; dependiendo del diseño. La forma y ubicación de la línea de partición determina el costo del dado, los requerimientos del diseño, flujo del material y los procedimientos de corte.

En la mayoría de las forjas, la línea de partición se encuentra en la sección transversal más grande, ya que resulta más sencillo dispersar el material por la acción de la forja, que por la fuerza de una impresión profunda. Si la sección transversal más grande coincide con un lado plano de la forja, existe una ventaja particular en la localización de la línea de partida a lo largo de las aristas de sección plana, por ello se posiciona la impresión completa en una mitad del dado. Los costos del dado se reducen, porque un dado es simplemente una superficie plana, además elimina la posibilidad de desajustes entre el dado superior e inferior, favoreciendo el corte de rebaba.

La posición de la línea de partición permite la ubicación de la preforma en la impresión final del dado de forja y la forja de terminado en el dado de corte. Como parte del metal fluye en dirección de la línea de partición durante la forja, la ubicación de la línea afecta las características del flujo de grano de la pieza forjada.

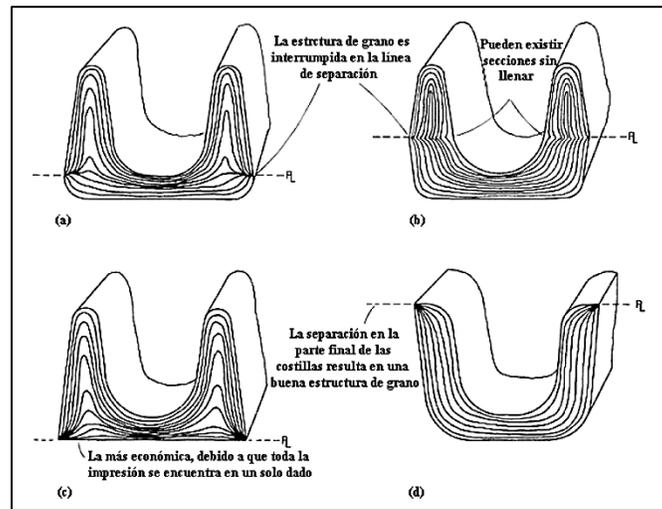


Figura 1.6 Efecto en los patrones de flujo de varias colocaciones de la línea de partición en una sección canal a) y b) No deseado; estas líneas resultan en un flujo de grano que produce defectos de forja. c) y d) Recomendado; patrones de flujo de metal suaves en acciones sometidas a esfuerzos grandes (ASM Handbook Vol 14, 1996).

b) Complejidad de la forja

Existe una relación directa entre la superficie, el volumen de una forja y la dificultad de su producción. La facilidad de forjar formas complejas depende de la proporción relativa de las proyecciones vertical y horizontal de la pieza. La figura 1.7 es una representación esquemática de los efectos de la forma y dificultad forjado. Las piezas "c" y "d" no requieren altas cargas de forja, pero si más operaciones que las piezas "a" y "b" para asegurar el llenado.

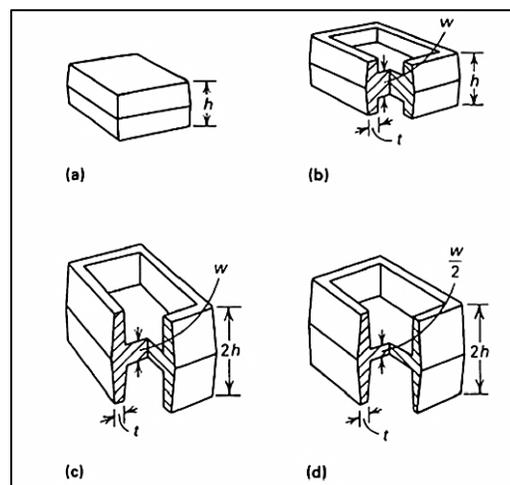


Figura 1.7 Dificultad de forja como función de la geometría de la pieza. (a) Forma rectangular, (b) Forma con alma y costillas, (c) Forma con costillas con mayor altura, (d) Parte con costillas con mayor altura y más delgada (Altan, 2005).

La mayoría de las forjas se pueden clasificar en tres categorías:

- a) El primer grupo de geometría simple (forma compacta) presenta las 3 dimensiones más grandes: longitud, ancho y alto; aproximadamente igual. El número de piezas pertenecientes a este grupo es relativamente pequeño. (clase 1)
- b) El segundo grupo consiste en forma de disco, en el cual, en largo y ancho presentan aproximadamente la misma dimensión y son más grandes que el alto. Todas las forjas redondas pertenecen a este grupo, lo que incluye aproximadamente el 30% de las forjas comúnmente usadas. (clase 2)
- c) El tercer grupo consta de forjas con forma larga, la cual consiste de una dimensión considerablemente mayor que las otras dos. (clase 3)

Estos grupos son subdivididos en más grupos dependiendo de la presencia de cualquier tipo de elementos. Este tipo de clasificación resulta útil para propósitos prácticos, como estimar el costo y la predicción de pasos de preforma. Éste método sin embargo, no es cuantitativo y requiere de algunos métodos de evaluación basado en la experiencia adquirida de procesos previos.

Un valor cuantitativo llamado “factor de dificultad de forma” fue sugerido por Teterin en 1968, para expresiones geométricas complejas y forjas redondas (teniendo un eje de simetría rotacional). El “factor de forma longitudinal” queda definido como:

$$\alpha = \frac{X_f}{X_c} \quad \text{DONDE: } X_f = \frac{P^2}{F} \quad , \quad X_c = \frac{P_c^2}{F_c}$$

Dónde P es el perímetro axial de la sección transversal de la forja, F es el área de la superficie de la sección transversal de la forja. P_c es el perímetro axial de la sección transversal del cilindro que circunscribe la forja. F_c es el área de superficie axial de la sección transversal del cilindro que circunscribe la forja. El cilindro que circunscribe la forja tiene un diámetro máximo y una altura máxima, que es la de la forja. El factor α representa una comparación de la forma de la forja con la del cilindro. En forjas redondas, protuberancias y bordes colocados más lejos del centro, resultan difíciles de forjar. Por ello, un “factor de forma lateral” es definido como:

$$\beta = \frac{2R_g}{R_c}$$

Donde R_g, es la distancia radial del eje de simetría al centro de gravedad de la mitad de la sección transversal y R_c es el radio máximo de pieza forjada, igual al radio del cilindro que circunscribe. El “factor de dificultad” incorpora tanto el factor longitudinal, como el factor lateral y queda definido de la siguiente manera:

$$S = \alpha\beta$$

El factor S expresa la complejidad de la mitad de la sección transversal de una forja redonda con respecto a la del cilindro que circunscribe. En forjas redondas, durante la operación de forjado, el material es movido en dirección del final del cilindro, desde el centro, el cual es considerado como el eje neutral. En forjas no simétricas el material se mueve lateralmente desde la posición neutral. Con esto, una vez definida la superficie neutral, el “factor de complejidad de forma” puede ser calculado para forjas no simétricas (Altan, 2005).

Usando la complejidad de forma y el material de forja como guía, el proceso de forja ingenieril, establece la secuencia de forjado (número de operaciones) y diseña los dados para cada operación, empezando con los dados de terminado. La información necesaria más crítica para el diseño de un dado de forja es la geometría y el material con el que se va a producir.

c) Fricción y lubricación

El flujo del metal en el proceso de forja es causado por la transmisión de presión de los dados al material deformado. Además, las condiciones de fricción en la intercara dado-material son importantes e influyen en los esfuerzos del dado y cargas de forja, así como en el desgaste de los dados. Para evaluar el desempeño de varios lubricantes y ser capaces de predecir las presiones de forja, es necesario expresar la fricción que existe en la intercara de manera cuantitativa, en términos de un factor o coeficiente. En la forja, el esfuerzo friccional cortante, τ , es comúnmente expresado como:

$$\tau = f \bar{\sigma} = \frac{m}{\sqrt{3}} \bar{\sigma}$$

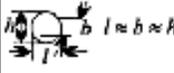
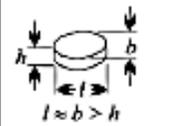
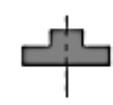
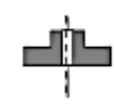
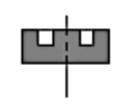
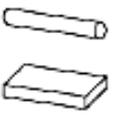
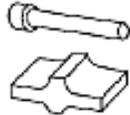
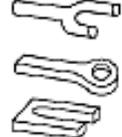
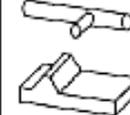
Donde τ , es el esfuerzo friccional cortante, f el factor de fricción y m es el factor de fricción cortante y toma valores de 0 a 1 (Altan, 2005).

Para algunas condiciones de forma, los factores m son los siguientes:

- a) $m=0.05$ a 0.15 en forja en frío de aceros, aleaciones de aluminio y cobre, usando lubricantes de jabón de fosfato o aceites.
- b) $m=0.2$ a 0.4 en forja caliente de aceros, cobre y aleaciones de aluminio con lubricantes de base grafito.
- c) $m=0.1$ a 0.3 en forja caliente de titanio y aleaciones de alta temperatura con lubricantes de vidrio
- d) $m=0.7$ a 1 cuando no se usa lubricante alguno, por ejemplo en rolado caliente de platos o bloques y en la extrusión sin lubricación de aleaciones de aluminio.

En la tabla 1.4 se muestra una clasificación de tipos de forja según la geometría y complejidad de la pieza que se desea obtener.

Tabla 1.4 Clasificación de tipos de forja (ASM Handbook Vol 14, 1996).

| | | | | | | |
|---|----------------------------|---|--|---|--|--|
| <p>Geometría tipo 1: Esferas, cubos y cilindros</p>  | <p>Sub-grupo</p> | <p>Sin proyecciones</p>  | <p>Con proyecciones unilaterales</p>  | <p>Con proyección periférica</p>  | <p>Con proyección unilateral y periférica</p>  | |
| <p>Geometría tipo 2: Discos, pueden presentar pequeñas proyecciones y regiones recalçadas</p>  | <p>Sub-grupo Forma</p> | <p>Sin proyección</p>  | <p>Con proyección (tetón)</p>  | <p>Con proyección y cavidad</p>  | <p>Con proyección perimetral</p>  | <p>Con proyección central y perimetral</p>  |
| <p>Geometría tipo 3: Formas alargadas, partes cuyo eje longitudinal es dominante</p>  <p>1. Partes cortas $l < 3b$</p> <p>2. Partes de media longitud $l = 3...8b$</p> <p>3. Partes alargadas $l = 8...16b$</p> <p>4. Partes muy alargadas $l > 16b$</p> | <p>Sub-grupo Forma</p> | <p>Sin proyección</p>  | <p>Con proyecciones paralelas al eje principal</p>  | <p>Con elementos en forma de horquilla</p>  | <p>Con proyecciones asimétricas al eje principal</p>  | <p>Con dos o más proyecciones</p>  |

1.6 PRECISIÓN DE LA FORJA

La precisión del proceso de forja es afectada por diversas variables, las cuales se muestran en la Tabla 1.5, estas variables se encuentran clasificadas en tres principales categorías. En el primer grupo pueden ser modificadas antes de comenzar con el proceso. El segundo grupo incluye aquellas variables que son afectadas durante el proceso; y finalmente el tercer grupo incluye las variables que llegan a afectar una vez terminado el proceso de forja.

| <u>Antes de la forja</u> | <u>Durante la forja</u> | <u>Después de la forja</u> |
|--------------------------------------|------------------------------------|----------------------------|
| Material de la pieza de trabajo | Temperatura de la pieza de trabajo | Desbastado |
| Tamaño de la pieza de trabajo | Esfuerzos | |
| Forma de la pieza de trabajo | Incrustaciones | Tratamientos térmicos |
| | Contracción | Proceso de enfriamiento |
| Precisión de la fabricación del dado | | Proceso de limpieza |
| Precisión de las medidas del dado | Volumen de la preforma o lingote | |
| Superficie de la cavidad del dado | | Dimensionado |
| Deformación elástica del dado | Lubricación | Maquinado |
| | Temperatura del dado | |
| Configuración de precisión del dado | | |
| Diseño del dado | Desgaste del dado | |
| Secuencia de forjado | | |
| Tipo de máquina de forja | | |
| Carga requerida y energía | | |
| Dureza de la máquina forja | | |
| Guía del ariete | | |

a) *Variables antes del proceso.*

Durante el diseño y la planeación de las etapas, las decisiones tomadas acerca del material a usar, afectan la capacidad de alcanzar precisión en el forjado. Excepto en algunos casos raros el material no cambia, sin embargo, el conocimiento del material a forjar ayuda en la planeación del proceso. El flujo del material es uno de los principales aspectos que es considerado. A pesar de esto, la composición, la microestructura y la experiencia de procesos anteriores afectan su forjabilidad.

Una planeación cuidadosa del tamaño y la forma del lingote, así como de la preforma, es esencial en la forja resultante. Como resultado, la distribución del material en la preforma debe ser planeado y realizado en un orden preciso para evitar que la cavidad no se llene o que se generen sobrepesiones.

La exactitud del dado, al llevar a cabo el proceso, impacta claramente en la precisión de la forja. Los procedimientos por los cuales es maquinado varían de manera considerable, por consiguiente la capacidad de hacerlos altamente precisos. La Tabla 1.6 muestra los métodos comunes de maquinado con sus respectivas precisiones. La precisión posicional es afectada en gran medida por el hundimiento del dado y la capacidad para colocar una impresión en el bloque del dado relativo a las superficies de referencia. En los dados bien hechos, la posición de la impresión debe estar cerca de 0.01 mm de referencia.

| Proceso | Precisión dimensional (μm) | Superficie de rugosidad $R_t(\mu\text{m})$ |
|-------------------|---|--|
| En frío | 10 | < 5 |
| En caliente | 50 | < 15 |
| Torneado | 10 | < 12 |
| Fresado | 200 | < 15 |
| Electroerosionado | 5 | < 5 |

Todos los dados de forja se deforman de manera elástica (si se presenta deformación permanente en el dado representa un diseño inadecuado del mismo) durante el proceso. La deformación es predecible y se minimiza haciendo las dimensiones del dado más grandes con respecto al tamaño de la impresión.

La secuencia de forjado debe ser diseñada ya que existen varios caminos para realizar una forja, para una de precisión, la mejor secuencia es aquella en la que provoca un menor desgaste en el dado de terminado, esto involucra realizar uno o dos pasos adicionales de preforma.

b) Variables de la máquina.

La precisión de la forja depende de la máquina también, dicha precisión es afectada por la rigidez, dirección, cargas y energía repartida por el sistema. En las prensas mecánicas, como la carga varía el espesor de forja varía también. En algunas máquinas la rigidez varía poco y son consideradas más adecuadas para la forja de precisión.

La prensa de forja permite una configuración guiada de los dados y eyectores, esto mejora la precisión horizontal. Los eyectores permiten un forjado de formas más exactas. En prensas de tornillo y martinete se tiene un excelente control de la dimensión del grosor.

c) *VARIABLES DURANTE EL PROCESO.*

De todas las variables de la forja, la temperatura de la pieza de trabajo es probablemente la más compleja e importante. Se debe tener un control cuidadoso a la salida del horno de precalentamiento, y después cambia sustancialmente durante el primer paso de forjado. El trabajo de deformación causa calentamiento en el interior y en la superficie debido al contacto con el dado.

La temperatura durante el proceso también afecta el flujo de material a ser forjado y después a la carga y energía requerida. Una baja temperatura de forja resulta en una mayor deformación elástica de los dados y la máquina de forja debido a la carga aplicada. En las prensas mecánicas, la estructura va a cambiar, esto debe ser tomado en cuenta en el proceso de configuración con el propósito de alcanzar un espesor de forja preciso. Si la temperatura de forja varía durante la operación, existirá una variación proporcional en las dimensiones de la pieza forjada.

La formación de óxido y descarbonización están relacionados con el tiempo, temperatura, atmósfera del horno y el material. El acero comienza a oxidarse cerca de los 204°C (400 °F), sin embargo la oxidación grave comienza hasta que el material alcanza los 843 °C (1550 °F). El lingote no debe mantenerse por un largo tiempo a la misma temperatura, una atmósfera protectora o un revestimiento protector resultan útiles para prevenir óxido, si éste es inevitable debe ser removido, al menos antes de la primera etapa de forjado. La formación de oxidación durante el proceso de enfriamiento se puede reducir con una atmósfera apropiada y acelerando el enfriamiento.

Cierta cantidad de descarbonización es inevitable y se debe remover de las superficies críticas de maquinado. El uso de una atmósfera protectora durante el calentamiento puede minimizarla, en casos donde el subsecuente tratamiento de calentamiento es un proceso de carburación, una menor cantidad de descarbonización ocurrirá durante la forja.

El impacto de variaciones en el volumen de lingote es bien conocido. Esto causa que la carga de forja y energía varíen, lo que se traduce en variaciones en la pieza forjada, siendo el grosor la dimensión más afectada. Cuando se lleva a cabo un proceso sin rebaba, un control cerrado del volumen del lingote es necesario para evitar el sobrellenado e incremento de la carga.

El desgaste es un factor que no solo afecta la precisión sino también la economía del proceso, normalmente 70% de la sustitución de dados es debido este fenómeno. Estos son cambiados porque ya no mantienen las tolerancias requeridas.

La temperatura impacta de forma dramática la vida del dado, se tiene estimado que en un proceso convencional, el calentamiento reduce la vida del dado hasta en un tercio de lo normalmente esperado.

Con el sobrecalentamiento de los dados, el exceso de óxido es el principal factor que empobrece la vida del dado, afortunadamente al reducir la temperatura de forjado, se reduce la formación de óxido producido durante el calentamiento.

d) *Variables después del proceso.*

El desbastado es usado para incrementar la precisión de la forja. En algunos casos para remover el ángulo de desmoldeo y mejorar el radio de las esquinas. Sin embargo, este proceso deforma la pieza de trabajo y modifica su precisión. En los casos más sencillos donde se emplea para remover el cordón resultante de rebaba, si la herramienta se encuentra excesivamente desgastada o desalineada, el resultado de distorsión es inaceptable. En otros casos, donde la forma es más compleja, la pieza es sujeta cuidadosamente, para evitar la más mínima distorsión. Frecuentemente las piezas obtenidas por forja son tratadas térmicamente para alcanzar la combinación deseada de resistencia y dureza. Una práctica normal de tratamiento térmico, empleado en forja convencional, es inaceptable en una de precisión y resulta en exceso de óxido, superficie descarburizada, o distorsión. El tratamiento térmico en horno con atmósfera oxidante debe evitarse, ya que existe el riesgo de dañar la superficie lo que la haría inusable. Se debe buscar una atmósfera que prevenga la formación de óxido y descarburización.

1.7 TOLERANCIAS PARA FORJA DE PRECISIÓN

La norma alemana para tolerancia de forja, DIN 7526 (1969), presenta valores de tolerancia para ambos casos, un proceso normal o de precisión. Es conocido que esto toma en cuenta el peso, complejidad, y la dificultad del material a ser forjado. La Tabla 1.7 ilustra un ejemplo de tolerancias de la norma mencionada. Las tolerancias de esta tabla aplican para dimensiones de largo, ancho y alto, incluyen los diámetros de un lado de la línea de partición; todas las variaciones, incluyendo aquellas relacionadas debido al desgaste del dado.

Tabla 1.7 Tolerancias de forja para el largo, ancho y alto de un lado de la línea de partición de la DIN 7526 (Norma alemana, 1969)

| Peso de la forja (lbs) | Dimension en pulgadas | | |
|--|-----------------------|----------------|----------------|
| | 1.2–4.0 | 4.0–6.3 | 6.3–10.0 |
| <i>Tolerancias de la norma para forja simple (S1)</i> | | | |
| 2.2–4.0 | +0.0421/–0.021 | +0.047/–0.023 | +0.0541/–0.026 |
| 4.0–7.0 | +0.0471/–0.023 | +0.0541/–0.026 | +0.060/–0.030 |
| 7.0–12.0 | +0.054/–0.026 | +0.060/–0.030 | +0.067/–0.033 |
| 12.0–22.0 | +0.060/–0.030 | +0.067/–0.033 | +0.074/–0.036 |
| <i>Tolerancias de la norma para forja compleja (S3)</i> | | | |
| 2.2–4.0 | +0.054/–0.026 | +0.060/–0.030 | +0.067/–0.033 |
| 4.0–7.0 | +0.060/–0.030 | +0.067/–0.033 | +0.074/–0.036 |
| 7.0–12.0 | +0.067/–0.033 | +0.067/–0.036 | +0.080/–0.040 |
| 12.0–22.0 | +0.074/–0.036 | +0.080/–0.040 | +0.094/–0.046 |
| <i>Tolerancias de precisión para forja simple (S1)</i> | | | |
| 2.2–4.0 | +0.027/–0.013 | +0.030/–0.015 | +0.034/–0.017 |
| 4.0–7.0 | +0.030/–0.015 | +0.034/–0.017 | +0.038/–0.019 |
| 7.0–12.0 | +0.034/–0.017 | +0.038/–0.019 | +0.042/–0.021 |
| 12.0–22.0 | +0.038/–0.019 | +0.042/–0.021 | +0.046/–0.023 |
| <i>Tolerancias de precisión para forja compleja (S3)</i> | | | |
| 2.2–4.0 | +0.034/–0.017 | +0.038/–0.019 | +0.042/–0.021 |
| 4.0–7.0 | +0.038/–0.019 | +0.042/–0.021 | +0.046/–0.023 |
| 7.0–12.0 | +0.042/–0.021 | +0.046/–0.023 | +0.051/–0.025 |
| 12.0–22.0 | +0.046/–0.023 | +0.051/–0.025 | +0.059/–0.029 |

CAPÍTULO 2. MANUFACTURA DE BIELAS

2.1. INTRODUCCIÓN AL USO DE LA BIELA

La biela es un elemento mecánico que une al pistón con la manivela del cigüeñal. Es la encargada de transformar el movimiento lineal del pistón, en movimiento rotacional del cigüeñal, transmitiendo la fuerza de explosión. Debido a lo largo y delgado de la pieza, el émbolo se encuentra sometido a sollicitaciones de compresión y flexión, la longitud de la biela está relacionada con el radio del muñón del cigüeñal. La biela tiene gran resistencia y bajo peso, para aminorar las fuerzas de inercia resultantes.

Éste elemento es fabricado buscando una relación entre el peso y la resistencia, manufacturándose por procesos de forja principalmente, siendo posteriormente balanceadas y seleccionadas para un mismo motor, agrupándolas de forma que tengan un peso idéntico.

2.2. PARTES DE LA BIELA Y FUNCIÓN.

- a) Cabeza de biela: se encuentra en contacto con el muñón del cigüeñal, la cual es partida en dos mitades. Esta pieza se le conoce como sombrerete y se une a la biela por medio de tornillos generalmente de acero, los cuales son inmovilizados durante el montaje para evitar que se aflojen al estar en funcionamiento. Las superficies en forma de cilindros, son revestidas con un cojinete dividido en dos mitades.
- b) Pie de biela: es la pieza con el barreno de menor diámetro y permite el acoplamiento de la biela con el pistón por medio del bulón.
- c) Cuerpo de la biela: es la pieza central, encargada de unir a la cabeza y pie, en algunas ocasiones presentan un conducto para dirigir el aceite a través de la misma para evitar así un desgaste mayor. (Munive, 2013)

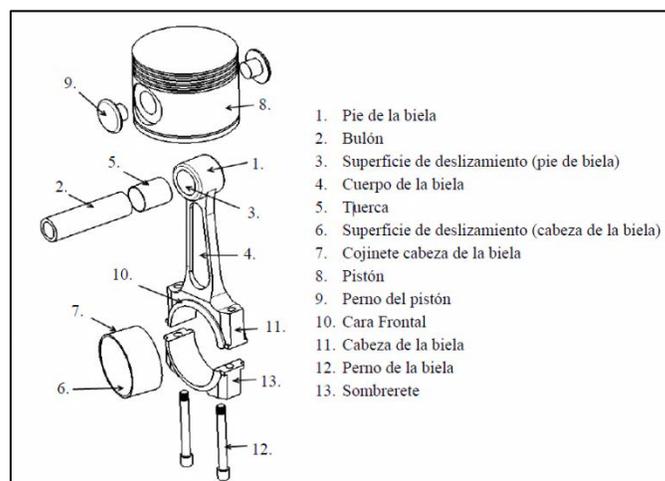


Figura 2.1 Biela y sus principales componentes. (Munive, 2013)

Las bielas que funcionan dentro de un motor de combustión interna se encuentran sujetas a altas cargas cíclicas compuestas de tracción dinámica y cargas compresivas. Son capaces de transmitir la tracción axial y las cargas compresivas, así como soportar la flexión causada por el empuje y tirón del pistón; y por la fuerza centrífuga del cigüeñal.

Si el peso de una biela se reduce mientras incrementa su resistencia, el motor se vuelve más eficiente, actualmente el acero es un material comúnmente empleado en autos de pasajeros. Sin embargo, algunas marcas manufactureras están intentando emplear materiales más ligeros. Varios materiales compuestos con base de aluminio han sido considerados (Takemasu, 1996).

La forja sin rebaba ofrece la posibilidad de producir bielas de compuestos de aluminio a precios competitivos. El proceso de diseño de forja sin rebaba, es más complejo que el diseño de un dado cerrado para forja convencional con rebaba.

Para acelerar el desarrollo del proceso de manufactura y para reducir los costos de desarrollo, el diseño ha sido desarrollado y aplicado. El método de elemento finito, ofrece la posibilidad de diseñar un proceso de manufactura completo, esto lleva a una reducción del costo y tiempo del proceso, así como el diseño del herramental, manufactura del mismo y del dado de prueba. Además permite modificar iterativamente las condiciones de proceso en la simulación, para encontrar las mejores condiciones de manufactura de un producto. (Takemasu, 1996)

2.3. MATERIALES EMPLEADOS PARA LA FABRICACIÓN DE BIELAS

Mientras la mayoría de las bielas usadas en la producción de automóviles son de acero, otros materiales y tecnologías existen para un mejor desempeño.

a) *Aluminio*

Se ha reportado que algunas matrices metálicas compuestas consisten de una aleación de aluminio y carburo de silicio con fibras continuas, las cuales han sido probadas en motores de autos de carreras. La reducción del peso es de aproximadamente el 25%, comparado con las hechas de acero e incrementa la rigidez un 29% así como la resistencia en un 20%, lo que lo hace una opción atractiva para algunos motores de competición. (Sala, 2002)

b) *Magnesio*

Las bielas de magnesio han sido satisfactoriamente fabricadas mediante el proceso de forja caliente en dado cerrado. Se ha reportado que los valores de tensión de una biela, compite con una equivalente de aluminio, sin embargo no han sido realizadas pruebas funcionales.

Un análisis económico de los beneficios de componentes más ligeros de magnesio, han sido mostrados en el consumo de combustible. (Kevorkijan,2003)

c) *Titanio*

Se han realizado bielas forjadas de titanio en motores de competición. El dado de acero es rociado con disulfuro de molibdeno para prevenir la oxidación del titanio durante el proceso de forja. Mientras el costo del titanio es excesivo para la producción en masa, Honda® ha sido capaz de alcanzar 700rpm adicionales de velocidad en un motor con bielas de titanio. Muchos autos de fórmula 1 utilizan bielas de titanio para alcanzar 18,000 rpm en su motor. (Gupta,1993)

d) *Materiales poliméricos*

Una biela híbrida, se desarrolló mediante un avanzado programa compuesto de Daimler-Benz, que consistió en una fibra de carbono reforzada con plástico en el cuerpo de la biela y terminales de titanio. Dichas bielas reportaron ser 30% más ligeras que las forjadas de acero y reportan haber resistido satisfactoriamente las pruebas máximas de carga como en el motor 2.3 l a temperatura ambiente y aceite a 120°C. (Gupta,1993)

e) *Otros materiales*

Con materiales como el acero C-70, se presentan ventajas en el proceso de compactación de polvos sobre el de obtención por forja, como el maquinado para emparejar la superficie entre la biela y el sombrerete, ya que la división de estas dos piezas se lleva a cabo por máquinas hidráulicas y disminuye los procesos de acabado, lo que reduce el costo hasta en un 25%. (Reppen, 1998).

Se continúan desarrollando más aceros; como el 36MnVS₄ microaleado que muestra una mejor resistencia a la fatiga que el C-70. Este material mostró un incremento en la resistencia del 15 a 20%, además de incrementar la vida del herramental así como un menor costo de manufactura. (Reppen, 1998)

2.4. FABRICACIÓN DE BIELAS

El proceso de forja en dado cerrado es ampliamente usado en la producción masiva de piezas de alta calidad como bielas, cigüeñales, etc. a costos moderados.

Los aceros al carbono fueron el primer material utilizado, puesto que una biela no puede ser formada en un solo impacto, los dados de forja presentan múltiples impresiones, cada paso se acerca más a la forma final. El material inicial es llevado de una impresión a otra en aplicaciones de carga sucesivas. La figura 2.2 muestra los pasos principales en la forja de una biela. A menudo la tapa de la biela es forjada por separado, o junto con la biela y ligeramente separado en dos partes.

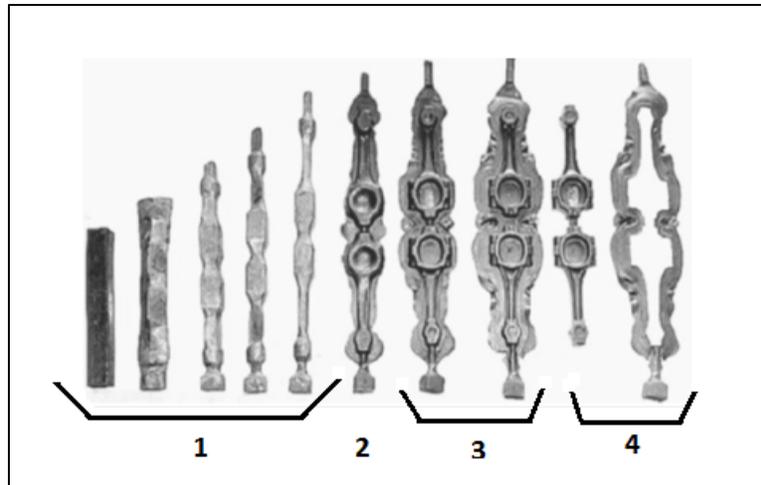


Figura 2.2 Secuencia de forja en estampa para una biela (Altan, 2005)

Las Etapas del proceso de fabricación de biela son:

- a) Paso 1: En el proceso de llenado, se usa la forja de martinete para reducir la sección transversal, alargar y distribuir al material. Este proceso es realizado en conjunto con la impresión de contorno. Se convierte a la barra de sección rectangular en una preforma, la cual es reducida en su sección transversal y es alargada.
- b) Paso 2: La operación de bloqueo forma a la biela en su primera etapa definida. Esto involucra el trabajo en caliente del metal y la aplicación sucesiva de golpes, haciendo que la pieza de trabajo entre y llene los dados de impresión. Se producen las rebabas en los bordes de la biela, provenientes del exceso de material que garantiza el llenado.
- c) Paso 3: La forma exacta de la biela es obtenida mediante la aplicación de varios impactos del martinete o la carga ejercida por la prensa, donde la fuerza obliga al material a llenar cada parte de la impresión final.
- d) Paso 4: La rebaba formada es desbastada o cortada; lo cual es realizado mediante diferentes procesos: con un dado de corte en la prensa mecánica y en ciertas ocasiones por sierra. La biela está lista para recibir tratamientos térmicos y maquinado.
- e) Paso 5: Para obtener tolerancias más cerradas se requiere de operaciones de acuñado y medido. El acuñado es llevado a cabo en frío o caliente; para obtener un buen acabado superficial se escoge en frío.
- f) Paso 6: Después de ser forjada la biela, se llevan a cabo tratamientos térmicos para asegurar un óptimo tamaño de grano, microestructura y propiedades mecánicas.
- g) Paso 7: Para obtener el peso y balanceo correcto de la pieza final, la biela es forjada con un poco de material extra a forma de contrapesos en ambos extremos de la misma. Estos contrapesos son maquinados durante el proceso de terminado.

- h) Paso 8: La biela y la tapa son finalizadas empleando diversas operaciones como: escariado, fresado, barrenado, rectificando, contorneado, entre otros procedimientos de terminado. Se incluye el maquinado de los contornos externos, barrenado de la cavidad de lubricación y del sombrerete para sujeción, así como la misma cabeza de la biela.

Resulta importante la cantidad del material para obtener las dimensiones finales deseadas. La cantidad de material removido durante el maquinado es generalmente del 25 a 30 % del lingote inicial. Esta estimación no incluye la rebaba que es cortada inmediatamente después del proceso de forja. (Visser, 2008)

Durante la forja se forman escamas producto de una reacción química entre el oxígeno en el horno y el material caliente. Para las siguientes operaciones las escamas son removidas mediante chorro de municiones, frotación o baño limpiador. Finalmente las bielas son inspeccionadas en su tamaño, peso y condiciones de superficie después de las operaciones de terminado.

A inicios de los años 90 fue un periodo en donde surgieron nuevos desarrollos en la industria de forja de bielas. Nakamura desarrolló una alta resistencia a la fatiga, sin maquinado, mediante un acero microaleado específicamente para bielas. Este acero contiene el 0.3% de su peso de carbono, con algunos agregados de vanadio, azufre, fósforo y calcio. Presentó 26% más de resistencia a la fatiga, que las bielas tradicionales y mostró una misma vida del herramental. Como las propiedades mecánicas son alcanzadas después del proceso de forja, se elimina la necesidad de llevar a cabo tratamientos térmicos. Además el peso de la biela se redujo el 15% sin afectar sus propiedades mecánicas. En 1992 Olaniren y Stickels obtuvieron la patente de un acero de forja manipulable. En este procedimiento dos muescas son hechas en la línea de partición para la biela y el sombrerete a 180° una de la otra; posteriormente son fracturados en el método de control. Este proceso, con todo y los inconvenientes en el control dimensional del proceso de forja, permite el maquinado de la biela a costo competitivo.

Existen otros procesos de fabricación de bielas como la metalurgia de polvos y la fundición, en las cuales no se profundizará ya que no son motivo de este trabajo.

2.5. MÉTODO PARA LA FABRICACIÓN DE BIELAS DE MOTORES (PATENTE DE PROCESO DE FABRICACIÓN DE UNA BIELA FORJADA ES 2 124 388 T3)

Esta patente muestra un método empleado en la fabricación de bielas para motores de combustión interna que se obtienen de una sola pieza. Cada biela contiene un extremo principal o pie, con cojinete superior, una tapa de cojinete y un extremo reducido o cabeza, con los extremos unidos entre sí, por el brazo de la biela. Consta principalmente de los siguientes pasos: corte de una barra a partir de un lingote inicial, mediante trazos longitudinales o transversales dependiendo de cada una de las bielas. El precalentamiento de la pieza inicial; forja de las piezas iniciales y finalmente división de la biela forjada en dos partes a lo largo de un plano de división predeterminado que pasa por el pie de biela.

Según varios métodos; el pie de biela es dividido en un cojinete superior y un sombrerete, que se vuelven a conectar después mediante pernos cuando se efectúa el montaje en el motor. Esta división, se puede realizar de diferentes formas. El método más laborioso y costoso es realizar dicha separación después del proceso de forja, ya que representa la elaboración de piezas sobredimensionadas y la eliminación de dicho material mediante el proceso de fresado.

La finalidad es mejorar los presentes métodos conocidos de fabricación de bielas, mediante un método simple, económico y que sea realizado con precisión.

Este objetivo es alcanzado por el hecho de que la división de biela de motor terminada se inicia antes del comienzo de las operaciones de forja, al realizar una ranura por un corte en la superficie lateral de cada pieza en bruto, la ranura queda dispuesta a una distancia predeterminada con respecto al extremo de la pieza destinada a formar el pie de biela con una forma específica. La ranura durante las diferentes fases de forja es obligada a expandirse para formar finalmente, en el plano de división, un inicio de fractura alrededor de una parte homogénea restante del pie de biela, que está situada en el área dentro de la cual se taladran los orificios para los pernos que fijan a la biela con la tapa.

La tapa es separada del cojinete por los orificios para pernos, requeridos para el nuevo montaje de la tapa sobre el cojinete superior, que son taladrados a través de una parte importante de la zona homogénea rodeada por la iniciación de la fractura, después de lo cual, cualquier material restante en el plano de división es roto o separado por una pequeña fuerza.

El área en sección transversal del material restante en la zona homogénea, después del taladrado de los orificios, es menos de 5% del área de división entre la parte de la biela y la de la tapa. Esto logra una superficie de división libre de deformación, lo que proporciona una guía fiable entre la biela y la tapa.

El método de fabricación inicia por el corte aserrado de material de la barra, este corte se realiza en frío, en tramos o piezas iniciales que tienen una longitud apropiada. El diámetro de la barra D y por lo tanto el diámetro de la pieza en bruto o tramos varía dependiendo del tipo de biela que se quiere fabricar. Las piezas en bruto de sección circular, rectangular o de sección cuadrada pueden ser usadas.

Los diámetros apropiados se encuentran dentro de un intervalo de 43-65 mm. La longitud de la pieza L , varía al igual que en el caso anterior, dependiendo del tipo de biela de motor y los valores apropiados de L se encuentran en el intervalo de 125-400 mm (Ravenshorst, 1993).

Cada una de las piezas en bruto es dividida en una parte, destinada a la biela y una parte a la tapa de la misma. Por medio de una ranura transversal anular (Figura 2.3), que es cortada radialmente en la superficie lateral cilíndrica de la pieza en bruto.

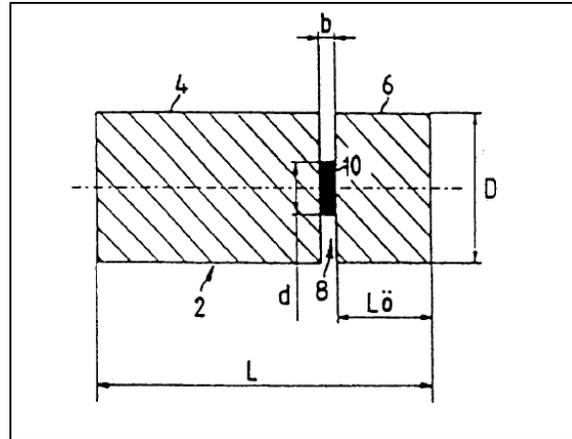


Figura 2.3 Corte de una pieza en bruto de una barra quedando dotado de una ranura anular (Ravenshorst, 1993).

El fondo de la ranura anular define una zona de núcleo (Figura 2.3) circular y homogénea cuyo diámetro "d" varía como función de los valores de D, llegando a valores dentro del intervalo de 10-30mm. La ranura (Figura 2.4) en la pieza en bruto está situada de manera que se obtiene una indicación de fractura en el plano de separación entre la parte correspondiente a la biela y la correspondiente a la tapa.

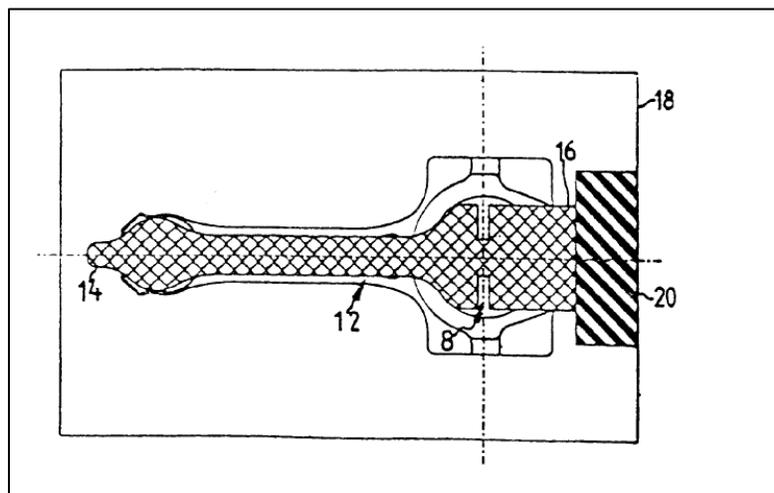


Figura 2.4 Vista Plana de una pieza en bruto formada (Ravenshorst, 1993).

Se ha comprobado mediante pruebas que un valor aproximado de 40-50mm. Dependiendo de la técnica a utilizar para la fabricación de la ranura, es posible hacer que el ancho b de la ranura varíe desde centésimas de milímetro hasta 5 mm. El ancho adecuado de la ranura se ha encontrado que es de 1.5-2 mm.

Las piezas iniciales son cargadas en un horno, de forma que la ranura quede dirigida en la misma dirección efectuándose el calentamiento por inducción, hasta la temperatura de forja en el intervalo de 1250-1280 °C. Después del calentamiento, las piezas iniciales son preformadas de modo convencional, mediante laminado a efectos de obtener una pieza en bruto adecuada para la forja.

La pieza inicial comprende una zona laminada (Figura 2.4) y una zona no laminada. La ranura anular queda situada en la parte no laminada y por lo tanto no queda afectada por el preformado. Este preformado reduce el área de sección transversal y aumenta la longitud de la pieza inicial.

La siguiente forja es llevada a cabo en dos fases, en una prensa excéntrica de mil toneladas, es decir, una fase de preformado y una fase de conformado final.

Para el preformado, la pieza en bruto pre-laminada es colocada en el dado de preformación, con la parte sin laminar haciendo tope en el dado de preformado. Asegurando de este modo que la ranura anular quede situada exactamente en la misma localización del dado. En la primera fase de forja, el dado, proporciona a la pieza inicial el perfil correcto.

En la segunda fase de forja, llevada a cabo con el dado de terminado (Figura 2.5), la biela se compone en la fase final por el pie, cojinete superior, tapa, cabeza y cuerpo. Las diferentes fases de trabajo imparten finalmente a la biela una sección tal que la parte del núcleo, según el plano de división, se desplaza hacia afuera del centro de cada una de las áreas por las que se deben taladrar los orificios para los pernos en el cojinete superior y tapa. El material del núcleo se extiende más allá del eje de los orificios para pernos pero no pueden continuar después del borde externo de cada uno, con la finalidad de no dificultar la división siguiente de la biela.

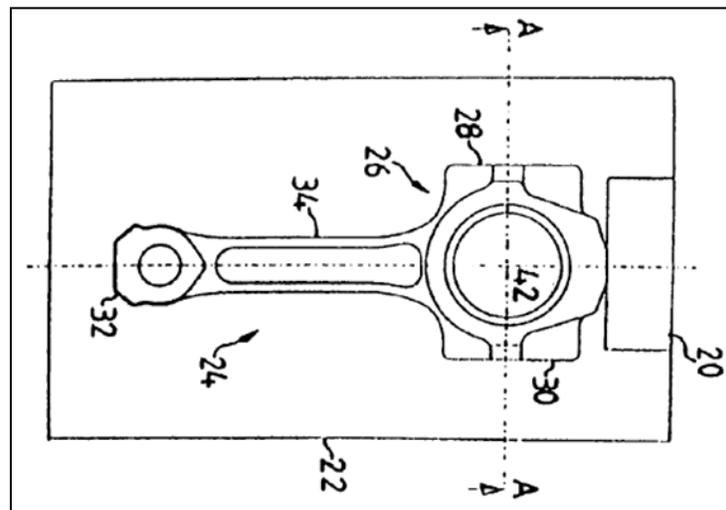


Figura 2.5 Vista de planta de dado terminado con una pieza en bruto forjada en modo de acabado (Ravenshorst, 1993).

La extensión controlada del material se hace posible en virtud del hecho que el diámetro d de la región del núcleo se equilibra con respecto a un área sobrante situada en el centro del dado de forja. Si la proporción entre el diámetro d de la parte del núcleo y las dimensiones de la zona sobrante se escoge en forma correcta, una parte del núcleo se extenderá siempre hacia adentro del área para los orificios de los pernos. Una proporción seleccionada de forma correcta significará que el área de cada uno de los orificios de los pernos quedará llenada parcialmente por el material de la zona del núcleo.

Cuando la biela queda finalmente forjada tendrá una indicación de fractura. Que rodeará la parte restante de la zona del núcleo.

Después de la forja, la biela es desbastada de manera convencional tanto por dentro como por fuera en una prensa excéntrica. El desbastado es realizado en caliente, directamente después de la fase final de la forja, para eliminar el material que ha penetrado dentro de la zona sobrante interior o la zona exterior sobrante.

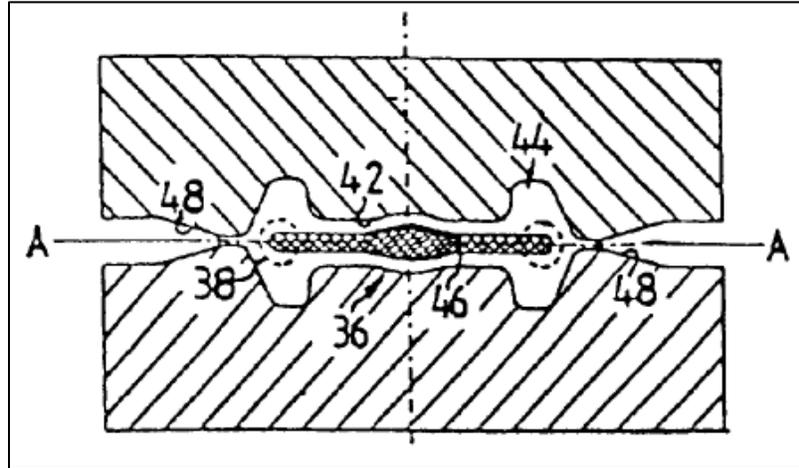


Figura 2.6 Dado terminado con la pieza en bruto forjado de acabado (Ravenshorst, 1993).

Posteriormente se realiza un calibrado, se somete a un proceso de impacto por chorro de arena, se taladran los orificios y la biela está entonces lista para su división en la línea de producción y tiene la forma que se muestra en la figura 2.7

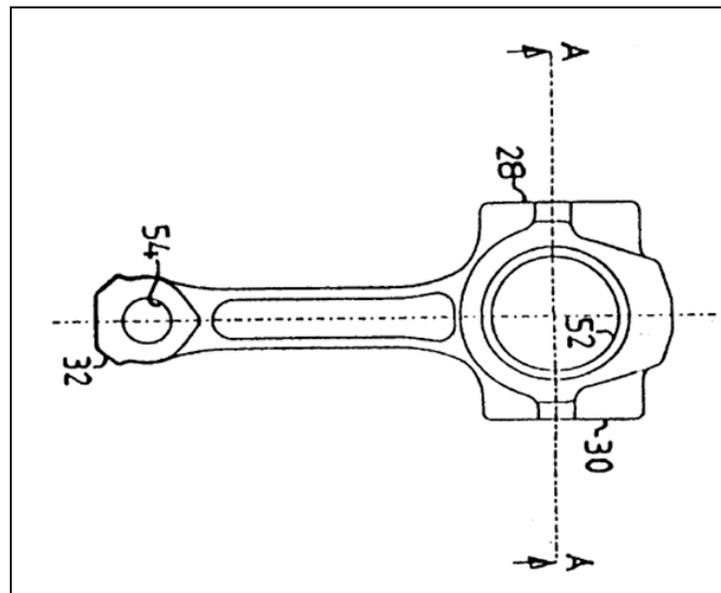


Figura 2.7 Vista de planta de una biela de motor terminada. (Ravenshorst, 1993).

CAPÍTULO 3. ESTADO DEL ARTE DE SIMULACIÓN DE PROCESOS DE FORJA EN ELEMENTO FINITO (EF)

3.1. INTRODUCCIÓN A LA SIMULACIÓN DE PROCESOS DE FORJA

El desarrollo de tecnología para simulación en EF en el área de forja comenzó a finales de los años 60. Durante los 70's e inicio de los 80's simulaciones de estado estacionario en dos dimensiones (2D), como la extrusión de una barra cilíndrica y la deformación plana de una lámina por rolado, se encontraban disponibles. Estados no estacionarios en 2D de flujo de metal con re-mallado manual, requerían mucho tiempo para completar la simulación por lo que eran aplicados en áreas limitadas de forja, especialmente en el proceso de forja caliente de piezas aeroespaciales. Desde el mallado automático y la tecnología de re-mallado desarrolladas a finales de los 80's y principios de los 90's, la capacidad del uso práctico de paqueterías ha incrementado drásticamente, acompañado de la amplia difusión de estaciones de trabajo de alto desempeño. La tecnología automática de re-mallado, así como las computadoras de alto desempeño hicieron de los programas de simulación una herramienta de desarrollo práctico en las compañías de forja de gran tamaño. Desde mediados de los 90's, las simulaciones EF fueron usadas ampliamente como una herramienta práctica incluso en industrias de forja de pequeño y mediano tamaño.

Las simulaciones de EF en tres dimensiones (3D) han sido empleados desde la comercialización de programas capaces de realizar un re-mallado automático a mediados de los 90's.

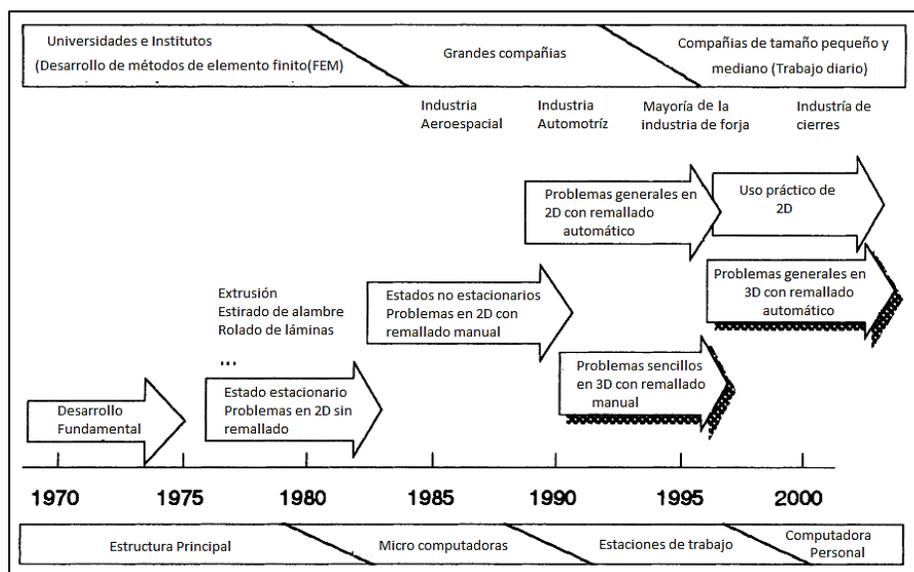


Figura 3.1 Historia Práctica del uso de simulación EF en forja (Kim, 2000).

3.2. FLUJO DE METAL Y OPTIMIZACIÓN DE LA PREFORMA DE UNA BIELA

El modelado de experimentos, así como las simulaciones en elemento finito las llevaron a cabo en 2D para determinar la preforma para la forja de la biela sin rebaba.

Los modelos experimentales para el conformado de una biela mediante un proceso de forja sin rebaba se realizaron con lingotes de plastilina y herramental de aluminio. El propósito fue encontrar la geometría de la preforma, que resulta en el llenado completo de la cavidad del dado.

La distribución del volumen en la biela se obtuvo cortando varias secciones transversales y calculando el área de cada corte. Los valores fueron graficados como se muestra en la Figura 3.2 a, teniendo como ejes la altura contra la longitud de la biela. Basado en los resultados se diseñó una preforma axisimétrica. La preforma sugerida se muestra en la Figura 3.2 b.

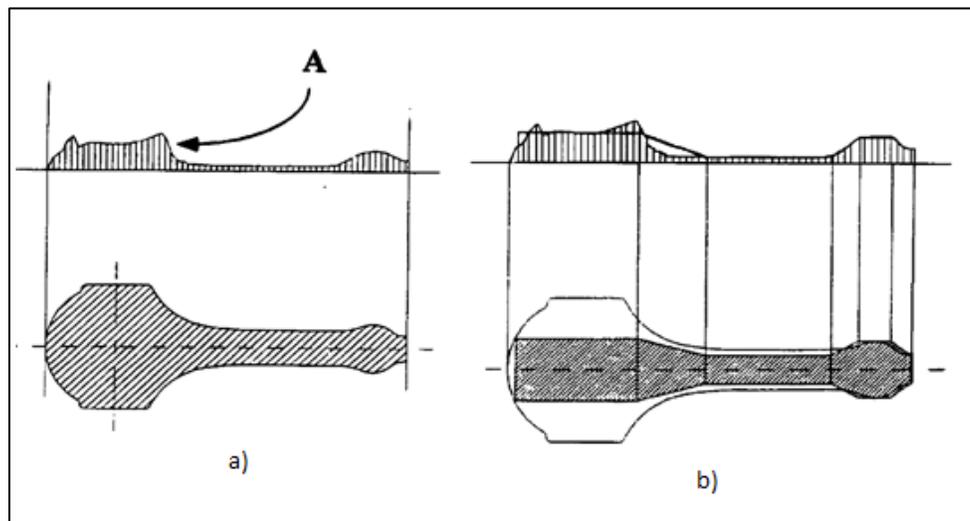


Figura 3.2 a) Distribución del volumen de una biela contra su largo b) Preforma axisimétrica (Takemasu, 1996).

3.3. SIMULACIÓN EN ELEMENTO FINITO DEL PROCESO DE FORJA.

El paso inicial de configuración de la preforma fue simulado empleando un dado plano el cual se mueve en la dirección negativa Y, para comprimir el pie de biela. Elementos tetraédricos se emplearon para el lingote en ésta simulación. La simulación fue detenida a una carrera aproximada de 1.5 mm, considerando una aleación Al 2618 a una velocidad de golpe de 20 mm/s

La curva de carga necesaria para esta operación se muestra en la Figura 3.3. La fuerza requerida para formar la mitad de la pieza de trabajo es de casi 1.9 toneladas, lo cual significa que 3.8 son necesarias en esta operación.

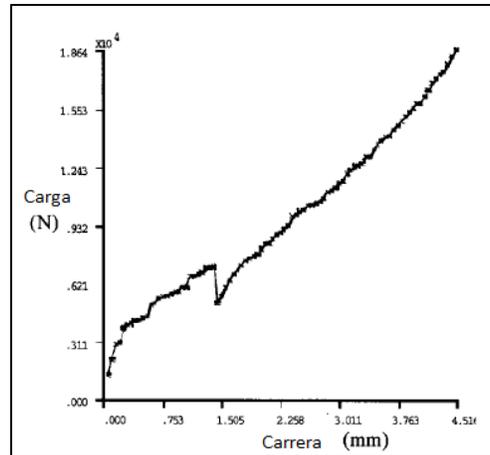


Figura 3.3 Carga en el proceso inicial de preforma (Takemasu, 1996).

La simulación de forja sin rebaba se realizó empleando un dado superior y un dado con la preforma pre-establecida en medio como se muestra en la Figura 3.4. Se apreció que una cavidad relativamente grande permanece en la superficie superior de la pieza anular en la cabeza de biela.

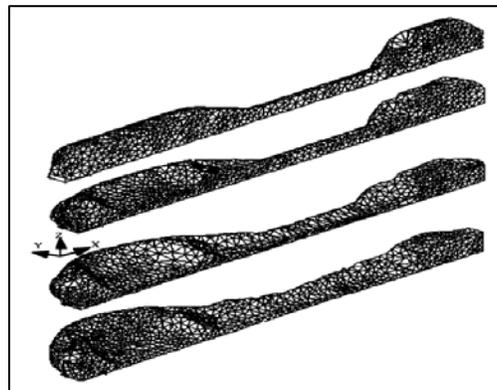


Figura 3.4 Flujo de material en el proceso de forja de biela (Takemasu, 1996).

En el cuerpo de biela, el lado de la pared fue inicialmente formado por ambos extremos, gradualmente avanzó a la mitad hasta combinarse finalmente. El patrón de deformación en esta sección no se completó y no presenta la suficiente altura al centro e incluso al final de la carrera.

Por medio de estos resultados se concluyó que para la cabeza de biela, es necesario optimizar la geometría de la preforma para llenar la cavidad completa y uniformemente. Por otro lado, para el pie de biela, controlar el volumen inicial de distribución de la pieza y transferir el exceso de volumen a otras características del producto y finalmente para el cuerpo de biela, es necesario optimizar el diámetro de la preforma.

a) *Optimización de la cabeza.*

Existen 7 parámetros de forma en la cabeza. Con el fin de reducir el número de parámetros, los diámetros d_1 y d_3 , el total del volumen y la longitud total se configuraron constantes. Los diámetros d_2 , el segmento de longitud s_1 y el largo $p_1=s_1+s_2+s_3$ son seleccionados de manera independiente. Después los demás parámetros que son segmentos de la longitud s_2 , s_3 y s_4 , fueron escogidos con base a estas restricciones.

Tres diseños de preforma para la cabeza y varias combinaciones de parámetros fueron seleccionados para el modelo de simulación en elemento finito, como se muestra en la Figura 3.5. Se nombraron BT0, BT1 y BT2 respectivamente. BT0 es la preforma original y es representada por la línea punteada en la figura mencionada.

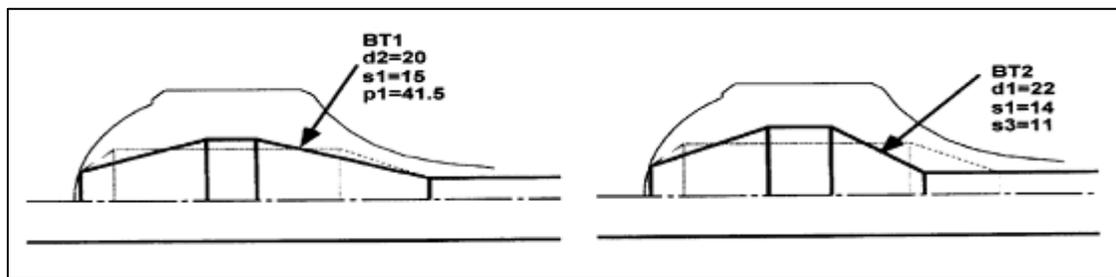


Figura 3.5 Esquemas de figura de BT1 y BT2 (Takemasu, 1996).

La vista superior del flujo de material de la cabeza para cada preforma se muestra en la figura 3.6. El 100% de la carrera se alcanzó en cada simulación. El área sombreada en la vista superior muestra el área de contacto en la superficie del material y el herramental.

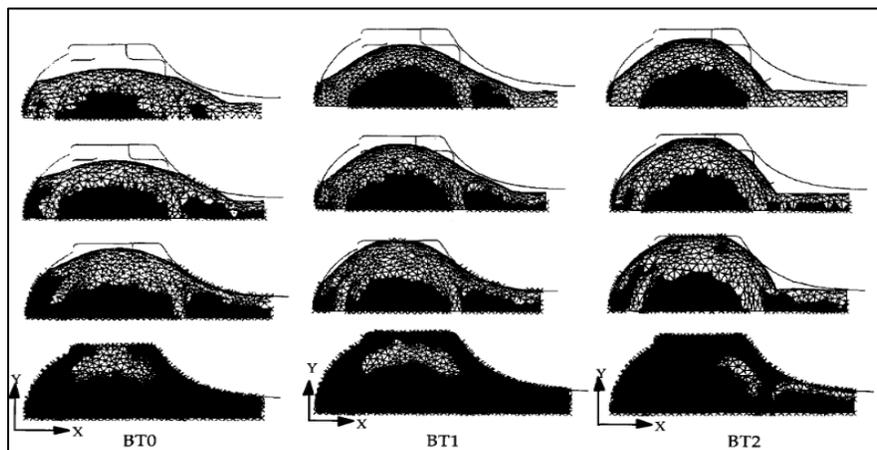


Figura 3.6 Flujo de material en BT0, BT1 y BT2 en vista superior (Plano XY) (Takemasu, 1996).

La pared exterior del anillo más grande de BT1 y BT2 es deformado casi radialmente a lo largo del proceso de forja y presenta una suficiente altura al final de la carrera. Esto comparado con BT0, el cual presenta hundimiento al inicio del proceso y permanece un poco cóncavo incluso después de la deformación. Como por el lado de la pared próxima al cuerpo, la cavidad se llenó por completo en los casos BT0 y BT1, mientras que en el caso de BT2, no se llenó del todo.

b) *Optimización del pie de biela.*

Como el pie fue formado completamente antes del final de la carrera en la simulación de preforma 1, la distribución de volumen fue variando para optimizar la geometría de la preforma. Son también 7 parámetros de forma en esta sección. Los diámetros d_3 y d_5 , el segmento s_8 , y la longitud $p_2=s_6+s_7+s_8$ fueron arregladas. El volumen inicial de esta sección fue controlado al cambiar el diámetro d_4 y el segmento s_6 . Se modelaron tres preformas para el pie, como se muestra en la figura 3.8. Fueron llamados TP1, TP2, y TP3 respectivamente. La geometría del pie en la preforma 1 está representada por la línea punteada.

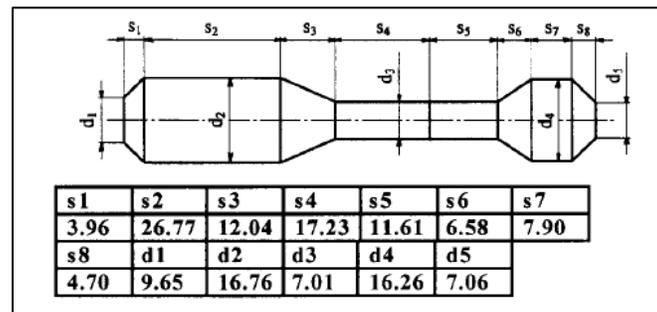


Figura 3.7 Principales valores de las dimensiones de la preforma (Takemasu, 1996).

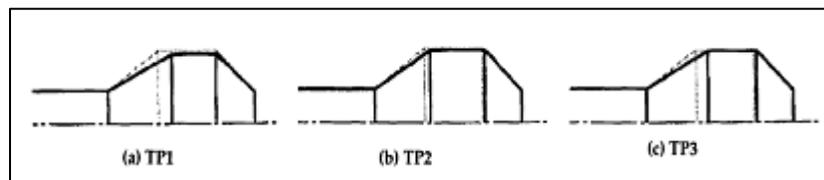


Figura 3.8 Esquema de los modelos EF del pie de biela (Takemasu, 1996).

La vista superior del material deformado al final de la carrera se muestra en la figura 3.9. Las secciones pequeñas del final de TP2 y TP3 son completamente deformadas, mientras que en el caso de TP1 una cavidad permanece en su lado de la pared.

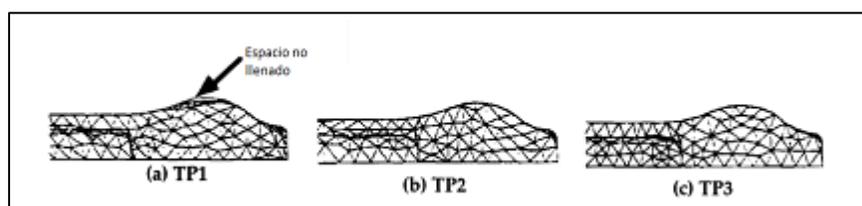


Figura 3.9 Etapa final de deformación del pie de biela (Takemasu, 1996).

c) *Optimización del cuerpo de la biela*

Existen 3 parámetros en la sección del cuerpo: diámetro d_3 y los segmentos s_4 y s_5 , como se muestra en la Figura 3.7. Asumiendo que el material de esta parte está deformado bajo condiciones de deformación plana, el diámetro inicial d_3 de la sección del cuerpo fue configurada a 7.37 mm.

d) *Simulación en elemento finito con nueva preforma*

Evaluando los resultados obtenidos del método de optimización, se propuso un nuevo diseño de preforma, como se muestra en la figura 3.10. Una segunda simulación en 3D de elemento finito, fue realizado con este diseño de preforma y fue comparado con los resultados previos. Las dimensiones de la nueva preforma se muestran en la Tabla 3.1.

| Tabla 3.1 Parámetros de forma de la preforma II (mm) (Takemasu, 1996). | | | | | | | |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| s_1 | s_2 | s_3 | s_4 | s_5 | s_6 | s_7 | s_8 |
| 14.5 | 6.82 | 20.2 | 18.5 | 13.5 | 7.2 | 7.1 | 4.7 |
| d_i | d_2 | d_3 | d_4 | d_5 | | | |
| 9 | 20 | 7.37 | 15.8 | 7 | | | |

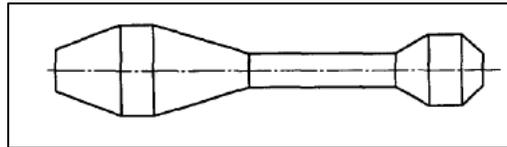


Figura 3.10 Bosquejo de la preforma II (Takemasu, 1996).

El flujo de material en el proceso de forja de biela con la preforma II fue como se muestra en la figura 3.11; donde se observa que el pie de biela es formado por completo. La sección del cuerpo de biela fluye bajo condiciones de deformación plana y el lado de la pared tiene una altura suficiente después de la deformación. La cabeza de la biela es deformada casi completamente, a pesar de la ligera cavidad se mantiene entre el material y el dado superior en la superficie del anillo mayor.

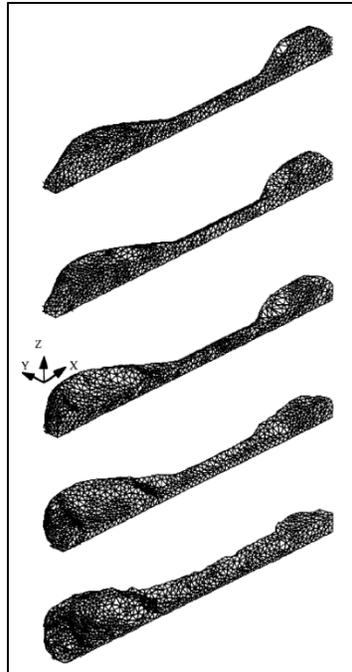


Figura 3.11 Flujo de material de la simulación de forja con la preforma II (Takemasu, 1996).

Las condiciones de deformación de la pared exterior del anillo mayor de la preforma II en la etapa final es comparada con la de la I. Se concluyó que con el diseño de la preforma II se obtuvieron resultados favorables. La carga predicha por la forja de la preforma 2 es 30% más alta que en la preforma I. Esto es debido a que la carrera en la preforma II es más larga que en la preforma I y se observa una cavidad en la superficie superior en la pieza del anillo de mayor tamaño en la cabeza de la biela de la preforma I después de la deformación.

Para la cabeza de biela, tanto la geometría inicial y la distribución de volumen de la preforma fueron optimizadas al mismo tiempo cambiando el diámetro de la sección. Se concluye de los resultados de la simulación que optimizar la geometría de esta parte es más difícil que el pie de biela o el cuerpo de la misma, debido al hecho de que la forma del producto es compleja y el flujo de material es demasiado influenciado por la geometría inicial de la preforma.

El patrón de deformación de la sección del cuerpo se aproxima a condiciones de deformación plana al optimizar el diámetro inicial de la pieza.

Para el pie de biela, la distribución inicial de volumen se controló principalmente para llenar la cavidad del dado al final de la carrera. También es claro que el patrón de deformación de esta parte no es tan sensible a la geometría inicial de la preforma, como lo resultó la parte de la cabeza.

Ocho de diez pasos de remallado se necesitaron en la simulación de la preforma inicial al final de la carrera. Se observó una pérdida de volumen cerca del 1% después de cada paso de remallado, siendo el total de volumen perdido de 8%.

3.4. SIMULACIÓN DE UN PROCESO DE FORMADO EN CALIENTE DE UNA BIELA.

Se realizó una simulación termomecánica en tres dimensiones en EF, para la producción de una biela. El proceso de producción consistió de 5 pasos de laminado y los subsecuentes pasos de forja. Las piezas de trabajo para todas las etapas del proceso se usaron para determinar la geometría, microestructura y propiedades mecánicas locales. Combinando los resultados de estas pruebas con las variables del proceso, como el esfuerzo y temperatura de la simulación numérica es posible el estudio de la deformación en la pieza y sus propiedades mecánicas.

Para examinar la microestructura y las propiedades mecánicas, se tomaron especímenes de la pieza de trabajo en cada etapa. Las posiciones de estos especímenes se muestran en la Figura 3.12 para las piezas de trabajo después del preformado. La selección de estas posiciones fue basada en el conocimiento de cargas críticas en la biela. Aunque a continuación el desarrollo se enfocará únicamente al aspecto numérico, ya que es el tema de interés de la tesis.

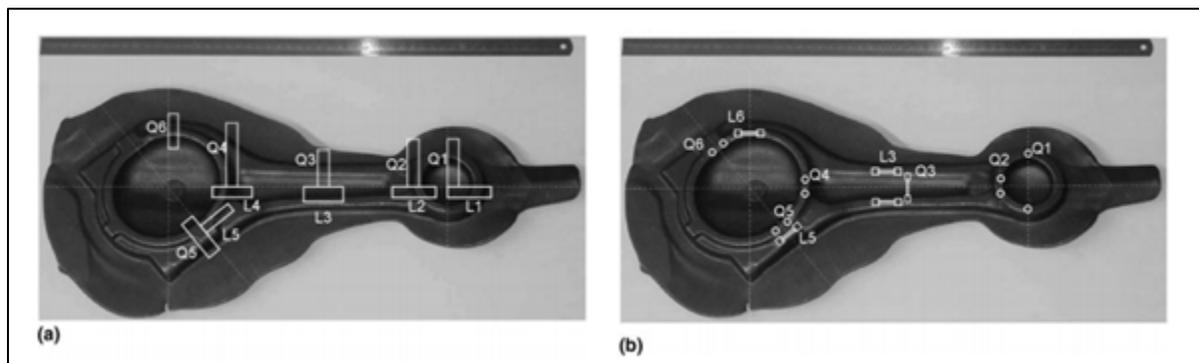


Figura 3.12 Pieza de trabajo mostrando la posición de los especímenes para a) pruebas de microestructura y b) pruebas de tracción (Grass, 2006).

Simulación del proceso de formado en caliente.

Este procedimiento se realizó con un programa comercial, considerando un material elasto-plástico, los herramientas se tomaron como superficies rígidas y la geometría fue importada de un CAD.

En el proceso real el material primero se calienta a la temperatura de formado y es colocado en su posición inicial, después de cada pasada entre los rodillos la pieza de trabajo es girada 90° alrededor de su eje de laminado y se mueve hacia atrás a su posición inicial para el siguiente paso.

En la simulación resulta más sencillo mover el herramental en vez de la pieza de trabajo, las superficies de cada laminado son guardadas como herramientas separados y el movimiento traslacional es aplicado a los rodillos además del movimiento rotacional.

Todas las cargas son definidas como cuasi-estáticas. Cada paso consiste en la aplicación de dos cargas, una para la deformación y la otra para retirar la pieza de trabajo después de la deformación. La duración de la segunda coincide con la aplicación del tiempo de mantenimiento entre las etapas de deformación.

El cálculo es logrado con un número total de elementos finitos entre 5000 y 8000 y tomó cerca de 12h en una estación de trabajo DEC operada a 670 Mhz.

Después del laminado, la pieza de trabajo es forjada en una prensa entre dos herramientas planas y después entre dados (de pre y final) como se ilustra en la figura 3.13

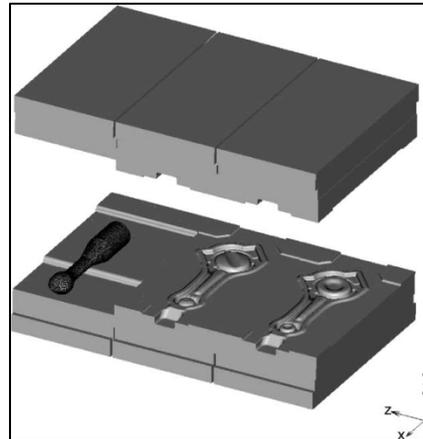


Figura 3.13 Modelo esquemático de los procesos de forja aplanado (izquierda), final (medio), preformado (derecha) (Grass, 2006).

La geometría calculada, esfuerzos, temperatura y la deformación plástica equivalente de la simulación de laminado son usados como condiciones iniciales para forjar la pieza de trabajo. La posición de los herramientas y la pieza de trabajo al inicio del análisis se muestran en la figura 3.14

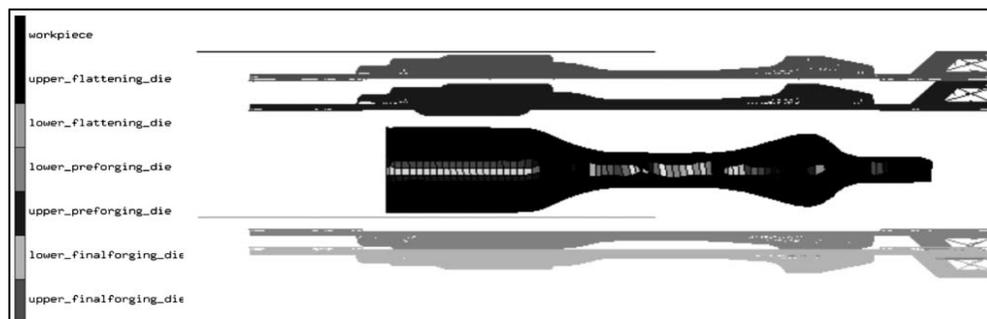


Figura 3.14 Herramental y pieza de trabajo al inicio de la operación de aplanado. (Grass H.,2006)

Para las operaciones de formado se incluyeron 8 etapas usando los parámetros iniciales resumidos en la Tabla 3.2

| Tabla 3.2 Parámetros iniciales usados en la simulación numérica (Grass, 2006). | | |
|--|-------------------|--------------------|
| PARÁMETRO | VALOR | UNIDAD |
| TEMPERATURA AMBIENTE | 50 | ° C |
| TEMPERATURA DE LOS RODILLOS | 120 | ° C |
| TEMPERATURA DE LOS DADOS | 150 | ° C |
| COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR (DE LA PIEZA AL HERRAMENTAL) | 1.5×10^4 | W/m ² K |
| COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR (DEL HERRAMENTAL A LA PIEZA) | 150 | W/m ² K |
| FACTOR DE FRICCIÓN (LAMINADO) | 0.6 | - |
| FACTOR DE FRICCIÓN (APLANADO) | 0.6 | - |
| FACTOR DE FRICCIÓN (DADO DE FORJA) | 0.3 | - |

La geometría calculada después del quinto paso por los rodillos y la distribución de la deformación plástica total y la temperatura relativa en la superficie de trabajo se muestra en la figura 3.15

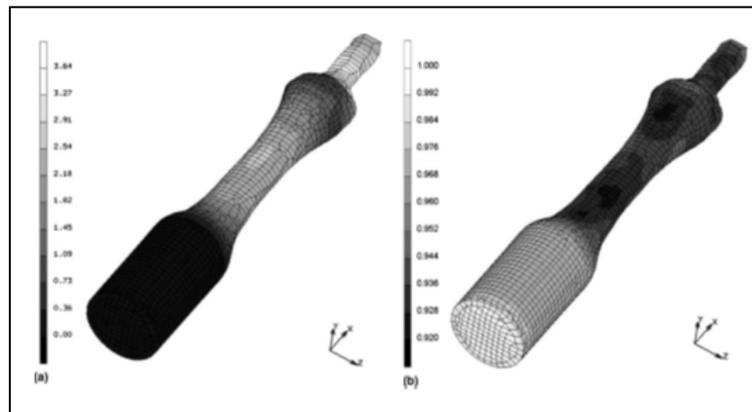


Figura 3.15 Resultados de la simulación de Laminado: a) deformación plástica total y b) temperatura relativa T/T_0 (Grass, 2006).

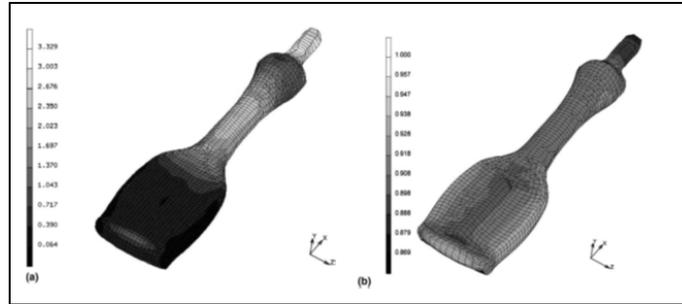


Figura 3.16 Resultado de la simulación del proceso de aplanado: a) deformación plástica equivalente y b) temperatura relativa T/T_0 (Grass, 2006).

La simulación de la preforma es la más crítica y el paso que consume más tiempo en el análisis. La distribución de la deformación plástica equivalente en la superficie de trabajo se muestra en la figura 3.17

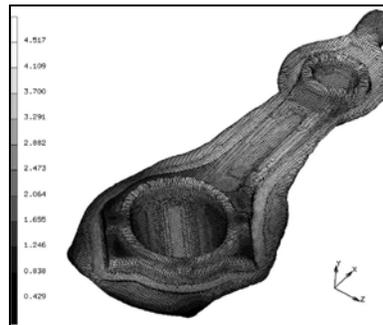


Figura 3.17 Distribución de la deformación plástica equivalente total, determinada numéricamente en la superficie de la pieza de trabajo después de la preforma (Grass, 2006).

La figura 3.18 muestra la distribución de la deformación equivalente en la superficie de la pieza de trabajo simulada en el proceso completo de formado.

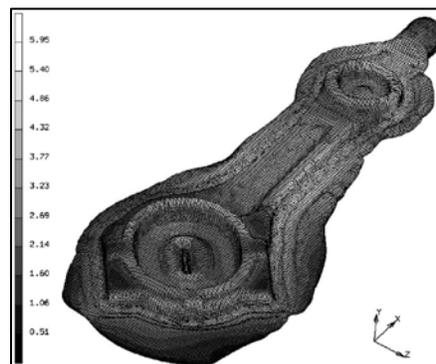


Figura 3.18 Distribución de la deformación plástica equivalente total, determinada numéricamente en la superficie de la pieza de trabajo después de la forja final (Grass, 2006).

Similar a la laminación, la desviación entre la distribución de temperatura calculada y la medida de la pieza de trabajo durante la forja final es más pequeña que la inexactitud de las herramientas de medición, las cuales indican también una buena estimación de la distribución de temperatura dentro del componente. Como se esperaba, el coeficiente de transferencia de calor tiene influencia de la distribución de temperatura. También la parte inferior de la pieza de trabajo es significativamente más fría que la parte superior. Esto debido al contacto de la pieza de trabajo con el herramental inferior. La influencia del factor de fricción en la geometría de la pieza de trabajo es muy baja.

3.5. SIMULACIÓN DEL DISEÑO DE LA ZONA DE REBABA DE FORJA EN CALIENTE.

Aquí se centra principalmente la atención en el campo del dimensionamiento de la rebaba, visto como una influencia importante en el diseño de la misma como parámetro de proceso de forja, además de la vida del dado y la calidad de las piezas forjadas.

Durante varios años se han propuesto diversas expresiones para el diseño de la rebaba dependiendo principalmente de la geometría o la masa de la forja. Sin embargo, los valores calculados prueban que esto es un poco diferente para la misma pieza forjada

La versión 2.11 del programa DEFORM-2D, se empleó para el análisis de modelo de elemento finito de la formación de la rebaba en el dado caliente de forja. La pieza en consideración es la que se muestra en la figura 3.19. Las dimensiones relevantes de la rebaba para esta forja se muestran en la tabla 3.4. La simulación se realizó para 3.2, 5.8, 8.4 y 13.6% de exceso de metal ΔV sobre el volumen de la forja. Las temperaturas iniciales se han asumido de 1200 °C del lingote y 250 °C del dado, al modelar el proceso de forja con una prensa mecánica de 80 MN.

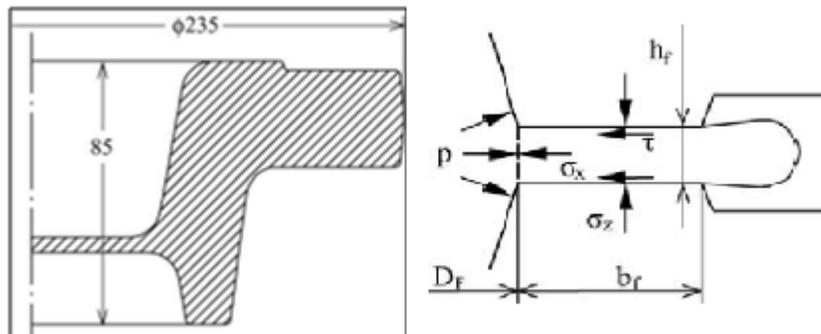


Figura 3.19 Forja de un acero suave para análisis. (Tomov, 2004).

$$h_f = 0.015 D_F$$

$$b_f = 5(1 + 0.01 D_F)$$

| Ecuación | Referencia | h_f (mm) | b_f (mm) | b_f/h_f |
|----------|------------|------------|------------|------------|
| (1) | [8] | 3.52 | 19.92 | 5.65909091 |
| (2) | [9] | 4.62 | 16.75 | 3.62554113 |
| (3) | [10] | 3.76 | 15.45 | 4.10904255 |
| (4) | [10] | 4.06 | 25.1 | 6.18226601 |
| (5) | [11] | 4.21 | 12.65 | 3.00475059 |
| (6) | [12] | 4.52 | 22.27 | 4.92699115 |

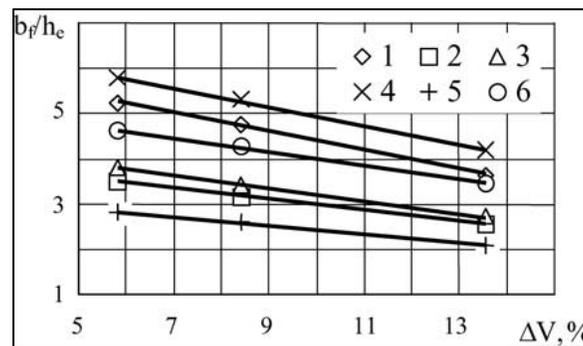


Figura 3.20 Relación real b_f/h_e cuando la cavidad del dado está completamente llena (Tomov B., 2004)

Se encontró mediante la simulación que la impresión final no se llenó por completo cuando se realizó con un exceso de material del 3.2% para la formación de la rebaba. Sin embargo, las tolerancias comunes del diámetro y longitud del lingote producen cerca del 3.1% de variación del volumen. Por esto, un exceso de ΔV del 5.8% para este proceso de forja resulta insuficiente en la práctica para llenar la cavidad del dado. Los resultados obtenidos con un exceso de ΔV de 8.4% se muestran en la tabla 3.4 como parámetros totales del proceso (Fuerza F y trabajo de deformación W) y como locales (presión de contacto p , promedio de velocidad radial VR y temperatura T). Exactamente para el material a ser deformado en la zona de la rebaba.

Las simulaciones en computadora mostraron, que el llenado de la cavidad del dado comenzará después de iniciado el formado de la rebaba, si los valores de ΔV fueran lo suficientemente altos, y terminará antes del cierre de los dados, para determinar el grueso de la rebaba. Los datos obtenidos para el radio b_f/h_c se muestran en la figura 3.20.

Después de recopilar los datos de varias forjas fue posible observar las relaciones estáticas a pesar de la complejidad de la forja, las dimensiones de la rebaba y la cantidad de exceso como un preámbulo en el diseño de la misma.

Tabla 3.4 Parámetros del Proceso de Forja durante la formación de la rebaba (Tomov, 2004).

| Ecuación | b (mm) | h_e/h_c (mm) | F_e/F_c (MN) | W_e/W_c (kJ) | p_e/p_c (MPa) | V_{Re}/V_{Rc} (m/s) | T (°C) |
|----------|----------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------------|----------|
| (1) | 19.9 | 4.2/3.5 | 18/17 | 90/102.5 | 148.9/139.2 | 0.74/0.31 | 1159–182 |
| (2) | 16.8 | 5.3/4.6 | 16/15 | 83/104.0 | 158.8/160.7 | 0.62/0.24 | 1160–183 |
| (3) | 15.4 | 4.9/3.8 | 18/17 | 83/104.0 | 158.5/180.3 | 0.54/0.28 | 1160–183 |
| (4) | 25.1 | 5.3/4.1 | 18/17 | 82/103.0 | 157.3/193.2 | 0.47/0.28 | 1135–182 |
| (5) | 12.6 | 4.9/4.2 | 17.5/16.5 | 90/101.0 | 0.149/145.2 | 0.66/0.25 | 1160–183 |
| (6) | 22.3 | 5.2/4.5 | 17.5/16.0 | 88/100.5 | 155.2/162.6 | 0.66/0.25 | 1136–184 |

Haciendo referencia a la Tabla 3.4 no es sencillo determinar las dimensiones correctas de la rebaba. En la Figura 3.21 se muestran resultados representativos obtenidos por el análisis de EF.

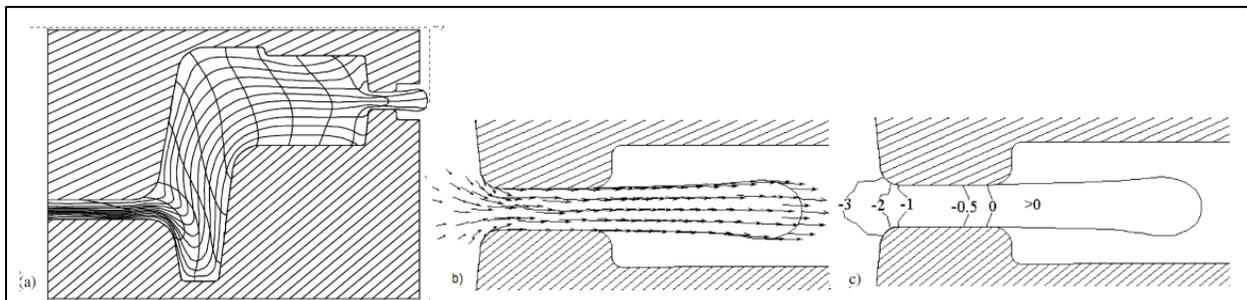


Figura 3.21 Resultados EF como a) Mallado Lagrangiano para toda la forja b) Velocidades de flujo y c) Radio σ_m/σ_p en el área de rebaba (Tomov, 2004).

Basado en este trabajo, se encuentra que el primer paso en el diseño de la zona de rebaba en forja con dado caliente, es el cálculo analítico, el siguiente paso involucra la estimación de la deformación elástica tanto del dado como de la máquina y finalmente la corrección del espesor de la rebaba.

CAPÍTULO 4. METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DE UN DADO PARA FORJA

4.1. INTRODUCCIÓN DE LA METODOLOGÍA SEGUIDA

La metodología seguida para el diseño del dado se basa en lo planteado por J. Kulon en el año 2000, donde se emplea un programa que ayuda al diseño del herramental para forja caliente. El desarrollo del programa de diseño de forja se fundamenta en el conocimiento basado en Ingeniería (CBI) y comprende los siguientes módulos.

- a) Datos de diseño y requerimientos de producción. Permite especificar los diversos requerimientos en términos de tasa de producción, volumen y tiempo para comercializar. Estos factores son significantes al determinar los costos de manufactura.
- b) Datos y propiedades del material. Contiene conocimiento integrado de materiales así como sus propiedades.
- c) Selección de las unidades de manufactura y producción. Incluye una biblioteca de las máquinas de forja y sus especificaciones técnicas. En general, los componentes de forja se conforman empleando uno de los tres tipos de unidades de producción: hidráulicas, mecánicas, prensas de tornillos y de martillo. Cada una con factores a considerar para las apropiadas unidades de producción como tamaño, geometría, complejidad, cantidad, material, costo de los componentes y tolerancias de los mismos.
- d) Reglas de diseño. Abarca conocimiento de diseño de características geométricas como cortes, costillas, filetes, esquinas, ángulos de desmoldeo, entre otras.
- e) Componentes de la geometría. De forma automática proporciona la geometría forjable partiendo de la geometría final. Esta selección proporciona las transformaciones sucedidas.

En la figura 4.1 se observa un ejemplo de lo obtenido al emplear la metodología descrita anteriormente. En la etapa 0 se describe la geometría final deseada, es decir, la geometría obtenida después de procesos de maquinado posteriores a la forja final. En la etapa 1 se muestra una sección transversal de la misma pieza simétrica. En la etapa 2 se muestran las restricciones del proceso, donde se descartan las geometrías imposibles de formar mediante la forja, tomando en cuenta que la fuerza del herramental es normal a la pieza de trabajo. En la etapa 3 se muestra un excedente de material; se visualiza la pieza sin operaciones de maquinado. En la etapa 4 se adiciona un sobredimensionamiento debido a las tolerancias de forja, observando que existe contracción térmica del material, recuperación elástica y desgaste del dado. La etapa 5 muestra geometrías estrechas difíciles de obtener mediante el proceso de forja, las cuales son eliminadas. En la etapa 6 se muestran los ángulos de salida necesarios para lograr una mejor eyección de la pieza. En la etapa 7 se adicionan radios y filetes, los cuales cumplen con el mismo propósito que los ángulos de salida.

La etapa 8 muestra las costillas de soporte, como su nombre lo indica sirven para dar sustento y mayor resistencia al dado y finalmente la etapa 9 muestra la geometría forjable, es decir, la figura posible de obtener mediante el proceso de forja teniendo en cuenta las consideraciones mencionadas en cada una de las etapas anteriores.

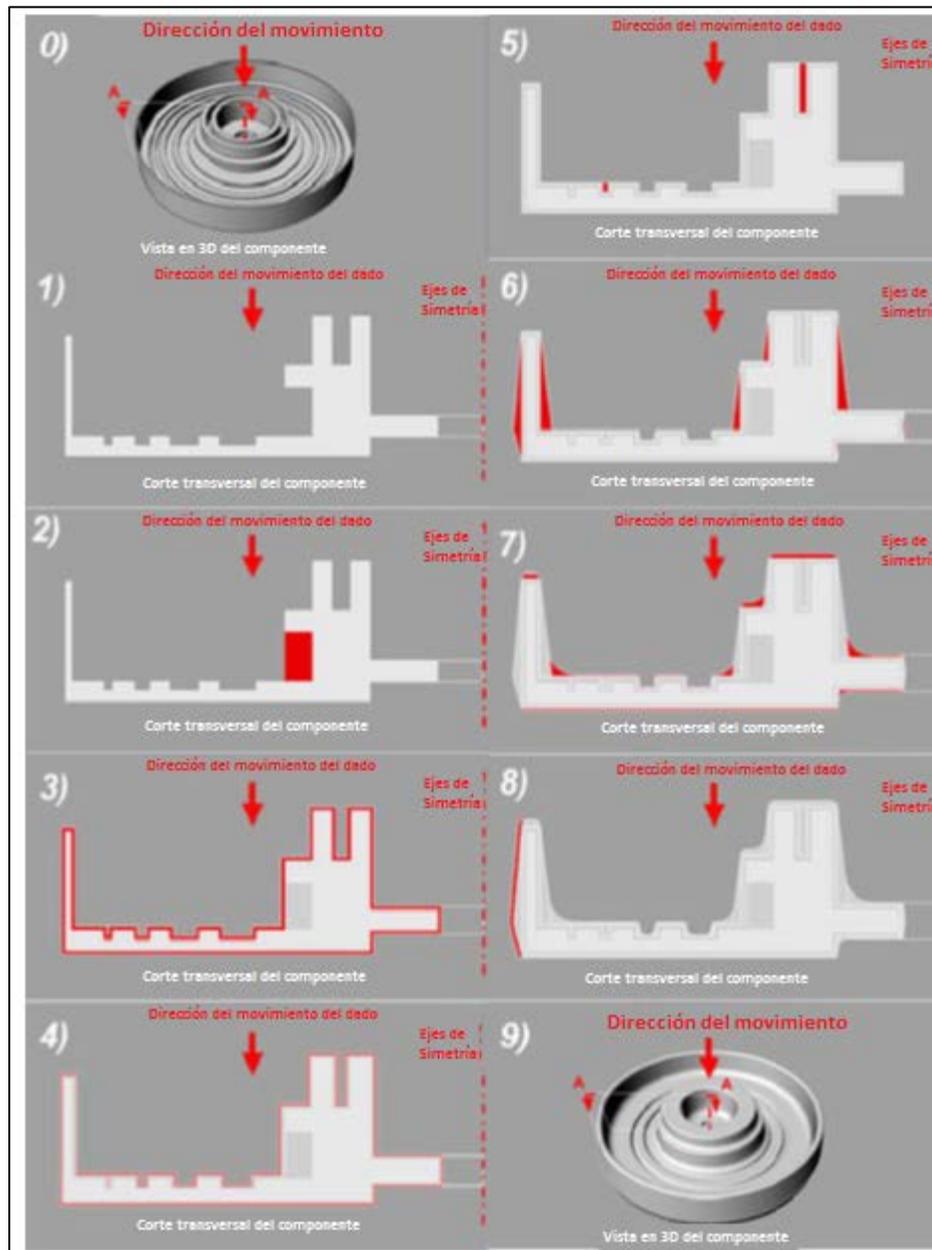


Figura 4.1 Metodología de diseño de herramental (Kulon, 2000).

4.2. GEOMETRÍA A OBTENER

Siguiendo el método anteriormente descrito para el diseño del herramental se partió de la pieza final deseada. En la figura 4.2 se aprecia la geometría obtenida después de realizar el último paso de forja, corte de rebaba y operaciones de maquinado.

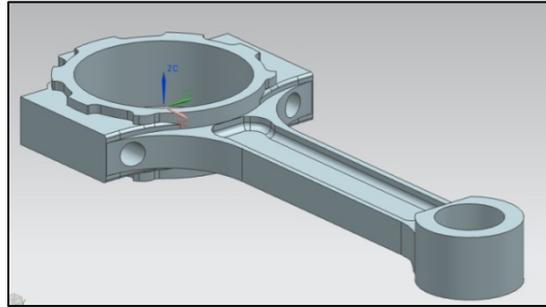


Figura 4.2 Biela final deseada.

4.3. ELIMINACIÓN DE GEOMETRÍAS NO ALCANZABLES POR EL PROCESO

En el proceso de forja, como se explicó en los capítulos anteriores, el dado aplica cargas normales a la pieza, como se muestra en la figura 4.3.

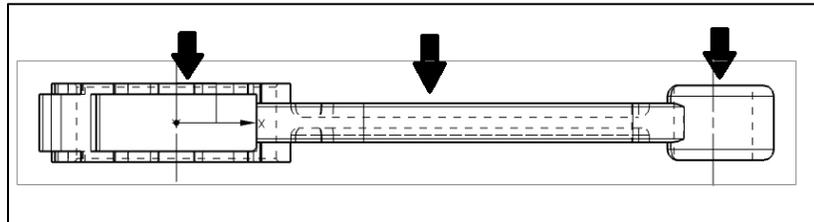


Figura 4.3 Vista lateral de la biela y aplicación de carga.

Existen elementos dentro de la biela que sólo pueden ser obtenidos mediante operaciones de maquinado posteriores al último proceso de forjado. En la figura 4.4 se muestran dos ejemplos. Ya en la figura 4.5 se muestra una pieza final sin la presencia de los elementos mencionados anteriormente.

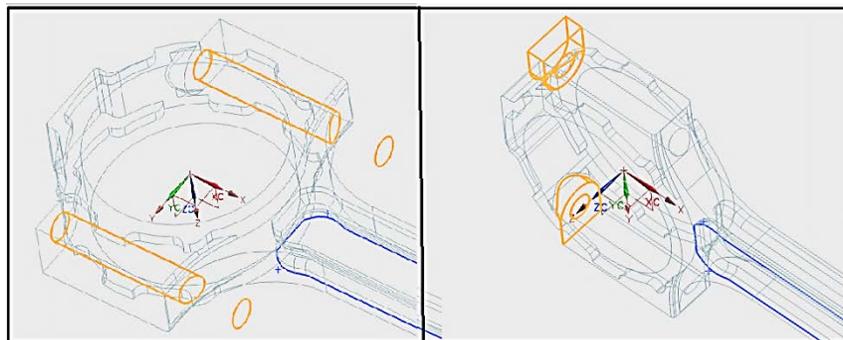


Figura 4.4 Geometrías no formadas por carga transversal

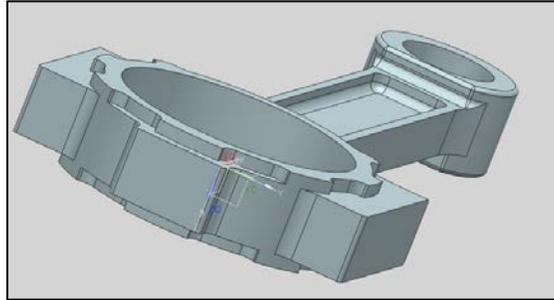


Figura 4.5 Biela sin regiones mostradas en figura 4.4

Para esta biela el dado presentaría la geometría mostrada en la figura 4.6. El dado mostrado representa la pieza final deseada sin las regiones más sencillas de maquinar que de forjar. La biela es una pieza simétrica por lo que se trabajó sólo con una mitad del dado. Al detectar y eliminar las regiones ya mencionadas, el diseño del herramental se sitúa en la etapa 3 del método descrito en el punto 4.1 de este capítulo.

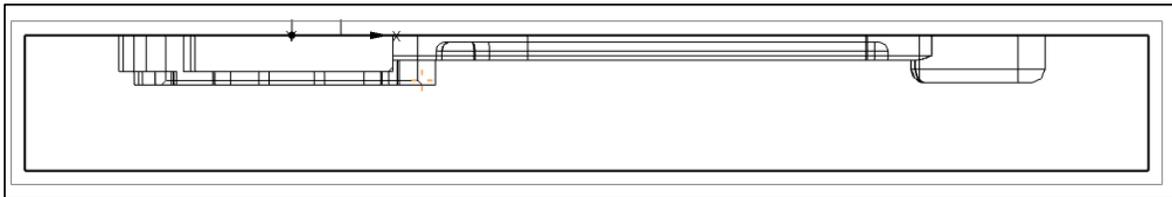


Figura 4.6 Dado de biela en vista lateral.

4.4. SOBRE-DIMENSIONAMIENTO

Según La Asociación de Industrias de Forja (FIA por sus siglas en Inglés), para obtener las tolerancias del herramental, se deben tomar en cuenta los siguientes datos: el material del herramental, desgaste del dado y medidas principales de la pieza final deseada (longitudes y diámetros).

El factor de tolerancia largo/ ancho es ± 0.003 mm por milímetro y aplica a todas las dimensiones largo/ancho e incluye diámetros. Esta tolerancia incluye contracción, hundimiento del herramental y variaciones de pulido del mismo. Las tolerancias generalmente se combinan con la respectiva al desgaste del herramental expresado en unidades decimales de 0.1 mm o mayores. Los decimales empleados al calcular las tolerancias son sumados y llevados al siguiente número decimal (0.1). Constantemente, las tolerancias para el desgaste del material son aplicadas junto con las de largo/ancho pertenecientemente sólo a las superficies forjadas.

Para las dimensiones del largo, ancho y diámetros menores de 750 mm, se calculan multiplicando la longitud o diámetro de la pieza por el factor mostrado en la Tabla 4.1 Las dimensiones externas son expresadas sólo como valores sumados, mientras que las tolerancias en dimensiones internas son expresadas como valores restados.

| Tabla 4.1 Tolerancias de desgaste del herramental (FIA). | | |
|--|---|---|
| Tolerancias del desgaste del herramental | | |
| Material | Valor (Cuando la pieza es menor a 750 mm) | Valor (Cuando la pieza es mayor a 750 mm) |
| Aceros al carbono, de baja aleación | 0.005 | 3.81 |
| Acero Inoxidable | 0.007 | 5.33 |
| Aleaciones resistentes al calor | 0.009 | 6.86 |
| Titanio | 0.009 | 6.86 |
| Aluminio | 0.004 | 3.05 |
| Latón y Cobre | 0.004 | 3.05 |

Para el cálculo de tolerancias de la biela se tomaron como base las medidas de la figura 4.7 para obtener el sobredimensionamiento correspondiente. Cada medida fue calculada siguiendo el procedimiento de la FIA; como se muestra a continuación:

El valor (0) de la tabla 4.2 es la medida de la biela sin operaciones de acabado: **58 mm**. El valor (1) se obtuvo de multiplicar el valor (0) por el factor constante de tolerancia largo/ancho, con valor de 0.003 mm: **58 x 0.003 = 0.174 mm**. El valor (2) se obtiene de multiplicar el valor (0) por el factor de desgaste tomado de la tabla 4.1. Teniendo en cuenta que el material es acero al carbono: **58 x 0.005 = 0.29 mm**. El valor (3) se obtiene de sumar los valores (1) y (2): **0.6183 + 1.0305 = 0.464 mm**. El valor (4) se obtiene de redondear el valor (3) al próximo decimal superior: **0.5 mm**. Finalmente el valor (5) se obtiene de la suma del valor (4) con el valor (0): **0.5 + 58 = 58.5 mm**.

| Tabla 4.2 Obtención de tolerancias | |
|---|------------------|
| Medida con tolerancia(5) | 58.5 mm |
| Medida Final(0) | 58 mm |
| Material | Acero al carbono |
| <i>Tolerancias para medidas de la biela</i> | |
| Largo (mm) * Factor de tolerancia(1) | 0.174 |
| Largo (mm) * Factor de desgaste(2) | 0.29 |
| Total(3) | 0.464 |
| Siguiente decimal(4) | 0.5 |

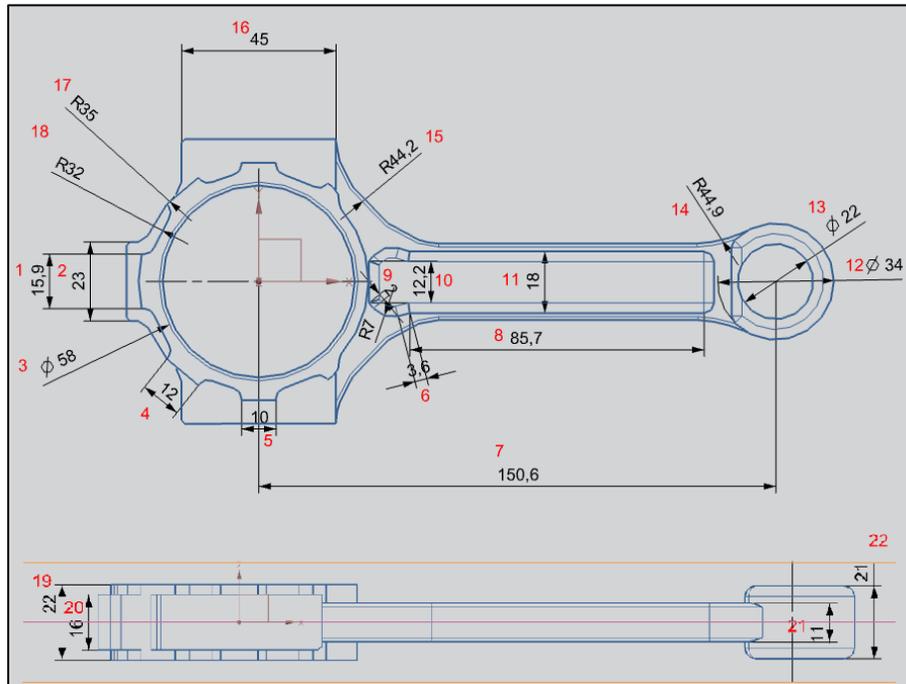


Figura 4.7 Medidas de la biela final.

La Tabla 4.3 muestra las medidas con tolerancias de la biela:

| Tabla 4.3 Valores de tolerancia obtenidos | |
|---|----------------------------|
| Medida sin tolerancia [mm] | Medida con tolerancia [mm] |
| 15.9 | 16.1 |
| 23 | 23.2 |
| 58 | 58.5 |
| 12 | 12.1 |
| 10 | 10.1 |
| 3.6 | 3.5 |
| 150.6 | 150.6 |
| 85.7 | 85 |
| 2 | 1.9 |
| 2.12 | 12.1 |

| Medida sin tolerancia [mm] | Medida con tolerancia [mm] |
|----------------------------|----------------------------|
| 18 | 17.8 |
| 34 | 34.3 |
| 22 | 21.8 |
| 89.8 | 90.6 |
| 88.4 | 89.2 |
| 45 | 45.4 |
| 70 | 70.6 |
| 64 | 63.4 |
| 22 | 22.2 |
| 16 | 16.2 |
| 11 | 11.1 |
| 21 | 21.2 |

4.5. ELIMINACIÓN DE GEOMETRÍAS ESTRECHAS

Una vez obtenidas las tolerancias de la pieza, el proceso de diseño se sitúa en la etapa 4. Para la etapa 5 se eliminan las geometrías difíciles de alcanzar mediante el proceso de forja dado la complejidad del flujo de material a través de esas regiones y en la fuerza necesaria.

En la figura 4.8 se muestran las geometrías mencionadas previamente:

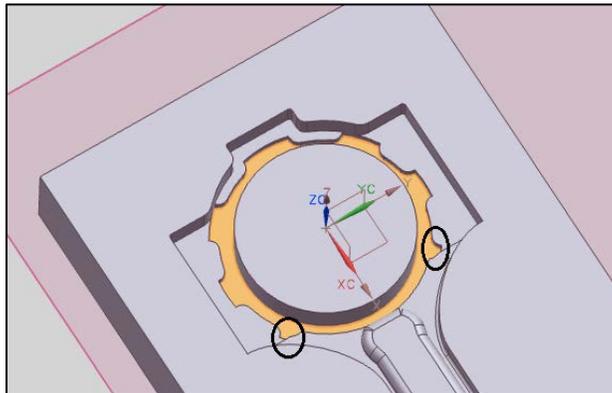


Figura 4.8 Geometrías difíciles de obtener mediante la forja, después del sobredimensionamiento de tolerancias.

Los elementos mostrados en la figura 4.8 se eliminaron del dado quedando como se muestra en la siguiente figura.

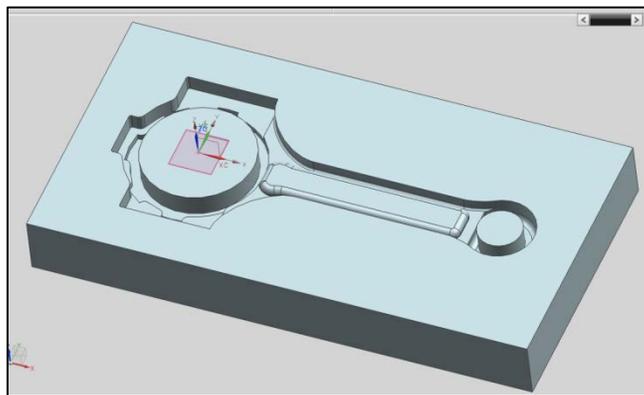


Figura 4.9 Herramental sin regiones mostradas en la figura 4.8

4.6. ADICIÓN DE ÁNGULOS DE SALIDA O DESMOLDEO

En piezas de sección rectangular o cuadrada los ángulos de salida son agregados a las paredes verticales del herramental para permitir una eyección más sencilla de la pieza del dado de impresión. El ángulo, por lo general, varía de 3 a 7° para paredes externas. En las paredes rodeadas por barrenos presentan ángulos de 5 a 10°.

Un ángulo mayor se emplea en paredes que rodean huecos para prevenir que la pieza se atranque como resultado normal de la contracción térmica mientras se enfría (FIA). La figura 4.10 muestra el herramental en la etapa de diseño 6.

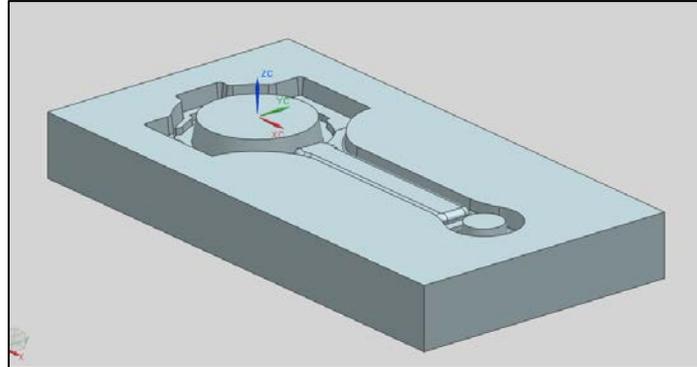


Figura 4.10 Dado con ángulos de salida.

4.7. ADICIÓN DE RADIOS DE TRANSICIÓN

Para definir los radios de transición se tomó en cuenta la Tabla 4.4

Tabla 4.4 Cálculo de radio de transición (Vazquez, 2000).

| h, mm | r ₁ mm | r ₂ mm |
|--------------------------|----------------------|----------------------|
| Partes forjadas de acero | | |
| <25 | 2 | 4 |
| 25-40 | 3 | 6 |
| 40-63 | 4 | 10 |
| 63-100 | 6 | 16 |
| 100-160 | 8 | 25 |
| 160-250 | 10 | 40 |
| 250-400 | 16 | 63 |

En la figura 4.7 se aprecia que todas las alturas son menores a 25 mm, por lo que a los radios internos (R2) se les asignó un valor de 4 mm y a los externos (R1) un valor de 2mm. Quedando como se muestra a continuación en la figura 4.11.

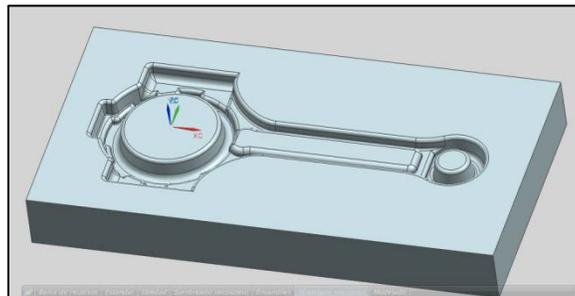


Figura 4.11 Dado con radios internos y externos

4.8. ZONA DE REBABA

Una vez concluido el paso anterior, es necesario definir la geometría de la zona de rebaba. Como se explicó anteriormente, las variaciones de las dimensiones de la rebaba influyen en la fuerza de forja, la energía de forja y la tolerancia de rebaba empleada para determinar el volumen inicial del lingote. Las dimensiones de la rebaba sólo pueden variar de las siguientes tres maneras: cambiando el ancho de la rebaba, manteniendo un espesor constante; cambiando el espesor y manteniendo un ancho constante; y cambiando el ancho y espesor con una relación constante.

Muchos factores influyen en la elección del espesor de la rebaba, esta elección depende directamente del peso de la pieza, así como de la complejidad de la forma. Las diferentes piezas a forjar se clasifican en 3: compactas, esféricas y cúbicas. También se pueden clasificar en forma de disco y formas alargadas.

Estos tres grupos básicos, se encuentran a su vez divididos en subgrupos, dependiendo de la presencia y tipos de elementos subsidiarios a la figura básica. Esta clasificación es útil para casos prácticos como estimación de costos y predicción de los pasos de preforma; sin embargo, requiere de una evaluación subjetiva basada en la experiencia adquirida de procesos anteriores.

El diseño de la zona de rebaba debe efectuarse de tal forma que el flujo del material llene primeramente las cavidades deseadas y posteriormente, el material sobrante, se desplace hacia la zona de rebaba sin causar cargas excesivas. Idealmente se busca desplazar la menor cantidad posible de material a ésta zona, ya que entre mayor sea la cantidad de material que se desplace mayor será la carga requerida.

La rebaba se encuentra ubicada exactamente en la línea de partición dividiéndose en dos zonas: La zona del canal y la de alojamiento. Cada una de ellas con su ancho y espesor respectivo. Existe también un ángulo α entre las dos zonas. La presión de forja es controlada mediante la zona del canal, lo cual determina la relación espesor-ancho cuando los datos se encuentran cerrados.

El grosor de la zona de alojamiento es determinado por el equipo de forja a usar, el material a ser forjado, el peso de la pieza y la complejidad de esta última. La relación del ancho con el grosor en esta zona varía de 2 a 5. Los valores más bajos se usan cuando el equipo es una prensa, mientras que los valores altos son empleados con martinets.

El canal tiene un ancho mayor que la zona de alojamiento y proporciona una cavidad para el exceso de material.

Para forjas axisimétricas Neuberger y Mockel en 1980, propusieron las siguientes relaciones entre el peso y la geometría de la rebaba.

$$\frac{W_f}{T_f} = 3 + 12e^{(-1.09W)} \dots \dots \dots (4.1)$$

$$T_f = 113 + 0.89W^{0.5} - 0.017W \dots \dots \dots (4.2)$$

Donde W es el peso de la pieza en Kilogramos, W_f es el ancho de la rebaba en milímetros y T_f es el grosor de la rebaba en milímetros. Las dimensiones del canal de rebaba deben alojar todo el exceso de material que fluye más allá de zona de alojamiento, previniendo el cierre de los dados.

$$T_g = 1.6T_f \quad (3)$$

$$W_g = 0.4W_f \quad (4)$$

$$r = T_f \quad (5)$$

$$R = T_g \quad (6)$$

Donde T_g es el grosor del canal, W_g el ancho correspondiente, r y R los radios de las esquinas

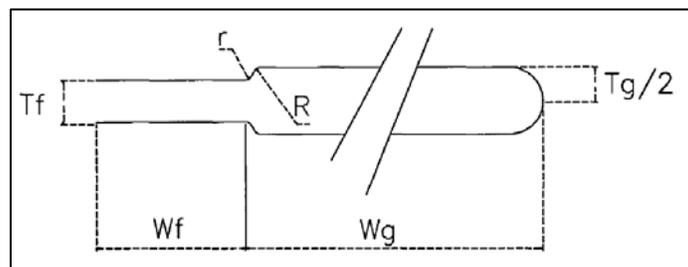


Figura 4.12 Principales dimensiones de la zona de alojamiento y canal de rebaba.

La masa de la pieza se obtuvo con la ayuda del programa NX 8™. cuyo valor es de 0.6985 kg. Con este valor y las ecuaciones mostradas anteriormente se obtienen los valores correspondientes a la geometría de la rebaba.

$$T_f = 1.13 + 0.89(0.6985)^{0.5} - 0.017(0.6985)$$

$$T_f = 1.13 + 0.2352 - 0.0118$$

$$T_f = 1.35 \text{ [mm]} \dots \text{grosor de la rebaba en milímetros}$$

$$T_g = 1.6T_f$$

$$T_g = 1.6(1.35)$$

$$T_g = 2.16 \text{ [mm]} \text{ Grosor del canal}$$

$$\frac{W_f}{T_f} = 3 + 12e^{(-1.09W)}$$

$$W_f = (3 + 1.2e^{(-1.09 \cdot 0.6985)}) * T_f$$

$$W_f = (3 + 1.2e^{(-1.09 \cdot 0.6985)}) * T_f$$

$$W_f = 4.8 \text{ mm} \dots \text{ancho de la rebaba en milímetros}$$

$$W_g = 4W_f$$

$W_g = 19.2 \text{ mm}$... ancho del canal de la rebaba

Con los valores obtenidos con el peso de la biela se continúa con el diseño de la zona de alojamiento y canal de la rebaba. Quedando como se muestra en la figura 4.13. Siendo éste punto, el último paso de diseño del dado final.

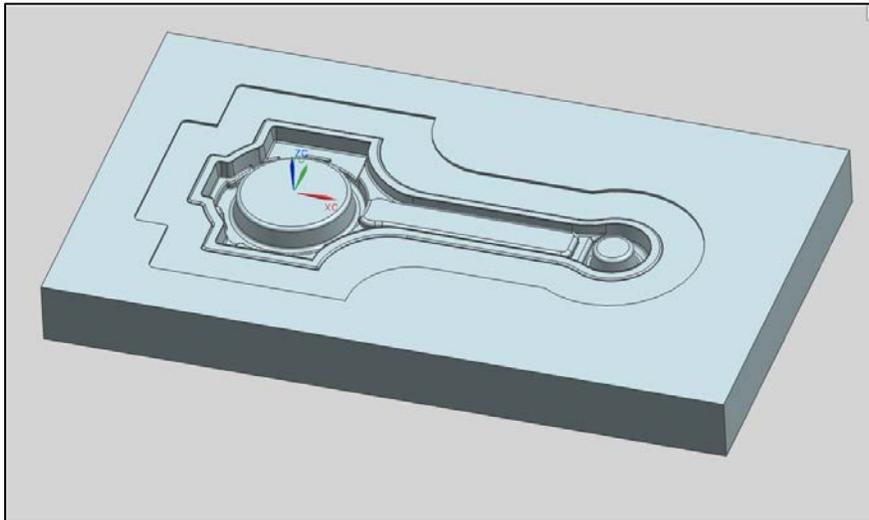


Figura 4.13 Dado final de terminado de la biela con zona de rebaba.

Una vez realizado el herramental final, se elaboró la preforma anterior a la de terminado; es decir, la preforma obtenida del proceso de forja, en el cual la pieza sufre cambios significativos y pasa de tener una geometría no bien definida a una similar a la final deseada. Dicha preforma se muestra a continuación:

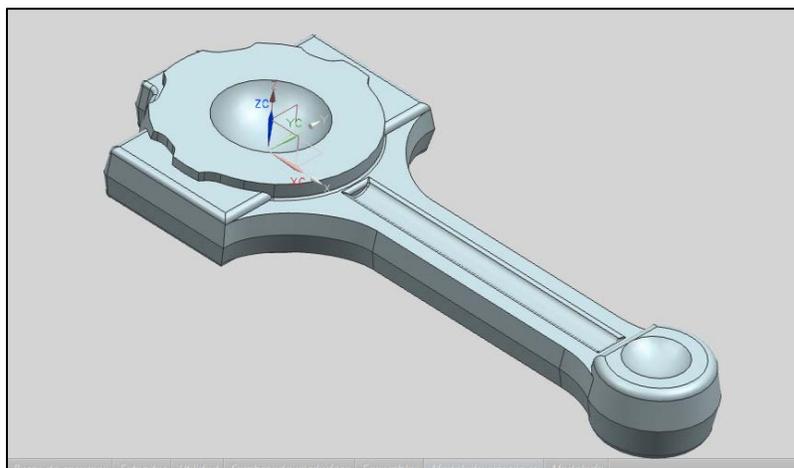


Figura 4.14 Preforma anterior a la pieza final.

CAPÍTULO 5. MODELADO EN ELEMENTO FINITO DE UN PASO DE FORJA DE UNA BIELA

5.1. INTRODUCCIÓN A LA SIMULACIÓN

En éste capítulo se describirá paso a paso el método seguido para el modelado en EF de una etapa del proceso de forja de una biela. Como se mencionó en el capítulo 2, el proceso completo de conformado abarca una serie de pasos donde al final de cada uno de ellos se obtiene una preforma hasta llegar a la pieza final deseada. El paso que se modelará es el número 2 descrito en el subtema 2.4. Dado que es aquí donde se forma la primera etapa definida de la biela; en este paso el lingote inicial toma una forma burda de la pieza final y se eligió este paso porque se involucran deformaciones grandes y se considera un paso crítico en el proceso completo de su manufactura. El objetivo principal es el de validar el diseño del dado desarrollado, verificando el correcto llenado y flujo; con ello establecer una metodología de validación de herramientas. Esta metodología se deberá completar a futuro ya que el objetivo principal de este trabajo es establecer una propuesta de diseño de un herramental de forja.

5.2. DESARROLLO DEL MODELADO.

a) *Generación de la geometría*

La generación tanto del herramental como de la preforma había sido ya desarrollada siguiendo los pasos mostrados en el capítulo cuatro. Dentro del proceso, se centra la atención sobre la pieza que se quiere obtener, teniendo en cuenta que ésta es la que cambia de geometría y que estos cambios ocurren en varios planos, por lo que se le da la característica de ser 3D deformable.

Si bien es cierto e importante conocer que el dado sufre cambios, como el desgaste, entre la manufactura de una biela y otra; los cambios ocurridos son mínimos en comparación con los de la pieza de trabajo. Por esta razón, se le dio la propiedad de una pieza 3D rígida.

Adicionalmente se creó un cuerpo 3D Euleriano, donde durante la deformación o flujo de un continuo la posición de los pequeños elementos volumétricos cambian con el tiempo, estos cambios pueden ser descritos como funciones de dos maneras: Con una descripción Lagrangiana, en donde el movimiento queda definido como una función de las coordenadas iniciales y el tiempo; o bien, mediante una descripción Euleriana donde el movimiento es descrito como función de la posición instantánea y el tiempo. En simulaciones con formulación Lagrangiana la intercara entre las dos piezas es precisamente definida y seguida; sin embargo, cuando las deformaciones son grandes tanto la malla como los elementos son distorsionados. La ventaja del análisis Euleriano es que la malla no se distorsiona ni se mueve.

b) *Propiedades mecánicas.*

Para ésta simulación se consideraron las propiedades reportadas por Lee en el 2013, mostradas en la tabla 5.1 y en la figura 5.1

| Tabla 5.1. Propiedades del material de la preforma a Temperatura Ambiente (Lee, 2013). | |
|--|-------|
| Propiedad | Valor |
| Módulo de Young (GPa) | 150 |
| Relación de Poisson | 0.3 |
| Esfuerzo de Cedencia (MPa) | 169 |
| Último Esfuerzo (MPa) | 448 |

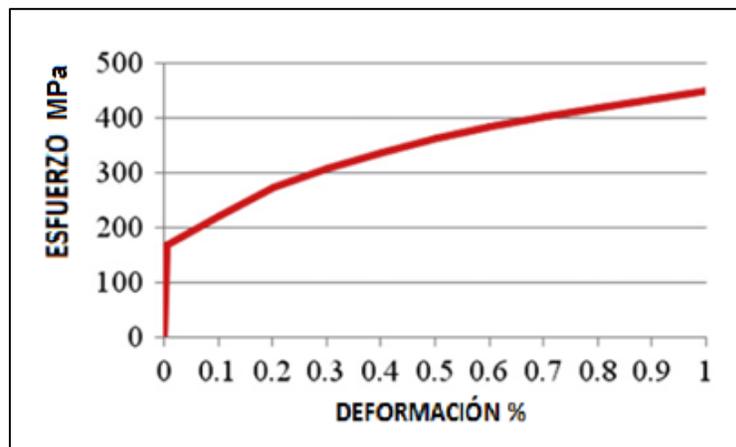


Figura 5.1 Curva esfuerzo-deformación del material seleccionado para la preforma (Lee, 2013).

c) *Ensamble del arreglo.*

Para esta sección, conociendo y considerando que el proceso es simétrico, se trabajó con un solo dado y con la mitad de la preforma. Adicionando al cuerpo Euleriano, la preforma y herramental, el arreglo quedó como se muestra en la figura 5.2.

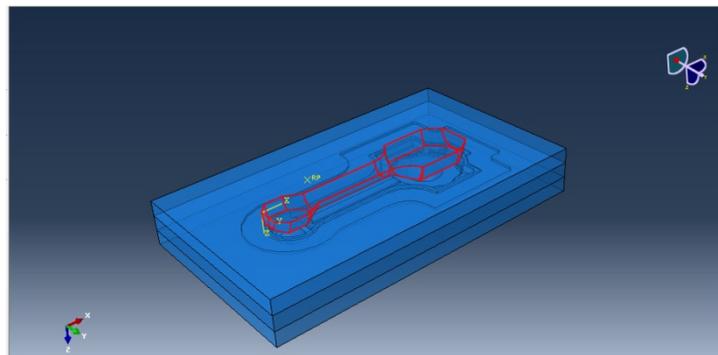


Figura 5.2 Ensamble de la partes para el proceso de forja.

d) *Condiciones generales del modelo*

Se consideró un sólo paso de tipo dinámico explícito, con un tiempo de duración de 0.76 segundos.

Resulta importante definir el modo en el cual la superficie del herramental y el material de la preforma actuarán al estar en contacto, esto se ve claramente reflejado en el flujo del material y los parámetros de fuerza y potencia. Teniendo en cuenta que ésta simulación se realizó para probar el dado y la preforma diseñada, se seleccionó un tipo de contacto general (CG) estableciendo como superficie maestra al herramental y esclava a la preforma; considerando las condiciones ideales sin fricción entre los componentes.

Posteriormente se crearon cinco condiciones de frontera, como se enlista a continuación: la primera asociada al desplazamiento deseado propio del herramental, definiendo que el mismo se realice en el eje z. La segunda condición asociada también al herramental fue creada con la finalidad de evitar desplazamientos o rotaciones en direcciones distintas a la deseada. La condición de frontera número tres, cuatro y cinco; fueron creadas con la finalidad de contener al material y evitar que éste último tenga un comportamiento errático al fluir en el dado. Finalmente el dado fue mallado con 3900 elementos tipo R3D3, de geometría triangular lineal; mientras que el Euleriano se realizó con 1796760 elementos hexaédricos lineales de tipo EC3D8R.

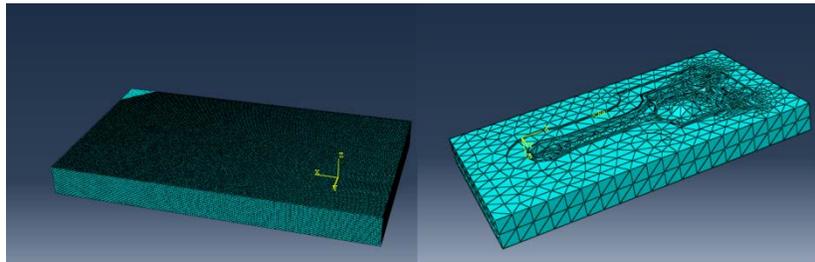


Figura 5.3 Mallado del dominio Euleriano y herramental.

5.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

A continuación se enlistan tres resultados obtenidos que permiten evaluar el diseño propuesto en el capítulo 4 de este trabajo.

a) *Análisis de esfuerzo equivalente de Von Mises.*

Se obtuvieron en total 16 diferentes imágenes que muestran como va cambiando la geometría de la pieza conforme el herramental va avanzando de posición.

La figura 5.4a muestra a la preforma inicial. La preforma se encuentra descrita completamente por el color azul intenso, lo que indica que el herramental no ha comenzado a deformar al material en ningún punto.

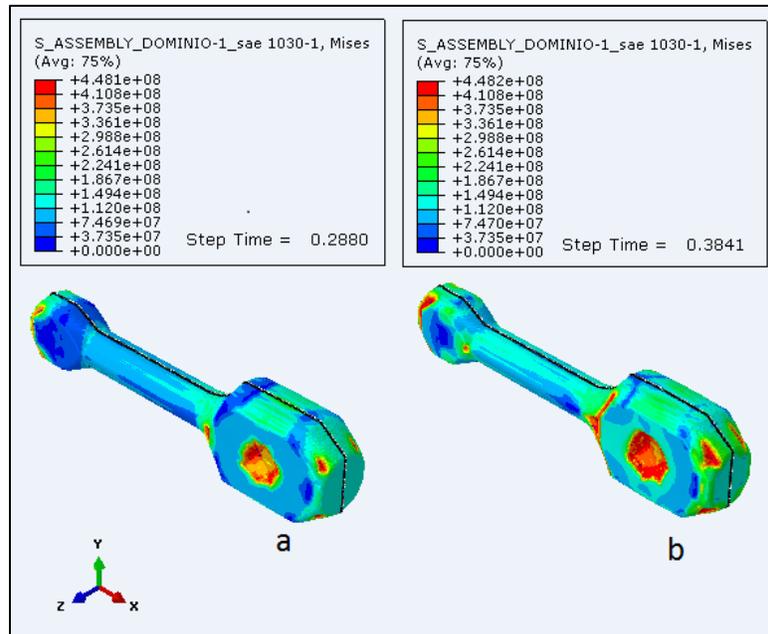


Figura 5.5 Esfuerzo equivalente del modelo obtenido. a) $t=0.228$ s, b) $t=0.3841$ s

La figura 5.6a presenta los esfuerzos mayores en las caras perpendiculares a la dirección de aplicación de carga, principalmente los esfuerzos de 448 MPa abundan en aquellas zonas donde el área de contacto es relativamente más pequeña. En contraste, se aprecia que las caras paralelas a la aplicación de la carga son las que presentan los esfuerzos de una magnitud menor a 149 MPa.

En la figura 5.6b se observa que la pieza se encuentra casi completamente formada a excepción de las esquinas de la cabeza de la biela.

Se aprecia que las zonas mostradas en la figura 5.6a, con esfuerzos de 448 MPa, han aumentado de tamaño de tal forma que en casi la mitad de la pieza se presentan esfuerzos de esta magnitud. Las caras paralelas a la carga siguen siendo las zonas que presentan los menores esfuerzos. En este punto se aprecia una pequeña salida de rebaba alrededor del pie de biela.

En la zona de rebaba se observan esfuerzos de 448 MPa, es importante recordar que el área de salida de material va disminuyendo conforme el herramental continúa avanzando, por lo tanto estas zonas generalmente presentarán esfuerzos mayores en comparación con las demás zonas de la pieza.

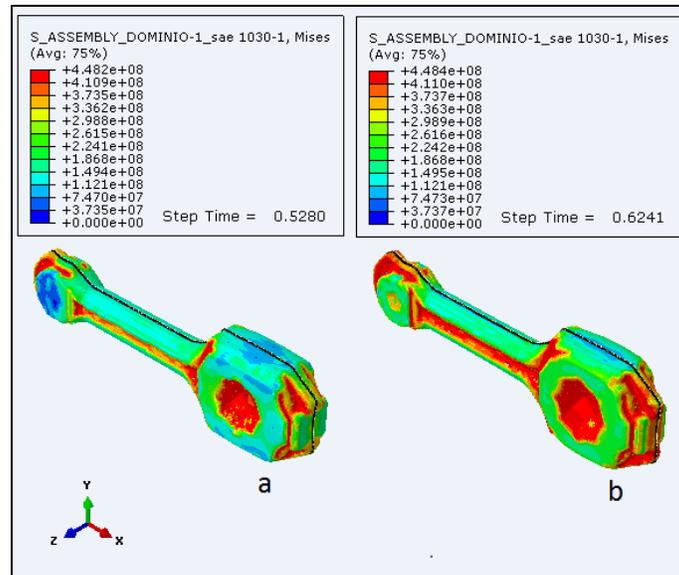


Figura 5.6 Esfuerzo equivalente del modelo obtenido. a) $t=0.528$ s, b) $t=0.6241$ s

Finalmente en la figura 5.7 a y b se muestran las dos últimas piezas del proceso modelado. En la figura a se observa que en alrededor de en gran parte de la pieza existe rebaba. Las esquinas de la cabeza de la biela aún no se han formado por completo y en la mayor parte de la pieza presenta esfuerzos de 448 MPa; algunos de 411 MPa y pocos de 149 MPa. Para el final del modelo la figura b, muestra que al final se han formado las esquinas de la cabeza de la biela. En casi toda la pieza se visualizan esfuerzos de 448 MPa; aparecen muy pocos esfuerzos de 150 MPa. Se aprecia que toda la pieza se encuentra rodeada por rebaba.

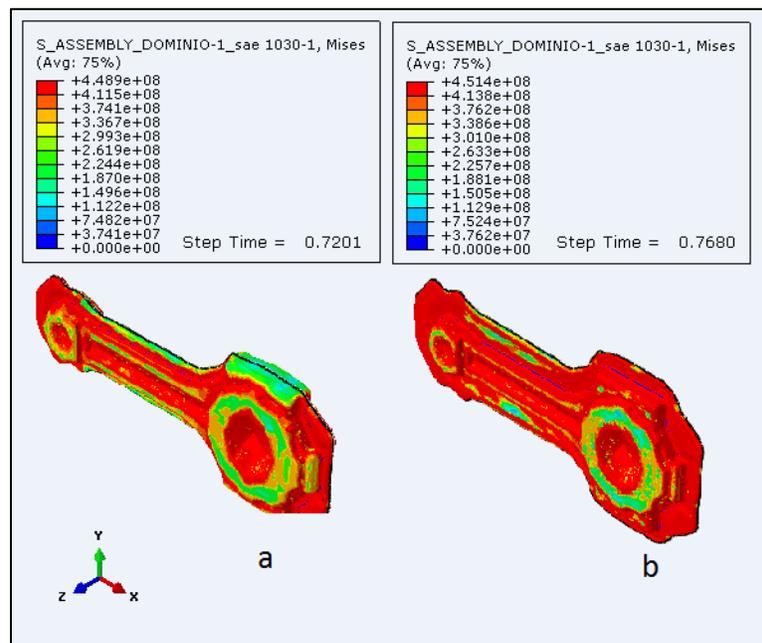


Figura 5.7 Esfuerzo equivalente del modelo obtenido. a) $t=0.7201$ s, b) $t=0.7680$ s

b) *Análisis de Flujo de Material.*

Otro análisis, entre varios más, que permite obtener Abaqus® es el de flujo de material; como su nombre lo indica por medio de vectores de desplazamiento de distintos colores muestra la magnitud y dirección que se va presentando en cada uno de los elementos que conforman la pieza durante todo el proceso.

En la figura 5.8 a se muestra la preforma completa de color verde y de ella no emana ningún vector, lo que indica que aún no ha sido comprimida por los herramientas, por lo que no ha sido modificada.

Para el tiempo $t=0.1441$ s, mostrado en la figura 5.8 b, se observa que existe desplazamiento de material principalmente desde el centro de la cabeza de biela hacia el exterior. El desplazamiento mayor reportado en esta zona es de 0.1 mm.

Los desplazamientos más pequeños se presentan en el pie de biela y son de 0.01mm en dirección del eje X negativo.

Se observa que el flujo del material se da principalmente hacia las zonas en las que no existe parte del herramienta que se oponga al flujo del material.

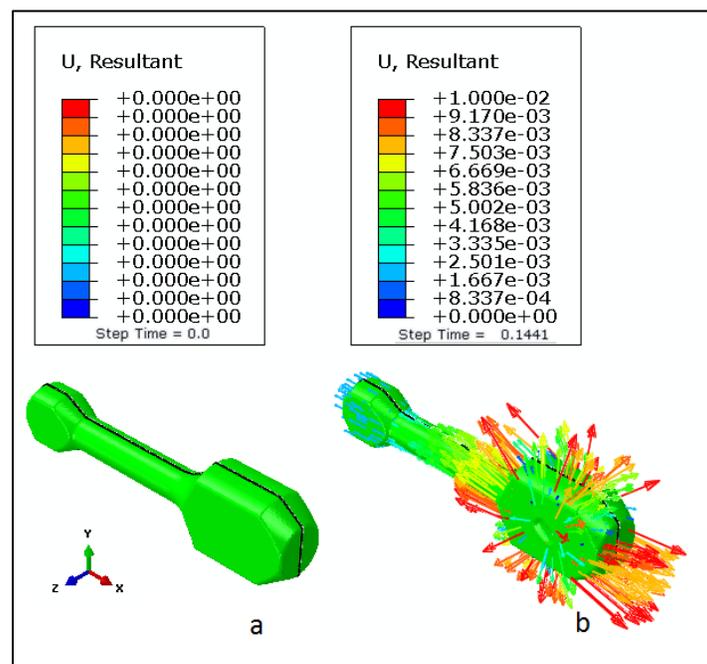


Figura 5.8 Flujo de material obtenido del modelo. a) $t=0$ s, b) $t=0.1441$ s

En la figura 5.9 se observa que el desplazamiento de la cabeza de biela ha comenzado a dirigirse mayormente en dirección del eje X.

En el pie de biela, la mayoría de los desplazamientos presentes son de 0.05 mm. Existen también algunos de 0.07 mm y casi ninguno de 0.1 mm.

Es importante analizar que en el cuerpo de la biela existen desplazamientos en dirección del eje Y, en un solo lado, lo cual podría ser consecuencia de un choque de material proveniente tanto de la cabeza como del pie de biela. Al ser una pieza simétrica se esperaría que este desplazamiento también estuviera presente en el lado contrario del cuerpo de biela.

En la imagen b de la figura 5.9 se aprecia, en comparación con la a, que el desplazamiento en el pie de biela ha disminuido e incluso ha cambiado de dirección hacia el eje X positivo. Se observa que parte del material mencionado provoca desplazamientos sobre el cuerpo, en dirección de la cabeza de biela, lo que entonces confirma que lo descrito en el párrafo anterior, sólo es un instante de cambio de dirección.

En la cabeza de la biela el desplazamiento ha cambiado un poco, ya que en la base de la cabeza ha disminuido, pero se ha intensificado en las partes centrales, continuando desde el centro hacia el exterior. En la parte superior de la cabeza se mantienen los desplazamientos.

Es importante mencionar que en la cabeza de biela se siguen presentando los desplazamientos de mayor magnitud (0.1 mm), en la mayoría de esta zona. Prácticamente no existen desplazamientos menores a 0.03 mm.

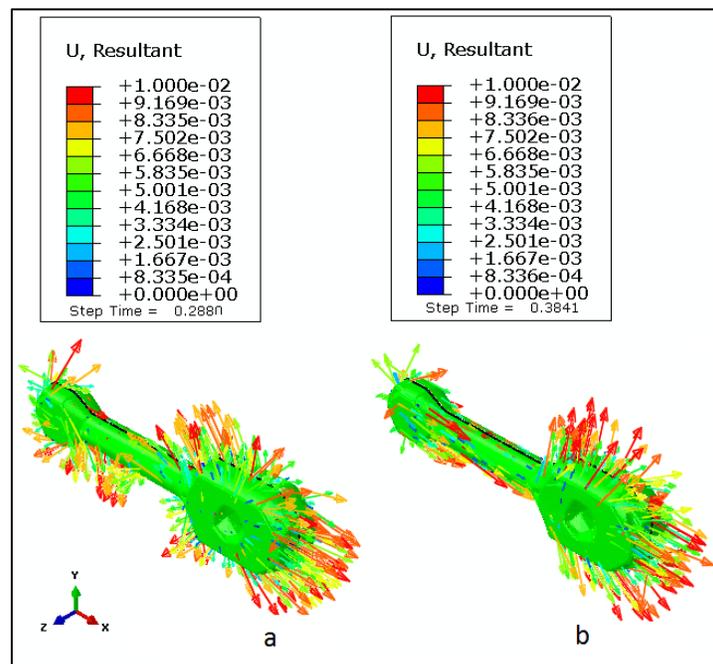


Figura 5.9 Flujo de material obtenido del modelo. a) $t=0.2885$ s, b) $t=0.3841$ s

En la figura 5.10 a, en el cuerpo de la biela, se comienza a visualizar la aparición de la costilla y con ello, los desplazamientos hacia afuera del cuerpo. Sin embargo, llama la atención que el desplazamiento en esta zona no vuelve a ser simétrico y continúa siendo mayor en el lado derecho.

En la cabeza de biela ha disminuido la cantidad de desplazamiento de material y también la magnitud de la misma, ya que ahora la mayoría de los vectores mostrados son de 0.06 mm o menores. En el pie de biela ha aumentado ligeramente el flujo de material, no observándose cambios de consideración.

En la imagen b de la misma figura, aumenta el desplazamiento en la zona del pie de biela, así como en el cuerpo de biela, donde ahora, se visualiza un desplazamiento más simétrico en comparación con la imagen a. En la cabeza de biela se observa una notoria disminución de flujo de material, sin embargo los pocos vectores presentes en la parte media de la misma han aumentado de magnitud, anteriormente presentaban un valor de 0.06 mm y ahora son de 0.1 mm.

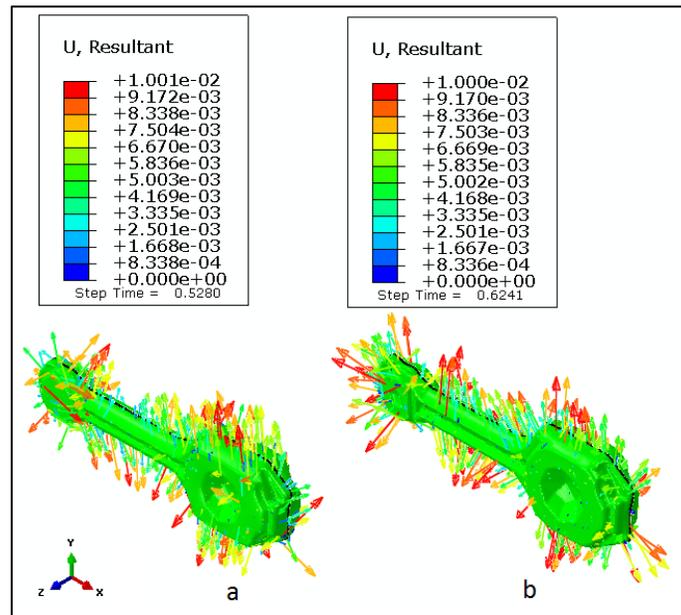


Figura 5.10 Flujo de material obtenido del modelo. a) $t=0.528$ s, b) $t=0.6241$ s

Finalmente la figura 5.11 muestra los últimos dos pasos obtenidos del modelo. En la imagen a, se observa que los desplazamientos de material han disminuido considerablemente, además de que la mayoría del material se desplaza hacia los canales de rebaba. Es importante poner atención en que en las únicas zonas en que aún existe desplazamiento sobre el eje Z, son aquellas que aún no han sido llenadas por completo de material. Esto último se demuestra al observar que los vectores se encuentran dentro de la biela; la mayoría de estos son de magnitud de 0.1 mm.

En la imagen b, casi todos los vectores se encuentran fuera de la biela, existen desplazamientos sobre el eje Z. La presencia de estos últimos se debe al cambio de sección presente en la zona de la rebaba.

Se observa que los desplazamientos han disminuido en cantidad y magnitud; la mayoría son menores a 0.066 mm. La mayoría de desplazamientos ocurren en la zona de rebaba, puesto que es la parte que no presenta restricción completa por el herramental.

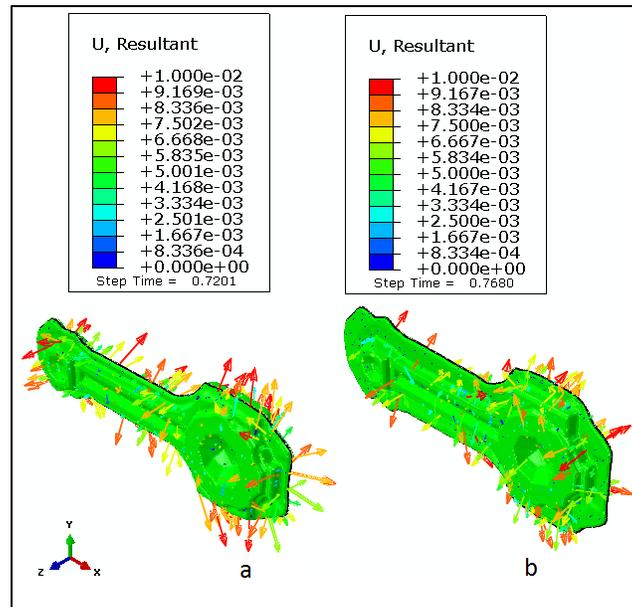


Figura 5.11 Flujo de material obtenido del modelo. a) $t=0.7201$ s, b) $t=0.768$ s

CONCLUSIONES

Una vez obtenidos los resultados del modelo desarrollado en elemento finito, se verifica que el diseño de los herramientales permite el flujo del material en el interior de los mismos, sin embargo es preciso tener en cuenta que al final del proceso la pieza presenta esfuerzos superiores a 448 MPa, mismos que aumentarán al tomar en cuenta la fricción presente entre el material y las paredes del herramientales. Será indispensable, como trabajo futuro, verificar las variables tales como la velocidad del herramientales y propiedades del material seleccionado.

Al ser los esfuerzos mayores a 448 MPa, se está sobrepasando el último esfuerzo del material. Lo que significa que el material no está cumpliendo en este último instante. Sin embargo es importante tener en cuenta que los esfuerzos disminuirán al considerar la temperatura a la cual normalmente se lleva a cabo este proceso (por encima de los 900°C); siendo este un punto de desarrollo para un trabajo posterior.

Al momento de diseñar un dado de forja y éste sea el que provoque la mayor deformación, se debe evitar la presencia de geometrías relativamente pequeñas y permitir que sean obtenidas en los dados de acabado, ya que promueven la formación de zonas de grandes esfuerzos, pudiendo llegar a ser zonas en las cuales la pieza obtenida falle.

Las caras perpendiculares al movimiento de los herramientales, son las zonas que presentan los esfuerzos de menor magnitud, estos disminuyen al aumentar el área ocupada por las mismas.

Los cambios de sección son zonas que desde el inicio presentan esfuerzos de gran magnitud, por lo que es recomendable que dichos cambios sean aminorados empleando radios y filetes de magnitud lo más grande posible.

En algunos momentos se observa que los desplazamientos son asimétricos, sin embargo, revisando cuadro a cuadro se concluye que esto sólo es momentáneo, pues en todas las demás imágenes se muestra simétrico.

En un futuro, para la selección de los materiales para los herramientales se debe tener en cuenta la presencia de los esfuerzos obtenidos.

Para la obtención de una pieza por medio de forja, se debe desarrollar de manera simultánea el diseño de la preforma, ya que a pesar de poder conocer el volumen final de la pieza a obtener, resulta impreciso dar una correcta distribución del material. En la simulación obtenida en este trabajo se destaca, por ejemplo, un llenado pronto de la zona del pie de biela y un llenado lento de la zona de la cabeza; razón por la cual una vez llena la cavidad del pie, el material se desplaza por el cuerpo de la biela con dirección hacia la cabeza, lo cual no es esperado.

El diseño de la zona de rebaba cumplió con su objetivo, ya que permitió un llenado completo de las cavidades del dado, no permitiendo que el material se desplazara fuera de la misma, hasta el final del paso.

El diseño de la preforma resulta importante para el completo llenado del dado. En el diseño propuesto se observó que el flujo de material iba del pie de biela hacia la cabeza y luego en sentido inverso debido a una incorrecta distribución de material. Es un punto que deberá trabajarse a futuro para garantizar un mejor diseño.

El empleo de este tipo de técnicas de análisis para validar diseños tanto del herramental como de la preforma, son generalmente más económicos que probar con herramentales o preformas ya fabricadas, pero hay que aclarar que se debe realizar una validación experimental

Las modificaciones realizadas a los herramentales, empleando programas de diseño asistido por computadora resultan más económicas y un menor consumo de tiempo que modificar el herramental de una línea de producción.

El modelo realizado en elemento finito, proporciona información sobre el proceso; inclusive aquella que no puede ser obtenida en un modelo físico, como los requerimientos del flujo de material y esfuerzos equivalentes mostrados en la etapa de resultados.

REFERENCIAS:

- 1 Altan, T., Ngaile, G., Shen, G., *Cold and Hot Forging Fundamentals and Applications*, ASM International, Estados Unidos, 2005.
- 2 ASM Handbook, *Forming and Forging*, International Handbook Committee, Estados Unidos, 1996.
- 3 Dieter, G., *Mechanical Metallurgy*, Mc. Graw Hill, Estados Unidos, 1961
- 4 Diko, F., *Metal Flow Simulation and Design of Dies for Closed Die Forging*, Tesis Dublin City University, Irlanda, 1992.
- 5 DIN 7526, *Steel Forgings; Tolerances and Permissible Variations for Drop Forgings*, German Institute for Standardization, Alemania, 1969.
- 6 Douglas, R.,Kuhlmann, D., *Guidelines for precision hot forging with applications*, Journal of Materials Processing Technology, Estados Unidos, 2000
- 7 Estrada,L., *Modelado de Flujo Plástico de Estampas para forja y propuesta de diseño*. Tesis UNAM, México, 2010
- 8 Forging Industry Association, <https://www.forging.org/>. Consultada el 13 de Enero de 2015
- 9 Grass,H.,Krempaszky C., Werner,E.,. *3-D FEM-simulation of hot forging processes for the production of a connecting rod*, Journal of Computational Materials Science, Alemania 2006
- 10 Gupta,R., *Recent Developments in Materials and Processes for Automotive Connecting Rods*, SAE, Estados Unidos, 1993.
- 11 Kevorkijan,V., *AZ80 and ZC71/SiC/12p Closed Die Forgings For Automotive Applications: Technical and Economic Assessment of Possible Mass Production*, Journal of Materials Science and Technology, Eslovenia, 2003
- 12 Kim,H.,Yagi,T., Yamanaka,M., *FE simulation as a must tool in cold/warm forging process and tool design*, Journal of Materials Processing and Technology, Japón, 2000.
- 13 Kulon, J., Mynors, D.,Broomhead,P., *Aknowledge-based engineering design tool for metal forging*, Journal of Processing Technology, Reino Unido, 2006
- 14 Lee,J. , Jung, U., Park,G., *Shape optimization of the workpiece in the forging process using equivalent static loads*, Journal of Finite Elements in Analysis and Design, República de Corea, 2013
- 15 Groover,M., *Fundamentos de Manufactura Moderna; Materiales Procesos y Sistemas*, Prentice Hall, México, 1997.

- 16 Munive,D., Reyes,O., *Manufactura de una Biela de un motor alternativo de uso aeronáutico*, Tesis IPN, México, 2013.
- 17 Henk,R., Jörgen, K., *Método para la fabricación de bielas para motores*. Oficina Española de Patentes y Marcas, España, 1993.
- 18 Repgen,B., *Optimized Connecting Rods to Enable Higher Engine Performance and Cost Reduction*, SAE, Estados Unidos, 1998.
- 19 Sala,G., *Technology-driven design of MMC squeeze cast connecting-rods*, Journal of Science and Technology of Advanced Materials, Italy, 2002
- 20 Schey,J., *Procesos de Manufactura*, Mc Graw Hill, México, 2002
- 21 Sleenckx,E., *Review of flash design rules for closed-die forgings*, Journal of Materials Processing Technology, Bélgica, 1992.
- 22 Takemasu,T., Vázquez,V., Painter,B., Altan,T., *Investigation of metal flow and preform optimization in flashless forging of a connecting rod*, Journal of Materials Processing Technology, Japón, 1996
- 23 Tomov,B., Radev,R., Gagov,V., *Influence of flash design upon process parameters of hot die forging*, Journal of Materials Processing Technology, Bulgaria, 2004.
- 24 Vazquez,V., Altan,T., *Die design for flashless forging of complex parts*, Journal of Materials Processing Technology, Colombia, 2000.
- 25 Visser,D., *A comparison of Manufacturing Technologies in the connecting Rod Industry*, Colorado School of Mines, Estados Unidos, 2008
- 26 Zhao,G., *Forging preform design with shape complexity control in simulating backward deformation*. Journal of Machine Tools and Manufacture, Estados Unidos, 1995.