



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA MECÁNICA E INDUSTRIAL

**IMPACTO DE INCREMENTAR LA VIDA DE LA HERRAMIENTA EN EL
CONSUMO DE RECURSOS EN PROCESOS DE FORJADO EN FRÍO**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO INDUSTRIAL

PRESENTA:

ANA KERIMA IRASTORZA GUTIÉRREZ

DIRECTOR DE TESIS:

ING. UBALDO MÁRQUEZ AMADOR



MÉXICO, D. F.

AGOSTO, 2014

*Für die beste Erfahrung meines Lebens... und für diejenigen, die mich
motiviert haben, um diesem Moment zu erreichen*

Agradecimientos

A mi familia, que siempre ha estado a mi lado, por su apoyo y cariño. Por siempre motivarme a seguir adelante.

A mis amigos, por todos los momentos de alegría, estrés, por esas noches de desvelos y el sentimiento de triunfo al final de cada semestre. Por fin lo logramos.

Fer, por todos esos sábados de tesis, por esos días en que escuchaste y me motivaste a seguir. Por todo tu apoyo siempre. Y por lo que nos falta.

Pepetón, por todos tus años de amistad, esas desveladas épicas de café y conceptos arquitectónicos que nos llevaron a estudiar ingeniería. Porque siempre has estado para mí.

A mi director de tesis, el Mtro. Ubaldo Márquez, quién estuvo en todo momento asesorándome, procurando que mi trabajo fuera mejor. Y por sus excelentes clases, que lograron crear en mi el amor por la manufactura.

Extiendo este agradecimiento a mis profesores y tutores, que ayudaron a que este momento se hiciera posible: Ing. Erik Castañeda, Ing. Alejandra Garza, M.I. Silvina Hernández y Dr. Javier Cervantes, quienes dedicaron su tiempo para que este trabajo.

Für meine zweite Universität, Friedrich Alexander Universität, und die Zeit, die ich dort war.

To my dear Seminar Professor, Eng. Tobias Schrader, for all the help and motivation he gave me during and after my studies abroad. And most importantly, for sharing with me his love to cold forging. Someday, I hope, we'll be able to work together again. *Bis dann! Und vielen Dank.*

Also, to Eng. Alessandro Berte from Lafer, for his kindness and disposition in assisting me in every doubt.

Por último, agradezco a la Universidad Nacional Autónoma de México por brindarme los elementos necesarios para mi formación profesional.

Tabla de contenido

Motivación.....	1
Objetivo.....	2
Tema I: Forja en Frío en la Industria	
1.1 Proceso de forjado	3
1.1.1 Generalidades de los procesos de formado.....	4
1.1.2 Trabajo en Frío.....	8
1.1.3 Tipos de forjado.....	11
1.2 Estado de la forja en frío en la industria global	16
Tema II: Contabilidad de Consumo de Recursos	
2.1 Sistemas de Contabilidad de Recursos.....	22
2.1.1 Sistema orientado al proceso.....	24
2.1.2 Sistema de Presupuesto-factura o presupuesto-matriz ambiental	25
2.1.3 Costeo objetivo orientado al medio ambiente	25
2.1.4 Contabilidad ambiental orientada al ciclo de vida	25
2.2 Sistema orientado al proceso aplicado a forja en frío.....	26
Tema III: Prolongamiento de la Vida de la Herramienta	
3.1 Aspectos que influyen en la vida de la herramienta.....	28
3.2 Razones de falla de la herramienta.....	31
3.1 Desafíos	35
3.2 Soluciones.....	36
Tema IV: Análisis de Resultados	
4.1 El producto: trípodos.....	47
4.2 Caracterización del proceso.....	48
4.3 Prolongamiento de la vida de la herramienta: recubrimiento PVD.....	50
4.4 Resultados	52
Conclusiones.....	56
Bibliografía.....	57

Motivación

La situación global se modifica en diferentes aspectos constantemente, creando cambios políticos, económicos y sociales. Esta circunstancia lleva a que la sociedad cuestione las tendencias, sistemas y perspectivas del momento. Hoy en día la globalización, las crisis económicas y los retos ecológicos han causado un cuestionamiento tal, que el enfoque global ha cambiado a demandar de la industria productos y procesos más sustentables, con costos económicos y ambientales cada vez más bajos.

Por tanto, los procesos de manufactura que integran a la industria han ido de la mano con este cuestionamiento, modificándose a lo largo del tiempo.

Con este planteamiento inició en octubre del 2012 un seminario al que asistí durante el semestre que estuve de intercambio en la Universidad Friedrich Alexander en Nuremberg, Alemania. El seminario se centró en desarrollar proyectos de investigación para diferentes procesos de manufactura y la evolución de éstos hacia la sustentabilidad. Estos proyectos estuvieron basados en prácticas que la universidad realizaba con empresas privadas. El tema que se me asignó y desarrollé sentó las bases para esta tesis, siendo el proceso de manufactura seleccionado el forjado en frío.

Hoy en día, la evolución de la forja en frío se debe principalmente a su dependencia hacia industrias como la automotriz, industria que está en constante crecimiento y cuya tendencia actual es hacia una producción sustentable. Al estar en línea con la tendencia de la industria, la forja en frío podrá permanecer como un proceso competitivo, ofreciendo productos con menor costo económico y ambiental.

Para lograr esto se requiere de una optimización del proceso de forjado en frío, situación que se ha logrado a través de diferentes tecnologías aplicadas al proceso. La optimización de la forja en frío mejora la eficiencia del proceso, lo cual tiene dos principales efectos que responden al enfoque global actual:

- Un menor impacto ambiental
- Reducción de costos

Un punto crítico dentro del proceso de forjado se encuentra en la herramienta o dado. De ella dependen fuertemente la continuidad en la producción, la calidad de las piezas forjadas y el consumo de recursos. Gracias a esto, es que actualmente la optimización del proceso de forjado se centra principalmente en incrementar la vida de la herramienta.

Como se puede observar en la figura 1.0, debido a las condiciones creadas durante el forjado en frío, la herramienta o dado es expuesta a altas cargas, ocasionando que su vida vaya disminuyendo por cada ciclo (o por cada pieza forjada). Una señal de esta disminución de vida de la herramienta es su desgaste.

El desgaste de la herramienta trae dos consecuencias principales:

- Disminución de la precisión de forjado.- Situación que ocasiona que existan productos rechazados, al no cumplir con las tolerancias dimensionales en su geometría.
- Fallo temprano de la herramienta.- Al haber desgaste, se requiere una resistencia cada vez mayor de la herramienta a la carga, hasta que ocurre su falla.

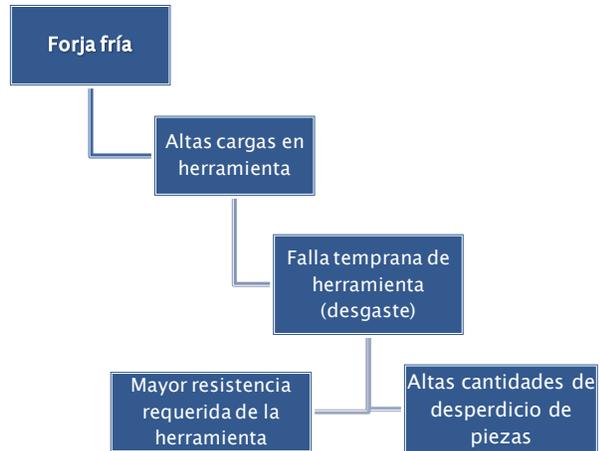


Figura 1.0: Causas y consecuencias de la falla temprana de la herramienta en el proceso de forjado en frío

A lo largo del tiempo, se han ido desarrollando diferentes tecnologías para la forja en frío que por diferentes métodos de aplicación consiguen solucionar o mitigar estos problemas. Además, estas tecnologías logran distintas propiedades en los productos forjados y distintos ahorros de recursos a lo largo del proceso.

Objetivo

Presentar algunas tecnologías que alargan la vida de la herramienta, mostrando finalmente un ejemplo aplicado donde por medio de la contabilidad de recursos se demuestre la optimización del proceso conseguido. El ejemplo es una aproximación del proyecto original, llevado a cabo por la Universidad Friedrich Alexander.

Tema I: Forja en frío en la Industria

Uno de los mayores retos de la industria moderna es lograr satisfacer la demanda de los usuarios por productos con cada vez mayor grado de complejidad, logrando mantener el costo social y ambiental que cualquier tipo de industria conlleva al mínimo posible, además de satisfacer los estándares de calidad esperados, optimizando costos.

Considerando que son pocos los productos cuya industria no involucre algún proceso de manufactura, los cuales implican un alto costo social y ambiental, se vuelve un parámetro importante el elegir el proceso de manufactura más adecuado para la fabricación de cada producto, puesto que cada uno de los métodos de manufactura tiene su conjunto de capacidades, ventajas y limitaciones.

1.1 Proceso de forjado

El proceso de forja data desde los más antiguos registros del hombre, hace más de 7,000 años. Hay evidencia de que el forjado fue utilizado en el Egipto antiguo, Grecia, Persia, India y China, entre otras culturas, para crear armas, joyería y otros productos. En Creta, se utilizaban platinas de piedra grabadas como dados de impresión al forjar, técnica que eventualmente evolucionó en la fabricación de monedas. La herrería, nombre bajo el cual se conoce al forjado artesanal, permaneció relativamente sin cambios por muchos siglos hasta la introducción del martillo descendiente con ariete guiado alrededor del siglo XVIII. Este desarrollo introdujo al proceso de forja a la era industrial.

Básicamente, la forja es un proceso de deformación en el cual la pieza de trabajo es comprimida entre dos dados por medio de impacto o presión gradual. Hoy en día, el proceso de forja es utilizado para crear una gran variedad de productos para diferentes empresas, entre las cuales se pueden mencionar como ejemplo la automotriz y la aeroespacial, donde algunos ejemplos de componentes fabricados por este proceso son cigüeñales del motor, bielas, engranes, componentes estructurales y piezas de turbinas de motores. Adicionalmente, las industrias acereras y metalúrgicas utilizan el forjado de piezas para establecer la forma básica de largos componentes que son subsecuentemente maquinados a una geometría final de dimensiones específicas.

De acuerdo con las condiciones en las que se lleva a cabo este proceso de manufactura, mencionadas anteriormente, se puede clasificar al forjado como perteneciente a los procesos de manufactura sin arranque de viruta, donde la geometría de nuestro producto final se logra por medio de la deformación.

Estos procesos han sido diseñados para explotar la propiedad de plasticidad de algunos materiales, principalmente metales. De esta manera, el material “fluye” sin deteriorar sus propiedades. Además, dado que el material es simplemente reacomodado para producir la

geometría final, en oposición a los procesos donde hay arranque de material, la cantidad de deshecho se ve reducida sustancialmente, lo cual comienza siendo un buen principio para reducir el consumo de recursos, reflejándose en un impacto ambiental menor.

Para poder comprender en su totalidad el proceso de forjado en frío es necesario conocer primero el proceso de forja en general, y antes, inclusive, los procesos de formado.

1.1.1 Generalidades de los procesos de formado

Los procesos de formado tienden a ser sistemas complejos que consisten de variables independientes y dependientes, además de sus interrelaciones. Estas variables son las que dan las características finales a la pieza formada, de manera que no sólo cada proceso de formado, sino también cada variación sobre estos procesos sea único.

Variables independientes

Las variables independientes son aquellas sobre las que el ingeniero o el operador tiene control directo y que normalmente son seleccionadas o especificadas al estar preparando un proceso. En un típico proceso de formado las variables independientes a considerar son:

- Material inicial (que puede ser primo o haber pasado por algún proceso anterior).- Las características y propiedades del material inicial o material de trabajo pueden ser elegidas enteramente para facilitar la fabricación del producto, pero en la mayor parte de los casos juega un papel más importante el conseguir ciertas propiedades finales (después del proceso) a partir de las iniciales. Debido a esto, es importante al especificar el material de trabajo, definir no sólo la química del material, sino también la condición de éste. Al hacer esto, automáticamente se definen también las características y propiedades.
- Geometría inicial de la pieza de trabajo.- Puede ser dictada por procesos anteriores, o ser elegida de entre una gama de formas disponibles. Normalmente, consideraciones económicas y de ahorro de recursos influyen en esta decisión.
- Geometría del dado o herramienta.- Esta variable es de las más importantes y tiene muchos aspectos, además de ser tema central de esta tesis. La importancia de esta variable radica en que, dado que el herramental induce y controla el flujo del metal al ir el material de su forma inicial a la final, el éxito o fracaso del proceso depende enormemente de la geometría de la herramienta. Algunos de los aspectos de esta geometría dignos de ser mencionados son el radio de doblado, los detalles de la cavidad, etc.
- Lubricación.- La fricción entre la herramienta y la pieza de trabajo puede llegar a necesitar hasta más del 50% de la potencia aplicada a un proceso de deformación, teniendo entonces los lubricantes un papel importante en el proceso, pues reducen el coeficiente de fricción. Aunado a esto, lubricantes cumplen también como refrigerantes, barreras térmicas e inhibidores de corrosión. De esta forma, su selección es un aspecto importante

en el éxito de un proceso de formado. Algunas especificaciones a considerar al elegir lubricante son: el tipo, la cantidad a ser aplicada y el método de aplicación.

- Temperatura inicial.- La especificación de esta variable puede incluir las temperaturas tanto de la pieza de trabajo, como del herramental, dado que las propiedades del material varían altamente con la temperatura.
- Velocidad de la operación.- La velocidad influencia directamente en las fuerzas requeridas para la deformación, la efectividad del lubricante, y el tiempo disponible para la transferencia de calor, su selección afecta enormemente el proceso de producción.
- Cantidad de deformación.- Algunos procesos de deformación, como el laminado, dan entrada a que sea el operador el que elija este factor, sin embargo, en procesos como el forjado, es el diseño de la herramienta el que controla esta variable.

Variables dependientes

Luego de la especificación de las variables independientes, el proceso en sí determina la naturaleza y los valores de un segundo conjunto de variables, que son las dependientes. De esta forma, podemos definir a las variables dependientes como la consecuencia de la selección de las variables independientes. Algunos ejemplos de variables dependientes son:

- Requerimientos de potencia.- Una cierta cantidad de potencia es necesaria para convertir el material seleccionado de una geometría inicial a la final, utilizando un lubricante específico, una geometría de la herramienta específica, velocidad determinada, y temperatura inicial. Cualquier cambio en cualquiera de las variables independientes repercute directamente en la cantidad de potencia que se requiere, siendo este efecto indirecto. No se puede directamente especificar la fuerza o potencia a requerir, podemos especificar las variables independientes y luego experimentar las consecuencias de esa selección. Es por esto que se vuelve extremadamente importante que seamos capaces de predecir, o mejor aún, definir, la potencia necesaria para cada tipo de operación de formado. Sin un estimado razonable, se vuelve imposible especificar el equipo necesario para el proceso, seleccionar la herramienta o el material de la herramienta necesarios, comparar entre distintos diseños de dados o métodos de deformación, o inclusive al final, optimizar correctamente el proceso.
- Propiedades materiales del producto.- Mientras que especificar las propiedades iniciales de nuestro material de trabajo es sencillo, los efectos combinados de la deformación y la temperatura experimentados durante el formado hacen que éstos cambien. Puede suceder que las propiedades iniciales del material sean de interés, pero es un hecho que las propiedades finales del material son de mayor interés tanto para el fabricante como para el cliente. Es por esto que es importante conocer que las propiedades iniciales se ven alteradas por el proceso de deformación.

- Temperatura final.- La deformación genera calor dentro de un material. Por ejemplo, una pieza de trabajo caliente se enfría cuando entra en contacto con el herramental a una temperatura menor. Los lubricantes pueden descomponerse cuando se sobrecalientan, al igual que pueden reaccionar con la pieza de trabajo. Resulta evidente entonces, que las propiedades de un material de ingeniería pueden resultar alteradas tanto por los aspectos térmicos de un proceso de deformación, como por los mecánicos. Es por esto, que dado que nuestro objetivo es controlar un proceso y producir productos de calidad, es importante el conocer y controlar la temperatura del material durante la deformación. Aumentando la complejidad de esta variable, se agrega el hecho de que la temperatura varía de ubicación a ubicación dentro del mismo material de trabajo, dependiendo esto de factores como la geometría final.
- Acabado superficial y precisión.- Estas dos variables dependen directamente de detalles específicos dentro del proceso de formado.
- Naturaleza del flujo del material.- Las propiedades del producto se ven enormemente afectados por las propiedades del flujo del material, y ese flujo depende de todas las variables controlando el proceso. Dentro de cualquier proceso de deformación, los dados y herramental ejercen fuerzas o presiones y controlan así el movimiento de las superficies externas del material de trabajo, volviéndose así importante la naturaleza del flujo del material.

Relaciones entre las variables independientes y dependientes

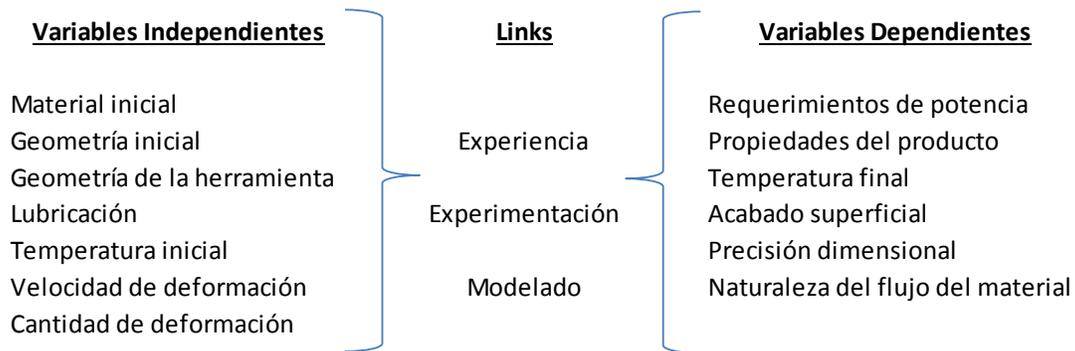
La satisfacción del cliente requiere no únicamente de lograr la geometría final en la pieza de trabajo, sino también que esa geometría sea acompañada de otra serie de propiedades mecánicas, sin que se encuentre cualquier tipo de defectos internos o superficiales.

Desafortunadamente estas propiedades se muestran en forma de variables dependientes, de forma que son las que queremos controlar, pero sus valores son determinados por el proceso, son consecuencias complejas de la selección de las variables independientes.

De esta forma, si queremos modificar los parámetros de una variable dependiente, primero debemos determinar qué variable o conjunto de variables independientes debemos modificar y de qué manera. Para ser capaces de tomar las decisiones apropiadas es importante desarrollar y entender la forma en que las relaciones entre las variables independientes y dependientes se da.

Los procesos de formado de metal son sistemas complejos compuestos por el material que está siendo deformado, la herramienta que realiza la deformación, la lubricación de las superficies e interfaces, y otros parámetros como lo son la temperatura y la velocidad. El número de variaciones que se pueden encontrar en estos procesos es enorme, por lo que se vuelve necesario conocer las interdependencias de cada variable para llevar correctamente a cabo cada uno de los procesos y obtener los resultados esperados.

Existen tres maneras para lograr esto:



- Experiencia.- Requiere de exposiciones prolongadas a un proceso y está con frecuencia limitado a materiales, equipo y productos específicos.
- Experimentación.- Puede llegar a ser costoso y tomar mucho tiempo. La cantidad y velocidad de deformación con frecuencia son menores durante la experimentación que los requeridos en un proceso normal y al depender el desempeño del lubricante y de la transferencia de calor directamente de las velocidades y tamaños, los resultados reales se ven afectados. De esta manera, la experimentación más válida es aquella llevada a cabo bajo condiciones de velocidades y tamaños reales, lo cual generalmente involucra costos más altos.
- Modelado del proceso.- En esta tercera posibilidad, se modela el proceso usando sistemas computacionales de alto nivel, por medio de métodos matemáticos. Se designan valores numéricos a las variables independientes y se corren simulaciones para conseguir predicciones de los resultados finales. Las soluciones pueden ser relaciones algebraicas que describen el proceso y revelan tendencias y relaciones entre las variables, o ser simplemente valores numéricos de una variable dependiente en específico.

Para efectos de esta tesis, el método a utilizar será el modelado del proceso de forja en frío. Por esto, es importante notar también que la precisión de cualquier modelo depende en gran medida de las variables de entrada que se tengan.

Al modelar un proceso de formado de metal, si bien es cierto que existen parámetros que son individuales para cada proceso en específico, existen parámetros también que son comunes a todos los procesos.

En primer lugar, es importante caracterizar el material que se deforma; la resistencia que posee a la deformación a ciertas temperaturas relevantes, su dureza, temperatura de transición, etc, así como también es importante saber los límites de formabilidad y las condiciones de falla, materiales con los que reacciona químicamente (si aplica el caso) o inclusive si puede reaccionar con algunos lubricantes, etc. Dado que las propiedades de los materiales de ingeniería varían

mucho, entre más se pueda caracterizar a un material, mayores posibilidades se tienen de elegir el mejor proceso de formado para un material en particular.

En el forjado en frío un parámetro a considerar es la velocidad de deformación. Esto porque existen algunos materiales sensibles a ciertos rangos de velocidad de deformación, por lo que pueden fracturarse o agrietarse si son impactados, pero se deformarán de manera plástica al ser sujetos a cargas a bajas velocidades.

Otros parámetros importantes son la fricción, la lubricación, y la temperatura. La fricción juega un papel importante en la cantidad y calidad de la deformación del material, además de ser un factor de desgaste del dado en el forjado en frío. El lubricante representa un recurso a utilizar en el proceso que tiene como consecuencia un alto impacto ambiental. Por último, la temperatura representa un parámetro que cambiará las propiedades mecánicas del material de nuestro producto, dándole algunas de sus características distintivas al proceso de forja en frío. Es importante notar que estos tres factores influyen en la caracterización uno del otro. Por ejemplo, a mayor lubricación, menor temperatura y fricción entre las piezas durante el proceso.

1.1.2 Trabajo en Frío

Los procesos de formado pueden ser clasificados como trabajo en caliente, en tibio o en frío, basados en la temperatura de la pieza de trabajo y del material de ésta.

En el trabajo en caliente, la deformación es hecha bajo condiciones de temperatura y de esfuerzo donde la recrystalización ocurre al mismo tiempo que la deformación, lo que significa arriba de 0.6 veces la temperatura de fusión del material de trabajo.

El trabajo en tibio es aquel donde la deformación se lleva a cabo bajo condiciones de transición (0.3 a 0.6 veces la temperatura de fusión).

El trabajo en frío, por otro lado, se lleva a cabo bajo condiciones donde la temperatura del material está debajo de su temperatura de recrystalización. También se llega a definir como trabajo en frío cuando la pieza es trabajada a una temperatura menor a 0.3 veces su temperatura de fusión.

La mayoría de los metales trabajados en frío se encuentran a temperatura ambiente, aunque el proceso de formado eventualmente causa una elevación en la temperatura.

Para comprender la acción del trabajo en frío, se debe entender primero la estructura de los metales. Los metales son cristalinos y están formados por granos de forma irregular y de tamaños diferentes. Cada grano está constituido por átomos en un arreglo ordenado conocido como estructura cristalina. La orientación de los átomos en un grano dado es uniforme, pero difiere de aquellos en granos adyacentes.

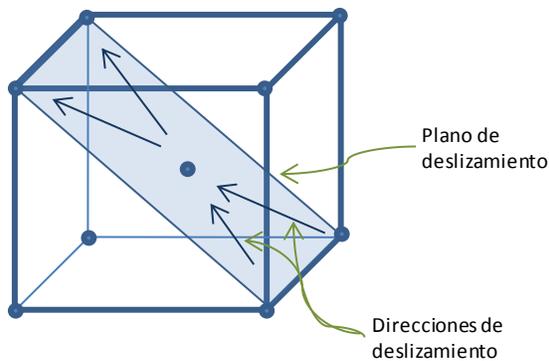


Figura 1.1: Deslizamiento en una estructura cristalina cúbica centrada en el cuerpo

Cuando el material se trabaja en frío se da una deformación plástica que se ve reflejada en cambios en la estructura del grano, al haber una distorsión de su estructura cristalina de acuerdo a los planos y direcciones de deslizamiento (ver ejemplo para estructura bcc en la figura 1.1). Al ocurrir este movimiento de deslizamiento, la orientación de los átomos no se modifica. El deslizamiento y movimiento de dislocaciones es el mecanismo más común para provocar la deformación en un metal.

Como el metal permanece en un estado más rígido, el formado se vuelve permanente hasta que los esfuerzos aplicados han excedido el límite elástico, es por esto que se requieren mayores presiones para el trabajo en frío que para el trabajo en caliente.

También, dado que no puede haber recristalización de granos en el rango de trabajo en frío, no hay recuperación de la distorsión del grano o fragmentación de éste. Conforme la deformación del grano aumenta, opone mayor resistencia, resultando en un aumento en el esfuerzo y en la dureza del metal. A esto se le llama que el metal está endurecido por deformación.

La cantidad de trabajo en frío que un metal soportará depende sobre todo de su ductilidad: a mayor ductilidad del material de trabajo, mejor podrá trabajarse en frío. Por ejemplo, los metales puros, al ser dúctiles y maleables, pueden resistir una mayor deformación que los metales que las aleaciones metálicas, las cuales son creadas para explotar las propiedades que otorgan diferentes metales. También, entre mayor sea el tamaño del grano, mayor es la ductilidad del material y, por tanto, se pueden considerar más adecuados para ser trabajados en frío.

Cuando el metal es deformado por el trabajo en frío, se generan en él esfuerzos residuales, los cuales son en general indeseables puesto que pueden llevar a una falla temprana de nuestro producto. Para eliminar estos esfuerzos se debe recalentar el producto a temperaturas por debajo del rango de recristalización del metal, proceso mejor conocido como recocido. Al llevar este proceso a cabo, no hay cambio apreciable en las propiedades físicas o estructurales del grano. Un recalentado con temperaturas en el rango de recristalización elimina el efecto del trabajo en frío.

Desde el punto de vista de manufactura, el trabajo en frío tiene un número de ventajas y un número de desventajas al ser comparado contra el trabajo en caliente.

Ventajas

- No se necesita utilizar energía para generar calentamiento en la pieza de trabajo.
- Mejor acabado superficial.
- Mayor control dimensional, produciendo piezas con geometrías finales o casi finales, reduciendo así la cantidad de maquinado posterior necesario.
- La dureza, la fatiga y el desgaste son mejorados a través de la deformación.

- Se pueden lograr propiedades direccionales en la estructura del grano.
- Es un proceso óptimo para producciones a gran escala.

Desventajas

- Fuerzas mayores son necesarias para iniciar y completar la deformación.
- Se requieren equipos más pesados y con potencia mayor, además de herramental más duro.
- Se obtiene menor ductilidad en las piezas finales.
- Puede requerir de un proceso de recocido final para compensar la falta de ductilidad y liberar los esfuerzos residuales.
- Las propiedades direccionales finales pueden ser perjudiciales.

Propiedades finales en un proceso de trabajo en frío

La calidad del material inicial es la clave al éxito o fracaso de un proceso de trabajo en frío. Para obtener un buen acabado superficial y mantener la precisión dimensional, el material inicial debe estar limpio (libre de óxido) y lo más liso posible (libre de laminaciones en el material y cavidades).

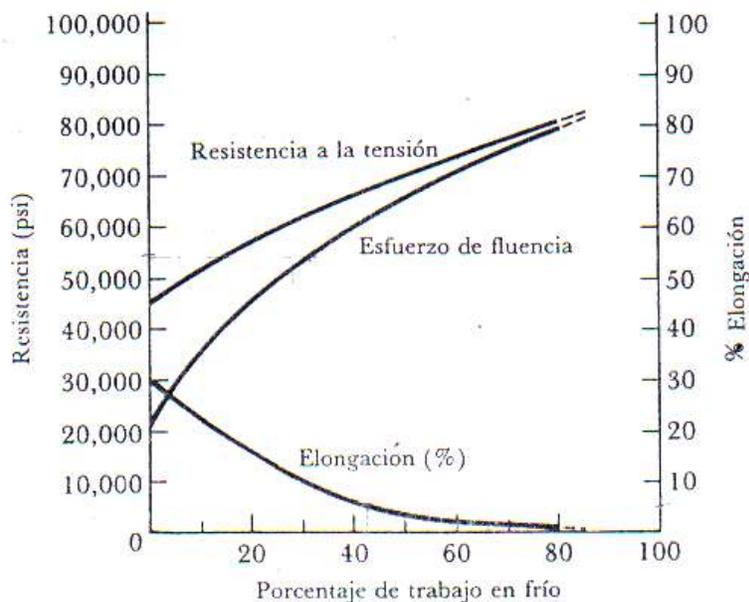


Figura 1.2: Propiedades mecánicas del cobre puro como función de la cantidad de trabajo en frío aplicado (%). Fuente: De Garmo's Materials and Processes in Manufacturing, 2008

Las propiedades finales del material dependerán de la cantidad de trabajo en frío a la que fueron sometidos. Como se muestra en la figura 1.2, el esfuerzo de fluencia y la resistencia a la tensión

incrementan conforme aumenta la cantidad de trabajo en frío, reduciéndose proporcionalmente el porcentaje de elongación obtenida en el material.

La cantidad de trabajo en frío a aplicar también se limita por el comienzo de la fractura en el material, efecto que se puede evitar maximizando la ductilidad del material inicial. Para lograr esto, con frecuencia se aplica un recocido previo al trabajo en frío.

Un punto importante a mencionar es que, al igual que en el trabajo en caliente, el trabajo en frío puede producir anisotropía, por lo que las propiedades varían conforme a la dirección del grano.

1.1.3 Tipos de forjado

Forjado es un término que es aplicado a una familia de procesos en donde se induce la deformación plástica de un material a través de fuerzas de compresión localizadas, aplicadas a través de una herramienta llamada dado.

Una forma de clasificar el forjado es por medio de la temperatura a la que se trabaja el material, que como ya se vio con anterioridad puede ser frío, tibio o caliente.

Otra manera es por medio de la aplicación de la fuerza utilizada durante el proceso, que puede ser por medio de impacto o por presión gradual. Esta distinción deriva en los diferentes tipos de equipos que pueden ser utilizados:

- Martillo
- Prensa

Encontramos otra clasificación que se puede hacer dependiendo del grado al que el metal encuentra comprimido por los dados:

- Dado abierto.- El metal es comprimido entre dos dados planos, permitiendo así que el material fluya lateralmente sin restricción.
- Dado cerrado de impresión.- La superficie de los dados contienen una figura o impresión que es impartida a la pieza durante la compresión, de forma que se restringe el flujo del material hasta cierto grado. En este tipo de proceso, una porción del material fluye más allá de los dados, formando rebaba o "*flash*", material que tendrá que ser removido posteriormente.
- Dado cerrado sin formación de rebaba.- El flujo de la pieza de trabajo es totalmente restringido dentro del dado, por lo que no se genera rebaba. En este tipo de forjado, el volumen del material de trabajo debe ser controlado de forma que sea igual al volumen de la cavidad del dado.

Esta clasificación para el forjado se puede observar gráficamente en la figura 1.3. La caracterización del proceso de acuerdo a esta clasificación será discutida a continuación.

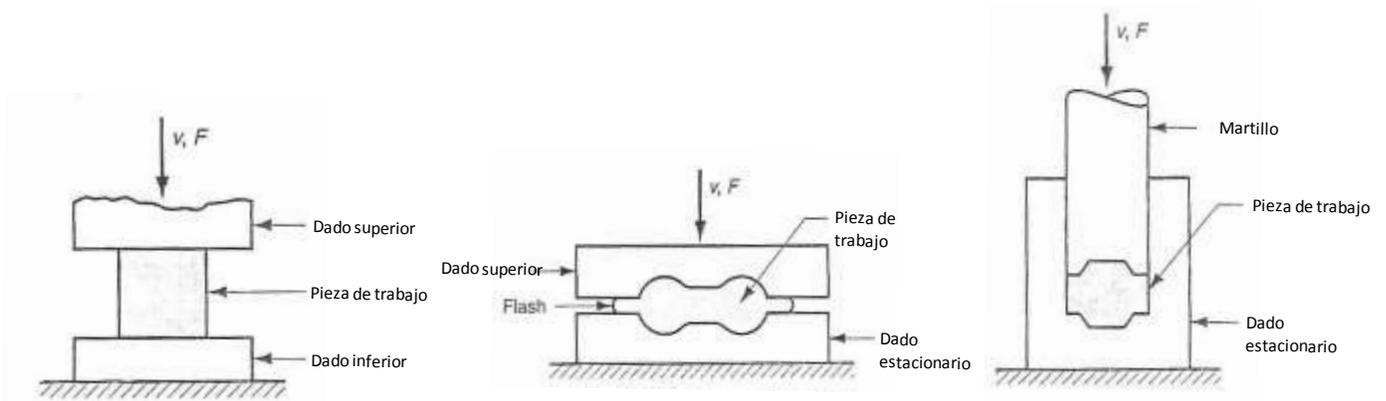


Figura 1.3: Los tres tipos de forjado de acuerdo al flujo de material: en dado abierto, de impresión en dado cerrado y en dado cerrado sin formación de flash. Fuente: Fundamentos de Manufactura Moderna, Groover, 1997.

Forjado en dado abierto

Este tipo de forjado tiene su origen en la herrería antigua.

En este proceso, el metal es calentado hasta cierta temperatura y después es impactado por un martillo mecánico. El forjado en dado abierto reduce la altura de la pieza de trabajo y aumenta su diámetro.

El martillo mecánico más sencillo es uno accionado por gravedad: se deja caer el martillo hacia la pieza de trabajo, la energía del golpe se puede variar al ajustar la altura de la caída.

Existen también martillos automatizados, en el cual la fuerza del impacto causado es controlada por computadora. El uso de este tipo de maquinaria aumenta de manera importante la eficiencia del proceso, al mismo tiempo que minimiza la cantidad de ruido y vibración.

El forjado en dado abierto no logra controlar totalmente el flujo del metal, de manera que para obtener la geometría final deseada, un operador debe orientar y posicionar la pieza de trabajo entre cada impacto. También es importante mencionar que este tipo de proceso usualmente es utilizado para dar una preforma al material, en preparación a otras operaciones posteriores.

Algunos ejemplos de piezas forjadas con dado abierto son los rotores de las turbinas y los ejes de los generadores, llegando a dimensiones de hasta 20m en longitud y 1m en diámetro.

Si se lleva a cabo esta operación en condiciones ideales (en donde no hay fricción entre la pieza de trabajo y la superficie de los dados), ocurre una deformación homogénea, y hay un flujo radial uniforme de la pieza de trabajo. Bajo estas condiciones, la deformación real (ϵ_R) es:

$$\epsilon_R = \ln \frac{h_o}{h}$$

Donde:

$$h_o = \text{altura inicial de la pieza de trabajo [mm]}$$

$h = \text{altura de la pieza de trabajo en algún punto intermedio del proceso [mm]}$

Al final de la compresión, $h = h_f$, donde h_f es la altura final de la pieza, y la deformación real (ϵ_R) ha llegado a su máximo valor.

De esta ecuación, para una operación de forjado en frío, podemos encontrar el esfuerzo real (σ) de la siguiente forma:

$$\sigma = K \epsilon_R^n$$

Donde:

$K = \text{Coeficiente de endurecimiento}$

$n = \text{Exponente de endurecimiento}$

Por otro lado, se puede estimar la fuerza necesaria para llevar a cabo el forjado (F_f) a una altura determinada h al multiplicar el área de la sección proyectada por el esfuerzo real:

$$F_f = \sigma A_f$$

F_f está expresada en Newtons [N] y el área del producto proyectada, A_f , en mm^2 .

Como se puede observar en la figura 1.4, durante el proceso, el área transversal se incrementa continuamente al tiempo que la altura se reduce. El esfuerzo, a su vez, también se incrementa como resultado del endurecimiento de la pieza de trabajo, causado por la deformación. La fuerza de forjado F_f alcanza su máximo nivel al final de la carrera del martillo de forjado, donde tanto el área transversal A_f , como el esfuerzo real σ , llegan a sus niveles más altos.

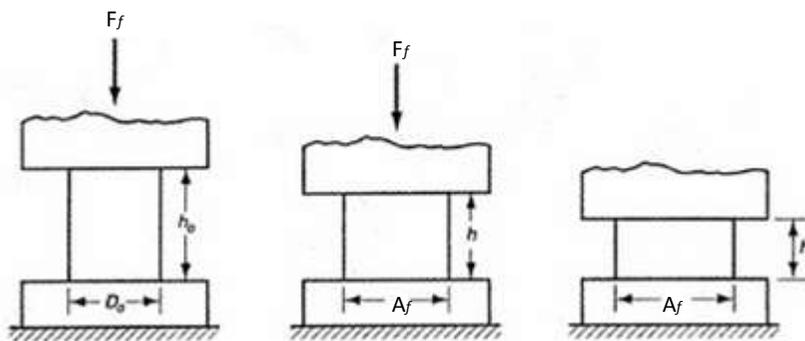


Figura 1.4: Deformación homogénea de una pieza de trabajo cilíndrica bajo condiciones ideales. Fuente: Fundamentos de Manufactura Moderna, Groover, 1997.

Sin embargo, una operación de forjado real no ocurre en condiciones ideales, por lo que la fricción sí se presenta. La fricción se opone al flujo del metal en la superficie de los dados, lo que produce un efecto de abultamiento en forma de barril. Esto ocasiona que la fuerza necesaria para forjar sea

mayor. Al aplicar un factor de forma K_f , se puede conseguir una aproximación de los efectos causados por la fricción y su relación entre el diámetro y la altura de la pieza de trabajo:

$$F_f = K_f \sigma A_f$$

Donde:

$$K_f = 1 + 0.4\mu \frac{D_f}{h_f}$$

$\mu =$ Coeficiente de fricción

$D_f =$ Diámetro de la pieza o longitud de la superficie de contacto con el dado [mm]

$h_f =$ altura final de la pieza [mm]

Forjado en dado de impresión

Mientras que el forjado en dado abierto es un proceso sencillo y flexible, no es práctico para la producción a gran escala, pues es de operación lenta y la geometría final depende de la habilidad del operador. Este problema se resuelve al utilizar el forjado en dado de impresión, que también puede ser llamado forjado en dado cerrado, pues utiliza dados con una geometría específica (la cual posteriormente dará la forma final) que regulan el flujo del metal.

En este proceso, el dado inferior es fijo y está posicionado en el yunque. Es aquí, en el dado inferior, donde se coloca el material de trabajo. El dado superior está adherido al martillo e impacta al dado inferior. Este martilleo causa que el material fluya y llene la cavidad creada entre los dos dados.

En el proceso normal, que puede ser observado en la figura 1.5, parte de este metal fluye fuera de la cavidad formando rebaba. Esta rebaba o “flash” es más adelante retirada por medio del maquinado.

En el forjado sin “flash”, ambos dados crean un confinamiento del material total, de manera que no hay flujo de metal fuera de la cavidad. En esta variante del proceso se requiere que el volumen de la pieza de trabajo sea exactamente el mismo que el de la cavidad de los dados, además de una buena lubricación y un buen diseño de los dados. La mayor ventaja de este proceso es que se ahorra entre un 20 y un 45% de material, que es el desperdicio que llega a representar normalmente la rebaba.

En general, el proceso más utilizado, sin embargo, es con “flash”, y es llevado a cabo en varias etapas (con varios golpes o impactos) para lograr la geometría final deseada.

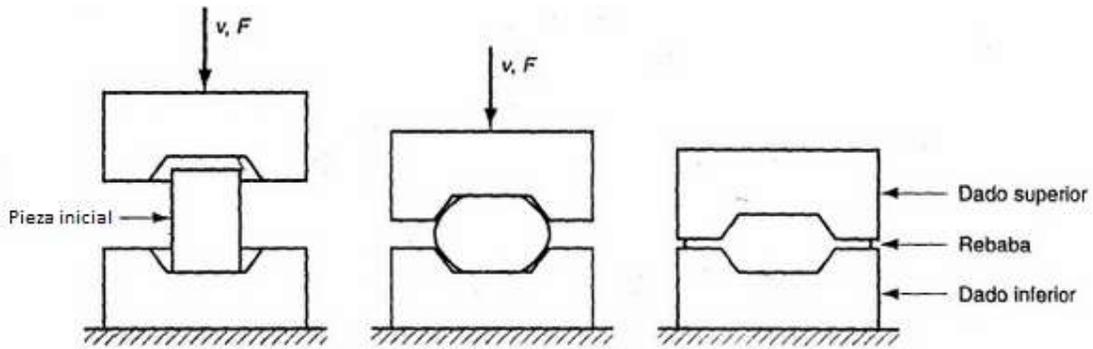


Figura 1.5: Secuencia del forjado en dado de impresión. Fuente: Fundamentos de Manufactura Moderna, Groover, 1997.

Debido a la formación de “flash” en este forjado y a que se logran geometrías en la pieza final más complejas, las fuerzas requeridas para llevar a cabo el proceso son mucho más difíciles de analizar. Es por esto que para estimar la fuerza requerida, fórmulas relativamente simples con factores de diseño o forma son utilizadas:

$$F_f = K_f \sigma A_f$$

Dónde:

$$F_f = \text{máxima fuerza en la operación [N]}$$

$$A_f = \text{área proyectada de la pieza final, incluyendo rebaba [mm}^2\text{]}$$

$$\sigma = \text{esfuerzo real [MPa]}$$

$$K_f = \text{Factor de forma}$$

El factor de forma intenta tomar en cuenta el incremento de la fuerza requerida conforme más compleja es la geometría de la pieza final. Algunos de estos factores son:

Forma de la parte	Kf
Forjado con dado impresor	
Formas simples con flash	6
Formas complejas con flash	8
Formas muy complejas con flash	10
Forjado sin flash	
Acuñado	6
Formas complejas	8

La ecuación sólo aplica cuando la fuerza es la máxima requerida durante el proceso, ya que esta es la carga que va a determinar la capacidad requerida de parte de la maquinaria. Esta fuerza máxima es alcanzada al último golpe, cuando el área proyectada es la mayor y la fricción está en su máximo.

El forjado en dado de impresión no es capaz de conseguir tolerancias muy cerradas, por lo cual con frecuencia cierto maquinado es necesario.

Cuando en el forjado se producen piezas con secciones transversales delgadas, geometrías complejas, tolerancias cerradas y prácticamente se consigue eliminar el maquinado final, se conoce al proceso como forjado de precisión. Los metales más utilizados para este tipo de forjado son el aluminio y el titanio. Dependiendo de la cantidad de “flash” que sea necesario maquinar al final del forjado, el forjado de precisión es clasificado como de geometría neta o casi neta.

Forjado sin flash

En este tipo de forjado, la pieza de trabajo es completamente contenida dentro de la cavidad de los dados, por lo que no se forma el “flash” o rebaba. Este proceso requiere un control muy estricto, sobre todo en que el volumen de la pieza inicial sea igual al de la cavidad de los dados. Si llega a ser menor, la cavidad no se llenará y la presión podrá causar daños a la prensa o a los dados. El forjado sin “flash” también es considerado como forjado de precisión.

1.2 Estado de la forja en frío en la industria global

La industria del forjado es un vínculo clave entre segmentos de manufactura críticos, como los proveedores de metal, tanto ferroso como no ferroso, con la industria usuaria final. Los productos forjados aparecen en hasta un 20% de los productos.

Hoy, esta industria se encuentra con una serie de retos a superar que definirán la forma de llevar a cabo sus operaciones. Algunos de estos retos son:

- Globalización cada vez mayor de los mercados e industrias.
- La demanda de un mayor retorno de la inversión y mejor productividad del capital.
- Expectativas de los clientes por mayor calidad a menor precio.
- Demanda global de una industria sustentable.

Para lograr superar esto, la industria de la forja deberá modificar sus procesos, estudiando el producto a obtener y cambiando radicalmente el proceso existente para producirlo. Parte de estas modificaciones deberán contemplar el material, el diseño y el modelado del dado, la optimización de los recursos utilizados durante el proceso, el modelado del proceso, el impacto ambiental, etc.

Las industrias dependientes de productos forjados en frío se encuentran la automotriz, la ferrocarrilera, la metalmecánica en general, la armamentista, la marina y la aeroespacial, entre otras. Algunos ejemplos de estas industrias y los productos forjados en frío que utilizan se pueden observar en la figura 1.6.

Automotriz	Electrodomésticos	Construcción y equipo de construcción	Aeroespacial
<ul style="list-style-type: none"> • Piezas de frenado • Rótulas y piezas de dirección • Piñones de arranque • Sensores de oxígeno • Juntas de velocidad constante • Pernos • Trípodes • Válvulas del motor 	<ul style="list-style-type: none"> • Engranajes • Sujetadores de montaje 	<ul style="list-style-type: none"> • Pernos • Tuercas • Tornillos • Engranajes de transmisión (equipo construcción) • Piezas similares a industria automotriz (en equipo construcción) 	<ul style="list-style-type: none"> • Remaches • Fuselaje • Sujetadores para tren de aterrizaje • Sujetadores para interior

Figura 1.6: Algunas aplicaciones de piezas forjadas en frío en diferentes industrias

El forjado es una manera efectiva en costo para producir geometrías netas o casi netas en productos. En algunos materiales, esta es la única forma de procesarlos puesto que se pueden forjar prácticamente todos los metales, logrando una gama extensa de propiedades físicas y mecánicas.

Las piezas forjadas son utilizadas en aplicaciones de alto rendimiento y resistencia, donde la tensión, el estrés, la carga y la seguridad son puntos críticos a considerar. También son utilizados en ambientes demandantes, incluyendo aquellos que incluyen corrosión, temperaturas y presiones extremas.

En el caso particular de la industria de la forja en frío, sus productos producidos para diferentes industrias son por lo general simétricos y no llegan a pesar más de 15 kg.

Contrario al forjado en caliente, el forjado en frío se utiliza para producir altos volúmenes de una misma pieza, ya que, además de ser la vida de la herramienta mayor en el forjado en frío, se consiguen piezas más complejas por medio de procesos más simples.

La industria que presenta la mayor cantidad de productos manufacturados por medio del forjado en frío es la automotriz. Esta industria crece rápidamente a nivel mundial, por lo que la demanda por productos forjados en frío seguirá creciendo. Un ejemplo del uso de piezas forjadas en frío para esta industria por parte de la empresa “*Hirschvogel Automotive*” se puede ver en la figura 1.7, en donde se observa la distribución del total de su producción de piezas forjadas destinadas a cada sistema automotriz.

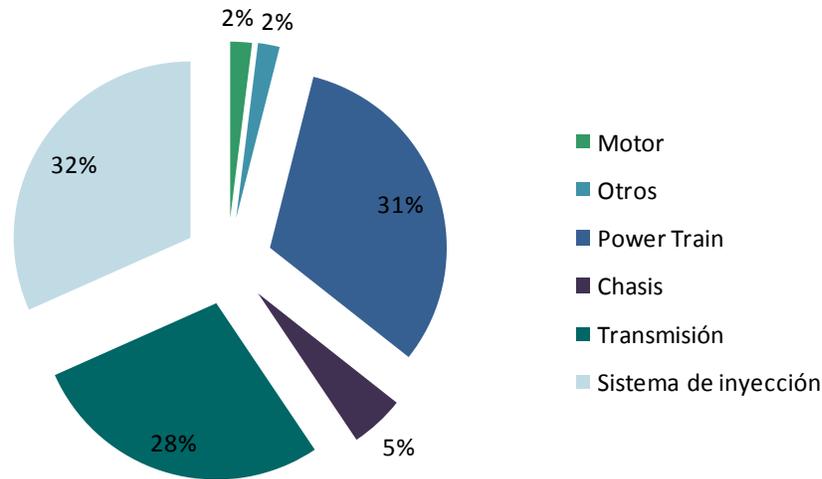


Figura 1.7: Distribución de producción de partes forjadas en frío para la industria automotriz de la empresa Hirschvogel Automotive Cold Forging Group, empresa que figura entre los mayores productores y proveedores del mundo para partes metálicas automotrices.

Para tener éxito en el mercado global, los proveedores de piezas forjadas en frío deben enfocarse en lograr una producción con alto valor añadido de ensamblajes y subensamblajes con la ayuda de:

- Avances en el modelado por computadora de procesos de forjado en frío.
- Avances en el diseño de prensas.
- Diseños de herramientas innovadores para operaciones de forjado complejas.
- Manejo de la información en cadenas de suministro donde las piezas forjadas en frío son parte esencial.

Más específicamente, se puede hablar de lograr ciertas metas dentro de una estrategia a corto plazo para lograr una mayor competitividad en la industria de la forja en frío. Algunos puntos importantes dentro de esta estrategia son:

- Reducir el consumo de energía en todo el proceso, reduciendo así de manera significativa la cantidad de energía utilizada en producir una pieza.
- Material.- Lograr una reducción en el uso de materias primas y de desecho (incrementar la utilización del material).
- Productividad.- Optimizar tiempos de producción y operación de forma que se reduzcan los costos de mano de obra por pieza.
- Calidad.- Reducir el número de piezas rechazadas por proceso.
- Medio ambiente.- Reutilización y reciclaje de los fluidos necesarios durante el proceso de forjado.
- Herramental.- Incrementar la vida del dado al mismo tiempo que se reduce su costo.

La industria del forjado en frío debe responder de manera rápida a los cambios en el mercado, adaptándose a las nuevas necesidades y tendencias. Necesita crear plantas manufactureras ágiles

con procesos de producción optimizados, donde el impacto del proceso al medio ambiente sea el mínimo, y el consumo de recursos el óptimo.

Tendencias

Debido a los cambios en el mercado han aparecido nuevas tendencias en la industria del forjado en frío basadas en objetivos económicos y ecológicos. Las tendencias principales son:

- Individualización.- Esta tendencia se da en respuesta a la demanda existente por productos de alta especialización y con ciclos de vida relativamente cortos. Esta demanda es impulsada principalmente por la industria automotriz y sus proveedores al requerir una gran variedad de partes y ensamblajes únicos y especializados en pequeñas cantidades. Dado el alto costo que tienen la herramienta y el sistema herramental del forjado en frío, la industria se ha visto en la necesidad de reducir el tiempo y costo de desarrollo del sistema de producción para cada producto individual, logrando mantenerse en línea con la demanda existente.
- Diseños con pesos ligeros (o *"lightweight design"*).- Industrias como la aeroespacial y la automotriz demandan subensambles y partes cada vez más ligeros con el objetivo de reducir materiales y costos. Esto se consigue en las piezas forjadas en frío al reducir el grosor de las piezas (aumentando así la carga que el forjado debe aplicar sobre el material), o, como se puede observar en la figura 1.8, por medio de ejes y piezas huecos (aumentando la complejidad de la geometría del dado).

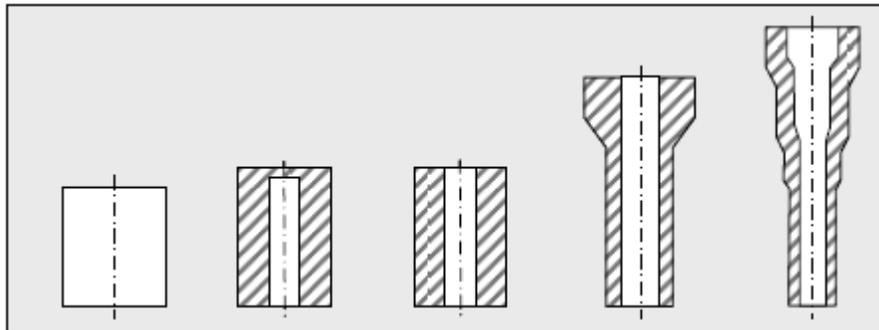


Figura 1.8: Eje de transmisión hueco; forjado hueco en vez de taladrar el agujero posteriormente. Fuente: Hirschvogel, Schrader, "Tooling Solutions for Challenges in Cold Forging".

- Utilización del material.- Su objetivo es alcanzar la máxima utilización posible del material de trabajo inicial. La propuesta se centra en incrementar el uso del forjado de precisión sin rebaba por medio del diseño de dados complejos.
- Piezas de geometría neta.- Su objetivo es evitar o disminuir el maquinado posterior del producto, forjando así piezas completamente terminadas y listas para usar/ instalar. Como beneficios adicionales, esta tendencia reduce el tiempo de operación al reducir el número de pasos en el proceso (al evitar el maquinado), llevando así a una reducción en costos. También, el evitar el maquinado mantiene el flujo continuo de las fibras del material, aumentando de esta forma la dureza del material, ventaja que se puede aprovechar ampliamente en productos como los engranes.

- Integración de funciones.- De nuevo, esta tendencia va de la mano con las tendencias anteriores al buscar reducir el número de operaciones (al remover el maquinado) necesarios para manufacturar una pieza. Lo que diferencia a esta tendencia es que también se centra reducir el número de piezas necesarias para crear un ensamble, un ejemplo se observa en la figura 1.9. De esta forma, se evitan elementos de unión y se diseña un sistema más compacto, reduciendo de esta forma el peso del subsistema (complementando así al *"lightweight design"*). Parte de los beneficios relacionados con esta tendencia es la reducción de costos mediante el ahorro de material, e inclusive mediante el ahorro en costos de ensamblaje. Sin embargo, la integración de funciones conlleva una geometría muy compleja en las partes forjadas, lo que puede generar costos más altos para algunos casos.



Figura 1.9: Engrane gemelo en tres partes, maquinado y ensamblado (izquierda), y en una sola pieza, manufacturado por medio del forjado en frío (derecha). Fuente: Wezel, Schrader, "Tooling Solutions for Challenges in Cold Forging".

- Cadenas de proceso eficientes.- Se puede conseguir una reducción en el tiempo y costo de la producción al optimizar cada paso del proceso. En ocasiones, un arreglo diferente del proceso completo puede llevar a la reducción de pasos requeridos.

Tema II: Contabilidad de Consumo de Recursos (RCA)

La gestión de recursos ambientales tiene como objetivo principal el mantenimiento y mejoramiento de un medio ambiente afectado por actividades humanas. Esto es logrado por medio de la administración y medición de la interacción y el impacto de estas actividades sobre los recursos del medio ambiente, consiguiendo un equilibrio ecológico.

En general, para cada actividad humana se identifican los principales recursos requeridos y cómo la explotación de éstos afecta al medio ambiente. Después se empata su necesidad contra su disponibilidad, de manera que se cause al medio ambiente el menor impacto posible.

Una herramienta importante de la gestión de recursos ambientales es la contabilidad del consumo de recursos (o RCA por sus siglas en inglés: “*Resource Consumption Accounting*”), que consta de tres elementos principales:

- Visualización y enfoque en los recursos consumidos en cada paso del proceso.
- Modelo del sistema basado en cantidades operativas de las entradas y salidas e impactos de los recursos utilizados.
- Comportamiento de costos, de manera que se muestre la relación directa entre el consumo de recursos y el costo de cada proceso que conforma al sistema.

La contabilidad del consumo de recursos es, en realidad, un método de contabilidad de costos en donde la asignación de costos tradicional se extiende al flujo de material y energía utilizada en el proceso.

El principal problema de RCA es que no existe una definición estandarizada de “costos ambientales” por lo que su asignación y cuantificación cae en la subjetividad, al igual que la definición del sistema. De esta manera, un sistema de contabilidad de consumo de recursos puede tomar en cuenta únicamente los costos de los procesos que son directamente llevados a cabo por una empresa específica, sin considerar los costos externos que producen eslabones anteriores de la cadena de producción o los generados por el consumidor.

Adicionalmente, la implementación de un sistema de RCA puede ser visto como un proceso cíclico de mejora continua, proceso que se puede apreciar en la figura 2.1.

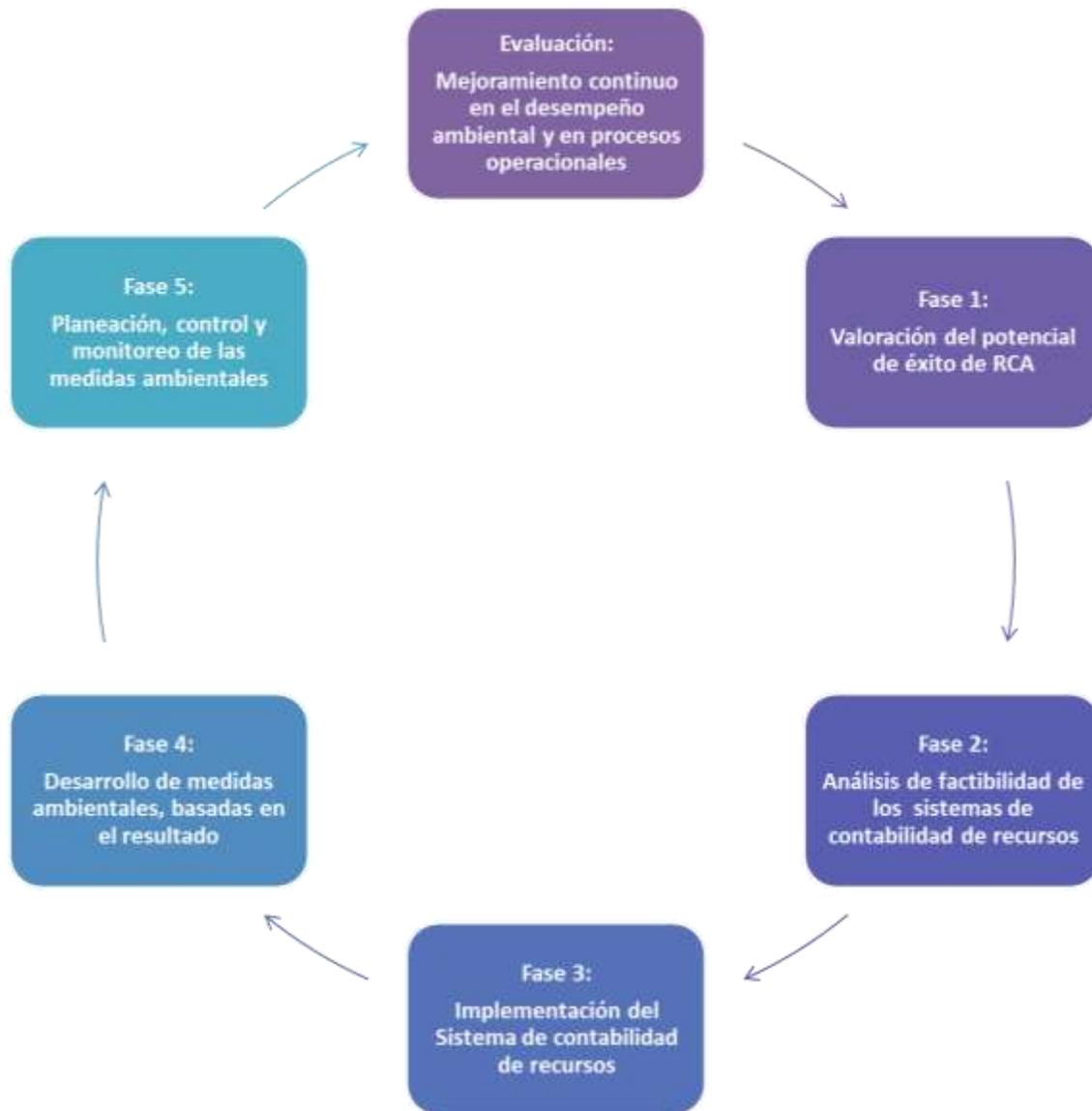


Figura 2.1: Fases del ciclo de mejora continua basado en RCA; Fuente: *Ökologieorientiertes Management. Um- (weltorientiert) Denken in der BWL*. Lucius&Lucius, Stuttgart 2008.

Como se puede observar, el ciclo se divide en seis fases, donde en la segunda fase se decide por un sistema RCA para poder cuantificar y posteriormente analizar el consumo de recursos en un proceso específico. Dependiendo del sistema RCA elegido, se obtendrán diferentes medidas ambientales a implementar sobre el proceso.

Existen varios sistemas RCA, diferenciándose cada uno por la forma en que se asignan los costos asociados a un proceso y por las distintas consideraciones y objetivos a los que se llegan. Es por esto que para asegurar una optimización completa del proceso, es recomendable correr el ciclo de mejora continua con diferentes sistemas RCA.

2.1 Sistemas RCA

Como se mencionó, el ciclo de mejora continua basado en RCA puede ser aplicado a un proceso utilizando varios sistemas RCA. Algunos de estos sistemas son descritos en la figura 2.2.

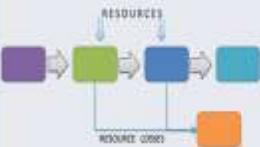
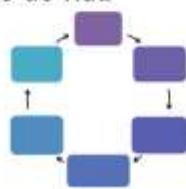
Sistema	Básicos	Ventajas	Limitaciones
Orientado al proceso 	Análisis y optimización del flujo de materiales (consumo de recursos) en cada paso del proceso	<ul style="list-style-type: none"> Visualización, análisis y optimización de los recursos paso a paso Posibilidad de estudio de sub-procesos 	No considera mejoras en material, diseño, etc.
Budget Matrix 	Identifica en una matriz los efectos y costos ambientales del proyecto	<ul style="list-style-type: none"> Da un reporte general Identifica factores a ser considerados 	No muestra soluciones de optimización
Costeo por objetivo 	Da un costo ambiental específico que no puede ser sobrepasado durante el proyecto	<ul style="list-style-type: none"> Enfocado en toda la vida del producto Considera costos monetarios 	<ul style="list-style-type: none"> Trabaja en asunciones Da lugar a vacíos de información Meta: mejorar procesos
Ciclo de vida 	Pondera impactos ambientales asociados con todas las etapas de vida de un producto	<ul style="list-style-type: none"> Dirigido a mejorar procesos, políticas, y consumo de recursos en cada etapa Evalúa impacto 	<ul style="list-style-type: none"> Trabaja con asunciones No considera costos \$ Usa mucho tiempo y recursos (\$)

Figura 2.2: Principales sistemas de contabilidad de consumo de recursos (RCA).

En general, se puede considerar que todo proceso tendrá como resultado un producto, sobre todo al hablar de procesos de manufactura. Las etapas de vida de este producto son:

- Planeación y diseño.
- Obtención y preparación de la materia prima.
- Manufactura del producto a través de un proceso específico.
- Uso del producto a través del consumidor.
- Disposición del producto o fin de su ciclo de vida.

En cada etapa de la vida del producto se pueden aplicar diferentes sistemas RCA, como lo muestra la figura 2.3.



Figura 2.3: Etapas del producto que contemplan los sistemas RCA.

A continuación, se explicará a detalle en qué consiste cada uno de estos sistemas RCA.

2.1.1 Sistema orientado al proceso

Este tipo de sistema requiere del uso de diagramas de flujo, como se observa en la figura 2.4, de forma que se puedan trazar todas las entradas y salidas del flujo de recursos (materiales, energía, mano de obra) a un nivel técnico, dando así introspectiva a todos los procesos.

La razón por la cual este sistema es considerado un sistema RCA es porque permite encontrar pérdidas, fugas y desperdicios de recursos y el origen de éstos.

El diagrama de flujo del proceso para este sistema RCA puede combinar recursos y costos.



Figura 2.4: Ejemplo de diagrama de flujo.

Un sistema orientado al proceso va más allá de identificar los problemas ambientales relacionados con los pasos técnicos de un proceso de producción, al ser parte de la perspectiva de este sistema otros procesos empresariales como lo son la logística y cadena de suministro, servicio al cliente,

innovación, administración, entre otros. Como consecuencia de esto, es que muchos sistemas de manufactura esbelta¹ como “Justo a Tiempo” involucran una perspectiva orientada al proceso.

Otra ventaja es que se pueden tener distinciones entre un proceso principal y un subproceso, obteniendo el detalle que se desee modelar.

2.1.2 Matriz de presupuesto ambiental

Es un sistema de información cuyo objetivo es preparar, por un lado, información sobre los efectos ambientales que no son notorios directamente en la operación y, por el otro lado, costos y utilidades ambientales que ya han sido previamente identificados y que por tanto son más predecibles y controlables. De esta manera se presenta un reporte en forma de presupuesto.

La matriz ambiental consiste en una matriz con columnas representando las diversas actividades de un proyecto y las filas representando los diferentes factores ambientales que deben ser considerados. Cada intersección es llenada indicando la magnitud (del -10 al +10) y la importancia (del 1 al 10) del impacto ecológico de cada actividad en cada factor ambiental, como también su costo. Es así como se puede obtener una evaluación del impacto de un sistema de producción completo, pudiendo identificar los procesos que más impactan en el medio ambiente que lo componen.

Este sistema tiene la desventaja de ser subjetivo.

2.1.3 Costeo por objetivo orientado al medio ambiente

Se define como “una herramienta de gestión de costes para reducir el costo ambiental total de un producto durante su ciclo de vida con la ayuda de la producción, la ingeniería, la investigación y el diseño”. Un costeo objetivo es el máximo costo en el que puede incurrir un producto de manera ambiental. Dicho de otra manera, que el impacto ambiental que represente un proyecto no sobrepase cierto presupuesto ambiental. Existen cuatro pasos esenciales para llevar a cabo este sistema:

- Definición del producto.
- Identificación y asignación de los costos ambientales asociados a cada paso del desarrollo del producto.
- Fijar el impacto ambiental objetivo y costos asociados por paso.
- Optimización de los procesos de manera que el costo objetivo sea alcanzado.

Este sistema RCA puede ser utilizado en conjunto con los dos sistemas RCA anteriores.

2.1.4 Contabilidad ambiental orientada al ciclo de vida

Es una técnica que evalúa los impactos ambientales asociados con todas las etapas de la vida de un producto. Su objetivo es, al conocer el impacto ambiental total causado, optimizar procesos,

¹ La manufactura esbelta es un modelo de producción donde se busca eliminar cualquier actividad que no agregue valor al producto final, actividades que este modelo denomina como “desperdicio”. Se deriva del sistema de producción implementado por Toyota entre 1948 y 1975.

mejorar políticas y, en consecuencia, crear una base sólida para la toma de decisiones. Su metodología se puede resumir en tres puntos:

- Compilación de un inventario de los principales flujos de recursos (entradas y salidas).
- Evaluar el potencial impacto ambiental que cada uno de estos flujos significa.
- Interpretación del resultado, optimización de procesos, toma de decisiones.

El ciclo de vida del producto contempla las fases mostradas en la figura 2.5.

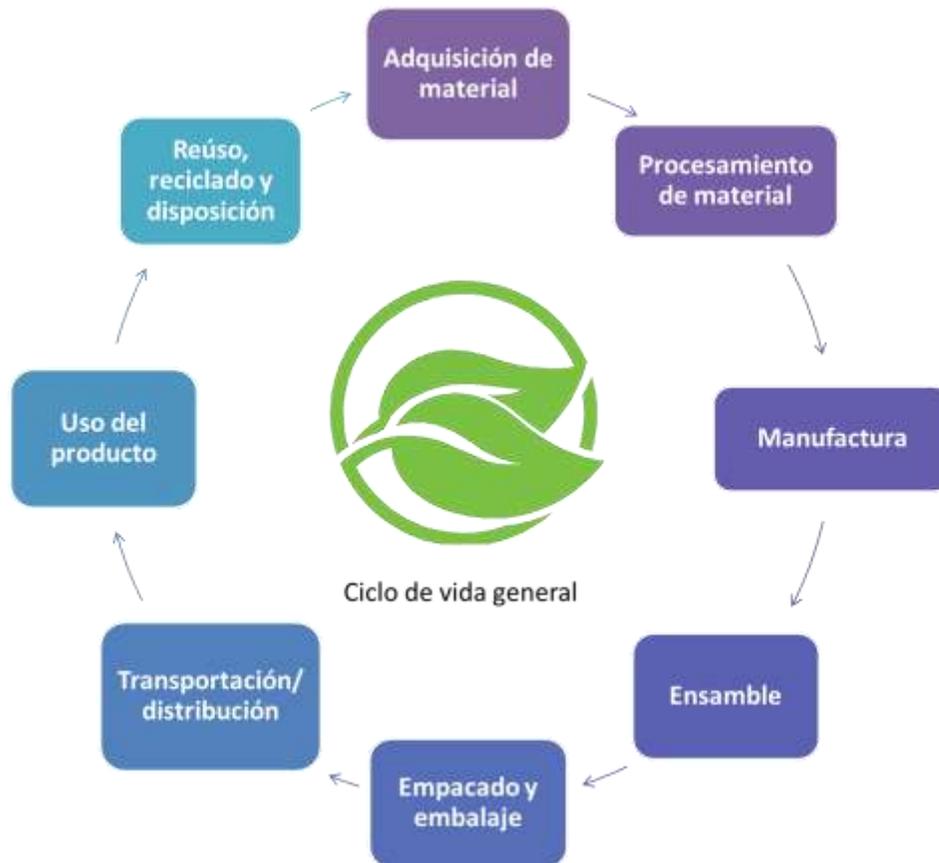


Figura 2.5: Ciclo de vida general de un producto. Fuente: Environmental Management Accounting Procedures and Principles, United Nations Subdivision for Sustainable Development, United Nations, New York, 2001.

2.2 Sistema orientado al proceso aplicado a forja en frío

En el forjado en frío, y para objeto de esta tesis, el sistema orientado al proceso es un sistema adecuado a utilizar, pues ayuda a identificar y cuantificar los recursos utilizados en cada paso del proceso, identificando de esta manera también los recursos que se podrán ahorrar (o minimizar su uso) al utilizar algún método de incremento de la vida de la herramienta.

En un panorama generalizado, podemos decir que el proceso de producción de una pieza forjada, visto desde un sistema orientado al proceso, puede verse como lo muestra la figura 2.6.



Figura 2.6: Producción de una pieza forjada, visto desde el sistema de contabilidad orientado al proceso.

Es importante notar que ésta es una vista muy general, por lo que la cantidad específica de cada recurso a utilizar y su tipo dependerá directamente del producto que se busca producir, además de su finalidad, etc.

Concentrándose específicamente en el paso de forjado en frío, se puede aprovechar la vista que este sistema da para entrar en detalle en los subprocesos, quedando el diagrama de flujo como lo muestra la figura 2.7. Así, para cada subproceso se pueden visualizar los recursos utilizados.

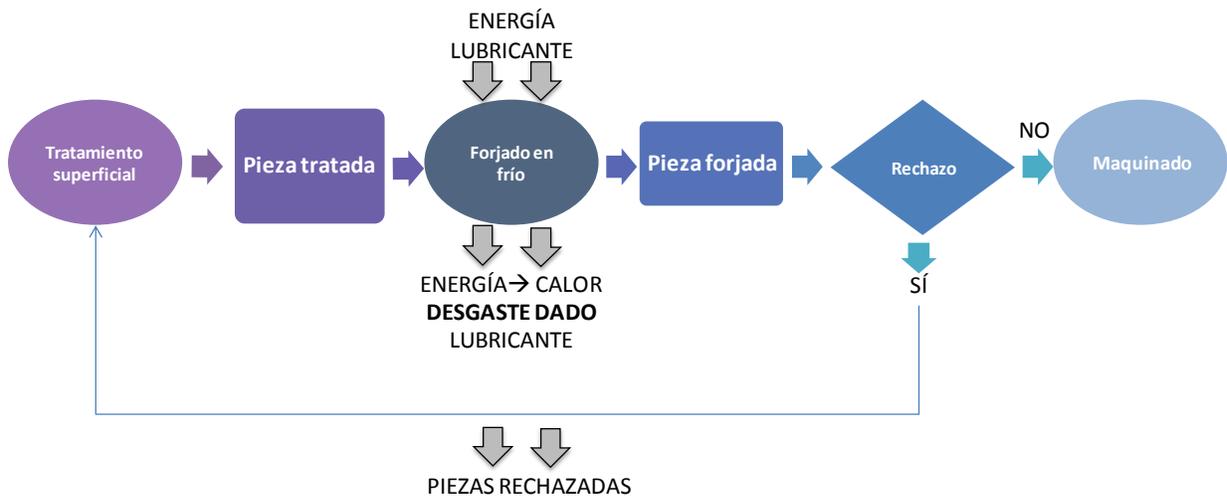


Figura 2.7: Forja en frío aplicada al sistema de contabilidad orientado al proceso.

Tema III: Incremento de la Vida de la Herramienta

La vida y la calidad de la herramienta son criterios decisivos en la producción industrial de productos forjados en frío, puesto que afectan directamente los costos de producción y, por ende, también en la competitividad del proceso. La herramienta es la base de una producción estable y de su desempeño.

El fallo de la herramienta es inevitable, por lo que la vida de ésta debe ser considerada en el cálculo del costeo de herramental, que puede llegar a representar hasta el 10% del costo total de producción y la planeación de suministro de la herramienta. Es por esto que prolongar su vida implica una inmediata reducción de costos.

Antes de poder decidir sobre algún método para alargar la vida de la herramienta, es necesario tener una visión clara de los problemas que la acortan y sus causas raíz.

3.1 Aspectos que influyen en la vida de la herramienta

Como ya se había analizado antes, en los procesos de formado convergen una serie de variables dependientes, cuyos parámetros afectan directamente la vida de la herramienta. Una división clásica de las razones y factores que influyen en la vida de la herramienta es:

- Específicas de la herramienta.
- Específicas de la aplicación de la herramienta.

Esta división cubre una extensa gama de factores que describen el sistema de forjado en frío por completo y todos los requisitos de calidad del producto final. Sin embargo, para tener un mejor análisis, se necesita de una división más específica.

De esta forma, podemos clasificar las razones del fallo de la herramienta en cuatro rubros:

- Diseño del dado.- Puntos críticos debidos al diseño que causan altas cargas internas.
- “*Layout*” o disposición del proceso.- Fuerza o presión excesiva de parte de la prensa que rebasen los límites aceptables, debidos a un grado extremo de llenado de la cavidad o malas condiciones del flujo del material.
- Material de la herramienta.
- Manufactura de la herramienta.- Un acabado superficial inadecuado lleva a una falla temprana.

El obstáculo principal a la hora de analizar la falla de la herramienta en el forjado en frío es la dificultad de separar la influencia de varios parámetros y sus interacciones del resultado final en el forjado.



Figura 3.1: Diferentes aspectos de la herramienta, pieza de trabajo y proceso de formado que determinan la vida de la herramienta al afectar el comportamiento del desgaste y la fractura de la herramienta.

En la figura 3.1 se pueden observar algunos factores que influyen en la vida de la herramienta, de los cuales se puede obtener una valoración adecuada al tener la mayor cantidad de datos posibles sobre la vida de una herramienta específica. Normalmente estos datos son experimentales, por lo que se pueden obtener diferentes resultados para un mismo diseño de la herramienta y disposición del proceso. Aplicando métodos estadísticos a estos datos, el comportamiento estocástico² de la vida de la herramienta puede expresarse en términos de una probabilidad de falla.

Un ejemplo para esto se puede observar en la figura 3.2, donde a lo largo de dieciocho meses se midió la vida de varias herramientas en términos del número de piezas forjadas antes de su falla. El producto y condiciones del forjado para este ejercicio fueron los mismos en todos los casos. A partir de esta muestra se grafica un histograma donde se observa el porcentaje de herramientas que fallaron en un rango determinado de piezas forjadas. Para esta muestra, se obtiene como resultado un rango promedio de entre 30 mil y 70 mil piezas forjadas antes del fallo. Utilizando las frecuencias obtenidas del histograma se puede estimar la probabilidad de falla de la herramienta a un número determinado de piezas forjadas.

² Un comportamiento estocástico está determinado tanto por factores predecibles del proceso como por elementos aleatorios.

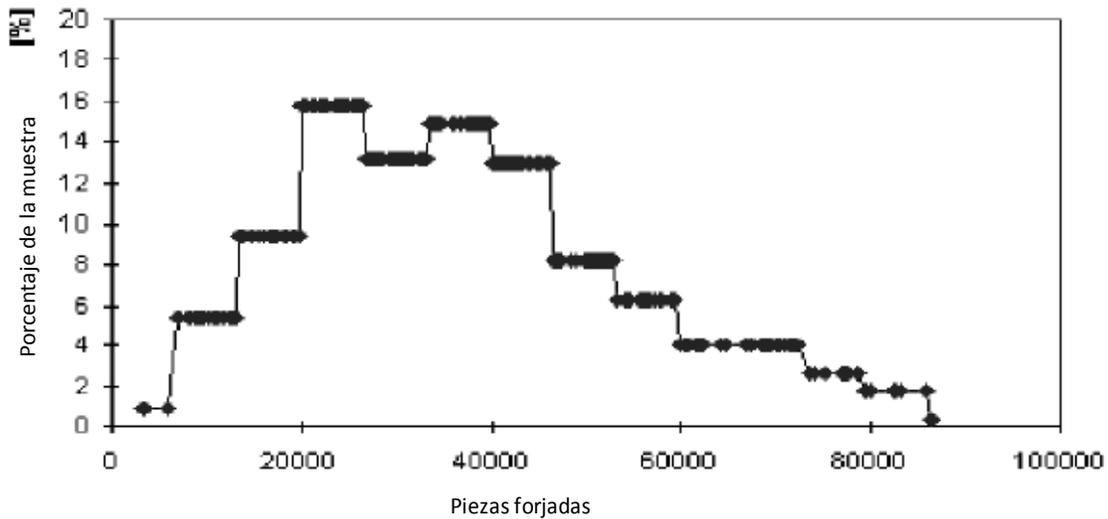
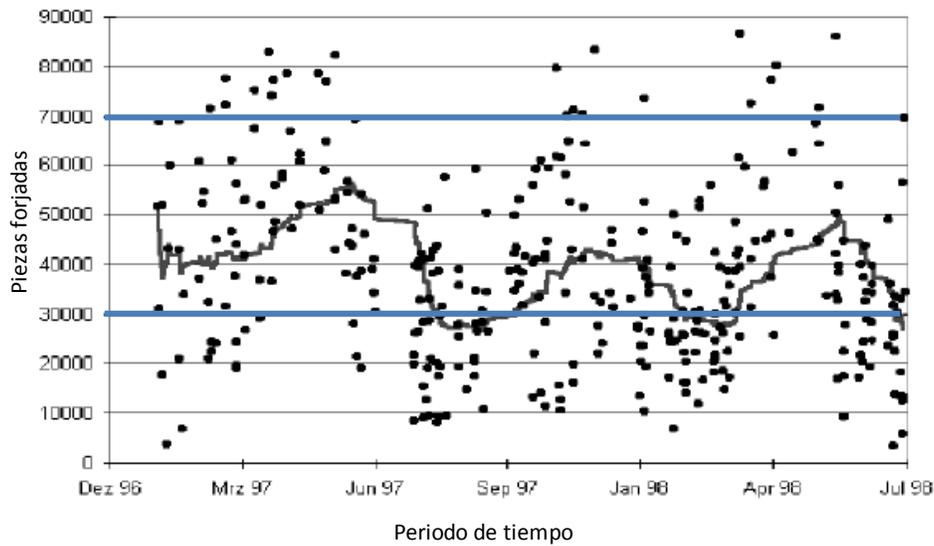


Figura 3.2: (a) Ejemplo para el análisis de los datos de la vida de la herramienta. Se muestra la vida de varias herramientas para un mismo producto, expresadas como cantidad de piezas forjadas, a lo largo de 18 meses. (b) Histograma de vida de la herramienta. Fuente: "Tool Life and Tool Quality, A Summary of the Activities of the ICFG Subgroup Tool life", M.Hänsel, T. Harnau, Principality of Liechtenstein

Otros métodos recientes para estimar la vida de la herramienta combinan simulación por elemento finito con métodos estadísticos para considerar la carga y el esfuerzo sufridos por la herramienta y así conseguir una predicción de la vida de la herramienta más realista.

Sin embargo, aún si este enfoque ayuda a entender la influencia de ciertos parámetros en la vida de la herramienta, no da una respuesta clara a los problemas observados en planta a la vida de la herramienta, por lo que no da una solución inmediata al cómo prolongarla. Por lo tanto, para lograr solucionar los problemas de la herramienta y prolongar su vida se debe tomar un enfoque más práctico, por medio de un proceso más sistemático.

3.2 Razones de falla de la herramienta

Los problemas con la vida de la herramienta surgen de dos posibles situaciones:

- La inesperada y repetida ocurrencia de falla temprana, lo que lleva a condiciones críticas en la producción con respecto al suministro de la herramienta y el costo que esto conlleva. Esta situación demanda acciones a corto plazo que consigan incrementar la vida de la herramienta rápidamente.
- Una corta vida de la herramienta permanente, en combinación con un alto costo del herramental y una presión constante por precios competitivos de parte del mercado. Esta situación requiere una reducción efectiva del costo de la herramienta y necesita de acciones a largo plazo que optimicen la vida de la herramienta.

Esta visualización de los problemas de la herramienta permite crear dos categorías de soluciones con actividades específicas:

- Conceptos a largo plazo de optimización de la vida de la herramienta para reducir costos y consumo de recursos.
- Conceptos a corto plazo de resolución de problemas para estabilizar la producción.

En este caso, utilizar como medio de visualización un sistema orientado al proceso (sistema que, como ya se mencionó anteriormente, también sirve para contabilizar los recursos utilizados) da la opción de identificar los problemas de la vida de la herramienta. De esta forma, se pueden rastrear los problemas a las causas principales: interacciones desfavorables de varios parámetros con cargas y resistencias³ internas o externas, causadas durante el desarrollo o la producción de la herramienta o el producto.

Problemas con cargas internas o externas en la herramienta pueden originarse debido a:

- Requerimientos críticos en el diseño del producto de parte del cliente.
- Diseño no favorable del proceso en términos de las condiciones del flujo del material, etc.
- Mal diseño del dado.

Problemas con la resistencia de la herramienta son principalmente causados por:

- Una mala elección del material de la herramienta y la manufactura de ésta.
- Condiciones de producción críticas causadas por un mal diseño del proceso de producción.

Los requerimientos del cliente influyen directamente en el diseño del proceso, al mismo tiempo que éste influye directamente en el diseño de la herramienta y la manufactura de ésta. Éstos, a su vez, influyen en la carga y la resistencia.

³ La resistencia de un material se define como su capacidad para resistir esfuerzos y fuerzas aplicadas sin romperse o adquirir deformaciones permanentes.

La falla de la herramienta resultante de la manufactura de la herramienta o de parámetros del proceso en condiciones de producción tiende a ser de una naturaleza estocástica. Por otro lado, fallas de la herramienta resultantes de requerimientos del cliente, el proceso, o el diseño de la herramienta aparecen sistemáticamente.

La distinción de los problemas de la herramienta entre relacionados con la carga o con la resistencia, originándose del desarrollo del proceso o del proceso de producción mismo, representa la base para crear una solución y el posterior incremento de la vida de la herramienta (figura 3.3). Dicho de otra forma, ayuda a dar los primeros indicios del origen de la falla y entonces a enfocarse en los principales problemas que influyen en la vida de una herramienta en particular, para así dar la solución que más convenga.

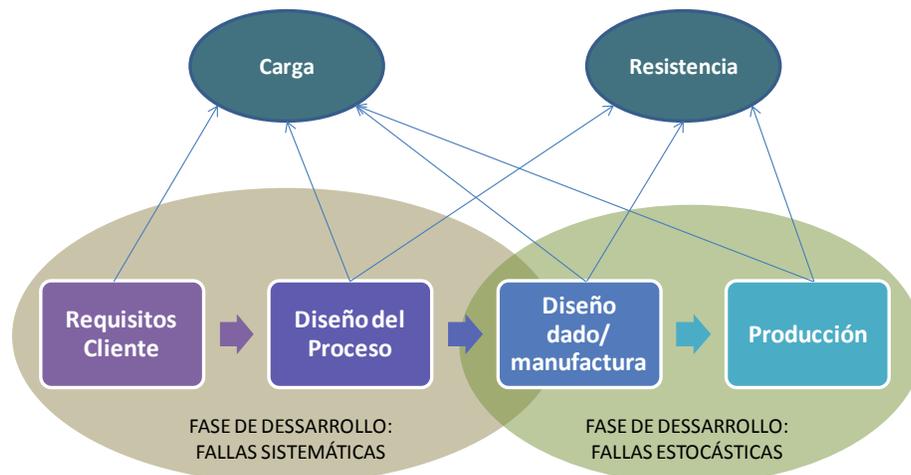


Figura 3.3: Problemas en la vida de la herramienta: interacciones del proceso de desarrollo y producción con la carga y resistencia. Fuente: "Tool Life and Tool Quality, A Summary of the Activities of the ICFG Subgroup Tool life", M.Hänsel, T. Harnau, Principality of Liechtenstein.

De esta forma, se puede hablar de cuatro causas principales para la falla de la herramienta:

- Sobrecarga.
- Desgaste.
- Deformación plástica.
- Fractura por fatiga, causada por esfuerzos normales y de corte.

Ahondaré en las causas más comunes para el forjado en frío. La primera es la fractura por fatiga, la segunda el desgaste, y la tercera la deformación plástica.

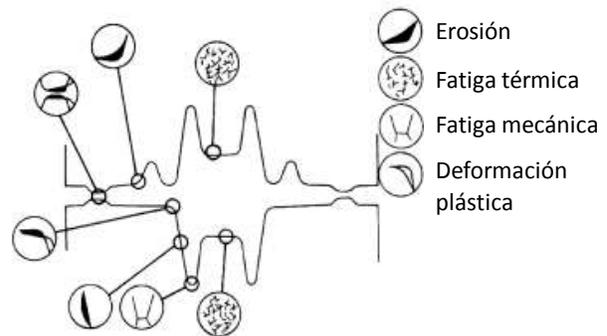


Figura 3.4: Ejemplos de causas de falla en forjado de precisión. Fuente: "Cold and Hot Forging: Fundamentals and Applications", ASM International, 2005.

1) Fractura por fatiga

Es el resultado de la aplicación de ciclos continuos de esfuerzos normales y de corte a los dados. Estos ciclos de esfuerzos son atribuidos tanto a la carga y descarga térmica como a la carga y descarga mecánica. La fatiga se acelera cuando hay puntos de concentración de esfuerzos, como lo son los radios pequeños.

Para poder maximizar la vida de la herramienta, es necesario conocer los mecanismos de falla principales para la fractura por fatiga.

El primero es la fatiga por fractura inducida mecánicamente. Este mecanismo ocurre cuando aparece una grieta en el dado y se propaga a través del dado debido a una carga mecánica.

La grieta aparece en un principio porque la carga presentada en la herramienta sobrepasa el esfuerzo de fluencia del material del dado en un punto crítico de concentración de esfuerzos, creando así una zona plástica. Esta zona plástica normalmente aparece durante el primer ciclo de forjado y lleva eventualmente a la aparición de grietas microscópicas, que pueden crecer y propagarse a la sección transversal del dado si se presentan esfuerzos de tensión durante la carga de la forja.

Como segundo mecanismo está la fatiga inducida térmicamente, la cual ocurre cuando una grieta es inducida y se propaga a través del dado debido a una carga térmica, que ocurre al fluctuar la temperatura de la pieza de trabajo drásticamente durante el forjado. Como es de imaginarse, ésta no es una causa común en el forjado en frío.

2) Desgaste

Ocurre al existir deslizamientos relativos entre la pieza de trabajo y el dado. Se puede definir al desgaste en el dado de tres maneras: como la remoción de material de su superficie, como la acumulación de material (tanto del dado como de la pieza de trabajo) en su superficie, o finalmente, como daños en su superficie.

El desgaste en el dado produce que se vayan perdiendo las tolerancias requeridas en el producto forjado, lo que lleva eventualmente a que se tenga que cambiar la herramienta.

En el forjado en frío existen cuatro principales mecanismos que provocan el desgaste de la herramienta, los cuales trabajan simultáneamente y que, por tanto, pueden llegar a ser difíciles de distinguir:

- Primero está el desgaste por adhesión. En este mecanismo, dos superficies se deslizan relativamente una contra la otra, adhiriéndose material de una superficie en la otra superficie. En el caso del forjado, parte de la superficie de la pieza de trabajo se adhiere a la superficie del dado.
- Segundo está el desgaste por abrasión, que ocurre cuando se remueve material de una superficie suave debido a la interacción con una aspereza en la superficie del otro cuerpo, o debido a la interacción con partículas duras sueltas entre ambas superficies. Dentro del

forjado este tipo de desgaste se da cuando se presentan en la pieza de trabajo o en el dado oxidación o partículas metálicas.

- En tercer lugar se encuentra el desgaste por fatiga. En este mecanismo de falla se forman pequeñas grietas en el dado y subsecuentemente se rompen en la forma de pequeños fragmentos, dejando de esta forma pequeños huecos en la superficie. En general, este tipo de fatiga es también resultado de los puntos de concentración de esfuerzos ocasionados por los defectos en la superficie de la herramienta, la química del lubricante (por ejemplo, lubricantes hechos a base de agua aceleran la fatiga del dado puesto que fragilizan al metal por medio del hidrógeno⁴), los esfuerzos residuales y el acabado superficial de la herramienta.
- Por último, el desgaste químico o corrosivo ocurre cuando la oxidación de una superficie es removida como resultado del contacto entre el dado y la pieza de trabajo en un ambiente corrosivo. En general, este tipo de desgaste es acelerado por el uso de lubricantes, sin embargo, si no se utiliza éste, el desgaste por adhesión (primer mecanismo de desgaste) se presenta de maneras más severas, causando estragos mayores.

Un modelo analítico para calcular el desgaste causado en una herramienta es:

$$V = \frac{KWL}{H}$$

Donde:

V = Volumen total de viruta causada por el desgaste

K = Coeficiente de desgaste experimental

L = Longitud de deslizamiento

W = Fuerza aplicada

H = Dureza del material más suave

Los valores para K han sido calculados para varias combinaciones de materiales de pieza de trabajo/dado. Los valores para una K basada en desgaste adhesivo pueden ser vistos en la siguiente tabla:

Condición de la superficie	Pares metálicos iguales	Pares metálicos desiguales
Limpia	5x10 ⁻³	2x10 ⁻⁴
Pobrementemente lubricada	2x10 ⁻⁴	2x10 ⁻⁴
Lubricación promedio	2x10 ⁻⁵	2x10 ⁻⁵
Excelente lubricación	2x10 ⁻⁶ a 2x10 ⁻⁷	2x10 ⁻⁶ a 2x10 ⁻⁷

⁴ Fenómeno conocido como fragilización por hidrógeno, donde varios metales y aleaciones se vuelven frágiles y se fracturan al ser expuestos a éste.

Si se está hablando de una K basada en un desgaste abrasivo, entonces el valor depende del tamaño, forma y orientación de las partículas interactuando con la superficie del dado. Usualmente varía entre 0.02 a 0.2 para un desgaste abrasivo de dos cuerpos y de 0.001 a 0.01 para desgaste abrasivo de tres cuerpos.

3) Deformación plástica

Ésta es la tercera razón más común de falla de la herramienta y resulta de la formación de presiones que exceden el esfuerzo de fluencia del material del dado.

3.3 Desafíos

Debido a las tendencias seguidas (y antes mencionadas) por el forjado en frío, existen desafíos para la industria del forjado en frío que deberán desarrollar nuevos enfoques para el incremento de la vida de la herramienta y para el diseño del sistema de forjado.

Costos y tiempo

Aún cuando el objetivo esencial del desarrollo de nuevas tendencias en el forjado en frío sea reducir costos y tiempo, hay ciertas tendencias, como la producción con geometría neta, partes de alta resistencia, o la integración de funciones que contrarrestan estos objetivos al causar un incremento en el costo y el tiempo de producción de la herramienta. Este incremento es principalmente debido a que se requieren dados hechos de un material más resistente y un diseño del sistema de producción mucho más complejo.

La complicación en el diseño del sistema de forjado puede incluir, por ejemplo, un sistema de anillos de precarga, debido a que el sistema de producción entero deberá resistir una carga mayor.

Además, la manufactura del dado en sí misma requiere de mayores tiempos y costos por la complejidad de los productos y, por lo tanto, del dado, aunado a un requisito de mayor precisión de parte de la herramienta. Evidentemente, a mayor complejidad, mayor tiempo y costo son requeridos.

Cargas incrementales

El uso de materiales de alta resistencia en la pieza de trabajo genera requerimientos mayores para la capacidad de carga de las herramientas en el forjado en frío, puesto que las cargas operativas en el dado incrementan. En consecuencia, el riesgo de falla por fatiga incrementa, por lo que el riesgo de falla temprana también, causado por una combinación crítica de factores que incrementan aún más la carga, como son el volumen de la pieza a forjar, la resistencia del material, la geometría de la pieza final, entre otros, aún cuando estos factores se encuentren dentro de las tolerancias especificadas.

El desarrollo de productos de bajo peso y el diseño de geometrías netas, que requieren de características geométricas como esquinas agudas, radios pequeños, engranes, diseños huecos, o secciones transversales pequeñas, han hecho que el material resulte expuesto a cargas altas. Éstas llevan al endurecimiento del material, haciendo que tenga que realizar largos movimientos

relativos a la superficie de la herramienta. Largos caminos de flujo y materiales altamente resistentes no sólo causan una carga mecánica en la herramienta, sino que también llevan a condiciones tribológicas críticas. Como consecuencia de esto, se agrava el desgaste a través de una normal de contacto muy alta y esfuerzos cortantes de fricción altos.

Estos desafíos mecánicos y tribológicos alcanzan, o inclusive exceden, los límites elásticos de una herramienta convencional y, para superarlos, se debe tener un enfoque diferente para el diseño de ésta.

Reproducibilidad

Como ya se había mencionado antes, las tendencias en el forjado en frío en muchos casos implican un producto, herramienta y proceso cada vez más complejo. Este desarrollo con frecuencia lleva a una alta sensibilidad del comportamiento del proceso a diferentes factores, lo que eleva cada vez más la dificultad para reproducir con una misma solución los mismos resultados. Un factor que puede influir en esto, por ejemplo, son las tolerancias del producto.

Precisión

Por la misma razón que se busca reproducibilidad en el proceso, pero también para lograr tolerancias dimensionales más estrechas y así lograr piezas con geometría neta o casi neta, los requerimientos de precisión son cada vez mayores. Esto afecta la producción de la herramienta y los procesos de acabado, además del paso del diseño de la herramienta.

Durante el diseño del proceso en general, la alta demanda con respecto a la pieza de trabajo hace que sea esencial el considerar el comportamiento elástico de la herramienta, del sistema herramental y de la prensa. Las desviaciones debidas a la carga durante el proceso de forjado influyen en las dimensiones finales del producto.

3.4 Soluciones

Nuevos Materiales y caracterización de éstos

La creciente demanda por productos que por sus características incrementan la carga en la herramienta, ha hecho que se haya tenido que aumentar el desarrollo de materiales.

El desarrollo de materiales no es solamente cuestión de la composición del material y las aleaciones que lo componen, sino también de cómo procesar los materiales de manera que sus características cambien. Dentro de la pulvimetalurgia se pueden encontrar varios ejemplos, al buscarse nuevas formas de generar polvos para aleaciones de aceros virtualmente libres de inclusiones, mejorando así la dureza del material final.

Como consecuencia de estos desarrollos en materiales, se ha logrado incrementar la capacidad de carga de la herramienta final, aumentando su vida y capacidad de producir piezas con tolerancias dimensionales cerradas. En términos de características del material de la herramienta, se requiere de lo siguiente:

- Alta resistencia a la compresión, dado que los esfuerzos de compresión son típicos en el forjado en frío.
- Alta dureza para combatir adecuadamente el desgaste de la herramienta.
- Alta tenacidad para soportar la carga y así evitar la fatiga.
- Alta homogeneidad de la estructura del material, que esté libre de inclusiones, de manera que la herramienta sea más resistente a la fatiga por fractura.

De aquí, la alta resistencia a la compresión y la alta dureza van de la mano. El problema se encuentra en que, para incrementar la resistencia a la fatiga y la tenacidad del material⁵, se requiere que se disminuya la dureza y la resistencia a la compresión.

Un ejemplo aplicado a la forja en frío se puede tomar de la industria automotriz, en el caso específico del forjado de un eje de cromo hueco, visto en la figura 3.5. El forjado de esta pieza se ha hecho desde hace ya varias décadas, sin haber habido modificaciones significativas a su geometría o a su secuencia de producción. Sin embargo, la demanda funcional a este producto, derivado de su utilización en motores cada vez más potentes, ha llevado a que la dureza requerida del eje hueco se eleve cada vez más, elevando la carga sobre la herramienta que lo forja. Esto acorta la vida de la herramienta, logrando forjar un máximo de 24,000 piezas.



Figura 3.5: Eje de cromo hueco, manufacturado por medio del forjado en frío.
Fuente: "Tooling Solutions for Challenges in Cold Forging", U. Engel, T. Schrader, et al, LTF, University of Erlangen-Nürnberg, Germany.

La solución a este problema se obtuvo modificando el material de la herramienta a un carburo cementado de grano más fino, proveído por un fabricante japonés. Con este cambio se logró aumentar la vida de la herramienta a 33,000 piezas.

Se puede caracterizar un material para herramienta a través de un diagrama de curvas S-N de Wöhler. En éste se describen las curvas de resistencia a la fatiga en términos de la tensión, S , frente al logaritmo del número de ciclos N , hasta la ruptura de una probeta del material a caracterizar (ver figura 3.6). Los valores S se toman como amplitudes de la tensión σ_a . La desventaja de una caracterización como esta es que se requiere llevar a cabo un gran número de pruebas para lograr una dispersión graficable, lo cual puede resultar costoso.

⁵ Tenacidad se define como la energía total que absorbe un material en condiciones de impacto antes de alcanzar la rotura.

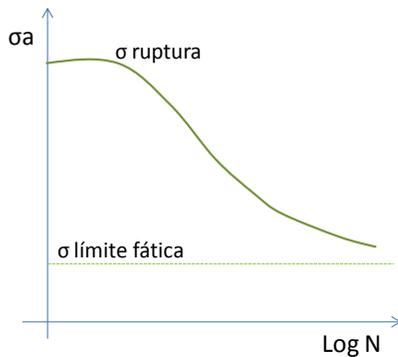


Figura 3.6: Ejemplo de curva S-N de Wöhler

Queda claro que en el esfuerzo por desarrollar materiales altamente resistentes a la fatiga, se debe disminuir la dureza de la herramienta, lo que, como ya se había platicado, lleva a disminuir también la resistencia al desgaste. Es por esto que el problema de prolongar la vida de la herramienta no puede solucionarse únicamente al desarrollar nuevos materiales. Existen otras soluciones, descritas a continuación, que pueden ser aplicadas en conjunto.

Pulido superficial

Como se había visto anteriormente, una de las causas más importantes de la falla en la herramienta es el desgaste, provocado por la remoción de material de la herramienta y por la acumulación de éste en la superficie del dado. De esta manera incrementa la fricción entre la herramienta y la pieza forjada, corriendo el riesgo de que el proceso comience a soldar en frío. Esta situación se evita al utilizar un buen sistema de lubricación, pero una superficie lisa en la herramienta también es necesaria. Un pulido superficial logra este efecto, que como efecto agregado dejará también una mejor calidad de acabado superficial en las piezas forjadas.

Las herramientas son pulidas por lo general a una calidad de espejo, puesto que esta calidad de pulido se considera como la óptima para obtener un buen desempeño en la herramienta.

Muchas herramientas son pulidas manualmente, lo que da una cierta flexibilidad, dado que se logra alcanzar una calidad de espejo en herramientas con geometría compleja. Sin embargo, cuando se demanda un alto número de herramientas iguales (o alta reproducibilidad de la herramienta), el pulido manual tiene efectos no deseados como la variación en la calidad del pulido, variación en la vida de las herramientas, alta dependencia a trabajadores con gran habilidad para el pulido. Como consecuencia, hay variación en los costos y en la estabilidad de la producción y por ende en el número de recursos consumidos.

Esto ha llevado a la creación de robots de pulido. Así, los grados de aspereza requeridos para el forjado en frío (normalmente de 0.025 a 0.04 μm) son obtenidos con mayor facilidad, teniendo control de la calidad del pulido.

Tratamientos de superficie

Como ya se había visto, dos de los fenómenos más importantes que limitan la vida de la herramienta son la fatiga y el desgaste. Donde, enfatizando nuevamente, la fatiga es causada por la carga cíclica de esfuerzos a la que es sometida la herramienta, mientras que el desgaste es causado por la pérdida de material en la superficie del dado.

De esta forma, la superficie de la herramienta y la interacción de ésta con el material de trabajo obtienen una gran importancia al prolongar la vida de la herramienta. Una mejor interacción

tribológica es el propósito de los tratamientos de superficie, teniendo cada uno un método distinto para lograrlo.

Revestimientos

El primer método de tratamiento de superficies a tratar son los revestimientos, cuyo propósito principal es reducir la fricción entre la herramienta y el material de trabajo.

El método para reducir la fricción más común es el uso del lubricante, sin embargo, al utilizar un revestimiento se puede obtener un mejor desempeño en el proceso.

Las tecnologías de aplicación de los revestimientos a la herramienta más ampliamente utilizados son los métodos de deposición química de vapor (CVD por sus siglas en inglés) y deposición física de vapor (PVD por sus siglas en inglés). En estos métodos, que explicaré con detalle más adelante, se obtienen revestimientos homogéneos, con excelente acabado superficial. Otra ventaja es que prácticamente son aplicables a cualquier material.

Tanto por CVD como por PVD se obtienen revestimientos de densidad y acabado superficial similares. Del mismo modo, los materiales de recubrimiento son similares, siendo los más comunes el TiN (nitrado de titanio), ZrN (nitrado de circonio), CrN (nitrado de cromo) y TiAlN (nitrado de titanio aluminio), materiales que se utilizarán dependiendo de las propiedades finales que se requieran obtener.

Se deben de tener en cuenta diferentes factores para elegir cuál proceso de aplicación es el más óptimo, así como las condiciones a las que estará expuesto el revestimiento:

- Carga
- Movimiento
- Entorno químico (lubricante)
- Temperaturas

También se deben de considerar las propiedades del revestimiento que se desean obtener:

- Dureza
- Resistencia
- Densidad/ porosidad
- Coeficiente de expansión térmico
- Resistencia a la corrosión y al desgaste
- Material

CVD

El método CVD (*Chemical Vapour Deposition*) es un proceso que existe desde principios del siglo pasado, y consiste, básicamente, en vaporizar un metal y utilizar una serie de reacciones químicas sobre el sustrato de la herramienta para adherir el vapor.

Se puede dividir el proceso en cuatro etapas principales:

- 1) Creación del vapor reactivo.
- 2) Transporte del vapor.
- 3) Reacción química entre el vapor y el substrato calentado.
- 4) Remoción de subproductos resultantes.

El proceso completo, ilustrado en la figura 3.7, debe ser llevado a cabo en un contenedor o reactor debido a la naturaleza volátil de los químicos implicados. Este contenedor se encuentra a una presión tal que $P \leq P_{atm}$, y a una temperatura que puede alcanzar los 1500°C.

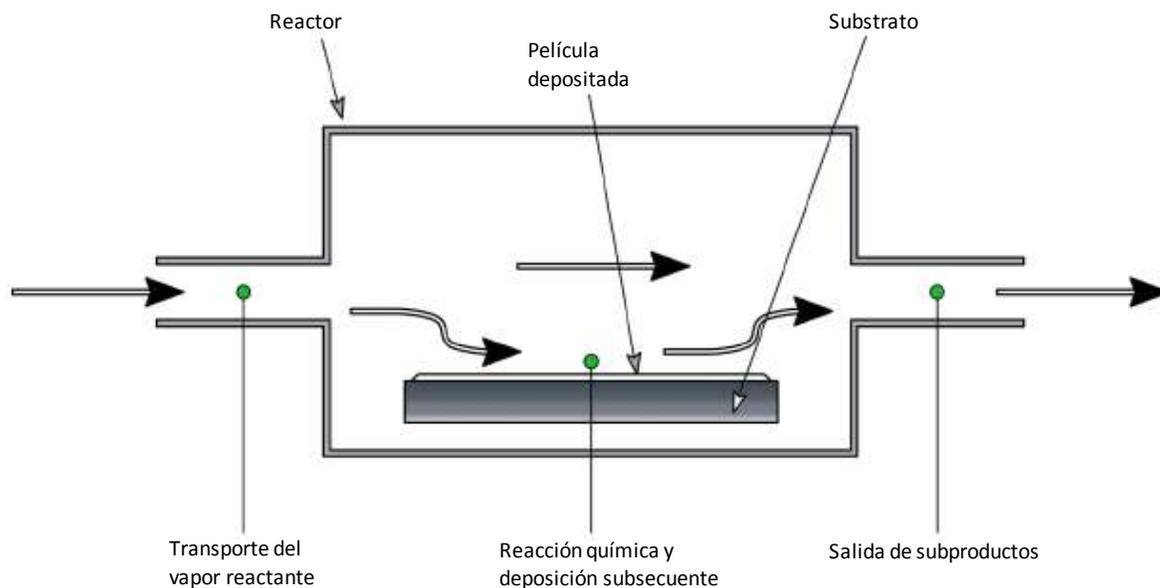


Figura 3.7: Proceso básico de aplicación de revestimiento por CVD. Fuente: "PVD and CVD Coatings for the Metal Forming Industry", S. Montgomery, D. Kennedy, N. O'Dowd, Dublin Institute of Technology.

Los revestimientos depositados contienen pocos poros, y son, generalmente, de un espesor mayor a los depositados por PVD, midiendo entre 10µm y 1 mm. Sin embargo, las propiedades en general del revestimiento dependerán de varios factores como lo son el material al que se le aplicó, la temperatura de deposición, la presión dentro del contenedor, y el tipo del gas portador del metal vaporizado.

Dentro de las ventajas de este proceso se encuentran:

- Aplicable a materiales que van desde el cromo y el níquel, hasta metales de tipo refractario.
- Se mejoran las propiedades mecánicas y termodinámicas de la herramienta.
- Aumenta resistencia a la corrosión.
- Aumenta la resistencia al desgaste.

- Mayor dureza de la herramienta.

La mayor desventaja de este proceso es que produce vapores tóxicos, cuya eliminación conlleva altos costos tanto económicos como ambientales.

PVD

El método PVD (*Physical Vapour Deposition*), al contrario de CVD, no tiene como resultado del proceso subproductos que puedan dañar el medio ambiente, por lo que además de reducir costos ambientales, se reducen costos monetarios al no tener que disponer de estos químicos y gases dañinos. Otra ventaja de éste método sobre el de CVD es que se lleva a cabo a menores temperaturas.

Las principales características que da un recubrimiento hecho por PVD a un producto son la resistencia al desgaste y la resistencia a la corrosión química.

Una gran desventaja de este proceso es que la deposición del recubrimiento es hecho al nivel de visión, por lo que herramientas con geometrías complicadas no pueden ser recubiertas, al no obtener un recubrimiento con espesor constante.

Existe una gran variedad de formas para llevar a cabo el proceso PVD, sin embargo, se puede hablar de tres pasos básicos existentes en todos:

- 1) Vaporización del material.
- 2) Transporte de los átomos del material hacia el sustrato.
- 3) Deposición del material.

Este proceso se ilustra en la figura 3.8.

Un ejemplo de un proceso PVD es por medio de una deposición de salpicadura, o "*Sputtering deposition*" en inglés. En este proceso, al producir el vapor a depositar, el material del recubrimiento es bombardeado con iones. La energía cinética de los iones es tan grande que, cuando ocurre el impacto, átomos del material son expulsados y enviados hacia el sustrato de la herramienta. Por lo general, el medio en el que ocurre este proceso se encuentra a presiones por debajo de la P_{atm} , por lo que se considera estar al vacío.

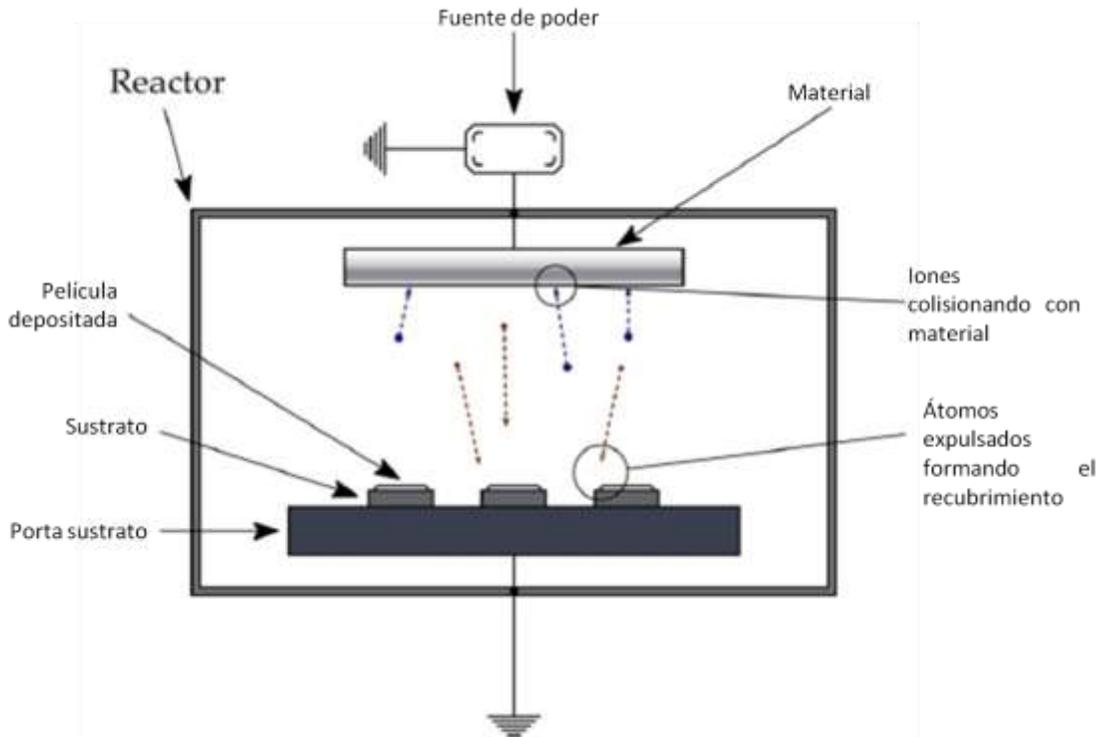


Figura 3.8: Proceso de aplicación de revestimiento PVD de salpicadura. Fuente: "PVD and CVD Coatings for the Metal Forming Industry", S. Montgomery, D. Kennedy, N. O'Dowd, Dublin Institute of Technology.

Las condiciones normales de operación para un proceso de aplicación por CVD son:

- $200^{\circ}\text{C} < T < 300^{\circ}\text{C}$
- Reactor con baja presión 0.5-1 Pa
- Velocidad de deposición aproximada de $0.1 \mu\text{m}/\text{min}$
- Amplia variedad de materiales de deposición: de níquel hasta aleaciones y cerámicos

En este proceso, al igual que en CVD, se incrementa la dureza, la resistencia a la corrosión y al desgaste en la herramienta.

Bruñido con rodillo duro

Su objetivo principal es mejorar la resistencia a la fatiga de la herramienta. Este proceso consiste en una bola o rodillo cerámica que rueda sobre la superficie de la herramienta a altas presiones, obteniendo dos efectos finales:

- Los puntos de rugosidad son aplacados al desplazar las protuberancias de la herramienta y con ellas llenar sus depresiones, lo que resulta en una mejora en el acabado superficial de la herramienta, disminuyendo su grado de rugosidad.
- Se incrementa la dureza de la superficie de la herramienta.

El proceso se puede observar en la figura 3.9:

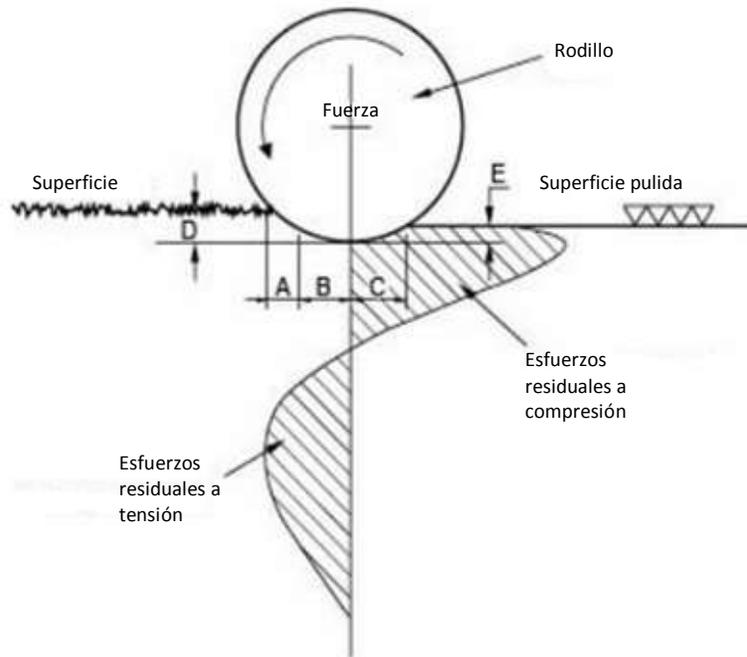


Figura 3.9: Proceso de bruñido con rodillo duro. Fuente: "Tool life enhancement in cold forging by locally optimized surfaces", K. Wagner, R. Völkl, U. Engel, University of Erlangen-Nürnberg.

En el área de transferencia A, el rodillo presiona gradualmente la superficie, excediendo el punto máximo de fluencia del material de la herramienta en el punto B, comenzando así la deformación plástica.

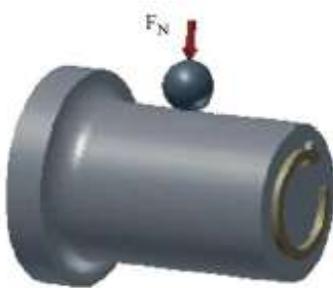


Figura 3.10: Bruñido con rodillo duro

Fuente: "Tool life enhancement in cold forging by locally optimized surfaces", K. Wagner, R. Völkl, U. Engel

Luego de que la carga máxima es alcanzada justo debajo del rodillo, la restauración elástica en el área C comienza, lo que hace que el rodillo se separe gradualmente de la superficie procesada. Durante la deformación plástica, la superficie experimenta un endurecimiento, lo que hace que los esfuerzos residuales a tensión que existían en la herramienta sean transformados a esfuerzos residuales a compresión, situación que aumenta la resistencia a la fatiga de la herramienta.

Por otro lado, la resistencia al desgaste es aumentada al pulir las protuberancias y cerrar las micro grietas en la superficie, impidiendo así su propagación e inclusive la iniciación de éstas.

Tratamiento térmico de superficie por láser

Este tratamiento modifica las propiedades de la superficie de la herramienta por medio de una transformación martensítica, mejorando de esta forma la resistencia de la herramienta al desgaste.

Básicamente, el proceso consiste en un punto de láser con un diámetro aproximado de 20 mm, que va recorriendo un camino predefinido, penetrando la superficie aproximadamente 1 mm. De esta forma se endurece el área de la herramienta que es recorrida con láser.

Durante este proceso las regiones calentadas se transforman de austenita a martensita⁶, incrementando así su dureza. Adicional a esto, debido a los gradientes en la expansión térmica que ocurren durante el tratamiento, se inducen esfuerzos residuales a compresión, los cuales, como ya se había mencionado, mejoran la resistencia de la herramienta a la fatiga.

Otra de las ventajas de este proceso es que también se crea un recocido del metal en las fronteras del tratamiento, lo que en áreas sujetas a la fatiga es una ventaja, pues baja la dureza del material e incrementa la tenacidad de éste.

Texturización de la superficie por medio de láser

La fricción y el desgaste dependen de la topografía de las superficies de la herramienta y de la pieza de trabajo. Como ya se había visto antes, en el caso de la fricción, la lubricación es un parámetro muy importante.

Para que haya una buena lubricación durante el proceso, es necesario que tanto la superficie de la herramienta como la de la pieza de trabajo transporten una cantidad adecuada de lubricante. El transporte del lubricante se lleva a cabo en los microporos que se presentan en la superficie de la herramienta y de la pieza de trabajo.

Para evitar el desgaste en la herramienta, se debe tener una superficie en la herramienta con acabado espejo, como ya se vio con anterioridad. La desventaja de esta superficie es que no transporta, almacena ni distribuye el lubricante.

Este es el problema en el que se enfoca este tratamiento de superficie, al crear microporos con una geometría en la superficie de la herramienta que actúan como bolsas de lubricante, permitiendo así una correcta transportación, almacenamiento y posterior distribución del lubricante. Una representación gráfica de estos microporos y su vista real pueden ser observadas

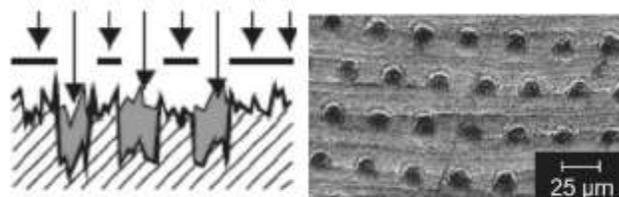


Figura 3.11: Esquema de las bolsas de lubricante y vista real sobre la superficie de la herramienta. Fuente: "Tooling Solutions for Challenges in Cold Forging", U. Engel, T. Schrader, et al, LTF, University of Erlangen-Nürnberg, Germany.

⁶ Austenita.- Su estructura es la FCC, y se da en temperaturas de 900 a 1300°C en el hierro. Aceros con esta estructura pueden absorber mayor cantidad de carbono.

Martensita.- La fase cristalina BCC en aleaciones ferrosas. Los aceros con esta estructura son los más duros y resistentes. La transformación martensítica tiene lugar a velocidades de temple muy rápidas.

en la figura 3.11. Como ventaja adicional, estos microporos atrapan también partículas de material desprendidas por el desgaste de la herramienta y del material de trabajo.

Simulación y modelado por medio de Elemento Finito

Como se vio previamente, si se tiene un diseño óptimo del proceso de formado y del dado de forjado se pueden evitar defectos en el producto inducidos por el flujo del material, reducir los esfuerzos por contacto, mantener la deflexión de la herramienta dentro de una tolerancia específica y, finalmente, reducir la probabilidad de falla de la herramienta. Estas optimizaciones pueden ser logradas a base de prueba y error, lo que implican costos y tiempo. Es aquí donde entra la simulación numérica por medio de modelado por elemento finito (o FEM, por sus siglas en inglés).

Un análisis hecho con FEM contempla principalmente la optimización del flujo del material, la interacción entre éste y la herramienta y el diseño del herramental. De esta manera se asegura lograr el diseño óptimo del dado y su ensamble, reduciendo así los costos que conllevaría hacer las pruebas físicas.

En el caso de la optimización del flujo del material de trabajo, se evitan defectos como las vueltas, los dobleces, y los colapsos de material en el producto final, un ejemplo puede observarse en la figura 3.12.

Los dobleces y vueltas aparecen cuando hay superficies libres del material, y al momento del formado, comienzan a torcerse sobre sí mismos. Estos defectos provocan que haya puntos críticos de concentración de esfuerzos en el producto final que pueden ocasionar su ruptura, o que tenga que ser desechado por no cumplir con los estándares de calidad. Los colapsos, por otro lado, son surcos formados por el mismo material a la hora del formado.

Evitar este tipo de defectos en el producto implica modificar el diseño del dado. Esta parte de la simulación del proceso por medio de FEM no tiene como objetivo primario prolongar la vida de la herramienta, sin embargo es importante mencionarlo al ser una ventaja.

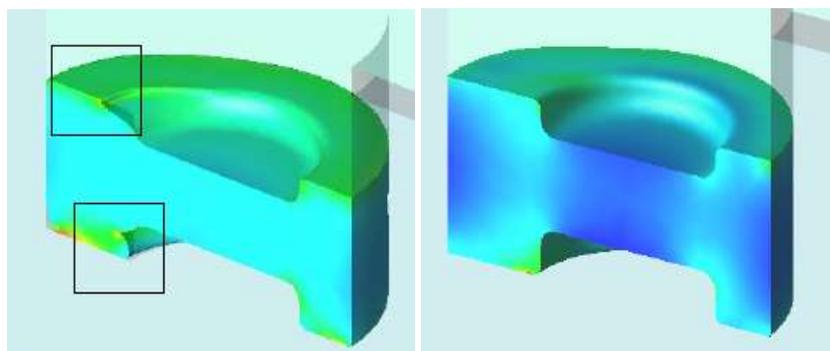


Figura 3.12: Resultado de la simulación FEM de un producto defectuoso con vueltas y uno exitoso. Fuente: "Optimization of Cold Forging Process Technology by Means of Simulation", H. Muntinga, N. Biba, Hendrik Muntinga Ingenieurbüro, QuantorForm Ltd.

En cualquier operación de formado, específicamente en este caso para el forjado en frío, el diseño de la herramienta es crítico desde el punto de vista técnico y económico. Por lo mismo, toma mayor importancia aumentar la vida de la herramienta y el reducir el costo de ésta. Esto se logra por medio de otros dos aspectos que contempla un análisis por medio de FEM: la interacción entre el material y la herramienta y el diseño óptimo del dado y el ensamble.

Normalmente, el software que se utiliza para simular en FEM es capaz de calcular punto a punto sobre la herramienta, el producto y el ensamble la distribución de los esfuerzos, las deformaciones elástica y plástica, la fricción, el endurecimiento y la fuerza de forjado (un ejemplo se ve en la figura 3.13). Conociendo estos datos se pueden prevenir, sobre la herramienta y el ensamble final, fallos ocasionados por sobrecarga, fatiga ocasionada por deformación no deseada, o el desgaste por abrasión.

Se pueden hacer modificaciones en el diseño, a través de una simulación, que prevengan la deformación elástica excesiva y que distribuyan la carga sobre la superficie del dado. Inclusive, se puede cambiar el material del dado, simulando así el proceso con las características específicas del material.

Al conocer el daño que la herramienta sufre en cada ciclo por medio de una simulación, se puede predecir la vida útil que ésta tendrá.

Las principales ventajas que se consiguen de simular por medio de FEM son:

- Predecir el flujo del material de trabajo, y el flujo de los granos que lo conforman, además de conocer las dimensiones finales del producto y evitar defectos producidos por el flujo.
- Predecir temperaturas de operación, las propiedades mecánicas del producto y las condiciones de fricción.
- Reducir la cantidad de viruta debida a un maquinado posterior.
- Incrementar y controlar la vida de la herramienta.

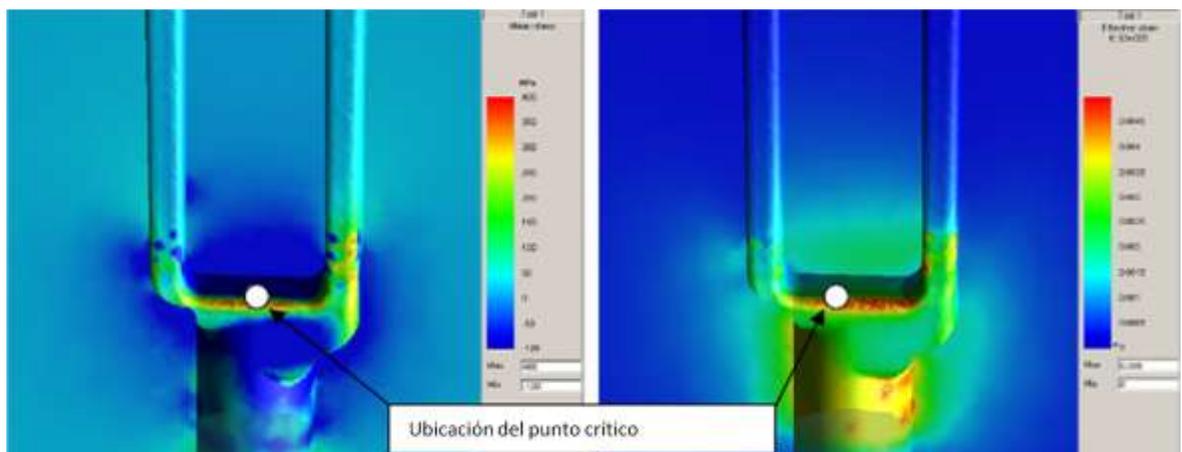


Figura 3.13: Ejemplo de simulación FEM donde se puede ver la distribución de los esfuerzos sobre la superficie interna de un dado utilizando el software QForm. Fuente: "Optimization of Cold Forging Process Technology by Means of Simulation", H. Muntinga, N. Biba, Hendrik Muntinga Ingenieurbüro, QuantorForm Ltd.

Tema IV: Análisis de resultados

Como se vio anteriormente, incrementar la vida de la herramienta se refleja directamente en un consumo de recursos más bajo a lo largo de toda la cadena de producción.

Sin embargo, ésto involucra analizar las razones por las que ocurre el fallo en la herramienta y sopesar cuál es la tecnología más adecuada que solucionará esto. También implica, por medio de un sistema RCA, contabilizar la cantidad de recursos y costos antes y después de la aplicación de la tecnología, de manera que se cuantifica cuánto se prolongó la vida de la herramienta y el impacto que se obtuvo de éste.

Por medio de un ejemplo de la vida real se puede demostrar cómo se conjunta todo lo anterior.

4.1 El producto: trípodos



Figura 4.1: Trípodos, fuente: TK Presta.

Los trípodos, como los de la figura 4.1, sirven para juntas homocinéticas en aplicaciones automotrices, principalmente diferenciales. Su proceso de producción es por forjado en frío, fresando al final el centro.

En este ejemplo, el material del cual están compuestos los trípodos, es acero AISI 1045, cada uno tiene un peso aproximado de 0.2 kg y cuestan 5€ cada uno. Sus dimensiones se pueden apreciar en la figura 4.2.

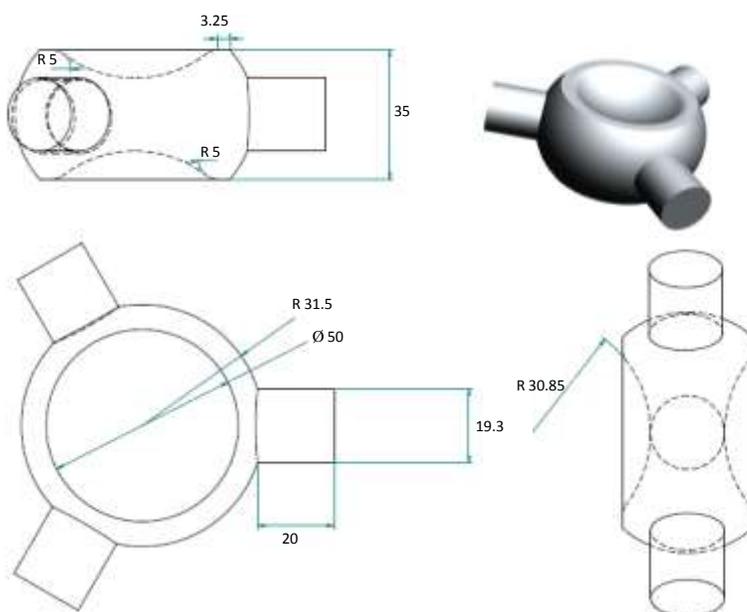


Figura 4.2: Trípedo simulado en Solid Edge, las dimensiones se encuentran en mm.

Por otro lado, la herramienta a utilizar durante el proceso es un dado cerrado de HSS 5600 endurecido a 62 HRC cuyo peso es aproximadamente de 5 kg. La principal razón de falla es el desgaste. Cada herramienta tiene un costo de 1500€.

Cada año se requieren producir aproximadamente 2,307,000 trípodos.

4.2 Caracterización del proceso

Para el proceso de forjado del trípodo, el lubricante utilizado durante el forjado es una mezcla de agua con aceite.

El forjado será en dado cerrado, como se mencionó anteriormente, donde la geometría inicial del material será un cilindro de 50 mm de diámetro y 50.93 mm de altura.

En la simulación del proceso por medio de FEM mostrada en la figura 4.3 se puede observar cómo se incrementa, conforme avanza el forjado del producto, el contacto del acero 1045 con el dado.

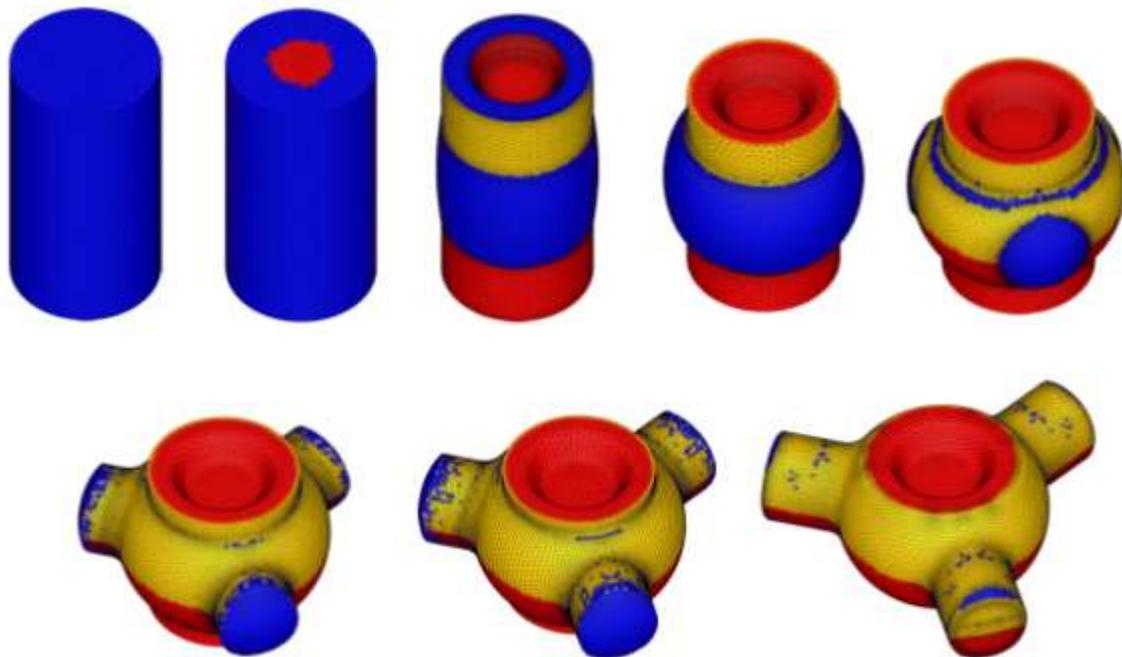


Figura 4.3: Simulación de forjado en frío para un trípodo, mostrando para cada paso del proceso el contacto del material con el dado. Fuente: Afdex.

Dentro de la misma simulación, podemos conocer los esfuerzos reales a los que se someterá al material durante el proceso. Estos esfuerzos los podemos observar en la figura 4.4.

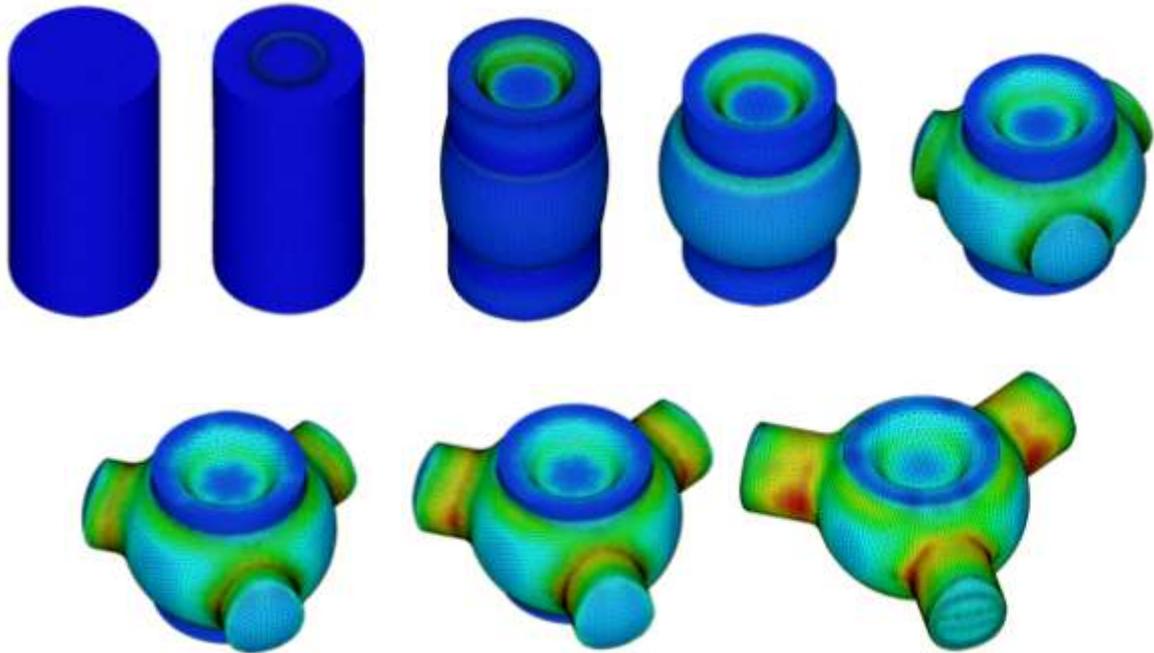


Figura 4.4: Simulación de forjado en frío para un trípodo, mostrando los esfuerzos de fluencia sufridos por el material en cada paso. Fuente: Afdex.

Dónde el máximo esfuerzo de fluencia sufrido por la pieza se calcula de la siguiente manera:

$$\sigma = K \varepsilon_R^n$$

Caracterizado para el acero 1045, obtenemos que:

$$\varepsilon_R = \ln \frac{h_o}{h} = \ln \frac{0.5093}{0.193} = 0.97$$

$$\sigma = 950(0.97)^{0.12} = 946.57 \text{ MPa}$$

Para calcular la fuerza de forjado necesaria, por ser, como ya se había mencionado, en dado cerrado, se tiene que:

$$F_f = K_f \sigma A_f$$

El área proyectada, A_f , se obtuvo de acuerdo a la simulación del trípodo en Solid Edge:

$$A_f = 146.7 \text{ cm}^2 = 14,670 \text{ mm}^2$$

El factor de forma se deberá calcular, de nuevo, por ser en dado cerrado, de acuerdo a la complejidad de la geometría final del trípodo. Para obtener un estimado de la complejidad:

$$C = \frac{h_{fmax}}{h_{fmin}} = \frac{h_f}{d_t} = \frac{35 \text{ [mm]}}{19.3 \text{ [mm]}} = 1.81$$

Al $C \leq 2$;

$$K_f = 6$$

Por lo tanto:

$$F_f = 6(946.57)(4275.25) = \frac{2428 \times 10^4 [N]}{9810} = 2,475.12 [ton]$$

$$F_f = 2,575.12 [ton]$$

Esto significa, que para el forjado de un trípodo con las características antes mencionadas, se requiere de una prensa de forjado que imprima una fuerza mínima de 2.58 kton.

4.3 Incremento de la vida de la herramienta: recubrimiento PVD

En el proceso de forjado en frío normal, bajo las anteriores características, se obtienen por cada herramienta utilizada:

- 115,350 trípodos.
- 1,323 piezas rechazadas.
- 1,291 minutos de paro para mantenimiento.
- Causa principal del fallo de la herramienta: desgaste de la herramienta.

El sistema RCA orientado al proceso para este ejemplo en particular quedaría como lo muestra la figura 4.5.

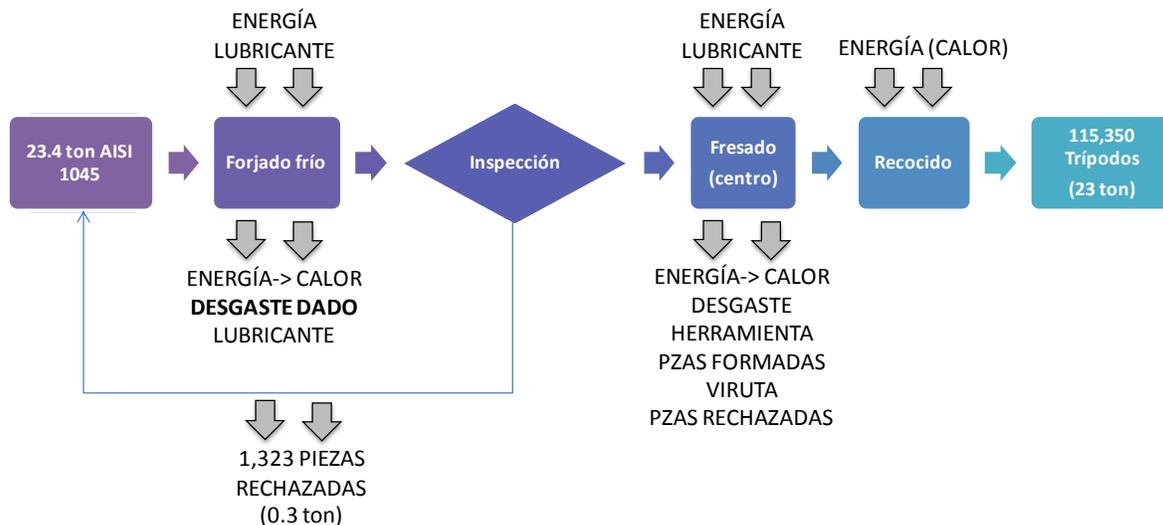


Figura 4.5: Proceso de forjado para los trípodos de acuerdo al sistema RCA.

Para este ejemplo, se utilizó un recubrimiento PVD sobre la herramienta hecho de TiAlCN. Específicamente, utilizaremos una marca comercial, de la compañía italiana Lafer. Debido al

material de los trípodos (AISI 1045) y al de la herramienta (HSS 5600), se utiliza el PVD de TiAlCN llamado Duplex Lafer- Red Speed.

Este tratamiento previene la adhesión y la abrasión entre herramienta y material forjado al reducir la aspereza de la superficie del dado, bajando la fricción entre dado y pieza forjada, dando mayor resistencia al desgaste.

De esta forma, se incrementa la calidad de las piezas forjadas, se disminuyen el número de trípodos rechazados por no cumplir con los estándares de calidad, y se tienen menos paros de máquina para realizar mantenimiento.

Las características específicas de este producto anunciadas por Lafer, son:

- Espesor del recubrimiento: 1-3 μm .
- Dureza: 3200 HV.
- Temperatura a la que se coloca el recubrimiento: 450°C.
- Máxima temperatura de trabajo: 600°C.
- Color: cobrizo, tendiendo a rojo.

Algunos ejemplos de herramientas cubiertas con Duplex Lafer Red Speed pueden ser observados en la figura 4.6.

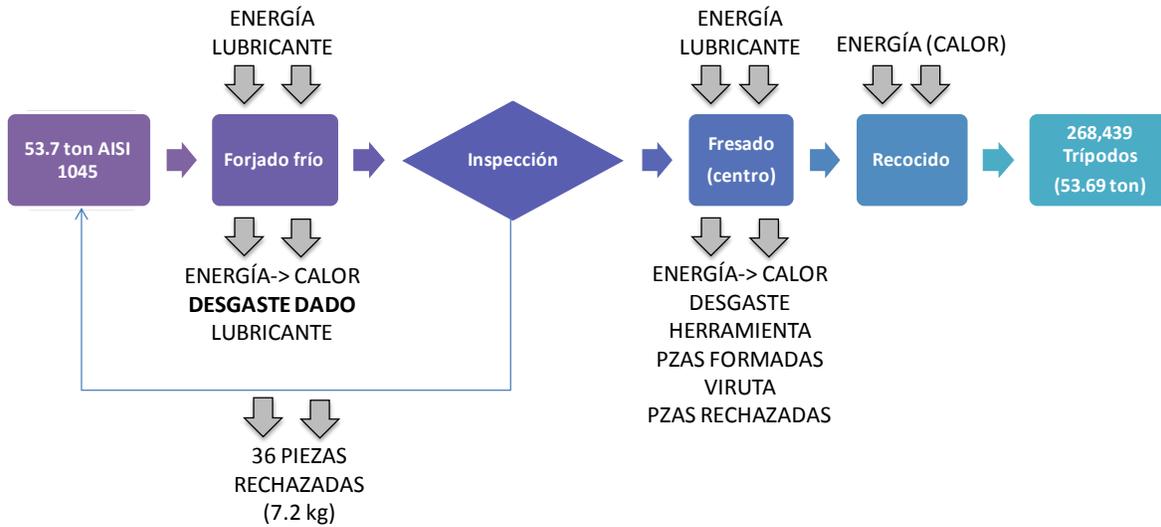


Figura 4.6: Ejemplos de moldes con un recubrimiento PVD Duplex Lafer Red Speed. Fuente: Lafer.eu.

Aplicando esta tecnología al proceso de forjado de los trípodos, obtenemos los siguientes resultados:

- 268,439 piezas forjadas (+133%).
- 36 piezas rechazadas.
- 14 minutos de paro por mantenimiento.
- Costo de recubrimiento por herramienta: 50 €.

Se obtuvo, por tanto, un incremento de 133% en la herramienta. Este incremento se refleja en toda la cadena de producción, en forma de menores pérdidas y mayor ahorro de recursos como lo muestra la figura 4.7.



4.4 Resultados

El utilizar para este ejemplo en específico el recubrimiento de PVD, nos da un ahorro de recursos a varios niveles, resumidos de la siguiente manera:

Proceso normal	Proceso con PVD	Resultados: Ahorro
<ul style="list-style-type: none"> • 20 herramientas • 30,000 € • 100 kg HSS 5600 • 26,460 trípodos rechazados • 132,300 € • 5292 kg AISI 1045 	<ul style="list-style-type: none"> • 9 herramientas • 13,500 € • 45 kg HSS 5600 • 324 trípodos rechazados • 1,620 € • 64.8 kg AISI 1045 • Costo PVD: 450€ 	<ul style="list-style-type: none"> • 11 herramientas • 16,500 € • 55 kg HSS 5600 • 26,136 trípodos • 130,680 € • 5,227 kg AISI 1045 • Total: 147,180-450= • 146,730€

Conclusión

Las condiciones bajo las que se desarrolla el proceso de forjado en frío generan un alto desgaste en la herramienta, desgaste que lleva a la falla temprana de ésta. Sin embargo, hoy en día existen nuevos métodos y tecnologías que mitigan los factores que crean desgaste en la herramienta, incrementando así su vida.

Durante el proceso de manufactura de forja en frío, prolongar la vida de la herramienta impacta en el consumo de recursos en cada uno de los pasos o subprocesos, optimizando de esta forma el proceso completo, hecho que se puede visualizar por medio de un sistema de contabilidad de recursos.

Elegir la tecnología a utilizar para incrementar la vida de la herramienta depende de tres factores principales: el producto final, la herramienta (con sus respectivas características: geometría, dureza, resistencia, coeficiente de expansión térmico, etc.), y las características del proceso (con sus respectivas variables independientes: temperaturas, entorno químico, movimientos, carga, etc.).

Al utilizar el sistema RCA orientado al proceso para visualizar el consumo de recursos al incrementar la vida de la herramienta, se obtiene como resultado:

- La disminución del número de herramientas necesarias para forjar un número determinado de productos.
- La disminución del número de productos rechazados, lo cual a su vez ocasiona:
 - Disminución del número de operaciones totales requeridas para compensar por las piezas rechazadas.
 - Disminuir la cantidad de viruta, el consumo de energía y lubricante, y el desgaste causado en la herramienta.
 - Disminución de la emisión de cualquier subproducto contaminante al medio ambiente.

Estos dos puntos responden a un menor consumo de recursos, situación que reduce el impacto ambiental, y los costos del proceso, haciendo así del forjado en frío un proceso de manufactura sustentable.

Optimizar el proceso de forja en frío por medio del incremento de la vida de la herramienta responde entonces a la demanda de la industria por procesos y productos con cada vez mayor sustentabilidad.

Bibliografía y Referencias

Bibliografía

E. Günther: Ökologieorientiertes Management. Um-(weltorientiert) Denken in der BWL. Lucius & Lucius, Stuttgart 2008, ISBN 978-3-8282-0415-7.

Sustainability as a Driver for Corporate Economic Success: Consequences for the Development of Sustainability Management Control; Stefan Schaltegger, Chair for Sustainability Management, Leuphana Universität Lüneburg, March 2010; page 9

Environmental Management Accounting Procedures and Principles, United Nations Subdivision for Sustainable Development, United Nations, New York, 2001; pages 8, 80

Fundamentos de Manufactura Moderna: Materiales, Procesos y Sistemas; Mikell P. Groover; Ed. Pearson Prentice Hall, FirstEdition, 1997, Cap. 20: "Fundamentos de formado de metales", páginas 397-412

De Garmo's Materials and Processes in Manufacturing, Tenth Edition, Black, Kohser, 2008, Chapter 15: "Fundamentals of Metal Forming" pages 363- 377, Chapter 16: "Bulk Forming Processes: Forging", pages 389-400

"Cold and Hot Forging: Fundamentals and Applications", ASM International, Altan, Ngaile, Shen, 2005, Chapter 22: "Die Failures in Hot and Cold Forging", pages 295-298

Artículos

"Tool Optimization by Means of Effective Prestressing Systems", Dr. Jens Grönbäk, Mr. Eric Lund, Denmark, Marzo 2008

"Tool life enhancement in cold forging by locally optimized surfaces", K. Wagner, R. Völkl, U. Engel, University of Erlangen-Nürnberg, Chair of Manufacturing Technology, Germany

Article: "Hard roller burnishing",

"Tooling Solutions for Challenges in Cold Forging", U. Engel, T. Schrader, et al, LTF, University of Erlangen-Nürnberg, Germany

"Optimization of Cold Forging Process Technology by Means of Simulation", H. Muntinga, N. Biba, Hendrik Muntinga Ingenieurbüro, QuantorForm Ltd.

"PVD and CVD Coatings for the Metal Forming Industry", S. Montgomery, D. Kennedy, N. O'Dowd, Dublin Institute of Technology, School of Mechanical and Transport Engineering, Ireland

"Enclosed Die Forging, Tripod Forging simulation", Afdex, 30/03/2013, www.afdex.com

Environmental Management Accounting Workbook, Ministry of Economy, Trade, and Industry, 2002, page 14 (http://www.meti.go.jp/policy/eco_business/pdf/workbook.pdf)

“Cold Forging: State of the Art and Future Trends”, Dr.-Ing. H.-W. Rädt, Hirschvogel Cold Forging Automotive Group, Hirshvogel Umformtechnik GmbH (http://www.icfg.info/IP_Germany.pdf)

Article: “Vision of the future”, Forging Industry Association, 2010, (<https://www.forging.org/vision-future#top>)

“State of Cold Forging Technology in Global Competition”, Prof. Dr. Taylan Altan, Dr. Gracious Ngaile, Shirgaokar; ERC for Net Shape Manufacturing, Ohio State University

“Tool Life and Tool Quality, A Summary of the Activities of the ICFG Subgroup Tool life”, M.Hänsel, T. Harnau, Principality of Liechtenstein

“Introduction to Cold Forging”, Techcenter/Carpenter Technology Corporation, March 2007, Ohio

Referencias Internet

“Knuckle-joint presses, Case Study for Automotive Supplier”, Schüler Group, 27/02/2014, http://www.schulergroup.com/major/documents/downloads/download_technologien_branchen_produkte/download_technology_forging/massivumformung_broschuere_e.pdf

“Lafer Rivestimenti PVD-CVD: Duplex Red Speed”, Lafer, 07/11/2013, http://www.lafer.eu/lafer/rivestimento-PVD-TiAlCN-duplex-redspeed_en.php

“Lafer Rivestimenti PVD-CVD: Hi-Tech Coatings, Cold Forging Applications”, Lafer, 07/11/2013, <http://www.lafer.eu/lafer/pdf/cold%20forging.pdf>

“Fatiga de Materiales”, Wikipedia, 03/10/2013, (http://es.wikipedia.org/wiki/Fatiga_de_materiales)

Sistema de pretensado Strecon, Strecon, 13/10, 2013, <http://www.strecon.com/Precision-Forging-7.aspx>

Taylor Race Engineering, “Motorsport Tripod”, 23/02/2014, <http://www.fsae.com/forums/showthread.php?1220-Taylor-race-tripod-dimensions>

“ Hydrogen Embrittlement”, 31/08/2014, http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_embrittlement