



11126
44

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN

PROCESO DE FORJA EN CALIENTE

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:

INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A :

MARCOS MIGUEL HERNANDEZ CRUZ

ASESOR: M. en I. FELIPE DIAZ DEL CASTILLO RODRIGUEZ

CUALITITLAN IZCALLI, ESTADO DE MEXICO,

2003.

A

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLAN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACION ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXAMENES PROFESIONALES



ASUNTO: VOTOS APROBATORIOS

FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES CUAUTITLAN



DEPARTAMENTO DE
EXAMENES PROFESIONALES

DR. JUAN ANTONIO MONTARAZ CRESPO
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN
P R E S E N T E

ATN: Q. Ma. del Carmen García Mijares
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán

Con base en el art. 28 del Reglamento General de Exámenes, nos permitimos comunicar a usted que revisamos la TESIS:

"Proceso de Forja en Caliente"

que presenta el pasante: Marcos Miguel Hernandez Cruz
con número de cuenta: 09758348-2 para obtener el título de :
Ingeniero Mecanico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 30 de Abril de 2003

PRESIDENTE	<u>Ing. Filiberto Leyva Piña</u>	
VOCAL	<u>Ing. Hector Roa Ortiz</u>	
SECRETARIO	<u>M.J. Felipe Diaz del Castillo Rodriguez</u>	
PRIMER SUPLENTE	<u>Ing. Marco Antonio Hernandez Rodriguez</u>	
SEGUNDO SUPLENTE	<u>Ing. Humberto Neri Mondragon</u>	

B

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIAS

Gracias a Dios por todo, pero especialmente por haberme dado la capacidad física y mental y la fuerza espiritual para terminar mi carrera.

Gracias a mi madre por todo el apoyo, cariño y comprensión que tuvo a lo largo de estos años y que solo una madre puede dar.

Gracias a mi padre por haberme dado la vida y darme confianza en que puedo realizarme como profesional y alcanzar todo lo que me proponga en la vida.

Gracias a mi tía tere por todo su apoyo moral, intelectual y económico que me brindo durante el transcurso de mi carrera.

A mi hermana Yurely por creer en la persona que soy, por la cercanía que representa y por haber esperado a que terminara mi carrera.

A mis hermanas Diana y Verónica por creer en mi capacidad intelectual y con ello elevar mi autoestima.

A mis sobrinos Isaac, Rebeca, Ricardo y Oscar por ser tan hermosos y por ser una luz en mi vida.

A mi asesor por su apoyo, comprensión y por impulsarme para llegar hasta este momento.

Gracias a la Universidad Nacional Autónoma de México y a todos los que la componen por haberme dado una formación académica gratuita que me será de utilidad el resto de mi vida.



INDICE

	Pag.
INTRODUCCIÓN.....	1
OBJETIVOS.....	3

CAPITULO 1

GENERALIDADES DEL PROCESO DE FORJA

1.1 Definición de forja.....	4
1.2 Clasificación.....	4
1.2.1 Temperatura de trabajo.....	4
1.2.2 Forma en que se aplica la presión.....	4
1.2.3 Restricciones de las matrices al flujo del metal.....	5
1.3 Forja en matriz abierta.....	5
1.3.1 Análisis de la forja en matriz abierta.....	5
1.3.2 Aplicaciones de la forja en matriz abierta.....	8
1.4 Forja en matriz cerrada.....	9
1.4.1 Secuencia de forjado.....	10
1.4.2 Aplicaciones de la forja en matriz cerrada.....	11
1.5 Comparacion con otros procesos.....	12
1.6 Metales utilizados para la forja en caliente.....	13
1.7 Equipo de forja.....	14
1.7.1 Maquinas de compresión.....	14
1.7.2 Martillos.....	15
1.7.3 Prensas.....	19
1.7.4 Ventajas y desventajas.....	23
1.8 Características técnicas.....	25
1.9 Proceso de forja en caliente.....	26

CAPITULO 2

PARÁMETROS DE DISEÑO

2.1 Forja con matriz cerrada en bloque.....	30
2.2 Forja convencional.....	30
2.3 Forja de precisión.....	31
2.4 Fundamentos de diseño sobre el producto.....	31
2.4.1 Línea de partición.....	31

D

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

2.4.2	Ángulo de salida.....	35
2.4.3	Bordes o salidas negativas	36
2.4.4	Radio en las esquinas	38
2.4.5	Alma de las piezas forjadas.....	46
2.4.6	Cavidades de la pieza.....	49
2.4.7	Forjas dobles	50
2.4.8	Piezas correctamente proporcionadas	51
2.5	Fundamentos de diseño sobre dados de forja	52
2.5.1	Cavidad de alivio	53
2.5.2	Borde de alivio	53
2.5.3	Cuneta de alivio	53
2.5.4	Planos o Bordes de alineación	54
2.5.5	Empuje lateral	55
2.5.6	Ángulos de salida constante.....	57
2.6	Tolerancias en los dados o matrices de forja	57
2.6.1	Tolerancias dimensionales y de alineación.....	59

CAPITULO 3

EJEMPLO

3.1	Definición del problema	61
3.2	Calculo de las presiones y fuerzas de las matrices	64
3.3	Calculo de los parámetros de diseño.....	67
3.3.1	Radio en las esquinas	67
3.3.2	Espesor del alma	68
3.3.3	Tolerancia para el tamaño del sobrante de material	69
3.3.4	Tolerancia de cierre.....	70
3.3.5	Tolerancias dimensionales	72
3.4	Diseño de las matrices	74
3.5	Volumen del material de inicio.....	78
	CONCLUSIONES.....	80
	BIBLIOGRAFÍA.....	81

TESIS CON
 FALLA DE ORIGEN

INTRODUCCIÓN

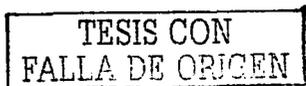
Una de las técnicas de manufactura más importantes en la industria es la forja. Es la operación más antigua para formado de metales y se remonta quizá al año 5000 A.C.. Hay evidencia de que la forja se usaba en el antiguo Egipto, Grecia, Persia, China y Japón para hacer armas, joyería y otros implementos. En esos tiempos, a los artesanos en el arte de la forja se le tenía en alta estima.

En la antigua Creta se usaban placas de piedra labrada como dados de impresión en el martillado del oro y la plata, alrededor de 1600 A.C. Esto evolucionó a la fabricación de monedas por un proceso similar hacia el año 800 A.C. En Roma se usaron dados de impresión mas complicados por el año 200 D.C. El negocio de la herrería permaneció relativamente sin cambios hasta que se introdujo el martinete de forja con pisón guiado a fines del siglo XVIII. Este desarrollo encaminó la práctica de la forja a la era industrial.

En la actualidad, la forja es un proceso industrial importante mediante el cual se hacen una gran variedad de componentes de alta resistencia para automóviles, vehículos aeroespaciales y otras aplicaciones. Estos componentes incluyen flechas y barras de conexión para motores de combustión interna, engranes, componentes estructurales para aviación y partes para turbinas y motores a propulsión. Además, las industrias del acero y de otros materiales metálicos básicos usan la forja para fijar la forma básica de grandes componentes que luego se maquinan para lograr su forma final y dimensiones definitivas.

El trabajo mecánico realizado en la forja consiste en la deformación de los metales a una determinada temperatura(en caliente o en frío) mediante dispositivos mecánicos. Esto no incluye el formado de metales por maquinado, esmerilado, etc. ni el vaciado de metal fundido en moldes sino que, como se vera mas adelante, los metales se forman por presión, ya sea por efecto de impactos o por compresión, lenta o rápida.

En el proceso ocurre que el metal, estando en estado plástico, se adapta a la forma de los dados. La acción de presión se realiza en el centro de la parte que se forja, trabajando completamente toda la sección. La deformación plástica de los metales y aleaciones forjables mediante una fuerza compresiva, generalmente a temperaturas elevadas, produce partes con la estructura granular orientada, siguiendo el contorno de la cavidad del dado de forja.



La orientación del grano mejora notablemente la tenacidad y la resistencia a la fatiga en las piezas forjadas, lo que permite reducir el peso de las mismas, contando con un amplio margen de seguridad.

En el primer capítulo se presentan las generalidades del proceso de forja tales como su definición, clasificación, características técnicas, aplicaciones y equipo utilizado para la forja, enfocándose en el proceso de forja de matriz cerrada.

En el segundo capítulo se tratan los parámetros de diseño como son las dimensiones y tolerancias, las características de forma como los ángulos de retiro y los radios de esquina y de filete, defectos, etc.

En el tercer capítulo se realiza el diseño de una matriz cerrada con dibujos de la pieza, en donde se mostrará a la misma ya con sus dimensiones, tolerancias y características de forma.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

OBJETIVOS

- Proporcionar un panorama general del proceso de forja de matriz cerrada.
- Diseñar una matriz cerrada para producir una pieza sencilla.

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

CAPITULO I GENERALIDADES DEL PROCESO DE FORJA

1.1 DEFINICIÓN DE FORJA

Es un método de manufactura de piezas metálicas, que consiste en la deformación plástica de un metal, ocasionada por esfuerzos impuestos sobre él, mediante martillos o prensas. En el proceso, el metal fluye en la dirección de menor resistencia, así que generalmente ocurrirá un alargamiento lateral a menos que se le contenga.

1.2 CLASIFICACIÓN

La forja se lleva a cabo de diversas maneras. Algunas formas de clasificar las operaciones de forja es de acuerdo a:

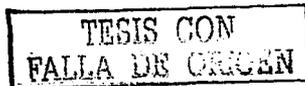
- La temperatura de trabajo.
- La forma en que se aplica la presión.
- La restricción de las matrices al flujo del metal.

1.2.1 Temperatura de trabajo

Las operaciones de forja se pueden realizar en caliente o en frío. La mayoría de las operaciones de forja se realizan en caliente (por arriba y por debajo de la temperatura de recristalización), dada la deformación que demanda el proceso y la necesidad de reducir la resistencia e incrementar la ductilidad del metal de trabajo, sin embargo, la forja en frío también es muy común para ciertos productos. La ventaja de la forja en frío es la mayor resistencia del componente que resulta del endurecimiento por deformación.

1.2.2 Forma en que se aplica la presión

En la forja se aplica la presión por impacto o en forma gradual. La diferencia depende mas del tipo de equipo que de las diferencias en la tecnología de los procesos. Una máquina de forjado que aplica cargas de impacto se llama martinete de forja, mientras la que aplica presión gradual se llama prensa de forjado.



1.2.3 Restricción de las matrices al flujo del metal

Quizá es la clasificación más importante que se puede hacer para las operaciones de forja. Atendiendo a esta clasificación se pueden distinguir dos amplios grupos para las operaciones de forja:

- a) Forja en matriz abierta.
- b) Forja en matriz cerrada.

En la *forja en matriz abierta* el trabajo se comprime entre dos dados planos (o casi planos), permitiendo que el metal fluya sin restricciones en una dirección lateral con respecto a las superficies del dado. En la *forja en matriz cerrada*, las superficies del dado contienen una forma o impresión que se imparte al material de trabajo durante la compresión, restringiendo significativamente el flujo del metal. En este tipo de operación el metal fluye más allá del dado impresor formando una *rebaba*. La rebaba es un exceso de metal que debe recortarse más tarde.

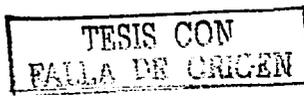
1.3 FORJA EN MATRIZ ABIERTA

En la forja en matriz abierta, el metal no está completamente contenido en el dado; la forja con martinete es un ejemplo característico de este método. La pieza se forma debido a rápidos y sucesivos golpes del martillo.

El caso más simple de forja en matriz abierta consiste en comprimir una parte de sección cilíndrica entre dos dados planos, muy semejante a un ensayo de la compresión. Esta operación de forjado conocida como *recalcado* o *forjado para recalcar*, reduce la altura del trabajo e incrementa su diámetro.

1.3.1 Análisis de la forja en matriz abierta

Si la forja en matriz abierta se lleva a cabo bajo condiciones ideales, sin fricción entre el trabajo y la superficie de la matriz, ocurre una deformación homogénea y el flujo radial de material es uniforme a lo largo de su altura como se representa en la figura 1.1.



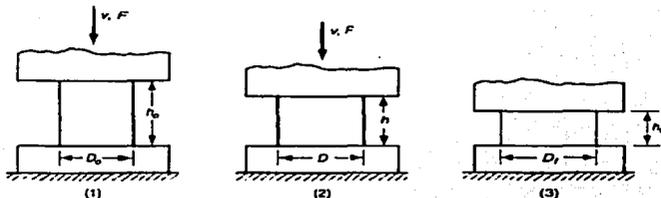


FIGURA 1.1 Deformación homogénea de una parte de trabajo cilíndrica bajo condiciones ideales en una operación de forjado en dado abierto: (1) inicio del proceso con la parte de trabajo a su altura y diámetro originales, (2) compresión parcial y (3) tamaño final.

Bajo condiciones ideales, el esfuerzo real que experimenta el material durante el proceso, se puede determinar por:

$$\epsilon = \ln \frac{h_0}{h} \dots \dots \dots (1.1)$$

donde:

h_0 = altura inicial del trabajo, pulg. (mm).

h = altura de un punto intermedio en el proceso pulg.(mm).

Se puede estimar la fuerza para ejecutar el recalado. Se puede obtener la fuerza requerida para continuar la compresión a una altura dada h durante el proceso, multiplicando el área correspondiente de la sección transversal por la resistencia de fluencia:

$$F = \sigma_f A \dots \dots \dots (1.2)$$

Donde:

F = Fuerza, lb(N).

A = Área de la sección transversal de la parte, pulg²(mm²).

σ_f = Resistencia de fluencia correspondiente al esfuerzo dado por la ecuación 1.1, en lb/pulg²(MPa).

El área A se incrementa continuamente al reducirse la altura durante la operación. La resistencia de fluencia σ_f se incrementa también como resultado del endurecimiento por trabajo.

excepto cuando el metal es perfectamente plástico (trabajo en caliente). En este caso, el exponente de endurecimiento por deformación $n = 0$, y la resistencia de fluencia σ_f iguala a la resistencia de fluencia del metal Y . La fuerza alcanza un valor máximo al final de la carrera de forjado donde el área y la resistencia de fluencia llegan a su valor más alto.

Una operación real de recalado no ocurre exactamente como se muestra en la figura 1.1, debido a que la fricción se opone al flujo del metal en la superficie de los dados. Esto crea un abultamiento en forma de barril, llamado abarrilamiento, que se muestra en la figura 1.2. Cuando se realiza un trabajo en caliente con dados fríos, el abarrilamiento es más pronunciado. Esto se debe a: 1) un coeficiente de fricción más alto, típico del trabajo en caliente y 2) la transferencia de calor en la superficie del dado y sus cercanías, lo cual enfría el metal y aumenta su resistencia a la deformación. El metal más caliente se encuentra en medio de la parte y fluye más fácilmente que el metal más frío de los extremos. El efecto se acentúa al aumentar la relación entre el diámetro y la altura de la parte, debido a la mayor área de contacto en la interfase dado-trabajo.

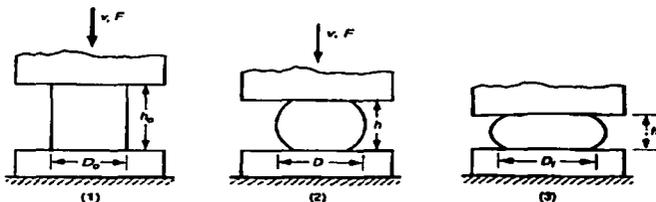
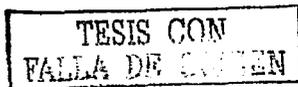


FIGURA 1.2 Deformación cilíndrica real de una parte de trabajo en forjado en dado abierto mostrando un abarrilamiento pronunciado: (1) inicio del proceso, (2) deformación parcial y (3) forma final.

Todos estos factores originan que la fuerza de recalado sea más grande que la pronosticada por la ecuación 1.2. Se puede aplicar un factor de forma a la ecuación 1.2 para aproximar los efectos de la fricción y la relación entre el diámetro y la altura:

$$F = K_f \sigma_f A \dots \dots \dots (1.3)$$



Donde:

F , σ_f y Λ tienen las mismas definiciones que en la ecuación 1.2.

K_f = Factor de forma de la forja, definido como:

$$K_f = 1 + \frac{0.4\mu D}{h} \dots\dots\dots (1.4)$$

Donde:

μ = Coeficiente de fricción.

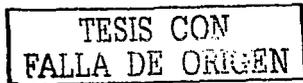
D = Diámetro de la parte de trabajo o cualquier dimensión que represente la longitud de contacto con la superficie, pulg. (mm).

h = Altura de la parte, pulg. (mm).

1.3.2 Aplicaciones de la forja en matriz abierta

La forja en matriz abierta es un proceso industrial importante. Las formas generadas por operaciones en matriz abierta son simples, como flechas, discos y anillos. Los dados en algunas aplicaciones tienen superficies con ligeros contornos que ayudan a formar el material de trabajo. Éste, además, debe manipularse frecuentemente (girándolo en cada paso, por ejemplo) para efectuar los cambios de forma requeridos. La habilidad del operador es un factor importante para el éxito de estas operaciones. Un ejemplo de forjado en dado abierto en la industria del acero es el formado de grandes lingotes cuadrados para convertirlos en secciones redondas. Las operaciones de forja en dado abierto producen formas rudimentarias que necesitan operaciones posteriores para refinar las partes a sus dimensiones y geometría final. Una contribución importante de la forja en caliente en dado abierto es la creación de un flujo de granos y de una estructura metalúrgica favorables en el metal.

Las operaciones clasificadas en la categoría de dado abierto son operaciones relacionadas y pueden realizarse con dados convexos, con dados cóncavos y por secciones, como se ilustran en la figura 1.3.



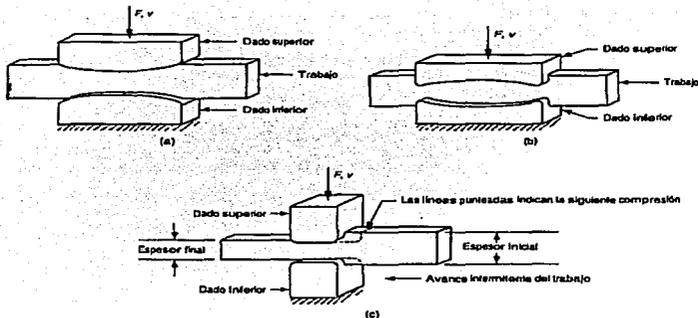


FIGURA 1.3 Varias operaciones de forjado en dado abierto: (a) con dados convexos, (b) con dados cóncavos y (c) por secciones.

La *forja con dados convexos* es una operación que se utiliza para reducir la sección transversal y redistribuir el metal en una parte de trabajo, como preparación para operaciones posteriores de formado con forja. Se realiza con dados de superficies convexas. Las cavidades del dado para forjado con dados convexos se diseñan frecuentemente con múltiples cavidades de impresión de manera que la barra inicial pueda formarse toscamente antes del formado final. La *forja con dados cóncavos* es similar al anterior, excepto que los dados tienen superficies cóncavas.

Una operación de *forjado por secciones* consiste en una secuencia de compresiones forjadas a lo largo de una pieza de trabajo para reducir su sección transversal e incrementar su longitud. Se usa en la industria siderúrgica para producir lupias y planchas a partir de lingotes fundidos, en la operación se utilizan dados abiertos con superficies planas o con un ligero contorno. Con frecuencia se usa el término *forja incremental* para este proceso.

1.4 FORJA EN MATRIZ CERRADA

En una variante del proceso la forma se obtiene llenando la cavidad definida por las mitades superior e inferior de la matriz. Se permite que el exceso de material escape en forma de *rebaba*: como la matriz no está por completo cerrada, se llama adecuadamente *matriz de impresión*. No obstante, también se aplica el término *matriz cerrada*.

1.4.1 Secuencia de forjado

La pieza de trabajo inicial se muestra como una parte cilíndrica similar a las de las operaciones en dado abierto. Al cerrarse el dado y llegar a su posición final, el metal fluye más allá de la cavidad del dado y forma una rebaba en la pequeña abertura entre las placas del dado, como se ilustra en la figura 1.4.

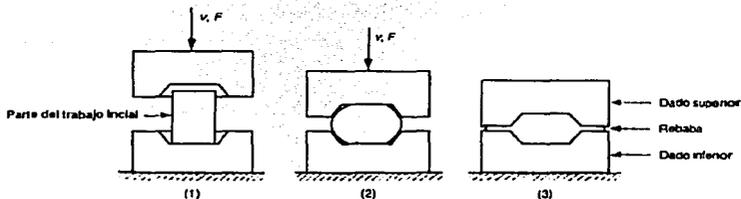


FIGURA 1.4 Secuencia en el forjado con matriz cerrada: (1) inmediatamente antes del contacto inicial con la pieza de trabajo en bruto, (2) compresión parcial y (3) cerradura final de los dados, ocasionando la formación de rebaba entre las placas del dado.

Aunque la rebaba se recorta posteriormente, tiene realmente una función importante en la forja con dado cerrado, ya que cuando ésta empieza a formarse, la fricción se opone a que el metal siga fluyendo hacia la abertura, y de esta manera fuerza al material de trabajo a permanecer en la cavidad. En el formado en caliente, la restricción del flujo de metal es mayor debido a que la rebaba delgada se enfría rápidamente contra las placas del dado, incrementando la resistencia a la deformación. La restricción del flujo de metal en la abertura hace que las presiones de compresión se incrementen significativamente, forzando al material a llenar los detalles algunas veces intrincados de la cavidad del dado, con esto se obtiene un producto de alta calidad.

Con frecuencia se requieren varios pasos de formado en el forjado con dado cerrado para transformar el material de inicio en la forma final deseada. Para cada paso se necesitan cavidades separadas. Los pasos iniciales se diseñan para redistribuir el metal en la parte de trabajo y conseguir así una deformación uniforme y la estructura metálica requerida en las etapas siguientes. Los últimos pasos le dan el acabado a la pieza final. En la figura 1.5 se muestra un dado con varios pasos de formado y la pieza producida mediante el mismo.

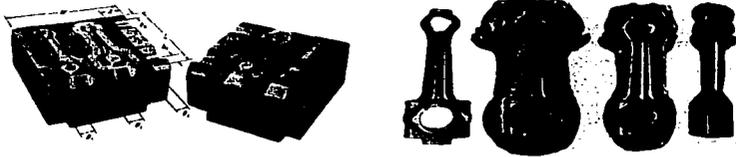


Figura 1.5 *Matriz de varios pasos*

1.4.2 Aplicaciones de la forja en matriz cerrada

Los mejoramientos de la tecnología de la forja con dado cerrado han tenido como resultado la capacidad de producir forjados con secciones más delgadas, formas más complejas, reducción drástica de los requerimientos de aguzamiento en los dados, tolerancias más estrechas y la virtual eliminación de concesiones al maquinado, en la figura 1.6 se muestra la diversidad de piezas que se pueden producir mediante forja con dado cerrado.

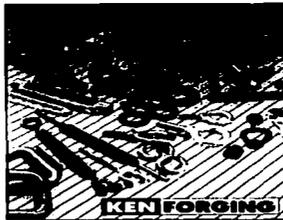


Figura 1.6 *Aplicaciones de la forja en matriz cerrada.*

Los procesos de forjado con estas características se conocen como forjado de precisión. Los metales más comunes que se usan en la forja de precisión son el aluminio y el titanio. Algunas operaciones de forjado de precisión se realizan sin producir rebaba. La forja de precisión se clasifica propiamente como un proceso de *forma neta o casi neta*, dependiendo de la necesidad del maquinado para acabar la forma de la parte.

1.5 COMPARACION CON OTROS PROCESOS

La forja con dado impresor no tiene tolerancias estrechas de trabajo y frecuentemente se requiere el maquinado para lograr la precisión necesaria. El proceso de forjado genera la geometría básica de la parte y el maquinado realiza los acabados de precisión que se requieren en algunas porciones de la parte(por ejemplo, perforaciones, cuerdas y superficies que deben coincidir con otros componentes). Las ventajas de la forja sobre el maquinado completo de la parte son:

- Velocidades de producción más altas.
- Conservación del metal.
- Mayor resistencia y orientación más favorable de los granos del metal.

En la figura 1.7 se ilustra una comparación del flujo granular en la forja, fundición y en el maquinado.



Figura 1.7 Comparación esquemática de la disposición de la estructura granular en función del proceso

Las ventajas de la forja sobre la fundición son:

- La deformación plástica elimina defectos internos.
- Mejor respuesta al tratamiento térmico.
- Adaptable a la demanda.

- Mayor resistencia.

Las ventajas sobre la soldadura son:

- Producción más económica.
- Mayor resistencia y propiedades metalúrgicas.
- Producción simplificada.
- Ahorro de material.

Las desventajas con respecto a todos estos procesos son:

- Debe precalentarse el material.
- El diseño de los dados o estampas debe realizarse con cuidado.
- No es económico para la producción en cantidades pequeñas.
- La maquinaria es costosa.

1.6 METALES UTILIZADOS PARA LA FORJA EN CALIENTE

El trabajo en caliente de los metales, se efectúa arriba de la zona de recrystalización. Para el acero, la recrystalización comienza entre los 500 a los 700 °C; sin embargo se le trabaja a temperaturas superiores a esta zona. Algunos metales como el plomo y el estaño, tienen una zona baja de recrystalización y se les puede trabajar en caliente o a la temperatura ambiente. Los metales que comúnmente se emplean en este proceso se muestran en la Tabla 1.1 con su gama de temperaturas aproximadas de trabajo.

Tabla 1.1 Metales empleados en la forja en caliente

MATERIAL	TEMPERATURA APROXIMADA EN °C	FACILIDAD DE FORJADO
Acero	1100 - 1260	1 a 2
Cobre y sus aleaciones	760 - 930	3
Magnesio y sus aleaciones	316	4
Aluminio y sus aleaciones	370 - 454	5

La facilidad de forjado se refiere a la resistencia a la deformación del material y va del 1 (mayor facilidad) al 5 (menor facilidad).

1.7 EQUIPO PARA FORJA

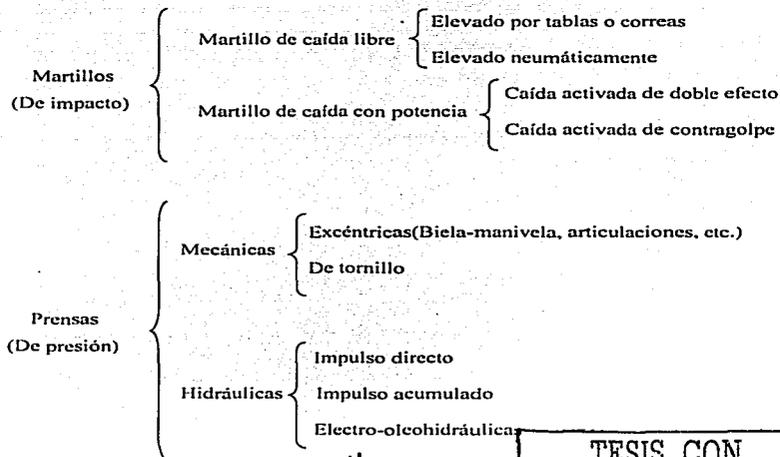
El equipo que se usa en el proceso de forjado consiste en máquinas de forja, que se clasifican en:

- Martinetes
 - Prensas
- } Máquinas de compresión
- Dados de forjado
 - Herramientas especiales (Hornos, dispositivos mecánicos, estaciones de recorte)

1.7.1 Maquinas de compresión

Las máquinas de compresión utilizadas para la forja se pueden dividir en dos grupos: las que trabajan por impacto (martinetes) y las que trabajan por presión (prensas), en la tabla 1.2 se muestra una clasificación más amplia.

Tabla 1.2. *Maquinas de compresión utilizadas para la forja*



1.7.2 Martillos

Su función es conformar el metal en caliente por medio de golpes sucesivos, producidos por la caída de un ariete, es decir, forma el material por medio de impactos, y se clasifican en la forma siguiente:

Martillo de caída libre elevado por tablas o correas. En el primer caso consta de una tabla unida al ariete y colocada entre dos rodillos, uno de los cuales está girando impulsado por un motor, como se ve en la figura 1.8.

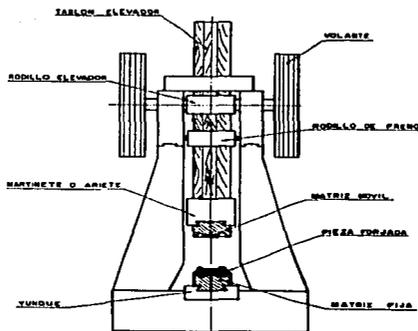


Figura 1.8 Martillo de caída libre elevado por tablas

Cuando el ariete llega hasta el punto más bajo de su carrera, el rodillo inmóvil prensa la tabla contra el móvil que por fricción eleva la tabla hasta una posición superior. Al llegar a esta posición, los rodillos se abren y una grapa se cierra, deteniendo la tabla hasta que se acciona un pedal y la deja caer de nuevo. La fuerza del impacto depende completamente del peso del ariete; los pesos más utilizados van de 227 a 2720 kg.

Los martillos elevados por correas son similares a los elevados por tablas, la diferencia básica es que en lugar de éstos, el ariete se eleva mediante correas que se enrollan por un motor situado en la parte superior.

Estos martillos tiene un peso de caída de 200 a 5000 kg; las medidas estándar fluctúan entre 500 y 2500 kg, en incrementos de 250 y 500 kg. La altura de caída del ariete varía con la medida del martillo, cambiando de 870 mm para un martillo de 200 kg hasta cerca de 1900 mm para uno de 3750 kg. La altura de caída y, por consiguiente, la fuerza de golpe del martillo, es aproximadamente constante para cierto trabajo y no puede alterarse sin parar la máquina y ajustar la longitud de caída.

Martillo de caída libre elevado neumáticamente. Es un martillo que deriva su fuerza de impacto de un martinete de caída libre. Sin embargo, se eleva mediante un cilindro de aire como se ve en la figura 1.9. Esto hace posible que la carrera sea rápida, sólo necesita mantenimiento en algunas de sus partes y permite seleccionar la longitud de la carrera. Los martillos neumáticos pueden realizar de 50 a 75 carreras por minuto, dependiendo de su tamaño.

Ofrecen la ventaja de una velocidad mayor, fácil manejo y, por tanto, un mayor rendimiento. También pueden estar provistos de un mecanismo automático por medio del cual, se obtiene la automatización en la subida y bajada del ariete.

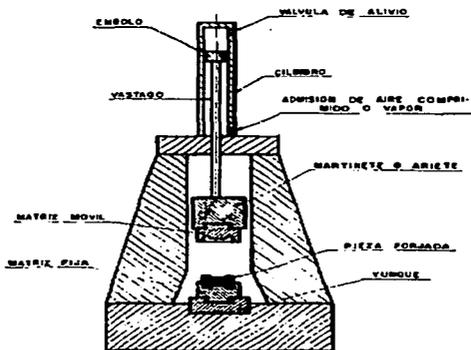


Figura 1.9 Martinete neumático (impacto por gravedad)

Martillos de caída con potencia.

En estos martillos la energía de golpe es la suma de la energía proporcionada por el peso del ariete o pilón, más la energía que se imprime a éste por algún medio. Se clasifican en martillos de doble efecto y de contragolpe.

Martillos de caída activada de doble efecto. Son el tipo de máquina de uso general para la producción de forja en matriz cerrada por impacto. Consiste de una base pesada que soporta los dos miembros del bastidor o armazón que guían con precisión el movimiento del ariete; el armazón soporta también un cilindro de aire que a través de un pistón y un vástago activa el ariete. En la figura 1.10 se muestra un martillo de este tipo. En la cara inferior del ariete va situado el dado superior. El dado inferior, está sujeto a la base o yunque que se encuentra firmemente acuñado a la misma. El movimiento del pistón se controla mediante una válvula que admite aire a la parte superior o inferior del pistón. Esta válvula se controla con un pedal o una palanca de mano.

Los pesos para estos martillos son comunes entre los 300 y 1600 kg, y ocasionalmente llegan hasta los 25 000 kg. La gran masa de este tipo de martillos no está a la vista, ya que está bajo el piso. Un martillo de 25000 kg posee una base acero cuyo peso alcanza el medio millón de kilogramos. El ariete, el pistón y su vástago tendrán un peso agregado de 20000 kg aproximadamente. La velocidad del pistón durante la bajada sobrepasa en ocasiones los 7.5 m/s.

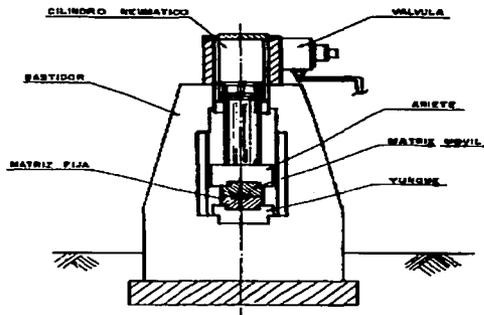


Figura 1.10 Martillo de caída activada de doble efecto

Aunque estos martillos son muy útiles, disipan en la base y los cimientos de un 15 a un 25% de la energía cinética desarrollada en el ariete. La energía transmitida impone un gran esfuerzo a la base, pudiendo romperla o causar daños en las instalaciones vecinas.

Martillo de caída activada de contragolpe. Desarrollan la fuerza de golpe por el movimiento de dos arietes que simultáneamente se encuentran en direcciones opuestas y se encuentran en el centro. Estos martillos admiten vapor en un cilindro superior que acciona hacia abajo el ariete, al mismo tiempo los pistones conectados al ariete superior actúan a través de un sistema hidráulico para que el ariete inferior suba, en la figura 1.11 se muestra el martillo de contragolpe.

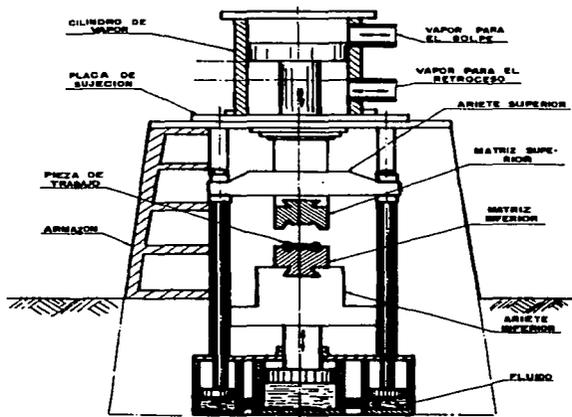


Figura 1.11 *Martillo de caída activada de contragolpe*

Debido a que el peso del ariete inferior y su pistón son mayores a los superiores, los arietes regresan automáticamente después del golpe. La velocidad de regreso se incrementa por la presión del vapor que actúa sobre el pistón.

1.7.3 Prensas

Funcionan en posición vertical al igual que el martinete, pero en lugar de impacto, imparten presión sobre la pieza. Generalmente tienen una maza o carro que se mueve en dirección vertical para presionar la pieza y llevar a cabo la deformación en contraste con los martillos, cuya característica es el golpeo repetitivo. A diferencia de los martillos, la energía es absorbida por la pieza de trabajo en un porcentaje mucho mayor, y las pérdidas se distribuyen por el bastidor en lugar de ir a la cimentación.

Estas prensas pueden costar dos veces más que un martillo de la misma capacidad, no obstante, son lo doble de rápidas. Pueden hacer lo mismo que un martillo, aunque a veces, debido a su acción de compresión, hacen mejor el trabajo con metales difíciles de forjar. Estas máquinas se clasifican en:

Prensas mecánicas. Constan de un bastidor o armazón que contiene en su base la fijación a los cimientos(mucho menos robustos que en los martillos), y el asiento del lado inferior.

Prensas mecánicas excéntricas. El impulso en la mayoría de estas máquinas, se basa en el mecanismo biela-manivela que transfiere movimiento circular en recíprocante, como en el motor de combustión interna. Un volante, como el que se ve en la figura 1.12, acumula energía que se usa sólo durante una pequeña parte de la revolución del eje excéntrico, o sea durante la deformación.

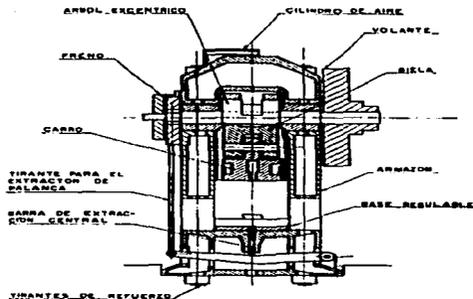


Figura 1.12 Prensa mecánica excéntrica

Prensas mecánicas de tornillo. Al igual que los martillos y las prensas excéntricas, son máquinas ampliamente usadas en la industria de la forja. Se componen de un armazón de una sola pieza de acero fundido, que en su parte superior lleva un eje horizontal que contiene las ruedas de fricción accionadas por un motor eléctrico, en la figura 1.13 se muestra una prensa de este tipo.

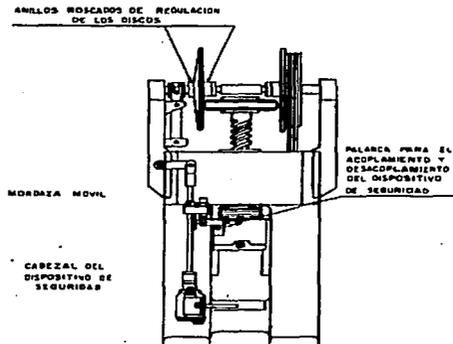


Figura 1.13 Prensa mecánica de tornillo

Perpendicularmente a las ruedas de fricción se encuentra localizado el volante de acero fundido, conectado a las mismas por un sistema de embrague controlado por un servomotor.

Cuando se accionan los controles, la rueda de fricción acelera el volante que tiene conectado a su vez el tornillo, fabricado de acero al molibdeno. El tornillo tiene acoplado en su parte inferior la maza que se acelera conforme va bajando, mientras que la energía cinética del volante continúa incrementándose.

Cuando la maza golpea la pieza, la carga necesaria de forjado se refuerza y se transmite a través de ésta, el tornillo y el yunque, a la armazón de la prensa.

Cuando toda la energía acumulada en el volante se ha usado en deformar la pieza y en deformaciones elásticas de la máquina, las piezas móviles se paran. En este momento, o un instante antes, el servomotor activa el eje horizontal y presiona la otra rueda de fricción contra el

volante, que junto con el tornillo se aceleran en dirección inversa y la maza es subida hasta su posición superior, terminándose así el ciclo.

Prensas hidráulicas. Se clasifican en *prensas de impulso directo, impulso acumulado y electro-oleohidráulicas*, en la figura 1.14 se muestra un ejemplar de una prensa hidráulica.

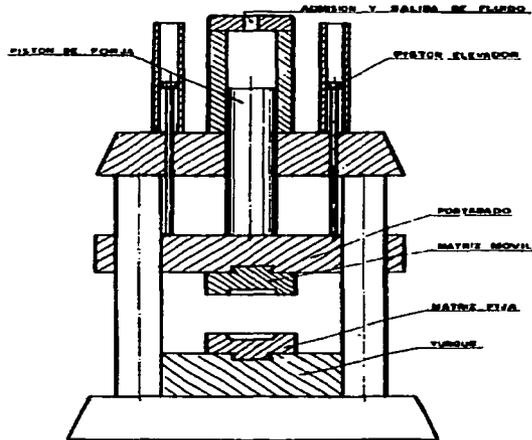


Figura 1.14 Prensa hidráulica vertical

Las características que corresponden a estas máquinas son:

- Ya que la carga máxima se tiene durante el golpe, existe gran cantidad de energía para la deformación.
- Dentro de la capacidad de las prensas hidráulicas, la carga máxima puede ser limitada para proteger la herramienta. En este caso, no es posible exceder este límite de carga, ya que la válvula de presión controla la presión del fluido actuando sobre el ariete.

- La velocidad del ariete puede variarse continuamente según se quiera durante el ciclo de golpeo.

Prensas hidráulicas de impulso directo. Contienen aceite como medio de trabajo. El ariete superior cae por gravedad y el aceite es trasladado del tanque hacia el cilindro de la maza a través de la succión de esta caída libre, en prensas horizontales la maza se mueve con poca presión. En contacto con la pieza, la bomba sube la presión en el cilindro de la maza. Cuando la maza superior alcanza una posición determinada, o cuando la presión llega a un límite preestablecido, el fluido es liberado y retorna a la maza. La principal ventaja de las prensas horizontales es que se aprovecha mejor la energía del impacto, ya que las dos mazas se desplazan, como se ve en la figura 1.15, además no requieren cimentación especial.

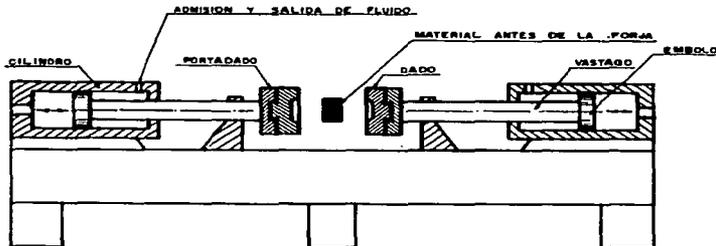


Figura 1.15 Forja con prensa horizontal

Prensas hidráulicas de impulso acumulado. Normalmente tienen una emulsión de agua con aceite como medio de trabajo, usan acumuladores cargados de nitrógeno o aire para mantener el medio bajo presión. La secuencia de operaciones es similar a la de impulso directo, excepto que la presión se eleva por medio de los acumuladores.

Por consiguiente, el margen de penetración no depende directamente de las características de la bomba y puede variar dependiendo de la presión del acumulador, de la compresibilidad del medio y de la resistencia a la deformación de la pieza. Hacia el final del golpe, la carga disponible de la maza disminuye porque el medio de trabajo se expande conforme la deformación progresa.

Prensas electro-oleohidráulicas. Sus características principales son: El bastidor de la prensa, compuesto de tablero, montantes y cabezal está unido en forma de marco rígido, mediante tirantes pretensados. El cabezal sirve a la vez como depósito de aceite, además todo el accionamiento hidráulico se halla por completo montado en él.

Debido a su construcción compacta, la máquina necesita poco espacio. La maza de la prensa se acciona por medio de una bomba de émbolo axial, con dirección de caudal variable o constante. La bomba está directamente acoplada a un motor especial. La inversión de marcha de la prensa en el punto inferior es iniciada por una corredera de mando, mientras que en el punto superior, para retener la maza se realiza el regreso desconectando la bomba a través de la corredera. Este sistema da breves tiempos de inversión a la vez que una carga reducida para la bomba. Se obtiene también un cambio de dirección exacto, libre de retraso, a la vez que una gran duración de todo el accionamiento hidráulico.

1.7.4 Ventajas y desventajas

A continuación se resumen las ventajas y desventajas de los diferentes tipos de martillos y prensas, ya mencionados.

Martillos de caída libre

- Son máquinas de capacidad restringida, simples, de bajo costo y se usan para forjas que sólo pesan unos cuantos kilogramos.
- La altura de caída y, por tanto, la fuerza de golpe es constante; si se quiere variar, se debe parar la máquina y ajustarla.
- Poseen bastante exactitud en cuanto al movimiento del ariete.
- No requieren gran inversión en equipos auxiliares.

Martillos de caída activada

- La cantidad de energía está bajo el control del operador, ya que puede variar la altura de caída de cualquier golpe.
- Poseen bastante exactitud en cuanto al movimiento del ariete.
- Menor altura de recorrido, por lo tanto, funcionamiento más rápido, lo que proporciona un mayor número de golpes por minuto.
- Gastos de operación mayores e inversiones en equipos auxiliares.

- Ya que es más importante la cantidad de trabajo desarrollado por minuto que por golpe, poseen mejor rendimiento debido a su funcionamiento más rápido.

Martillos de contragolpe

- Dan gran rendimiento, ya que el trabajo desarrollado en el choque de los dos arietes se absorbe casi totalmente por pieza, habiendo pocas pérdidas en la cimentación.
- La cimentación resiente vibraciones mínimas, pudiendo construirse con un volumen 15% menor a los de otros tipos.
- El juego de los dos arietes al sumarse repercute en la precisión de las estampas.
- Como los dos arietes se mueven al mismo tiempo, la pieza no se puede acompañar por el operario para un forjado preciso.

Prensas mecánicas excéntricas

- Se encuentran en capacidades de 300 a 8000 ton.
- Desarrollan su fuerza máxima al final del golpe, con la que se obtiene una excelente precisión en el forjado de configuración difícil.
- Dan un gran número de golpes por minuto.
- No requieren de personal muy especializado.
- Se puede automatizar el proceso.

Prensas de fricción de tornillo

- No tienen un punto muerto inferior definido, con lo que se pueden repetir golpes sobre la misma estampa para obtener mayor precisión.
- Son máquinas ideales para operaciones de acuñación, estampado en caliente de aleaciones ligeras, y como máquinas complementarias del proceso de electrorrecalcado.

Prensas hidráulicas

- Desarrollan su fuerza máxima, tan pronto como los dados tocan la pieza de trabajo, continuando durante todo el proceso.
- Son las máquinas de forjado más lentas y, por tanto, el tiempo de contacto bajo carga es mayor y desgasta más los dados.
- Son empleadas generalmente en forja libre y punzonado.



1.8 CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

El proceso de forja aporta beneficios para las piezas producidas por este método de manufactura, entre otras cosas elimina defectos internos, mejora las propiedades mecánicas y ahorra tiempo y dinero. Sus características técnicas más sobresalientes se enumeran a continuación.

- 1) Integridad estructural. La forja elimina las bolsas de gas internas y otras inclusiones del metal, que podrían causar fallas no predecibles en piezas sometidas a esfuerzos o impactos elevados.
- 2) Alta resistencia y tenacidad. Mediante la orientación adecuadas de las fibras del metal, la forja desarrolla la máxima resistencia posible al impacto y a la fatiga, dando además a la pieza la ductilidad necesaria para resistir fallas bajo impactos inesperados. En la figura 1.16 se muestra la orientación del flujo de grano para una pieza de metal forjado.



Figura 1.16 Configuración de las líneas de grano

- 3) Bondad de configuración. Muchas de las piezas forjadas se pueden producir aproximadamente a la configuración final estipulada, reduciéndose a un mínimo la necesidad de un maquinado posterior.
- 4) Uniformidad de las piezas. Es posible obtener piezas que exhiban una amplia gama de propiedades fisicomecánicas, dependiendo de los materiales, aleaciones y tratamientos térmicos.
- 5) Ahorro de peso. La alta resistencia que puede ser desarrollada en las forjas por la adecuada orientación del flujo de fibras, refinamiento de la estructura cristalina y tratamiento térmico, les permite tener en muchas ocasiones un peso más reducido que las piezas fabricadas con otros procesos.

- 6) Economía. Mediante la forja, se pueden producir piezas de configuración geométrica muy complicada, que en otro caso se tendrían que elaborar mediante el ensamble de varias partes. Esto permite obtener un considerable ahorro en la producción al evitar costosas uniones de soldaduras, remaches, etc.

1.9 PROCESO DE FORJA EN CALIENTE

El proceso de forja no es tan sencillo de realizar debido a que el metal aun se encuentra en estado sólido y por lo tanto no fluye fácilmente a las cavidades de la matriz, por lo que a la hora de forjar piezas hay que seguir los pasos siguientes:

1. Cortar y preformar la pieza. El preformado se puede hacer con una prensa de forja y el corte con sierra o cizalla, en la figura 1.17 se muestra la pieza cortada y preformada.

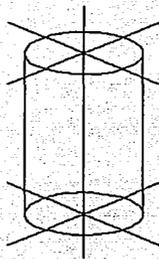


Figura 1.17 Pieza cortada y preformada

Se utiliza el preformado cuando la pieza a forjar tiene una geometría complicada o su peso unitario es relativamente alto, con esta operación se modifica la configuración inicial del metal, facilitando así su forjado final. Requiere además de un calentamiento inicial.

2. Calentar el trozo de metal cortado y/o preformado en hornos del tipo eléctrico, de resistencia, de inducción, de alta frecuencia o de combustible líquido o gaseoso.

Los aceros (incluyendo el acero inoxidable), son calentados aproximadamente a 1230 °C, en cambio, el aluminio se calienta a 425 °C, en la figura 1.18 se muestra una pieza de metal calentada a alta temperatura.



Figura 1.18 *Calentamiento del metal*

Esta fase de calentamiento se requiere a pesar de que el metal haya sido previamente calentado para su preformado.

3. La pieza ya caliente, se coloca en la matriz de la prensa o martinete, como se ve en la figura 1.19.

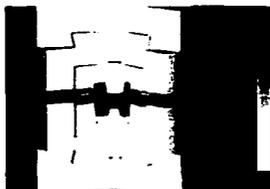


Figura 1.19

Dependiendo de su forma, tamaño y complejidad será el número de pasos y cavidades de la matriz, donde parcialmente se le irá dando forma al producto como se observa en las figuras 1.20a, 1.20b y 1.20c.

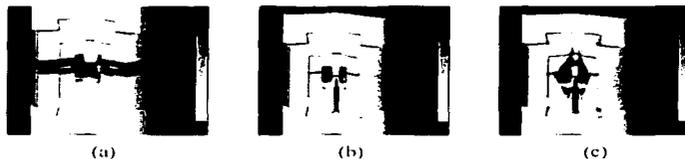


Figura 1.20 Formación de la pieza

4. Cuando la pieza ha sido formada, pasa a unas prensas cortadoras de menor capacidad, para efectuar en ellas el desbarbado, esta operación se puede observar en la figura 1.21.

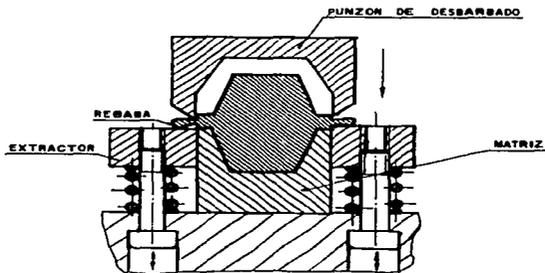


Figura 1.21 Eliminación de rebaba o desbarbado

Se debe realizar inmediatamente después del formado final para aprovechar la elevada temperatura de la pieza y hacer el corte con una fuerza menor.

5. Una vez que la pieza se ha forjado y desbarbado, se le somete normalmente a un tratamiento térmico con el propósito de aliviarle esfuerzos originados por la deformación y reducir la dureza en casos de aceros de alto contenido de carbono. Los métodos más usuales para ablandar el acero son el recocido y el normalizado.

Las partes hechas por el proceso de forja en caliente, pueden pesar desde 200 g hasta más de 2 ton, sin embargo, la mayoría de las piezas pesan de 2 a 50 kg.

Con respecto al paso 1 (cortar y preformar la pieza), es conveniente enfatizar que la mayoría de las piezas forjadas requieren de un preformado también en caliente, éste debe enfocarse a la formación de "bolsas" de material en las zonas donde el producto final tendrá mayor sección transversal.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPITULO 2 PARAMETROS DE DISEÑO

Para un diseño adecuado del producto y del herramental empleado en la forja es conveniente diferenciar el proceso de la siguiente manera:

2.1 FORJA CON MATRIZ CERRADA EN BLOQUE

El diseño utiliza filos grandes, radios en las esquinas, almas y nervios gruesos; generalmente se forjan las piezas en un solo juego de matrices. Se requieren presiones de 0.015 a 0.023 ton por mm² de área plana proyectada para aleaciones de aluminio, dependiendo del metal y de la complejidad del diseño.

La presión requerida es menor que la empleada en forjas más intrincadas. La forja en bloque, requiere generalmente maquinado en todas sus superficies. La selección de este proceso se puede basar en un estudio económico sobre el tamaño del lote de producción o en la necesidad de maquinar el producto debido a requerimientos de tolerancias cerradas.

2.2 FORJA CONVENCIONAL

Es el más común de los procesos de forja con matriz y se pueden obtener formas más intrincadas que con el proceso anterior con productos más ligeros, detalles de forma y tolerancias más cerradas. Las diferencias de diseño entre ambos tipos de forja para un mismo producto, se muestran en la figura 2.1.

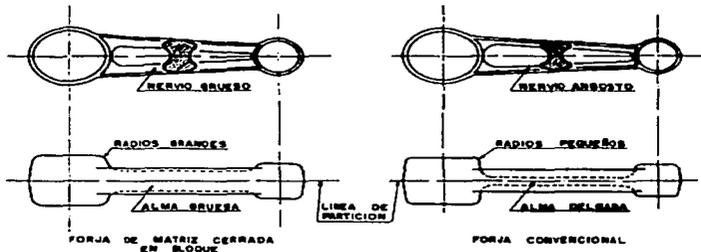


Figura 2.1 Diferencias entre la forja de matriz cerrada en bloque y la forja convencional

La forja convencional requiere sólo maquinado parcial de acabado; para aleaciones de aluminio, las presiones usuales van de 0.023 a 0.039 ton/mm² de área plana proyectada y generalmente se requiere preformar el trozo de metal que se va a utilizar en la matriz.

El diseñador debe evaluar las diferencias de costo entre ambos tipos de forja. La forja en bloque tiene menor costo de herramienta, pero el producto será más pesado y requerirá más operaciones de maquinado para terminarlo.

2.3 FORJA DE PRECISIÓN

Implica tolerancias más cerradas que en los dos procesos anteriores, diseños más intrincados con pequeños nervios y radios de esquinas, y delgados cuerpos y filos. El alto costo del herramienta (generalmente se requieren de dos a tres juegos de dados o matrices) se debe justificar por el uso final de la pieza, el tamaño del lote de producción y por el ahorro en el maquinado final. Este tipo de forja requiere generalmente de 0.029 a 0.078 ton/mm², para aleaciones de aluminio.

2.4 FUNDAMENTOS DE DISEÑO SOBRE EL PRODUCTO

Los fundamentos referentes al diseño del producto que se enunciarán a continuación, son aplicables a todos los metales forjables y sus aleaciones.

2.4.1 Línea de partición

Es el plano de partición entre el dado superior y el inferior de una matriz cerrada. Normalmente se ubica(aunque no siempre) a través del área transversal máxima de la pieza; puede ser plana o irregular y se debe señalar en todos los dibujos del producto y de la matriz. La ubicación del plano de partición puede influir considerablemente en el costo del herramienta, duración de la matriz, facilidad de forja, flujo del grano, propiedades mecánicas y requerimientos de maquinado para la terminación de la pieza.

Es preferible situar el plano de partición sobre la periferia mayor de la pieza, ya que es más fácil forjar lateralmente el flujo de metal, extendiéndolo que llenar un hueco profundo, un ejemplo de esto se muestra en la figura 2.2.

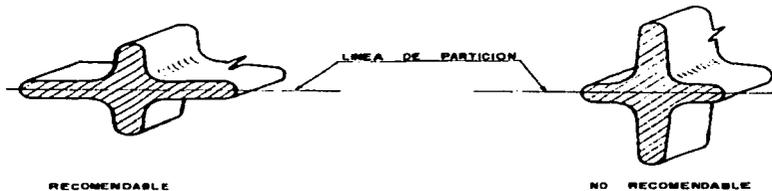


Figura 2.2 Línea de partición situada a lo largo de la sección más grande y poco profunda

Mediante dados superiores planos se puede reducir el costo del herramental, debido a que sólo se requiere maquinar la cavidad en el dado inferior, esto también simplifica el proceso, ya que elimina la posibilidad de desalineamiento sobre los dados superior e inferior y permite tener un solo dado superior plano para varias matrices, en la figura 2.3 se observa una superficie forjada con un dado plano.

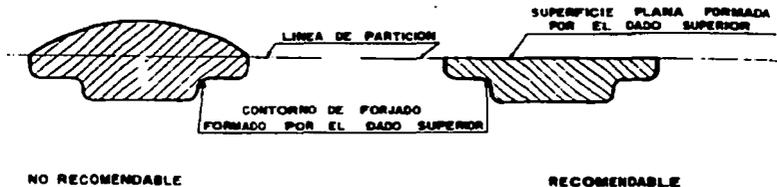


Figura 2.3 Una superficie plana en la línea de partición reduce el costo del dado, simplifica la operación de desbarbado y elimina el desalineamiento entre dados

Las piezas donde la línea de partición está inclinada con respecto al plano de forja, pueden presentar dificultades durante el desbarbado si la inclinación es demasiado grande, la práctica recomendable es limitar esta inclinación a 75° como máximo, según se indica en la figura 2.4, para evitar extremos mal desbarbados.

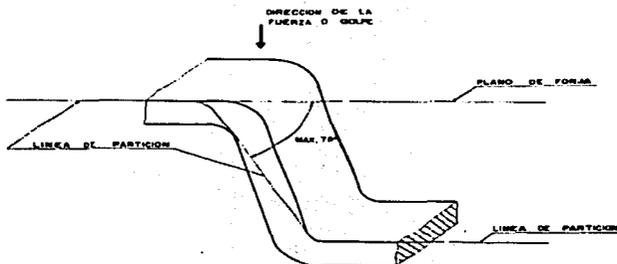


Figura 2.4 La inclinación máxima recomendable de la línea de partición para el desbarbado no debe ser superior a los 75°

La localización de la línea de partición tiene un papel crítico sobre el flujo del grano y en las propiedades dimensionales del producto forjado.

Durante el proceso, el exceso de metal fluye fuera de la matriz por la cuneta de alivio conforme los dados se aproximan. Este flujo en dirección de la línea de partición puede crear zonas desfavorables en la pieza según se muestra en la figura 2.5.

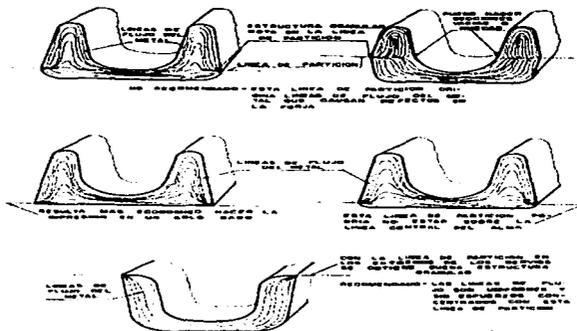


Figura 2.5 Efectos producidos en la orientación del grano por la localización de la línea de partición en una sección en "U"

En las forjas donde el alma de la pieza esté situada en varios planos, enmarcada por un nervio, la línea de partición puede seguir la trayectoria del alma de la pieza, como se ve en la figura 2.6.

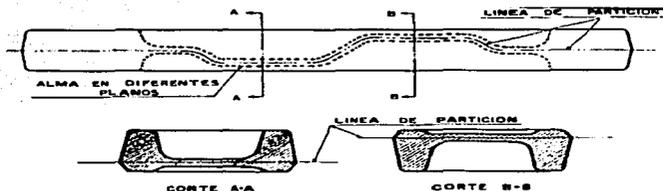


Figura 2.6 Trayectoria de la línea de partición a lo largo del alma de la pieza

También es correcto situar la línea de partición por encima o por debajo de la superficie del alma de la pieza.

Cuando la línea de partición está inclinada con respecto al plano de forja o las dimensiones principales de la pieza están en planos coordinados girados, el ángulo de salida debe estar referido a la dirección de la carrera de la prensa o martillo, como se observa en la figura 2.7.

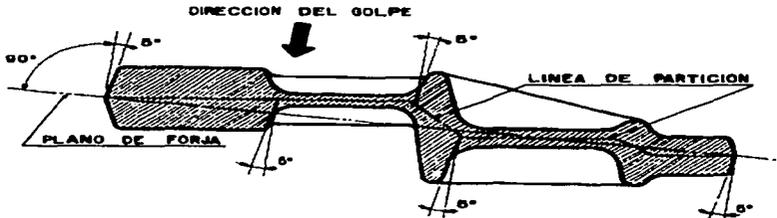


Figura 2.7 Los ángulos de salida deben ser medidos respecto a la perpendicular al plano de forja

Los ángulos de salida no pueden establecerse hasta que el plano de forja sea delimitado. Un método para posicionar el plano de forja con respecto a una línea de partición irregular, se muestra en la figura 2.8.

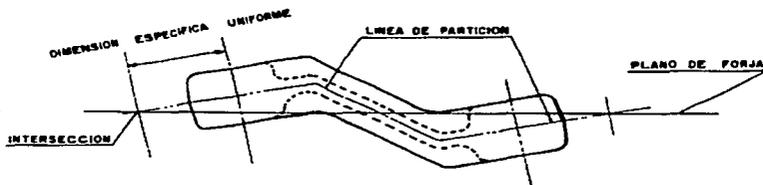


Figura 2.8 Plano de forja recomendado respecto a la línea de partición

Los puntos de intersección se sitúan a 13 mm o menos de los extremos de la pieza.

2.4.2 Ángulo de salida

Las salidas se refieren a la conicidad dada a las paredes interiores y exteriores de una pieza (obtenida en una matriz de forja) para facilitar su extracción de la cavidad del dado. Como ya se mencionó, las salidas están acotadas mediante ángulos referidos a la dirección de la carrera del yunque.

Las salidas no sólo aseguran una buena forja con un mínimo de dificultades de producción, sino que también reducen la fatiga de la matriz. Los ángulos de salida estándar se muestran en la tabla 2.1 en función de la profundidad de la cavidad.

Tabla 2.1 Profundidad máxima de la cavidad del dado en función del ángulo de salida

PROF. mm	ÁNGULO DE SALIDA				
	1°	3°	5°	7°	10°
	CATETO "A"				
0.79	0.0005	0.0016	0.0027	0.0038	0.0055
1.58	0.0011	0.0033	0.0055	0.0077	0.011
2.38	0.0016	0.0049	0.008	0.0115	0.0165
3.17	0.0022	0.0066	0.0109	0.015	0.022
4.76	0.0033	0.0098	0.016	0.023	0.033
6.35	0.0044	0.013	0.022	0.031	0.044
7.93	0.0055	0.016	0.027	0.038	0.055
9.52	0.0065	0.020	0.033	0.046	0.066
11.11	0.0076	0.023	0.038	0.054	0.077
12.70	0.0087	0.026	0.044	0.061	0.088
15.87	0.011	0.033	0.055	0.077	0.110
19.05	0.013	0.039	0.066	0.092	0.132
22.22	0.015	0.046	0.077	0.107	0.154
25.4	0.017	0.052	0.087	0.123	0.176

En la mayoría de los casos, los ángulos de salida menores de 5° impiden el uso de martillos de forja, ya que se requiere la adición de un mecanismo con pernos expulsores para extraer la pieza forjada de la cavidad. La combinación de varios ángulos de salida puede resultar en un mayor costo de la matriz de forja, debido a que en algunas ocasiones la cavidad se maquina con cortadores cónicos y el empleo de un solo ángulo de salida, implica el uso de un solo cortador.

Los nervios, paredes laterales y protuberancias con ángulo de salida constante para diferente profundidad, variarán en el espesor de la base. Si se efectúa un corte imaginario por el fondo de la cavidad, se observaría que las partes más profundas tendrían una pared recta y de espesor constante, sin embargo, conforme se acercara el corte al plano de partición, la base variaría de espesor y estaría curva o irregular, debido al ángulo de salida constante, esto se muestra en la figura 2.9.

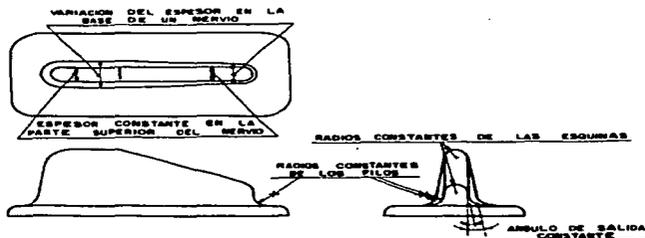


Figura 2.9. Simplificación del diseño mediante ángulos, radios y espesores constantes

Formar un nervio de altura variable con la parte superior e inferior paralelas, requiere la combinación de ángulos de salida con el consecuente incremento en el costo de la matriz. Esto se debe hacer sólo en casos donde sea imperativo.

2.4.3 Bordes o salidas negativas

Esto es posible aunque requiere de cuidadosas consideraciones para su aplicación. Los bordes pueden incrementar ligeramente el costo de operación, ya que la extracción de la pieza puede ser más dilatada.

Una forja con bordes a ambos lados de la línea de partición, como la que se muestra en la figura 2.10, no puede realizarse debido a que el dado requeriría ser separable o partido para remover la pieza y esta separación del dado podría mutilar la forja al vencer la resistencia del ángulo de salida en ambos dados.

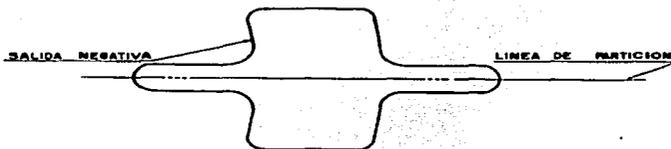


Figura 2.10 Las salidas negativas en los dados superior e inferior impiden su apertura y la extracción de la pieza

Los bordes que deben estar en el dado inferior, sólo se pueden forjar entre los límites mostrados en la figura 2.11 y la pieza debe ser removida en la dirección inclinada a causa del ángulo negativo que no debe ser mayor de 6° .

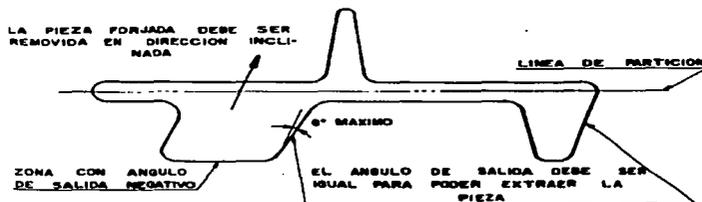


Figura 2.11 Pieza con ángulo de salida excesivo para permitir su extracción a pesar del ángulo negativo

También se pueden forjar piezas con ángulos negativos, inclinando el plano de forja para eliminar dicho ángulo, como se muestra en la figura 2.12.

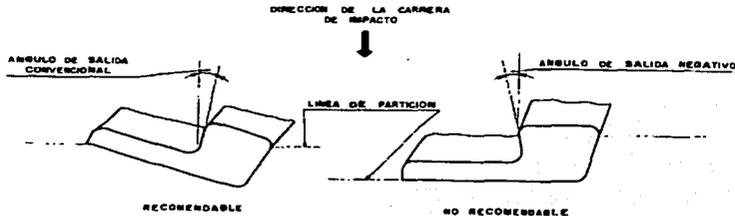


Figura 2.12 *Inclinación del plano de forja para poder formar una zona con ángulo de salida negativo*

2.4.4 Radios en las esquinas

El radio de una esquina se forma por la intersección de dos superficies con un ángulo menor o mayor de 180° . Para establecer las dimensiones de estos radios, se deben tener en cuenta dos factores:

- 1) El radio como un factor de concentración de esfuerzos en el dado
- 2) La presión necesaria para llenar la cavidad del dado.

La forma de un extremo o la esquina de una pieza forjada, requieren la correspondiente cavidad en el dado, debido a que la forja es una pieza en positivo y la cavidad del dado una forma negativa; por lo tanto, el radio de una forja está formada por la correspondiente arista del dado. Cuando estas aristas son excesivamente marcadas (poco radio), la fuerza del metal bajo presión y el esfuerzo que esto causa sobre las esquinas, puede provocar fisuras o roturas de estas esquinas después de que tan sólo unas cuantas piezas hayan sido forjadas.

Este efecto adverso sobre el dado se incrementa, debido a las grandes presiones requeridas para llenar y formar esquinas agudas, lo que disminuye la vida del dado y vuelve al proceso antieconómico.

Los radios mínimos en las esquinas, limitan el uso de nervios muy altos y delgados. Conforme a la grafica mostrada en la figura 2.13 (elaborada para aleaciones de aluminio) que proporciona el radio de una esquina en función de la altura de la forja a partir del plano de partición, se tiene que hacer lo siguiente:

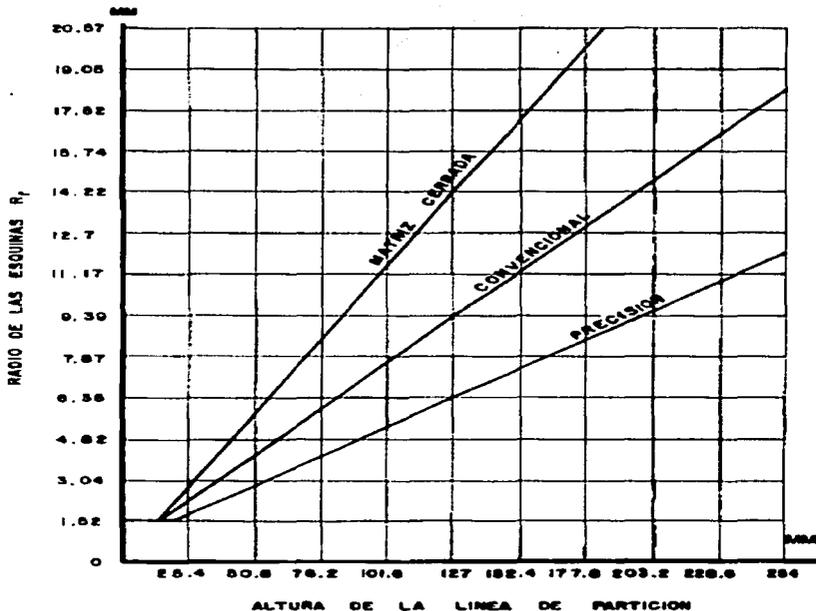


Figura 2.13 Dimensiones de los radios recomendados para las esquinas

Formado con un radio en el extremo y salidas estándar, un nervio no debe ser más delgado que el doble del radio. Un nervio grueso o caja, debe tener un extremo plano con dos radios en las esquinas, cada uno igual al radio recomendado; sin embargo, es mejor usar un solo radio, igual a la mitad del espesor del nervio, estos dos casos se ilustran en la figura 2.14.

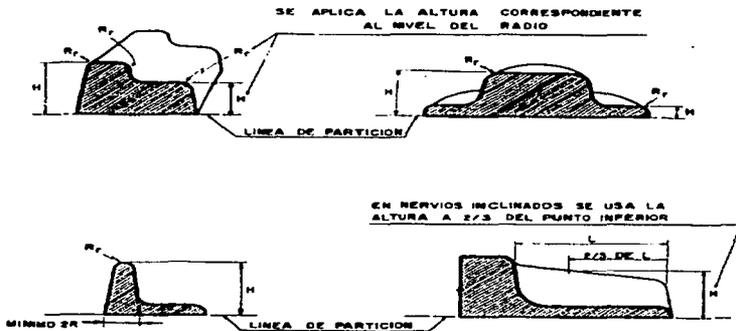


Figura 2.14 El radio de las esquinas es función de la altura de partición

Se deben buscar radios máximos, pero cuidando de mantener los costos de forja al mínimo.

La cuidadosa utilización de radios constantes en las esquinas, permite el empleo de herramientas con la misma concididad, lo que puede redundar en ahorros, en la figura 2.15 se muestra una pieza con radios constantes.

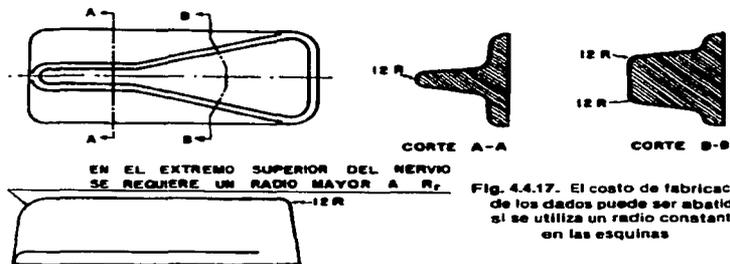


Fig. 4.4.17. El costo de fabricación de los dados puede ser abatido si se utiliza un radio constante en las esquinas

Figura 2.15 El costo de fabricación de los dados puede ser abatido si se utiliza un radio constante en las esquinas

En los extremos de los nervios, es mejor utilizar un radio mayor que el indicado en la figura 2.13. El radio R_x que se muestra en la figura 2.16:

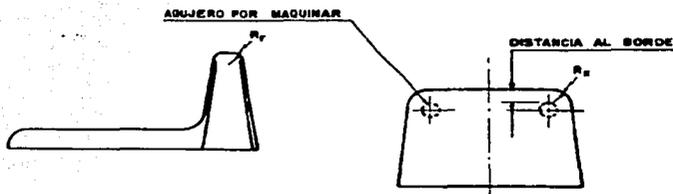


Figura 2.16 El radio R_x en las esquinas debe ser tan grande como sea posible para mejorar la forjabilidad

puede dimensionarse de acuerdo a lo siguiente:

- Igual a la distancia entre el agujero y el extremo de la pieza, más el radio del agujero.
- Tres veces al radio R_r .
- Tan grande como sea posible.

Mientras que se recomienda que R_x sea tan grande como sea posible, el tamaño del radio en la vista superior también es importante. Lo mejor es un radio completo que facilite el maquinado del dado, como el recomendado en la figura 2.17.



Figura 2.17 En los extremos de un nervio se recomienda un redondeamiento completo

Si el arco de circunferencia no es de un solo radio (R_z en la figura) el maquinado es más complicado.

Las aristas y bordes que están redondeados con un arco de circunferencia completo, como el nervio con extremo redondeado que se ve en la figura 2.18, reducen los problemas de fractura en las esquinas.

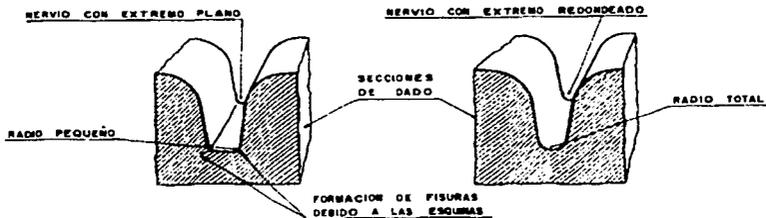


Figura 2.18 Redondeamiento de nervios para alargar la vida de los dados y facilitar el flujo de metal

La parte superior o el extremo de un nervio, se debe redondear con un radio mínimo, dependiendo de la altura con respecto al plano de partición. La vida útil del dado se reduce cuando se forjan nervios delgados o profundos.

La fuerza requerida para llenar la cavidad de un nervio profundo, particularmente cuando está adyacente a una sección (alma) muy delgada, desarrolla severos esfuerzos en el dado.

Por lo tanto, los nervios cercanos a almas delgadas, deben ser tan cortos como lo permita el diseño. Los filos que se forman en la intersección de dos superficies, deben permitir al material en forja, fluir libremente para seguir el contorno del dado con facilidad. Los filos con radios pequeños pueden causar vacíos momentáneos durante los cambios de dirección del metal al fluir. Estos huecos son subsecuentemente llenados, pero la interrupción del flujo ocasiona una fisura o grieta que debilita la pieza, lo anterior se muestra gráficamente en la figura 2.19.

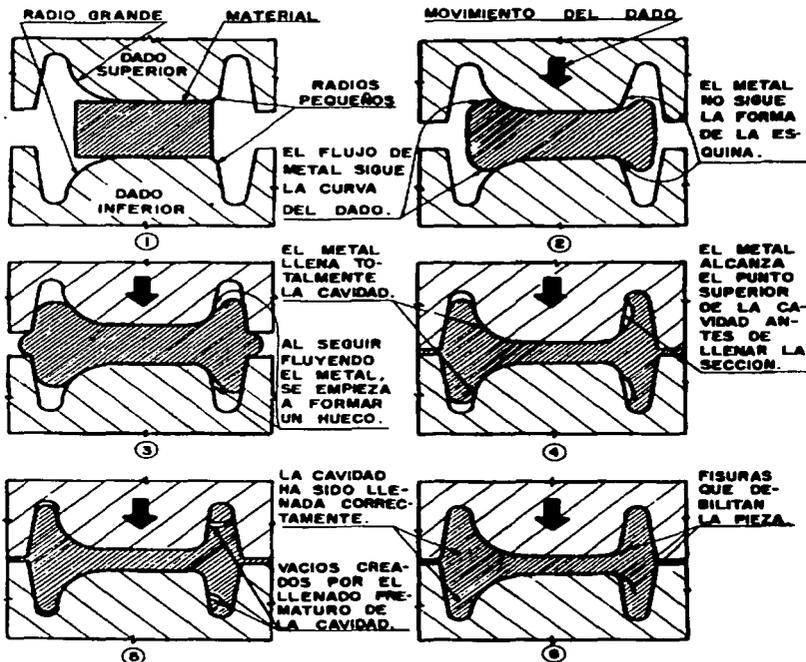


Figura 2.19 Pasos progresivos de la forja de una pieza para mostrar el efecto de los radios en los filos mal dimensionados

La figura 2.20, muestra los radios en los filos para forjas de aluminio en los procesos de forja en bloque convencional y de precisión.

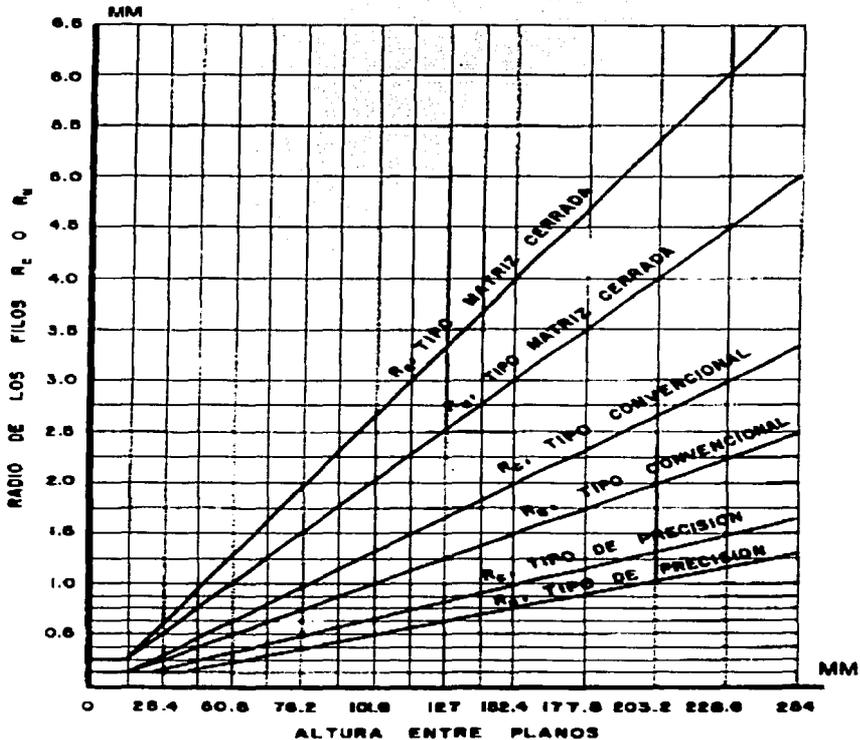


Figura 2.20 Dimensiones de los radios recomendados en los fillos de los dados o en las esquinas del producto

Y en la figura 2.21, se muestra la aplicación de los radios indicados.

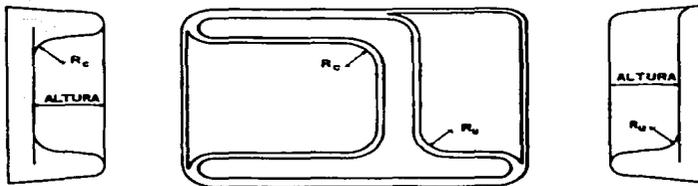


Figura 2.21 El radio de las esquinas es determinado por la altura entre dos superficies

Si el metal debe llenar nervios en la periferia, se deben indicar radios en el alma de la pieza por lo menos iguales a R_c (Figura 2.20); si el alma es muy ancha, este radio se debe hacer un poco mayor. Cuando los nervios opuestos no confinen el flujo de metal hacia el canal de salida para obtener forjas correctas, se deben emplear los valores de R_u indicados en la figura 2.20 y cuya aplicación se muestran en la figura 2.21.

La magnitud de los radios en los filos, está en función de la altura de la superficie donde se encuentra el filo y el nivel de la superficie de referencia más cercana. La combinación de radios en los filos incrementa el costo de los dados, sin embargo, cuando es necesario combinar diferentes radios, esto se debe hacer en las intersecciones de las esquinas que aparecen en las vistas ortogonales, según muestra la figura 2.22.

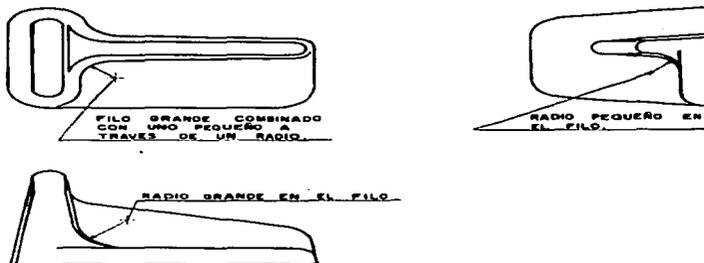


Figura 2.22 Los radios de los filos pueden ser combinados en las intersecciones que se muestran en las proyecciones ortogonales

Un filo inadecuado en la base de un nervio, ocasiona que el metal fluya hacia el canal de salida en lugar de fluir hacia el nervio. El resultado es una discontinuidad en la estructura del grano.

2.4.5 Alma de las piezas forjadas.

Las dimensiones del alma de una pieza dependen del tamaño de la parte expresada en función del área del plano de partición y de un espesor o ancho promedio, como el que se ve en la figura 2.23.

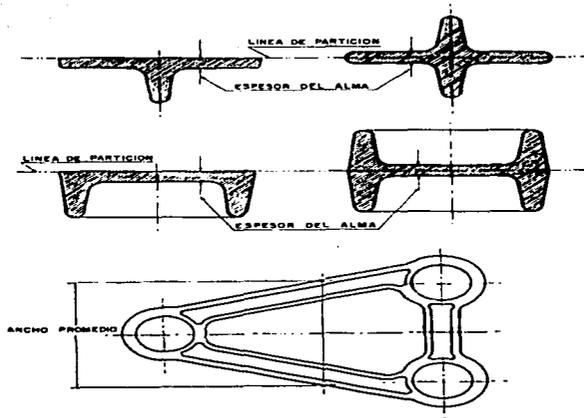


Figura 2.23 El espesor mínimo del alma es determinado por la proyección total del área (excluyendo áreas perforadas) o el ancho promedio de la pieza

Las cavidades de alivio para los agujeros, no deben ser incluidas en el área del plano de partición cuando se vaya a determinar el espesor mínimo del alma.

La tabla 2.2, muestra espesores del alma aplicables a las forjas de precisión y convencional para piezas de aleaciones de aluminio.

Tabla 2.2 Dimensiones recomendadas para el espesor mínimo del alma

Para forja de precisión o convencional

ANCHO PROMEDIO EN mm	AREA INTERNA m ²	ESPESOR DEL ALMA EN mm
76	0.00645	2.28
101.6	0.0193	3.048
152.4	0.0387	4.064
203.2	0.0645	4.826
279.4	0.129	6.35
355.6	0.226	7.87
452.2	0.355	9.398
558.8	0.548	11.17
660.4	0.774	12.7
863.6	1.29	15.74
1041.4	1.93	19.05
1193.8	2.58	31.75
1320.8	3.22	50.8

Para la forja en bloque, el espesor del alma es considerablemente mayor que los valores de esta tabla y por ningún motivo debe ser menor a 1.5 veces estos valores; lo anterior se debe a las tolerancias más holgadas que requiere la forja en bloque y a las tolerancias de acabado.

Cuando las almas son delgadas, es difícil mantener tolerancias cerradas, ya que se enfrían y contraen más rápido que otras zonas más gruesas de la pieza, además, las secciones delgadas tienden a deformarse durante el tratamiento térmico postforja, aplicado para relevar esfuerzos.

Las almas y los nervios delgados tienden a causar grietas en los dados y secciones vacías, debido a la tendencia del flujo del metal que trata de seguir las trayectorias de menor resistencia.

La forja de almas delgadas también puede causar deflexiones temporales en los dados, resultando en un alma más gruesa en la parte media que en los extremos de la pieza; cuando las secciones son sumamente delgadas, esta deflexión en el dado puede ser permanente.

Esta dificultad para forjar secciones delgadas puede ser disminuida mediante cavidades de alivio (que también pueden servir como protuberancias para agujeros), como las que se ven en la figura 2.24 o mediante estrechamientos recomendables para almas confinadas de amplia extensión y encerradas por nervios altos.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

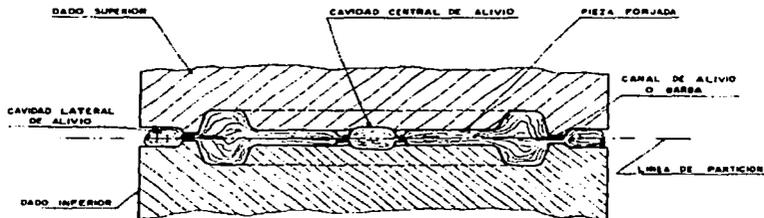


Figura 2.24 Las cavidades de alivio disminuyen la dificultad para forjar secciones delgadas

Las cavidades de alivio son la alternativa más deseable, debido a que reducen el área proyectada del plano de partición y la presión requerida para la forja; la localización más favorable de las cavidades de alivio es en el centro del área donde la resistencia al flujo del metal es mayor.

La incorporación de barbas y cavidades de alivio en estos puntos interiores de los dados provee un medio eficiente de escape para el excedente de metal.

Es de más ayuda y económico la localización de pocas y grandes cavidades de alivio (protuberancias para agujeros) que de muchos y pequeños agujeros con la misma área total; los pequeños agujeros no mejoran la forjabilidad.

Para llenar la cavidad de alivio, el material debe introducirse en el dado de forja con un barreno premaquinado para permitir que el material fluya hacia ese hueco, formando la protuberancia al llenar la cavidad del dado.

Las protuberancias de forma redonda para los agujeros, son preferidas por la facilidad de recorte. Las protuberancias para agujero, también son utilizadas por razones funcionales, tales como aligerar el peso de la pieza, proveer claros o minimizar maquinados subsecuentes.

Cuando se requiere una gran resistencia, las protuberancias se pueden reforzar con un borde. Este borde no es benéfico para la operación de forja y deberá ser generosamente combinado con un radio amplio o un estrechamiento adecuado en el alma, esto es necesario para evitar la formación de un hueco o vacío causado al entrar el metal con mayor facilidad en la protuberancia que en el borde.

2.4.6 Cavidades de la pieza.

Las cavidades se utilizan para obtener una dirección de grano adecuada y, con mayor frecuencia, para obtener mejores propiedades mecánicas al reducir el espesor de la sección. Las cavidades en la pieza forjada, se forman con las correspondientes secciones resaltadas o "machos" en los dados.

Es recomendable para alargar la vida de los dados y aumentar la rentabilidad del proceso, minimizar la profundidad de estas cavidades. También es adecuado utilizar radios generosos en los contornos y filos de las esquinas, como se ve en la figura 2.25, así como evitar las formas que obstruyen el flujo de metal.

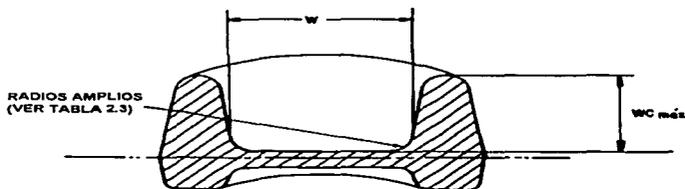


Figura 2.25 Las cavidades deben ser poco profundas y redondeadas en lo posible

Para las piezas con forma de recipiente cóncavo, no se recomienda que el espesor de la pared exceda el espesor del alma o base de la pieza; si la pieza terminada requiere de un alma delgada, puede maquinarse después de la forja, debiéndose seguir los parámetros de diseño indicados en la figura 2.26.

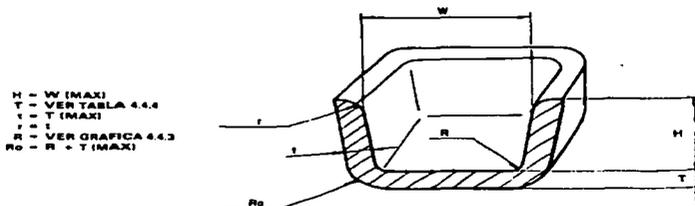


Figura 2.26 Las piezas forjadas deberán seguir las recomendaciones de diseño

Cuando alguna pieza forjada sea sometida a un proceso subsecuente de acuíñación para obtener tolerancias cerradas o marcar algún logotipo, se recomienda, para facilitar la acuíñación, la formación de cavidades en la pieza, como las mostradas en la figura 2.27.

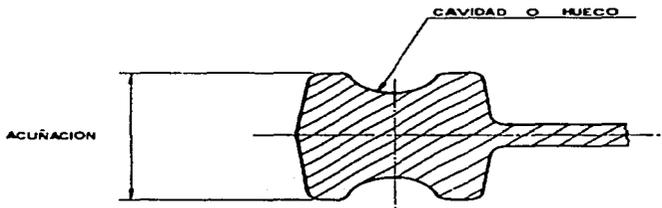


Figura 2.27 La cavidad reduce el área proyectada y la presión requerida debido a que solo las dos caras planas son proyectadas

2.4.7 Forjas dobles

Esto es recomendable cuando se requiere hacer más rentable el proceso. Cuando una forma forjada imponga un empuje lateral severo sobre los dados y aumente los problemas de manufactura, una forja doble puede ayudar a balancear las fuerzas laterales. En la figura 2.28 se muestran varios ejemplos de forjas dobles.

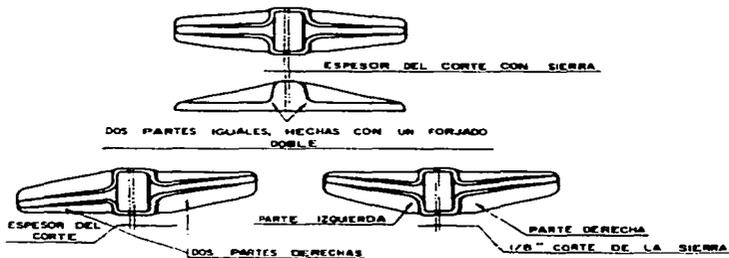


Figura 2.28 El forjado doble puede ser más económico cuando la pieza es simétrica, las dos partes derechas o una parte derecha y otra izquierda

Dependiendo del diseño, puede ser más económico forjar dos piezas simétricas o una parte derecha y otra izquierda; esto último debe ser cuidadosamente analizado, sobre todo si la cantidad que se deba producir de ambas no es igual.

Otra solución consiste en diseñar la pieza simétricamente, como se aprecia en la figura 2.29, para la forja y después maquinarse el material sobrante. Este método elimina en ocasiones la necesidad de un segundo juego de dados.



Figura 2.29 Una forja simétrica puede ser económica, especialmente si después de maquinada la parte opuesta, la pieza resulta ser casi simétrica

Este diseño sólo debe aplicarse si el costo total de los dados, forjas y maquinado del material sobrante, producen un ahorro contra la forja individual de las piezas izquierda y derecha. El tamaño de los lotes de producción influye notablemente en esta evaluación.

2.4.8 Piezas correctamente proporcionadas

Una pieza forjada correctamente proporcionada, tiene gran influencia con su exactitud dimensional. La contracción, deformación y otros problemas, se pueden anticipar y minimizar sus efectos con las apropiadas precauciones de diseño.

La contracción de una pieza forjada ocurre cuando ésta se enfría, desde la temperatura de forja hasta la del medio ambiente. Esta contracción también es función del coeficiente de expansión térmica de la aleación que se esté forjando.

Para evitar contracciones y deformaciones excesivas, el diseñador debe proyectar piezas proporcionadas y con curvas amplias; la figura 2.30, muestra una pieza mal diseñada que causará problemas de operación y presentará contracciones y deformaciones severas que la debilitarán.

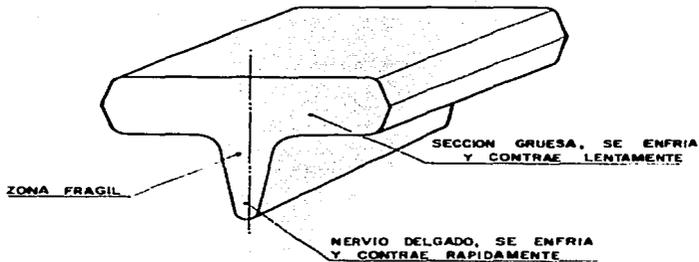


Figura 2.30 Las combinaciones de secciones gruesas y delgadas son la principal causa de distorsión durante el tratamiento térmico

2.5 FUNDAMENTOS DE DISEÑO SOBRE DADOS DE FORJA

La forja de un metal se produce al darle forma en caliente entre dos dados que se cierran con una fuerza compresiva. La figura 2.31, muestra la mitad de un dado de forja de cuatro pasos o estaciones. la primera estación (de doblado) preforma o forja los dobleces básicos de la pieza; en la segunda y tercera estaciones se proporciona a la pieza su forma definitiva; en la cuarta estación, se muestra el desbarbado de la pieza(recorte de excedente de material que en ocasiones se realiza en un dado independiente).

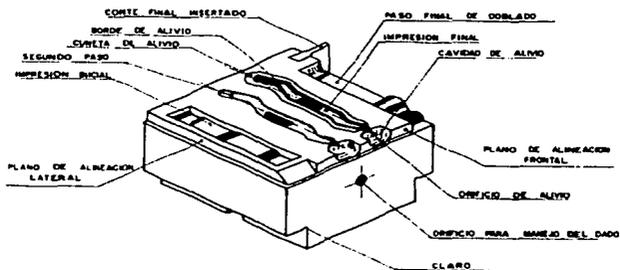


Figura 2.31 Elementos de un dado de forja

Las matrices de forja también son conocidas como dados de impresión, ya que sus cavidades son impresiones de la pieza. En forjas muy sencillas, puede ser posible prescindir de la impresión preliminar y directamente darle a la pieza su forma definitiva. La figura 2.31, muestra algunas características importantes de los dados o herramientas de forja que se mencionan a continuación.

2.5.1 Cavidad de alivio

Su función es alojar la mayor parte del material sobrante, para evitar esfuerzos excesivos en el dado; el metal sobrante (barba) fluye hacia las cavidades a través del borde o canal de alivio.

2.5.2 Borde de alivio

Rodea perimetralmente a la pieza en el plano de partición, su función es permitir el escape de material excedente hacia la cuneta o cavidad de alivio, una vez que el material ha fluido por la cavidad de los dados; su espesor debe ser reducido para permitir su fácil eliminación mediante desbarbado o maquinado. El desbarbado puede ser en frío o en caliente. Las forjas pequeñas de acero con bajo a medio contenido de carbono, pueden ser desbarbadas en frío, las forjas de tamaño medio y grande de cualquier metal, deben ser desbarbadas en caliente.

2.5.3 Cuneta de alivio

Unida al borde de alivio, su función es alojar una película o barba de material para poder asegurar que la cavidad del dado será completamente llenada. La tabla 2.3 proporciona tolerancias para el tamaño del sobrante de material después del desbarbado, medido desde el cuerpo de la forja.

Tabla 2.3 Tolerancias para el tamaño en el sobrante del material

PESO (kg)	LONG. TOTAL (mm)	FORJA CONVENCIONAL Y DE PRECISION (mm)	FORJA EN BLOQUE (mm)
0.227	127	0.381	-
2.27	381	0.762	3.048
11.34	762	1.524	4.572
22.67	1.524	3.048	6.350
45.35	3.048	3.048	12.7
45.35	3.048	6.35	12.7

Nota: Usar la tolerancia mayor cuando el peso y la longitud total no se encuentren en el mismo renglón.

(a) Estas tolerancias se aplican para matrices recortadoras y además deben emplearse para sierras. Todas las tolerancias mostradas se aplican para sierras.

El tamaño del sobrante debe variar desde cero hasta el valor proporcionado en la tabla mencionada, en función del peso y de la longitud mayor de la pieza. Cuando el peso y la longitud no coinciden en el mismo renglón, se debe usar el valor mayor.

2.5.4 Planos o Bordes de alineación

Debido al calentamiento de los dados por el contacto con el metal, por la fricción causada por éste al fluir y por los impactos, no es posible utilizar columnas y bujes guía, ya que debido a su mínima tolerancia de deslizamiento al expandirse por el calor se trabarían; por esta razón, se pueden utilizar bordes de alineación o columnas guía laterales que pueden ayudar a compensar el empuje lateral cuando se presente.

Para dados con ángulos de salida pequeños en la cavidad (3° o menos), se pueden utilizar pernos botadores que facilitan la extracción de piezas pesadas o simplemente para agilizar la producción, la figura 2.32 muestra la disposición de un perno botador.

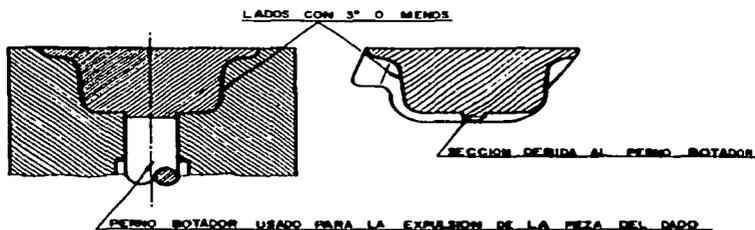


Figura 2.32 Pernos botadores o expulsores son requeridos en un forjado profundo o cuando el ángulo de salida es de 3° o menos

Para asegurar el llenado en forjas con cavidad profunda, se pueden disponer de orificios para la salida de aire, como se ve en la figura 2.33, con un diámetro de 0.5 mm.

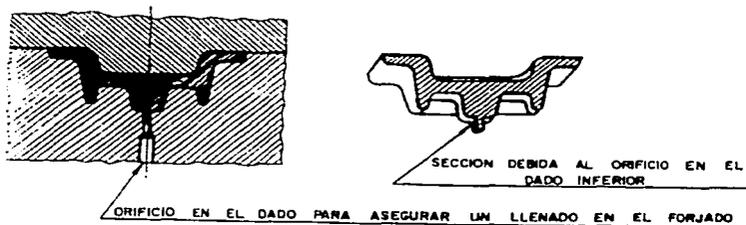


Figura 2.33 Los orificios en los dados permiten el escape del aire o lubricante y de esta manera asegura el llenado en el forjado en un solo golpe

La saliente que se forma al penetrar el metal en el orificio, debe removerse por maquinado. Los orificios se deben situar en las cavidades más profundas.

2.5.5 Empuje lateral

Debido a la holgura ya mencionada que requieren las guías de los dados, puede haber problemas de alineación entre éstos, especialmente cuando se provoca un empuje lateral por una línea de partición irregular.

El empuje lateral se incrementa conforme la línea de partición se inclina con respecto al plano de forja; este último es perpendicular a la dirección de la línea de fuerza de la máquina.

La figura 2.34a, muestra el problema creado por la inclinación de la línea de partición, a pesar de que esto coincide con la práctica recomendada de seguir el centro del alma.

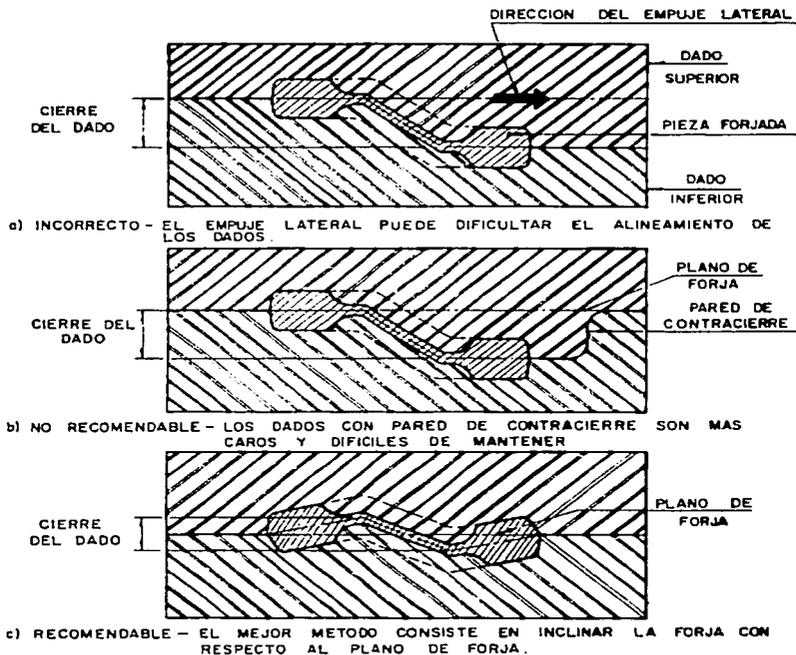


Figura 2.34 *El empuje lateral puede ser eliminado posicionando correctamente la pieza*

Como se muestra en b de la misma figura una solución puede consistir en disponer una pared de contrachierre, aunque esto es caro y crea problemas de operación.

La solución más correcta se muestra en c, donde la parte se ha inclinado con respecto al plano de forja, lo que anula el empuje.

2.5.6 Ángulos de salida constantes

La combinación de varios ángulos de salida, incrementa el costo de los dados. Debido a que algunas veces las cavidades de los dados son fresadas con cortadores cónicos, como los que se ven en la figura 2.35, y éstos tienen un ángulo constante, se pueden lograr considerables ahorros indicando un solo ángulo de salida, ya que esto implica el uso de un solo cortador.

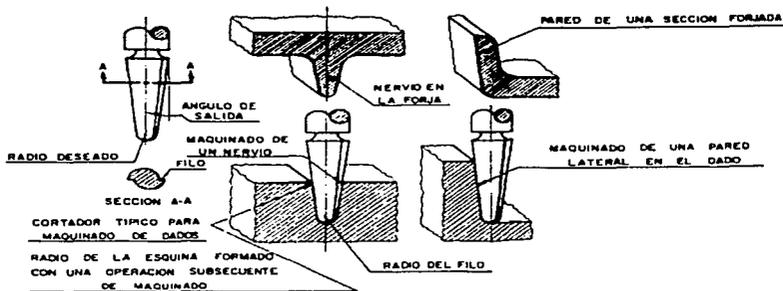


Figura 2.35 Las superficies de los dados con salidas, son maquinadas o erosionadas con herramientas cónicas

2.6 TOLERANCIAS EN LOS DADOS O MATRICES DE FORJA

Las tolerancias que se presentan a continuación, son de aplicación general. La tolerancia de cierre de los dados está relacionada con el espesor a lo largo y perpendicular a la línea de partición. Esta tolerancia de cierre, normalmente debe incluir los límites iniciales de compresión de la herramienta, la vida o material de la cavidad que será necesario pulir para mantener tersa y en buenas condiciones la superficie de la herramienta en producción, y la tolerancia debida a la deflexión del dado que crea un engrosamiento con almas delgadas.

Por lo tanto, se deben adicionar al espesor del dado y de la cavidad, dimensiones perpendiculares a la línea de partición, según se recomienda a continuación:

- A. Tolerancias de cierre para ambas mitades o dados.
 A todos los espesores, ya sea que la cavidad esté contenida en una o en las dos mitades de la matriz.
 A las dimensiones centrales a través de la línea de partición o desde el centro de la línea de partición, cuando la impresión esté en una sola mitad.
- B. Tolerancias de cierre para una sola mitad, más una tolerancia de simetría ± 0.4 mm.
 A las dimensiones desde la superficie a la línea de partición, cuando la impresión esté en ambos lados.
 A todas las dimensiones centrales a la línea de partición cuando la impresión esté en ambos dados.

La tabla 2.4 muestra la tolerancia de cierre recomendada. En la tabla, la tolerancia aplicable está determinada por el peso o por el área del plano de forja. Se debe emplear la tolerancia mayor cuando el peso y el área no coinciden en la misma línea.

Tabla 2.4 Tolerancias de cierre recomendadas

PESO EN kg	ÁREA EN m ²	FORJA EN PRECISION mm	FORJA CONVENCIONAL mm	FORJA EN BLOQUE mm
0 - 0.226	0.006	+0.5 - 0.25	+0.5 - 0.25	+0.78 - 0.4
0.226 - 0.453	0.019	+0.5 - 0.25	+0.78 - 0.4	+1.2 - 0.78
0.453 - 2.26	0.064	+0.78 - 0.25	+1.2 - 0.4	+1.6 - 0.78
2.2 - 9	0.25	+1.2 - 0.4	+1.6 - 0.78	+2.3 - 1.6
9 - 25	0.48	+1.6 - 0.4	+2.3 - 0.78	+3.2 - 1.6
25 - 50	0.64	+2.3 - 0.4	+3.2 - 0.78	+4.7 - 1.6
50 - 100	1.29	+3.2 - 0.4	+4.7 - 0.78	+6.3 - 1.6
100 - 250	2.25		+6.3 - 0.78	+9.5 - 1.6
250 en adelante	3.22			+12.7 - 1.6

El desgaste del molde es resultado básicamente del pulido que se efectúa para mantener tersa la superficie de los dados. La tolerancia de alineación es la máxima variación de desplazamiento lateral entre los dos dados que componen una matriz de forja. En la figura 2.37 se muestra el resultado del desalineamiento entre dos dados de forja.

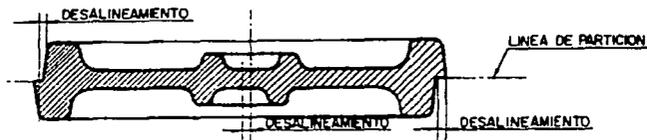


Figura 2.37 Un desplazamiento entre los dados da como resultado un desalineamiento en el forjado

La tabla 2.6, indica las tolerancias aceptables de desalineamiento para piezas forjadas de aluminio, en función del peso y de su longitud total.

Tabla 2.6 Tolerancias de desalineamiento

PESO EN kg	LONGITUD TOTAL EN mm	FORJA DE PRECISION [mm]	CONVENCIONAL Y EN BLOQUE [mm]
0 - 0.5	254	0.254	0.381
0.5 - 2.5	432	0.381	0.508
2.5 - 10	635	0.508	0.762
10 - 25	1,270	0.762	1.14
25 - 50	1,905	1.14	1.5
50 - 100	2,524	1.5	2.0
100 - 250	3,810		2.5
arriba de 250	6,350		3.0

Nota: Usar la tolerancia mayor cuando el peso y la longitud total no coincidan en el mismo renglón.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

CAPITULO 3

EJEMPLO

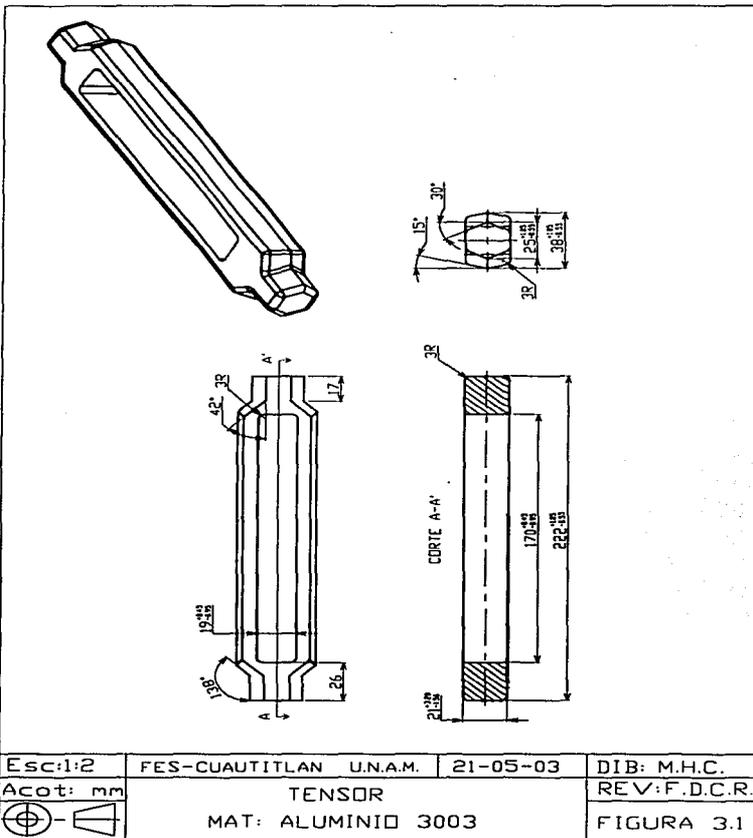
3.1 Definición del problema

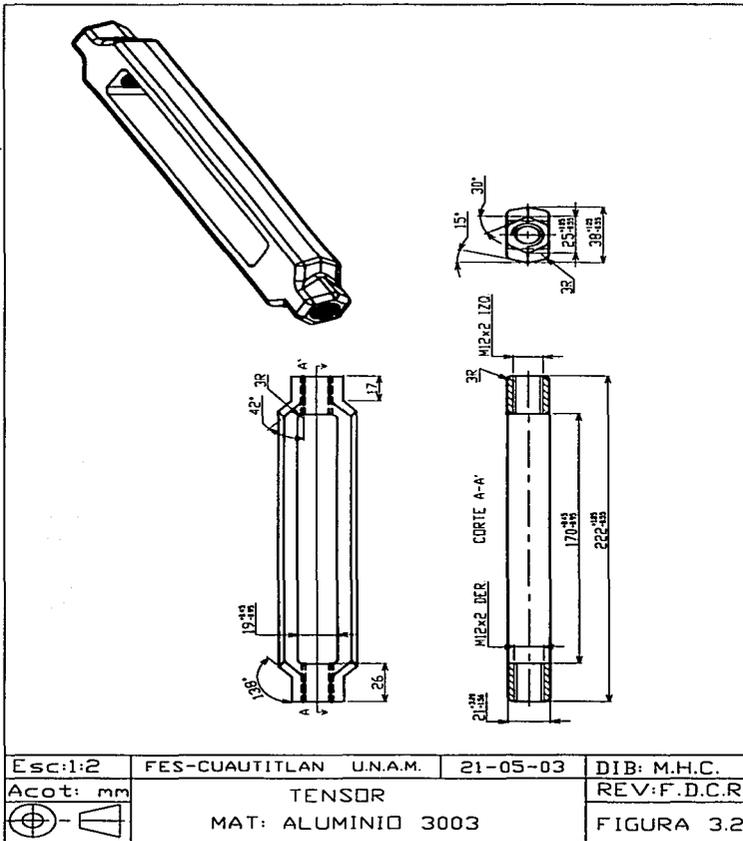
Se desea diseñar una dado de forja que permita producir una pieza como la que se muestra en la figura 3.1. Esta pieza tiene que quedar prácticamente en las dimensiones requeridas y para ello se utilizara el método de forja convencional, que es el que se usa para productos ligeros y de tolerancias mas cerradas, por lo que no será necesario el maquinado de la pieza a excepción de las roscas que van en los extremos de la misma, para que la pieza finalmente quede como se ve en la figura 3.2.

Para diseñar el dado de forja se tienen que hacer antes los cálculos para determinar la fuerza requerida de forjado y establecer la capacidad de la prensa. Después de que se calculo la capacidad de la prensa se procede a seleccionarla de entre los diferentes proveedores con una capacidad mayor a la requerida para no forzar a la maquina durante el proceso. Una vez que se selecciono se observan las medidas de la mesa y las distancias máximas y mínimas entre el ariete y la mesa, y con esto ya se pueden diseñar las dimensiones del área del dado de forja y su espesor.

Además de calcular la capacidad de la prensa, también se tienen que calcular los parámetros de diseño tales como los radios en las esquinas, el espesor del alma y las tolerancias dimensionales y de cierre, y para ello se tienen que seguir las recomendaciones indicadas en capitulo 2. Para poder calcular los parámetros de diseño se tienen que calcular datos como el área total proyectada, el área del plano de forja, el peso y volumen de la pieza, etc, y entonces se pueden usar las tablas del capitulo 2 que proporcionan los parámetros en función de esos datos.

El proceso de diseño del dado comienza con hacer el dibujo de la pieza que se va a forjar, que es la que se muestra en la figura 3.1. Después se identifican cuales son los parámetros de diseño que aplican a la pieza tales como los radios de las esquinas y el espesor del alma, así como también se identifica en que dimensiones se colocan las tolerancias de cierre y las dimensionales. Finalmente estos mismos parámetros identificados y calculados para la pieza de trabajo se aplican también para el dado de forja.





3.2 Cálculo de presiones y fuerzas de las matrices

No hay un método sencillo y a la vez satisfactorio para calcular las presiones y las fuerzas de las matrices de impresión, en parte, porque la velocidad de deformación varía mucho en las distintas partes de la pieza de trabajo. Se puede obtener un estimado muy aproximado por analogía con el forjado de formas simples, al dividir la forja en partes (cilindros, planchas, etc.) que se puedan analizar por separado. Alternativamente toda la forja se considera como una forma simplificada.

Paso 1: Se calcula la área total proyectada de la pieza, incluyendo el campo de la rebaba. La área total proyectada de la pieza de trabajo es la que se muestra en la figura 3.3.

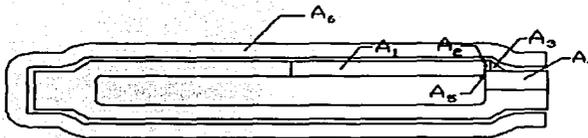


Figura 3.3 Área total proyectada

Área total proyectada

$$A_{TP} = 4(A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5) + A_6$$

$$A_{TP} = 4[(85)(9.5) + (6.5)(1.78) + (6.5)(7.22) + (26)(12.5) + (3)^2(1-1/4\pi)] + (501.44)(9)$$

$$A_{TP} = 4(1192) + 4513 = 9281 \text{ mm}^2$$

Paso 2: La presión promedio de la matriz se establece multiplicando la resistencia a la fluencia por un factor Q_c que tiene en cuenta la complejidad de la forma. El valor para Q_c se extrae de la tabla 3.1 y la resistencia a la fluencia de la tabla 3.2.

Tabla 3.1 Factores de multiplicación para estimar las fuerzas Q_c y los requisitos de energía Q_f en el forjado en matriz cerrada

Forma forjada	Q_c	Q_f
Sencilla, sin rebaba	3-5	2.0-2.5
Con rebaba	5-8	3
Compleja (costillas altas, almas delgadas), con rebaba	8-12	4

Tabla 3.2 Propiedades mecánicas típicas de la aleación de aluminio 3003 a varias temperaturas

Temperatura		Resistencia a la tensión		Resistencia a la fluencia		Elongación
$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{F}$	MPa	ksi	Mpa	ksi	%
-200	-328	230	33	60	8.6	46
-100	-148	150	22	52	7.5	43
-30	-22	115	17	45	6.5	41
25	77	100	16	41	6	40
100	212	90	13	38	5.5	43
200	392	60	8.6	30	4.3	60
300	572	29	4.2	17	2.5	70
400	752	18	2.6	12	1.7	75

Presión promedio de la matriz

De la tabla 3.1 se obtiene el valor mínimo de Q_c igual a 5 para una pieza sencilla con rebaba forjada en matriz de impresión y de la tabla 3.2 el esfuerzo de fluencia igual a 12 MPa a la temperatura de forja de 400 $^{\circ}\text{C}$.

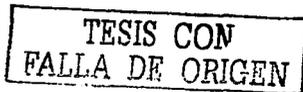
$$P = \sigma_f Q_c = (12 \times 10^6 \text{ N/m}^2)(5) = 60 \times 10^6 \text{ N/m}^2$$

$$P = 60 \text{ Mpa}$$

Paso 3: El requerimiento de energía que se necesita es

$$E = \sigma_f Q_c V_{prom} = (12 \times 10^6 \text{ N/m}^2)(3)(0.000092 \text{ m}^3)$$

$$E = 3312 \text{ N}\cdot\text{m} = 3.31 \text{ kJ}$$



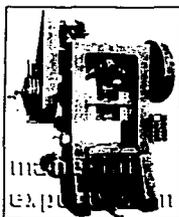
El volumen promedio se calculo con ayuda del programa Mechanical Desktop 4, que proporciona las propiedades de masa y volumen de una pieza.

Paso 4: La fuerza de forjado que se requiere es

$$P = \sigma_f Q_c A_{TP} = (12 \times 10^6 \text{ N/m}^2)(5)(0.009281 \text{ m}^2)$$

$$P = 111.37 \times 10^3 \text{ N} = 0.111 \text{ MN} = 11.36 \text{ Ton}$$

Ya que se calculo la fuerza requerida de forjado se puede seleccionar una prensa que cumpla con la capacidad demandada para poder producir la pieza. La prensa que cumple con la capacidad para realizar el proceso es como la que se muestra en la figura 3.4, se trata de una prensa mecánica de tipo embrague neumático modelo PLP-25 y tiene las especificaciones que se muestran en la tabla 3.3.



- Piezas fabricadas en acero con laterales
- Disponible en punto simple y punto doble - tipo con engranajes o de engranajes
- Disponible con embrague tipo flange rotatorio (estándar) o embrague neumático (opcional). La foto muestra la máquina con el embrague neumático (opcional)
- Estructura de la prensa de perfil "H" asegura gran robustez y estabilidad en forma y posición para mejorar vida de los herramientas
- Prensa de punto pasado, con alfileres de acero de tamaño para asegurar dimensión mínima
- Carga variable, ajustable en minutos

Figura 3.4 Prensa seleccionada

Tabla 3.3 Especificaciones de la prensa

Especificaciones:	25	80	75	900	150	300	280	300
Capacidad (toneladas)	25	80	75	900	150	300	280	300
Área de Trabajo - Trabaja a Doble o Frente a Doble (mm)	425 x 400	475 x 800	550 x 875	625 x 875	675 x 725	800 x 900	900 x 930	1000 x 1000
Cámara Ajustable (mm)	58	78	87	100	128	180	180	180
Cámaras Ajustable (mm)	25	25	32	32	32	80	80	80
Puntos a Punto (mm)	278	325	380	428	478	600	628	680
Abertura en Banda (mm)	150	175	187	210	250	278	300	300
Diámetro de agujero en punta de Pistón (mm)	38	31	37	43	60	88	78	78
Cargas por minuto:	60	60	40	30	30	30	27	22
Economía de bandas en %:	8	8	8	8	8	8	8	8
Número de bandas en %:	2	3	3	4	4	6	6	6
Motor Principal (HP)	2	3	6	7.5	10	15	20	25

3.3 Cálculo de los parámetros de diseño

3.3.1 Radio en las esquinas

Para establecer las dimensiones de estos radios, se deben tener en cuenta dos factores:

- 1) El radio como un factor de concentración de esfuerzos en el dado
- 2) La presión necesaria para llenar la cavidad del dado.

La fuerza necesaria para llenar la cavidad del dado es aproximadamente de 11 toneladas que es una fuerza relativamente pequeña, por lo que no se necesitan radios en las esquinas mucho mas amplios que los mínimos recomendados. Los radios existentes en la pieza de trabajo son los que se observan en la figura 3.5.

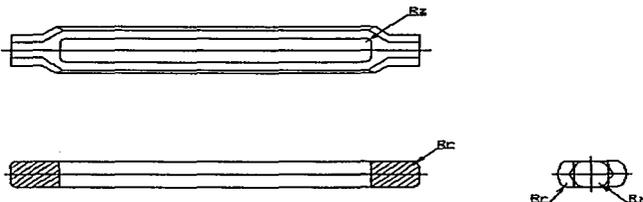


Figura 3.5 Radios en las esquinas de la pieza

Por analogía con las figuras 2.16 y 2.17 del capítulo dos se identificaron los radios R_r , R_x y R_z que se dimensionan mediante los siguientes criterios:

- El radio R_r se determina conforme a la grafica mostrada en la figura 2.13 que proporciona el radio de una esquina en función de la altura de la forja a partir del plano de partición. En la pieza de trabajo la altura de la forja es de 10.5 mm como se puede observar en los dibujos de la pieza, por lo que el radio de la esquina es de aproximadamente 1 mm.

- El radio R_x se puede dimensionar como 3 veces el radio R_r como se indicó en el capítulo 2, por lo que el radio R_x sería de 3 mm.
- Para dimensionar el radio R_z se recomienda un radio completo que facilite el maquinado del dado, sin embargo el diseño de la pieza puede cambiar demasiado del que se deseaba originalmente por lo que mejor se toma la dimensión que se va usar para el radio R_x de 3 mm.

Para permitir el uso de un solo cortador y de esta manera disminuir el costo de los dados, el radio R_r también se iguala a R_x , y de esta manera se cumple con la recomendación de buscar radios que sean lo más grandes posibles, además de que esto no afecta mucho el diseño de la pieza.

3.3.2 Espesor del alma

El espesor del alma se determina con ayuda de la tabla 2.2 que proporciona el espesor en función del ancho promedio y del área total proyectada.

El ancho promedio de la pieza es de 31.5 mm y es el que se muestra en la figura 3.6. La área total proyectada, anteriormente calculada, es de 0.009281 m^2 .



Figura 3.6 Ancho promedio

De la tabla 2.2 se observa que el valor mínimo para el espesor del alma se encuentra por debajo de 2.28 mm, por lo que se puede usar una dimensión de 2.28 mm en adelante para el espesor del alma. La dimensión utilizada para el espesor del alma de la pieza de trabajo es la que se muestra en la figura 3.7.

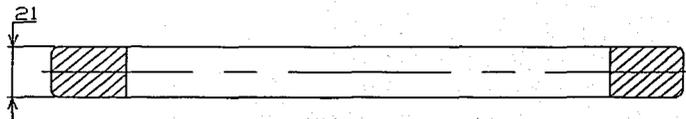


Figura 3.7 *Espesor del alma de la pieza de trabajo*

3.3.3 Tolerancia para el tamaño del sobrante de material

La tabla 2.3 proporciona tolerancias para el tamaño del sobrante de material medido desde el cuerpo de la forja en función del peso y de la longitud total de la pieza. El peso de la pieza de trabajo se obtuvo con ayuda del programa Mechanical Desktop 4, que es el que se utilizó para diseñarla y fue de 0.249 kg como se observa en la figura 3.8.

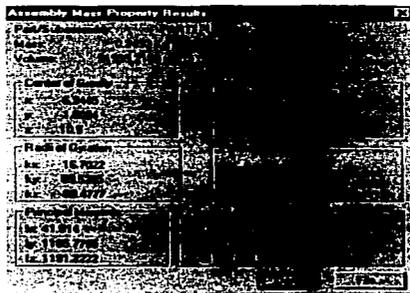


Figura 3.8 *Propiedades de masa de la pieza de trabajo*

La longitud total de la pieza es la que se muestra en la figura 3.9.

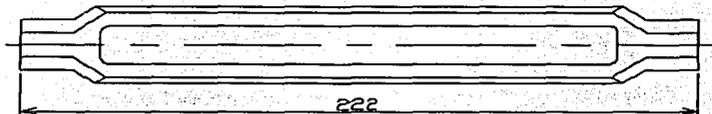


Figura 3.9 Longitud total

Interpolando en la tabla se encuentra que el valor mayor para la tolerancia lo proporciona el renglón de la longitud total, siendo este de 0.5235 mm.

3.3.4 Tolerancia de cierre

En la tabla 2.4 se encuentran las tolerancias de cierre recomendadas. En la tabla, la tolerancia aplicable está determinada por el peso o por el área del plano de forja. El peso de la pieza, anteriormente calculado, es de 0.249 kg. El área del plano de forja es la que está en la superficie del dado de forja en la línea de partición y es la que se muestra en la figura 3.10, esta tiene un valor de 0.07 m².

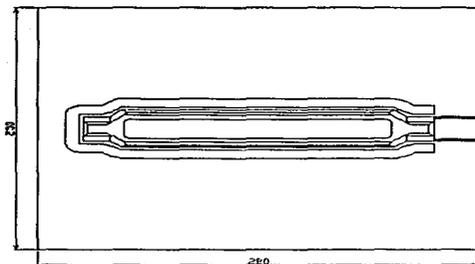


Figura 3.10 Área del plano de forja

La tolerancia mayor se encuentra en el renglón del área del plano de forja y tiene un valor de $+1.6 -0.78$. Estas tolerancias se aplican en las dimensiones que son perpendiculares a la línea de partición, en el espesor del dado y en sus cavidades como se muestra en la figura 3.11.

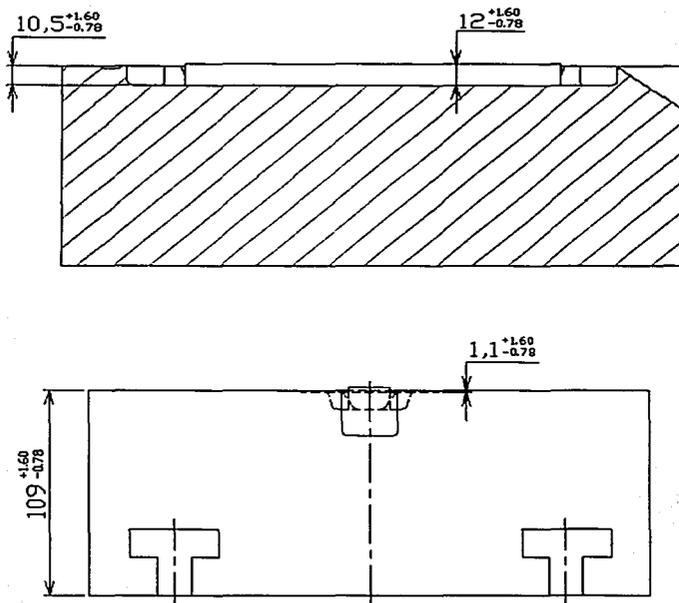


Figura 3.11 Tolerancias de cierre

3.3.5 Tolerancias dimensionales

Las tolerancias dimensionales se aplican a las dimensiones paralelas a la línea de partición. La tabla 2.5 muestra las tolerancias por contracción y las superficiales. Para un tipo de forja convencional como la que se va a usar para producir la pieza, la tolerancia de variación por contracción "A" sería de ± 0.05 y la superficial "B" sería de $+0.5 - 0.25$. La aplicación de estas tolerancias para superficies exteriores opuestas se muestra en la figura 3.12.

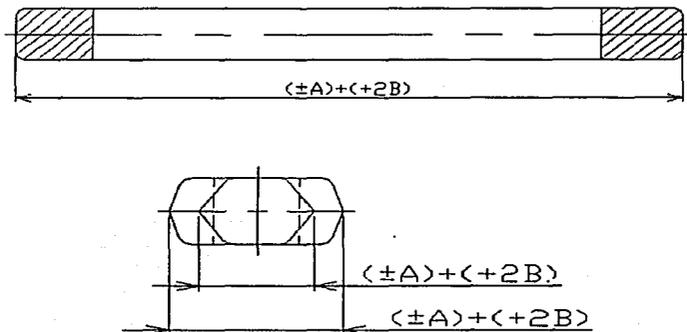


Figura 3.12 Tolerancias dimensionales para superficies exteriores opuestas

Estas tolerancias dimensionales se calculan de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} &(\pm A) + (+2B) \\ &(+0.05 - 0.05) + 2(+0.5 - 0.25) \\ &(+0.05 - 0.05) + (+1 - 0.5) \\ &+1.05 - 0.55 \end{aligned}$$

La pieza, entonces, quedaría dimensionada como se muestra en la figura 3.13

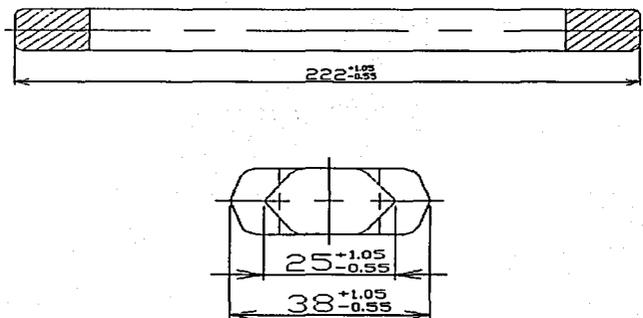


Figura 3.13

La aplicación de las tolerancias para superficies interiores opuestas son las que se muestran en la figura 3.14.

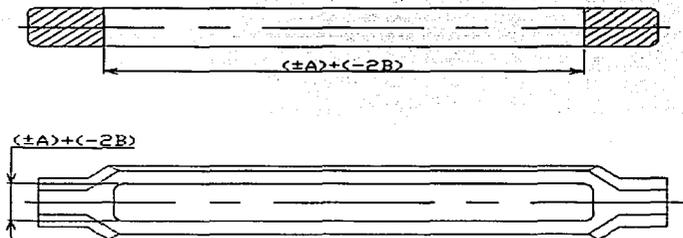


Figura 3.14 Tolerancias para superficies interiores opuestas

Estas tolerancias dimensionales se calculan de la siguiente forma:

$$(\pm A) + (-2B)$$

$$(+0.05 - 0.05) - 2(+0.5 - 0.25)$$

$$(+0.05 - 0.05) + (-1 + 0.5)$$

$$-0.95 + 0.45$$

La pieza, por consiguiente, es dimensionada como se muestra en la figura 3.15.

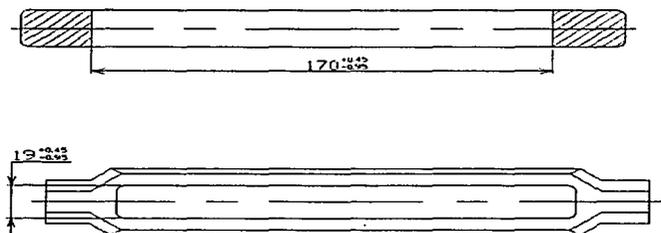
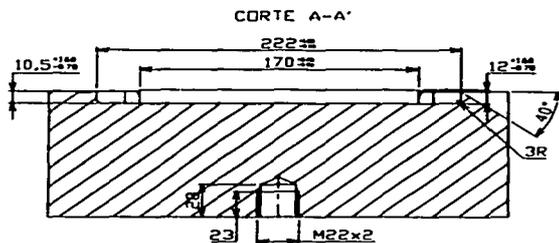
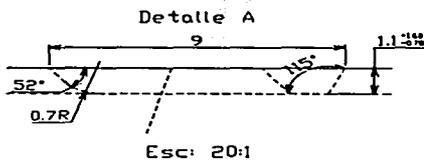
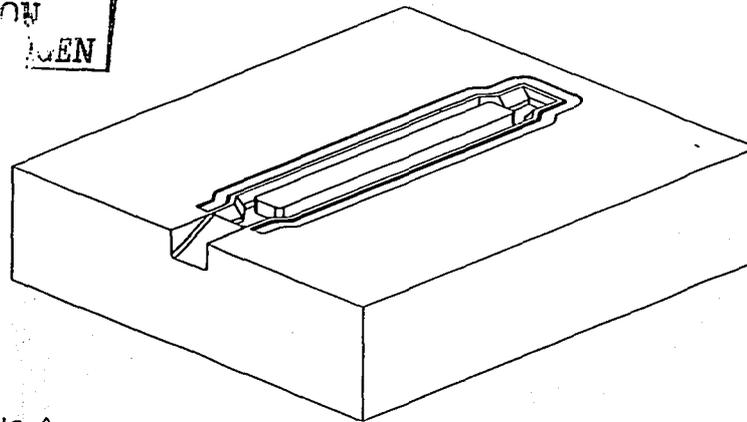
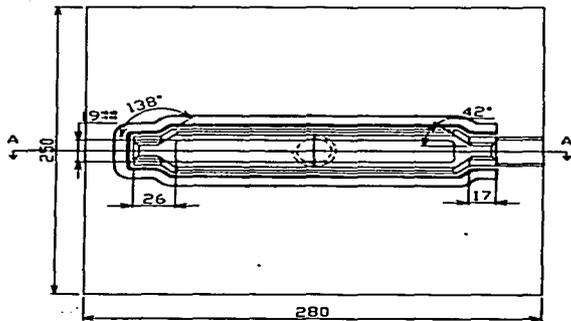


Figura 3.15

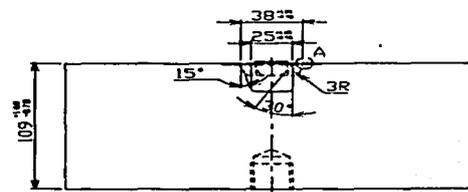
3.4 Diseño de las matrices

Después de que se identifican y calculan los parámetros de diseño para la pieza, se pueden diseñar los dados de forja aplicando todo lo anteriormente calculado. Se deben seguir los lineamientos que se usan en el diseño de dados de forja con base en el conocimiento de los principios y limitaciones de este proceso que se explicaron en el capítulo 2 y que se determinaron en este capítulo. El diseño que se hizo de los dados de forja que se utilizarán para producir la pieza requerida se muestra en los dibujos 1 y 2 para la matriz superior e inferior, respectivamente; así como también los modelos sólidos en las figuras 3.16 y 3.17. En los dibujos se incluye el diseño de un campo y de un canal para la rebaba para los que no se hizo ningún cálculo, pero que son importantes puesto que ayudan a controlar el incremento de la presión dentro del dado.

TESIS CON FALLA DE ORIGEN



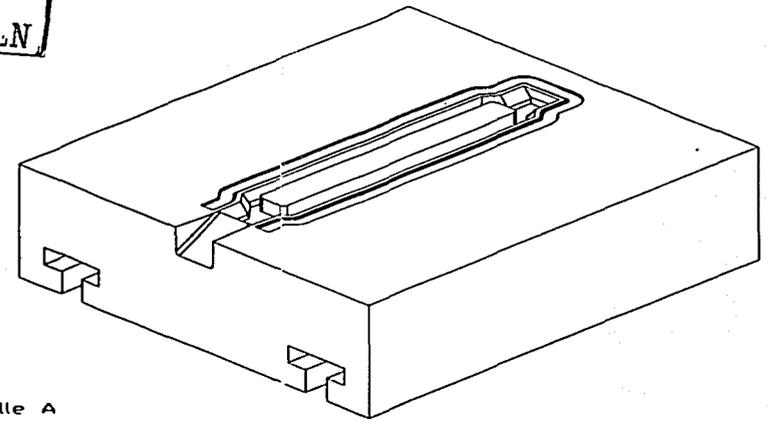
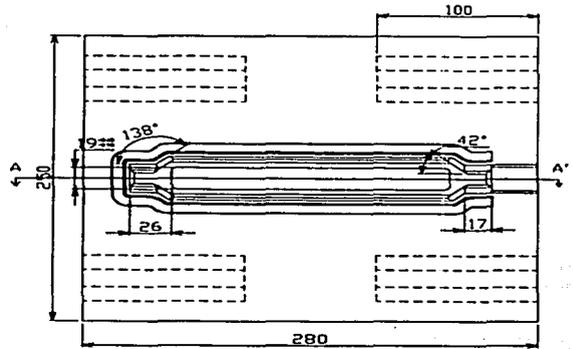
TESIS CON FALLA DE ORIGEN



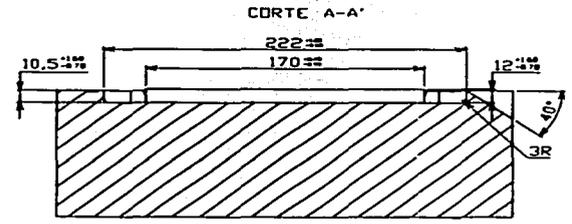
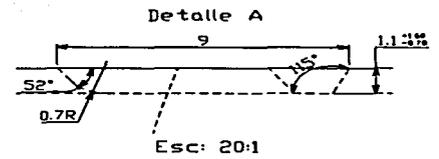
TESIS CON FALLA DE ORIGEN

Esc: 1:3	FES-CUAUTILAN U.N.A.M.	21-05-03	DIB: M.H.C.
Acot: mm	MATRIZ SUPERIOR PARA TENSOR		REV: F.D.C.R.
	MAT: ACERO D2		Dibujo 1

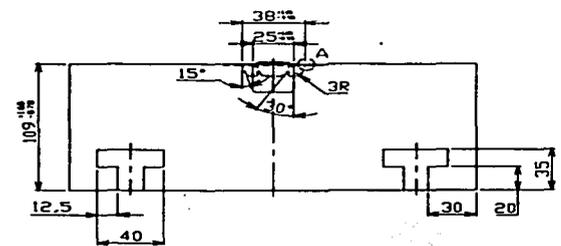
TESIS CON FALLA DE ORIGIN



TESIS CON FALLA DE ORIGIN



TESIS CON FALLA DE ORIGIN



Esc: 1:3	FES-CUAUTITLAN U.N.A.M.	21-05-03	DIB: M.H.C.
Acot: mm	MATRIZ INFERIOR PARA TENSOR		REV: F.D.C.R.
	MAT: ACERO D2		Dibujo 2

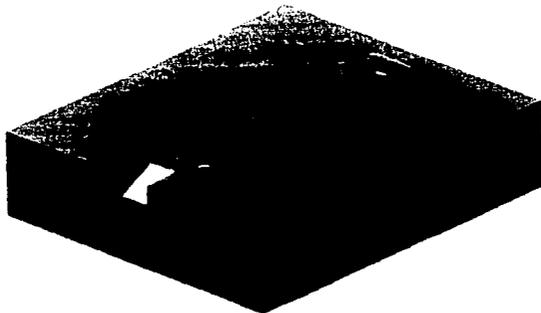


Figura 3.16. *Modelo sólido de la matriz superior*

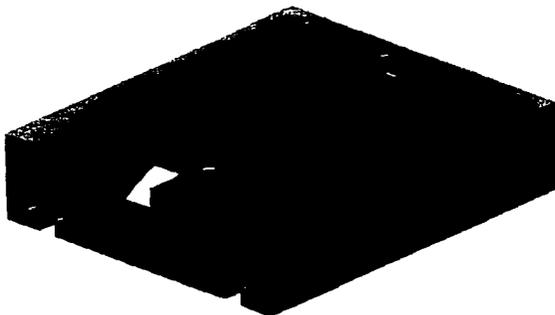
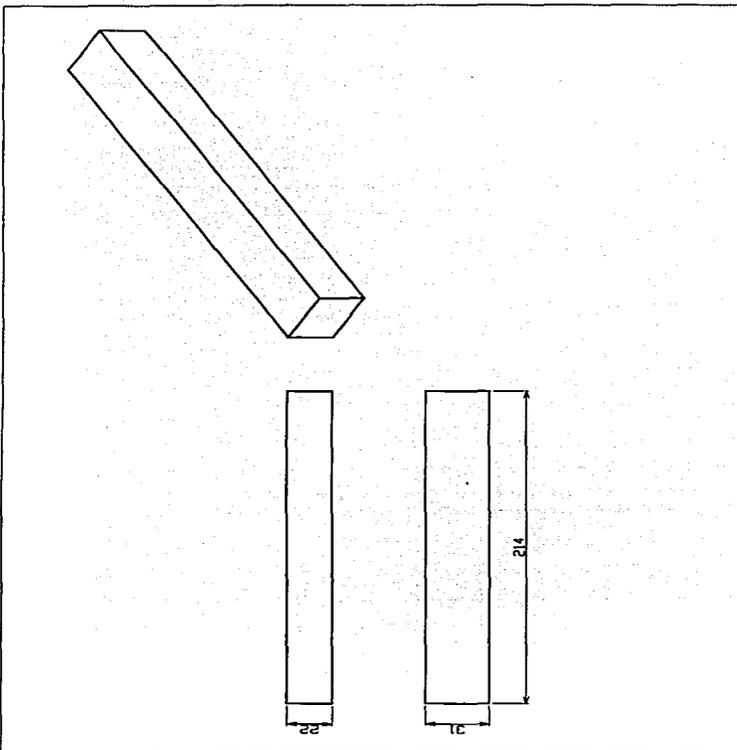


Figura 3.17. *Modelo sólido de la matriz inferior*

3.5 Volumen del material de inicio

Finalmente se determinan las dimensiones del material de inicio que, por la forma de la pieza a fabricarse, tiene que ser una barra rectangular y con un volumen que permita el llenado de las cavidades del dado. El volumen de las cavidades de los dados superior e inferior (que es el volumen de la pieza) es de $92,000 \text{ mm}^3$, mas un 58.6 % del material de inicio que se convertiría en rebaba daría un volumen total para la barra de inicio de $145,950 \text{ mm}^3$. Por lo tanto, el material de inicio tendría las dimensiones que se muestran en el dibujo 3.



Esc: 1:2	FES-CUAUTILAN U.N.A.M.	21-05-03	DIB: M.H.C.
Acot: mm	MATERIAL DE INICIO PARA TENSOR		REV: F.D.C.R.
	MAT: ALUMINIO 3003		Dibujo 3

CONCLUSIONES

Después del trabajo realizado se pueden establecer las conclusiones siguientes:

1. La forja es un proceso de manufactura muy rentable si se le aplica en los casos de producción adecuados, esto es: cuando se requieren grandes lotes y altas velocidades de producción, ahorro de material y buenas propiedades mecánicas.
2. Aunque la maquinaria para realizar el proceso es costosa, su operación no es complicada y a la larga se puede recuperar la inversión por las elevadas velocidades de producción y el ahorro en el material.
3. El proceso de forja contribuye para que se pueda entregar un producto de buenas propiedades mecánicas y a bajo costo, comparado con el maquinado completo de la pieza, los defectos de la fundición o las costosas uniones de soldadura.
4. Dependiendo de la pieza, se debe tener cuidado en aspectos esenciales de diseño tales como la colocación de la línea de partición, los ángulos de salida, los radios de los filos, etc, ya que estos pueden repercutir en el producto final.
5. El uso de tolerancias en los dados o matrices de forja es importante, ya que estas prevén aspectos como la vida de la herramienta, el desgaste y deflexión de los dados, la contracción de la pieza al enfriarse, etc.
6. El diseño de matrices es complicado, pero con las recomendaciones de diseño se puede facilitar el proceso y al final obtener una herramienta que tenga lo necesario para obtener la pieza deseada.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

BIBLIOGRAFÍA

1. FUNDAMENTOS DE MANUFACTURA MODERNA
MATERIALES, PROCESOS Y SISTEMAS.
MIKELL P. GROOVER
PRENTICE-HALL, MEXICO 1997.
2. PRINCIPIOS DE INGENIERIA DE MANUFACTURA.
VIC CHILES Y STEWART C. BLACK
COMPAÑIA EDITORIAL CONTINENTAL, S.A. DE C.V., 1998.
3. INGENIERIA DE MANUFACTURA.
ULRICH SCHÄRER SÄUBERLI
COMPAÑIA EDITORIAL CONTINENTAL, 1991
4. MANUAL DE METODOS DE FABRICACIÓN
SERGIO A. VILLANUEVA PRUNEDA Y JORGE RAMOS WATANAVE
AGT EDITOR, 1983.
5. PROCESOS BASICOS DE MANUFACTURA
C. KAZANAS Y GLENN E. BAKER
MCGRAW-HILL, 1989.
6. INGENIERIA DE MANUFACTURA, PRODUCTIVIDAD Y OPTIMIZACION
DANIEL T. KOENIG
PUBLICACIONES MARCOMBO, 1990.
7. MATERIALES Y PROCESOS DE MANUFACTURA
JOHN E. NEELY Y RICHARD R. KIBBE
LIMUSA, 1992.
8. PROCESOS DE MANUFACTURA I
FRANCISCO JIMÉNEZ CARO
AGT EDITOR, 1982.
9. PROCESOS PARA INGENIERIA DE MANUFACTURA
LEO ALTING
ALFAOMEGA, 1990.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN