

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍA INDUSTRIAL
TRABAJO FIN DE GRADO

***DISEÑO DE UTILLAJE PARA LA FORJA DE UNA
PIEZA INDUSTRIAL MEDIANTE SIMULACIÓN
POR ELEMENTOS FINITOS***

Alumno/Alumna: García Arenas, Asier

Director/Directora: Plaza Pascual, María Soraya

Curso: 2018-2019

Fecha: Bilbao, 24 junio, 2019

Resumen: En este trabajo fin de grado se pretende diseñar el utillaje para la fabricación de una pieza industrial para el proceso de forja. Se comenzará haciendo un diseño preliminar de las estampas aplicando las recomendaciones dadas por la Sociedad de Industrias de Forja y Estampación. Este diseño preliminar se optimizará con la ayuda de un programa de simulación mediante elementos finitos que será la parte principal del trabajo. Mediante la simulación, se modificarán parámetros y dimensiones de las estampas, con el fin de obtener los mejores resultados en la pieza final, es decir, las propiedades mecánicas deseadas. Además, un objetivo a cumplir del proyecto será analizar la vida útil del utillaje y conseguir que sea la más larga posible.

Palabras clave: *Forja, Simulación, Diseño, Utillaje*

Laburpena: Gradu amaierako lan honetan forjaketan erabiliko den pieza industrial baten erreminteriaren diseinua egingo da. Trokelen aurretiazko diseinua egitea izango da lehenengo urratsa, Forjaketa eta Estanpazio Industria Sozietateak emandako gomendioen arabera. Aurretiazko diseinu hau elementu finituz osaturiko simulazio programa baten bidez optimizatuko da, eta hau izango da, hain zuzen ere, lanaren atal nagusia. Simulazioaren bidez, estanpen parametro eta dimentsioak aldatuko dira, azkeneko piezan emaitzarik hoberenak lortzeko helburuarekin, hau da, bilatzen diren propietate mekanikoak. Gainera, proiektuaren helburuetako bat erreminteriaren bizitza erabilgarria aztertzea izango da, eta ahalik eta iraupen handiena lortzea.

Hitz gakoak: *Forja, Simulazioa, Diseinua, Trokel*

Abstract: This End Grade Project intends to design the equipment in order to fabricate one industrial piece employed in the forging process. The project starts by the preliminary design of the stamps applying the recommendations given by the Society of Industry of Forge and Stamping. This preliminary design will be optimized with the aid of a simulation program by means of finite elements, which will consist on the main part of the work. Through the simulation, the parameters and dimensions of the shapes will be modified with the objective of obtaining the best results according to the final piece, that is, the desired mechanical properties. Besides, another goal set by the project is to analyse the life cycle of the equipment and try to make it as durable as possible.

Key words: *Forge, Simulation, Design, Equipment*

Índice

1. Introducción	1
2. Contexto	3
3. Objetivos y alcance del trabajo	7
4. Beneficios que aporta el trabajo	9
5. Brida con cuello de soldadura	10
6. Análisis de alternativas.....	12
6.1. Análisis de alternativas del proceso de fabricación	12
6.2. Análisis de alternativas del software de simulación	13
7. Diseño de las estampas	14
7.1. Criterios a aplicar en la pieza	14
7.2. Dimensionamiento del cordón de rebaba	20
8. Dimensionamiento del taco de partida	24
9. Dimensionamiento de la prensa.....	26
10. Optimización del diseño mediante la simulación	28
10.1. Diseño preliminar de las estampas	29
10.2. Preprocesador	30
10.3. Procesador	32
10.4. Post-procesador	32
10.5. Simulación con preformas	34
11. Análisis de resultados	36
12. Descripción de tareas.....	43
12.1. Diagrama de Gantt	44
13. Descargo de gastos.....	46
14. Conclusiones	48
15. Referencias	49
Anexo I. Cálculos del diseño de las estampas.....	50
Anexo II. Cálculos sobre el dimensionamiento del taco de partida	54
Anexo III. Cálculos del dimensionamiento de la prensa	55
Anexo IV. Parámetros de la operación para la forja de la brida	56

Índice de ilustraciones

1. Ilustración. Forja manual.....	3
2. Ilustración. Forja con estampa	4
3. Ilustración. Dirección del fibrado en el proceso de forja con estampas en caliente ...	5
4. Ilustración. Tensiones obtenidas para una simulación de forja	6
5. Ilustración. Brida con cuello de soldadura.....	10
6. Ilustración. Dimensiones finales de la pieza.....	14
7. Ilustración. Diferentes sentidos de estampación	15
8. Ilustración. Radios de fondo R_1 y R_2	17
9. Ilustración. Esquema del cordón de rebaba	20
10. Ilustración. Organigrama del proceso de diseño	28
11. Ilustración. Planos de las estampas.....	29
12. Ilustración. Parámetros definidos de las estampas	31
13. Ilustración. Líneas superficiales a la izquierda y la zona de líneas horizontales a la derecha.....	33
14. Ilustración. Ejemplo simulación dos etapas.....	35
15. Ilustración. Ejemplo de solape	37
16. Ilustración. Fibrado por líneas superficiales	37
17. Ilustración. Fibrado interior en simulación a una etapa en la parte izquierda y a dos etapas en la parte derecha	38
18. Ilustración. Zona de la pieza donde se produce el máximo valor de 'Gartfield'.....	38
19. Ilustración. Distribución de la temperatura al terminar el proceso	39
20. Ilustración. Temperatura del utillaje	40
21. Ilustración. Tensión media del utillaje.....	40
22. Ilustración. Diagrama de Gantt.....	45
23. Ilustración. Dimensiones de la pieza aplicando sobre espesores y ángulos de salidas	51

Índice de tablas

1. Tabla. Propiedades del acero con un 0,30% de carbono	11
2. Tabla. Matriz de prioridades de los procesos	12
3. Tabla. Matriz de prioridades de los softwares de simulación.....	13
4. Tabla. Sobre espesor de la pieza según su peso.....	15
5. Tabla. Ángulos de salida para paredes externas	17
6. Tabla. Aristas de orificio.....	19
7. Tabla. Aristas de núcleo.....	19
8. Tabla. Relación entre el ancho del cordón y el diámetro de la base.....	20
9. Tabla. Valores del coeficiente de rozamiento viscoplástico para diferentes materiales y temperaturas.....	21
10. Tabla. Q en función de la temperatura de la rebaba	22
11. Tabla. Dimensiones preferentes, masa y tolerancias dimensionales de las barras redondas laminadas en caliente para usos generales y aplicaciones de precisión.	25
12. Tabla. Valores de $A_m + A_r + \alpha$ para diferentes materiales y temperaturas.....	27
13. Tabla. Corrección en la presión motriz por la posición de la cavidad.	27
14. Tabla. Partida de horas internas	46
15. Tabla. Partida de amortizaciones.....	46
16. Tabla. Partida de gastos	46
17. Tabla. Resumen de gastos	47
18. Tabla. Parámetros de la operación para la forja de la brida en la 1 etapa	56
19. Tabla. Parámetros de la operación para la forja de la brida en la etapa final	57

1. Introducción

En este documento se presenta el Trabajo Fin de Grado que tiene como objetivo realizar el diseño del utillaje para la forja de una pieza industrial mediante la simulación por elementos finitos. Se partirá de una pieza final para así conseguir su utillaje para su fabricación mediante el proceso de forja. A continuación, se presenta la estructura del documento.

En primer lugar, se muestra el contexto, que sirve para conocer la información necesaria sobre el proceso de la forja. A parte, se presenta la simulación, que servirá para diseñar el utillaje de una manera más rápida y eficaz. Para ello, se explica la evolución del proceso de diseño durante los años, y así darse cuenta de la importancia que ha tenido la aparición de estos programas de simulación mediante elementos finitos.

Después, se presentan los objetivos del trabajo, que como se ha mencionado antes, el objetivo principal será el diseño del utillaje para la forja mediante la simulación por elementos finitos. Para conseguir este objetivo, se mencionan unos subobjetivos a cumplir durante el mismo. En este apartado también se explica el alcance del proyecto.

A continuación, se definen los beneficios que aporta el trabajo, tanto técnicos como económicos. En el siguiente apartado se presenta la pieza escogida a estudiar, para la cual se diseñará el utillaje completo para su fabricación. Posteriormente se desarrollan las alternativas a diferentes variables del trabajo, como serían, alternativas al proceso de fabricación, y al programa de simulación, y se elegirán las mejores para el proyecto.

Seguidamente, vendría la primera parte importante del trabajo, el diseño preliminar de las estampas. En este apartado se diseñan las estampas, siguiendo las recomendaciones propuestas por la S.I.F.E¹, para definir parámetros de la pieza y del cordón de rebaba. Después, para terminar de definir los planos del prediseño, se dimensiona el taco de partida, cumpliendo con las condiciones propuestas por la norma. A su vez, se presenta el dimensionamiento de la prensa, definiendo la fuerza necesaria para el forjado de la pieza.

Posteriormente, se explica el proceso de optimización del diseño anteriormente efectuado, y se muestra el programa de simulación, con su distribución y sus herramientas. También se presenta la opción de la simulación con preformas, que habría que valorar. A continuación, se desarrolla el análisis de resultados obtenidos durante la simulación. Se presentan todos los resultados obtenidos y se comparan, tanto los de una como los de dos etapas.

En el siguiente apartado, se muestra la descripción de tareas ejercidas para el proceso. Se definen y se presentan visualmente con su duración en el diagrama de Gantt. Después, se expone el descargo de gastos del trabajo con la ayuda del presupuesto.

Para finalizar, se presentan las conclusiones obtenidas durante el proyecto y se exponen las referencias utilizadas para llevarlo a cabo.

2. Contexto

La forja² es un proceso el cuál se ha utilizado desde hace miles de años. Los antiguos egipcios trabajaban el hierro sobre todo para fabricar adornos y armas. Antiguamente los herreros calentaban el metal al rojo vivo y después sobre un yunque lo golpeaban con martillos hasta darle la forma que deseaban. Actualmente se sigue utilizando esta técnica manual [Ilustración 1], sin embargo, han aparecido diferentes métodos y variaciones.



1. Ilustración. Forja manual

En concreto, la forja es un proceso de fabricación de objetos y piezas que se basa en la deformación plástica del material mediante la aplicación de fuerzas de compresión. Es un proceso que puede realizarse en frío o en caliente, según se realice por debajo o por encima de la temperatura de recristalización del material.

Este proceso se utiliza para modelar o deformar de manera controlada el material hasta lograr una forma y unas propiedades determinadas en los metales y aleaciones a los que se aplica. La deformación se lleva a cabo gracias a las fuerzas de compresión que pueden ser aplicadas de forma intermitente (por impacto) o de forma continua (por presión), utilizando equipos como las prensas y los martillos.

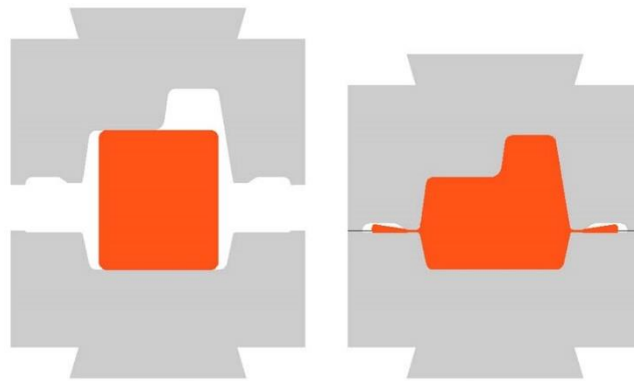
Hay que resaltar que en el proceso de la forja no se produce arranque de viruta, con lo que no se desperdicia material y se da un importante ahorro respecto a otros procesos como es el mecanizado.

Los productos forjados tienen unas características concretas, presentan unas buenas propiedades mecánicas, como son la resistencia a la corrosión y la fatiga, y una gran tenacidad y ductilidad, debido a que con los golpes y el calor se afina el grano y se orientan las fibras. Por los costes y medios de producción necesarios, la forja posibilita la producción de un gran número de piezas. Aunque por otro lado, el diseño no es libre, tiene sus limitaciones, por lo que no se puede utilizar para todo tipo de piezas.

En el proceso de la forja en caliente, se debe mantener en todo momento la temperatura por encima de la temperatura de recristalización del material, por lo que se requieren menores esfuerzos a la hora de deformar el material. La forja en caliente produce una deformación plástica a una temperatura y velocidad de deformación que permite la recristalización del material simultáneamente con la deformación, evitando así el endurecimiento por acritud del material.

El proceso consiste en calentar el material de trabajo (que se encuentra en forma de barra o de lingote) hasta la temperatura óptima para mejorar su ductilidad. Entonces el material se comprime o martillea en una serie de estampas para conseguir la forma deseada. Durante el proceso se obtiene un exceso de material, las rebabas, que se eliminan al final del proceso.

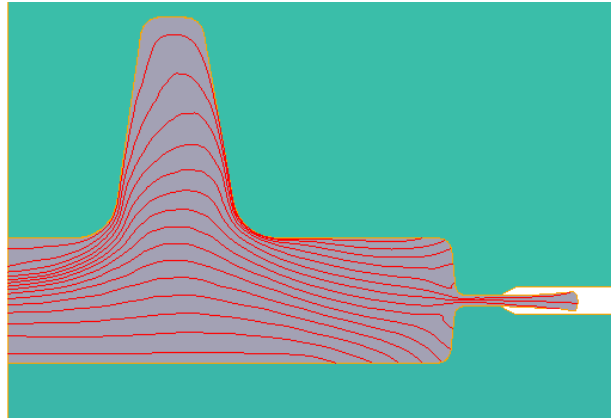
Existen diferentes tipos de forjado en caliente como son: forja libre o de matriz abierta, forja con estampa o forja cerrada, laminación de anillos, forja templada y forja isotérmica. La forja libre y con estampas [Ilustración 2] son las más utilizadas actualmente.



2. Ilustración. Forja con estampa

La forja en caliente permite obtener mejores propiedades mecánicas que en otros procesos no se pueden conseguir. Estas son algunas de las ventajas:

- Reducción del tamaño del grano: debido a la temperatura de trabajo y la velocidad de deformación.
- Eliminación de defectos internos: los poros generados en la solidificación del acero desaparecen debido a las enormes presiones a las que es sometido, con lo que el material es más homogéneo.
- Desarrollo y orientación de la fibra: al conformar el material en caliente, se modifica la fibra, mejorando las propiedades mecánicas si el esfuerzo se aplica en la dirección de la fibra formada por el proceso [Ilustración 3].
- Mejora en la resistencia al agrietamiento de material.



3. Ilustración. Dirección del fibrado en el proceso de forja con estampas en caliente

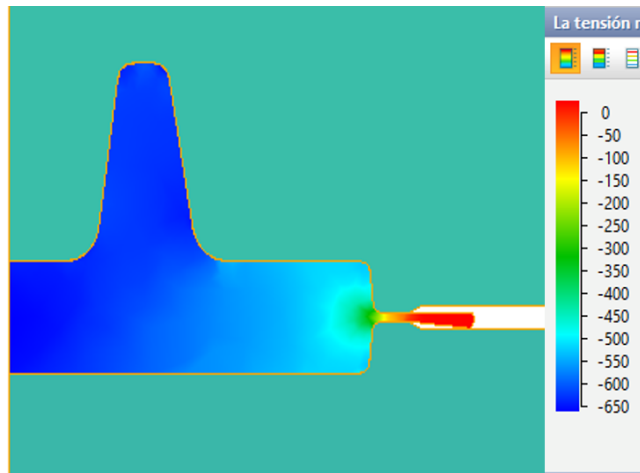
Técnicamente todos los metales tienen aleaciones que son forjables, pero las aleaciones más comunes en la forja son: aceros al carbono, aceros aleados, aceros inoxidables, aluminio, cobre y bronce entre otros.

La forja permite producir una amplia variedad de piezas, las cuales son utilizadas en cantidad de sectores, los más conocidos son: el sector aeroespacial, automoción, herramientas de mano e industriales y maquinaria y equipamiento.

El proceso de forja con estampas es uno de los más utilizados porque permite conseguir una pieza con la forma deseada, mediante el uso de dos estampas que deforman el material hasta dejarlo con la forma de ellas, en una manera efectiva. El material caliente, se introduce en el interior de las estampas y estas mediante una fuerza exterior se cierran hasta conseguir que todo el material haya rellenado el hueco interior, cogiendo la forma de él.

Es un proceso de bastante complejidad, ya que requiere el diseño del utillaje utilizado, las estampas. Para el diseño de las estampas hay que seguir una serie de normas. Hace unos años, el diseño de éstas se realizaba mediante el proceso de prueba y error, fabricando estampas y viendo los resultados que daban. Cuanta mayor era la experiencia del ingeniero diseñando el utillaje, menores eran los errores cometidos.

Desde la aparición de los softwares de simulación para los diferentes procesos, los errores cometidos en el diseño de los utillajes han disminuido notablemente, y con ello el coste del diseño. Estos softwares permiten simular el proceso por completo ofreciendo los resultados de la operación, como son los fallos en el material o el estado tensional obtenido [Ilustración 4].



4. Ilustración. Tensiones obtenidas para una simulación de forja

En la imagen anterior se puede observar la distribución de tensiones obtenidas en la simulación de una pieza. La escala a colores muestra las zonas donde mayor tensión se produce, tanto a compresión como a tracción. La mayor parte de la pieza está sometida a compresión, como muestran los colores azulados y verdosos. Por otro lado, la zona de la rebaba, sufre tensiones a tracción, colores rojizos, ya que el material se estira al entrar por la cavidad tan pequeña.

3. Objetivos y alcance del trabajo

Este estudio tiene como objetivo principal diseñar el utillaje para la forja de una pieza industrial. Para ello se van a fijar una serie de subobjetivos que se irán cumpliendo a lo largo del proyecto para al final conseguir el objetivo principal.

Dentro de los subobjetivos se encuentran:

- Diseño preliminar de las estampas mediante la aplicación de las recomendaciones dadas por la S.I.F.E. (Sociedad de Industrias de Forja y Estampación).
- Dimensionar el equipo a utilizar.
- Dimensionar el taco de partida.
- Optimizar el diseño mediante un software de elementos finitos.
- Analizar las estampas.

La primera parte del trabajo será hacer un prediseño de las estampas siguiendo las recomendaciones dadas por la S.I.F.E. donde se conseguirán dimensionar de manera que cumplan las recomendaciones.

Para optimizar de la mejor manera posible el prediseño, también se dimensionará el equipo a utilizar y el taco de partida. Se calculará la fuerza máxima necesaria para llevar a cabo el proceso, y a partir de ahí, se introducirá como parámetro en la simulación. El taco de partida se dimensionará con los datos obtenidos en el prediseño de las estampas, pero en la simulación será un parámetro que pueda variar para conseguir mejores resultados en la pieza.

La herramienta principal del trabajo es el software de simulación mediante elementos finitos, que acaparará la mayor parte del proyecto, puesto que se llevará a cabo un proceso iterativo de simulaciones con el fin de optimizar el diseño anteriormente conseguido. Por esta razón, se aprenderá a utilizar el software, para llevar a cabo el trabajo, y con la ayuda de todas las herramientas que el programa dispone, se analizarán los resultados.

Al obtener los resultados ofrecidos por el simulador, estos se deberán interpretar correctamente. En cada simulación principalmente se intentará conseguir estas tres condiciones:

- Que el material llene toda la cavidad.
- Que no se produzcan pliegues o solapes.

- Un fibrado bueno, es decir, que las líneas de fibrado de la pieza no se crucen entre sí.

A parte de que se cumplan estas condiciones también se analizarán parámetros como la temperatura del proceso completo, las tensiones y deformaciones que sufre tanto la pieza como el utillaje, que en ningún caso pueden plastificar, y la fuerza ejercida sobre la pieza.

Cómo último subobjetivo está el análisis de las estampas, que es igual de importante que el de la pieza. Un parámetro a valorar será la vida útil de las estampas. Para ello, se analizará la fatiga de los instrumentos y se buscará conseguir el máximo número de ciclos que puedan soportar.

Durante el trabajo se valorará la importancia de los softwares de simulación que permiten realizar todas las simulaciones necesarias hasta conseguir un buen resultado sin la necesidad de fabricar el utillaje, ahorrando tiempo y dinero.

En cuanto al alcance del trabajo, se buscará realizar un buen diseño del utillaje, partiendo de una pieza con sus dimensiones finales, se hará un diseño preliminar cumpliendo las recomendaciones, y se optimizará ese diseño hasta conseguir los mejores resultados con la ayuda de un software de simulación mediante elementos finitos.

4. Beneficios que aporta el trabajo

Los beneficios que aporta el trabajo se pueden dividir en dos grupos principalmente: beneficios técnicos y económicos. Los cuales se desarrollan a continuación.

Como es sabido, el objetivo principal del proyecto es el diseño del utillaje para la fabricación de una pieza industrial para el proceso de la forja, con lo que el principal **beneficio técnico** conseguido serán las estampas diseñadas. El diseño se podrá utilizar para la fabricación de este tipo de piezas.

Además, al haber obtenido un buen resultado final, el trabajo habrá sido satisfactorio y con ello el aprendizaje también. Los conocimientos obtenidos serán esenciales y valdrán para diseñar más variedad de utillajes para distintas piezas. Cuantos más diseños se lleven a cabo, la experiencia del diseñador aumentará, con lo que disminuirá el tiempo empleado en cada diseño y mejorarán los resultados obtenidos.

En cuanto al **beneficio económico** que aporta el trabajo, principalmente se encuentra el gasto que supone el diseño de las estampas para este tipo de pieza. Dentro de este gasto, se encuentran las horas ejercidas por el ingeniero durante el trabajo, y el coste del simulador. Las horas internas pueden suponer un gran coste para la empresa que demande los servicios para la obtención del diseño del utillaje. Mediante este trabajo, ese gasto se ha tenido en cuenta y supondría un beneficio por el ahorro que llevaría.

Por otra parte, el correcto diseño realizado en el proyecto llevaría a un ahorro del coste frente a un mal diseño. La utilización del programa de simulación permite ver e interpretar los problemas relacionados con la producción de la pieza, para después solucionarlos y así optimizar las estampas. Esto también hay que tenerlo en cuenta en los beneficios económicos del trabajo. Los errores en el diseño de las estampas, se convertirían en piezas no válidas y esto aumentaría el coste de la producción. Por este motivo, un buen diseño es fundamental para no aumentar el coste.

5. Brida con cuello de soldadura

La pieza industrial a forjar elegida para este trabajo es una brida con cuello de soldadura. Una brida³, en el ámbito de tuberías, es el elemento que sirve para unir dos componentes de un sistema de tuberías. Las bridas se unen a las tuberías para permitir juntar tramos de tuberías entre sí o para juntar tramos de distintas instalaciones. Permiten ser montadas y desmontadas sin dañar la instalación, gracias a la circunferencia exterior con agujeros en los que se montan los tornillos de unión.

Las bridas con cuello de soldadura, tienen un largo cuello cónico, cuyo extremo posee el mismo diámetro que la tubería a la que se va a acoplar. El extremo de la brida se suelda a tope con la tubería (de la misma manera que se sueldan dos extremos de tuberías), esto permite que no se altere el flujo del fluido que circula por el interior, evitando flujos turbulentos. En la unión de ambas, el flujo, se mantiene prácticamente constante, gracias a esto y al largo cuello, permite ser utilizado en sectores de tuberías sometidos a esfuerzos de flexión. Además, la soldadura entre brida y tubería presenta una buena resistencia a la fatiga.



5. Ilustración. Brida con cuello de soldadura

El proceso de fabricación de este tipo de bridas es generalmente la forja, ya que permite obtener unas propiedades mecánicas perfectas para su tipo de uso. Además, la soldadura que se le realiza a esta pieza, puede ser inspeccionada por métodos ultrasónicos, lo que da a las bridas con cuello de soldadura mayor confiabilidad y mayor seguridad en su uso.

Este tipo de bridas son recomendadas para servicios severos, sea por altas temperaturas, altas presiones, por ser líquidos inflamables o corrosivos, o en aquellos

servicios donde las fugas deban ser mínimas. Ejemplos de los usos son: líneas de vapor, petróleo o gas natural.

El material utilizado para la fabricación de estas piezas es el acero al carbono, ya que cumple con todas las necesidades que deben tener. En concreto, se considera un acero semidulce, ya que el porcentaje de carbono del acero es de un 0,30%, y también posee un pequeño porcentaje de manganeso. Las propiedades mecánicas del material son una buena resistencia a la tracción y una buena dureza. Al no ser alto el porcentaje de carbono en su composición, mantiene una alta tenacidad y ductilidad. Las propiedades más características del material aparecen en la tabla 1.

1. Tabla. Propiedades del acero con un 0,30% de carbono

Densidad	Dureza	Tensión de fluencia	Módulo elástico	Conductividad térmica	Capacidad calorífica
7531 kg/m ³	163 HB	380 Mpa	206 Gpa	26,9 W/m.K	655,4 J/kg.K

6. Análisis de alternativas

En este apartado se analizarán las diferentes alternativas surgidas en este proyecto. Principalmente, surgen dos alternativas, como son, el proceso mediante el cual se fabricará la pieza y el software de simulación que se utilizará para llevar a cabo el diseño del utillaje. Para su estudio se realizarán dos matrices de prioridad, que consiste en ponderar numéricamente una serie de criterios para escoger entre las distintas alternativas.

6.1. Análisis de alternativas del proceso de fabricación

En primer lugar, se analizarán las diferentes alternativas al proceso de fabricación. Aquí surgen dos opciones, la fundición y la forja (El proceso de mecanizado a partir del tocho conllevaría demasiada pérdida de material en tiradas altas y por tanto un aumento del coste, por lo que no se analizará esta opción). Además, aunque mediante los dos procesos se puede obtener la pieza escogida, el resultado final tendría diferentes propiedades mecánicas.

La pieza elegida debe tener unas propiedades mecánicas específicas, debido a su uso industrial. Debe tener una alta resistencia a la fatiga y a la corrosión, aparte de tener una gran tenacidad. Por ello, al ser éstas imprescindibles para la pieza, se incluirán en la matriz de prioridad, con el coste y la productividad del proceso.

Las diferentes variables que aparecen en las matrices se valorarán numéricamente del 1 al 5, siendo 1 la menor puntuación y 5 la mayor. La alternativa que mayor puntuación obtenga será la elegida.

El coste se ponderará con una puntuación negativa, ya que conlleva a un aspecto negativo del proceso.

2. Tabla. Matriz de prioridades de los procesos

	Tenacidad	Resistencia a la fatiga	Resistencia a la corrosión	Productividad	Coste	Total
Forja	5	5	4	4	-4	14
Fundición	2	2	3	4	-2	9

Analizando el resultado obtenido se puede concluir que con el proceso de forja se obtiene una puntuación mayor, por lo tanto será el escogido. Se puede observar que, aunque tenga un mayor coste, las propiedades mecánicas necesarias son mejores que en el otro proceso, debido a que las inclusiones metálicas se reparten uniformemente y el fibrado de la pieza coge una forma paralela al contorno de las estampas.

6.2. Análisis de alternativas del software de simulación

En segundo lugar, se analizará el análisis de alternativas del software de simulación. Para ello, se han escogido tres diferentes softwares que simulan mediante elementos finitos: Simufact, Deform 3D, Qform VX.

En la matriz de prioridad se van a valorar algunas de las propiedades más importantes de los softwares, que serían necesarias para este trabajo. Mayormente se buscará un simulador que sea sencillo de usar y que proporcione cálculos precisos y variados. También se ha sumado la variable de velocidad de los cálculos y el coste de la licencia.

Se ha buscado información de las tres alternativas, y después de compararlas, se valorarán las diferentes variables. Las variables se ponderarán dando valores del 1 al 5 al igual que antes, y el coste de la licencia tendrá un valor negativo ya que puede ser un impedimento.

3. Tabla. Matriz de prioridades de los softwares de simulación

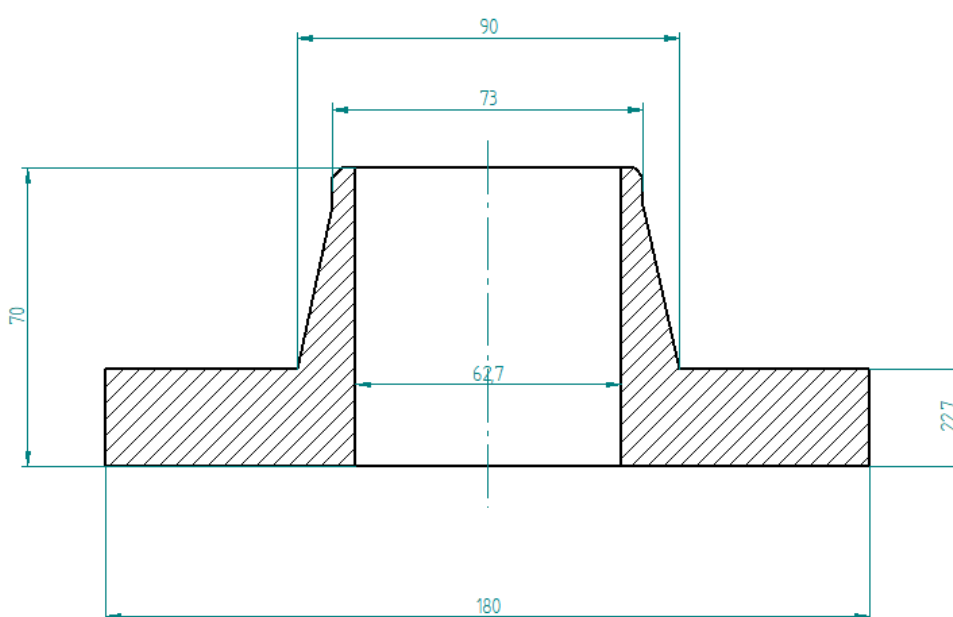
	Facilidad de uso	Variedad de resultados	Precisión	Velocidad de cálculo	Coste de licencia	Total
Simufact	3	5	5	3	-4	12
Deform 3D	3	4	5	3	-4	11
Qform VX	5	4	5	4	-3	15

Realizado el análisis, observamos que el software Qform VX ha conseguido una mayor puntuación, por lo que será el utilizado a la hora de hacer el trabajo. En la matriz se puede ver como las tres alternativas han conseguido un valor final parecido, pero analizando una de las variables más importantes anteriormente mencionadas, como es la facilidad de uso del programa, el simulador Qform VX se diferencia de las demás por tener un uso más sencillo.

Respecto de las demás variables, el simulador Qform VX también obtiene una buena puntuación. Por lo tanto, su utilización ayudará a conseguir unos buenos resultados en el trabajo.

7. Diseño de las estampas

A continuación, se presenta el proceso completo que se ha seguido para el diseño de las estampas, cuyo objetivo será conseguir los planos de la pieza estampada. Para ello, se han tenido en cuenta una serie de recomendaciones dadas por la S.I.F.E. (Sociedad de Industrias de Forja y Estampación) que aparecerán explicadas paso a paso a continuación. Primero se definen los criterios para aplicar en la pieza y después las recomendaciones para el dimensionamiento del cordón de rebaba. Los aspectos de diseño a tener en cuenta se han aplicado a partir de la pieza final ya acabada, donde sus dimensiones (en milímetros) aparecen en la ilustración 6.



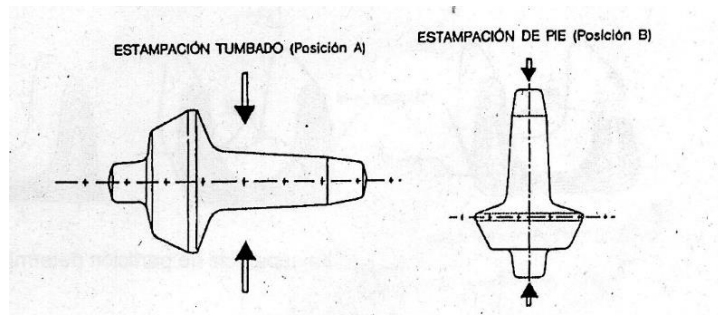
6. Ilustración. Dimensiones finales de la pieza.

7.1. Criterios a aplicar en la pieza

En este apartado aparecerán los criterios y recomendaciones utilizadas para llevar a cabo los cálculos relacionados con la pieza.

Sentido de la estampación

En primer lugar, se debe elegir el sentido de la estampación de la pieza. La elección de este factor es muy importante a la hora de facilitar el proceso de fabricación, con lo que se debe elegir correctamente. La forja en prensas suele tener una configuración vertical normalmente, con el sentido de la estampación paralela al movimiento de la prensa, por este motivo, se cogerá el sentido vertical. La estampación de pie también será la que obligue a diseñar menos salidas en las estampas, con lo que será la opción buena. En la ilustración 7 se pueden observar los dos tipos de estampación, tumbado y de pie.



7. Ilustración. Diferentes sentidos de estampación

Superficie de partición

En segundo lugar, vendría la elección de la superficie de partición de la forja, que será el parámetro que determine el fibrado final de la pieza. Las recomendaciones definen que siempre que sea posible se usen superficies de partición planas, con lo que en este caso se usará una superficie horizontal. La partición se hará en la zona de la pieza con mayor sección en el plano horizontal, que será la base de la pieza, justamente en la mitad.

Sobre espesores

En este apartado se calculará el sobre espesor de la pieza, el cual se elige a partir del peso de ésta. Sabiendo el peso de la pieza que es de 4,4 kg (Estimación del catálogo), consultando la tabla 4 con ese peso se considera un sobre espesor de 2mm que se aplicará en todo el volumen de la pieza.

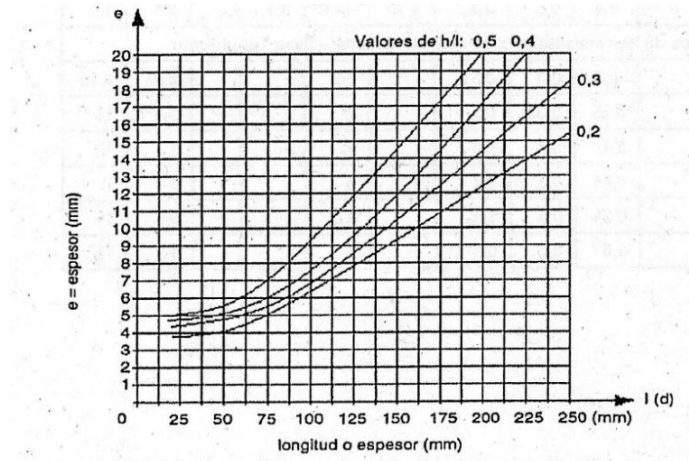
4. Tabla. Sobre espesor de la pieza según su peso

Peso (kg)	s (mm)
de 0 a 1	1
de 1 a 3	1,5
de 3 a 10	2
de 10 a 20	3
de 20 a 50	4
más de 50	5

Espesores de almas

La pieza posee un agujero pasante que no se podrá conseguir mediante la forja, sin embargo, se podrá trabajar con un agujero ciego ya que el diámetro interior es mayor a 15mm. El alma será la zona plana obtenida por aproximación de los dos núcleos, por lo que se deberá dimensionar su espesor.

Para su dimensionamiento se debe tener en cuenta que el espesor del alma debe de tener un valor mínimo que hay que calcular. Para su cálculo se aplicará el criterio de Del Rio⁴ que mediante el gráfico 1 permitirá obtener el valor mínimo para el espesor del alma.



1. Gráfico. Espesor mínimo del alma

Mediante la expresión (1) y el valor de l entrando en el gráfico permitirá obtener el valor mínimo para el espesor del alma, siendo h ; la altura desde la superficie de partición hasta la parte superior y l ; diámetro interior del agujero ciego.

$$\frac{h}{l} \tag{1}$$

Salidas

Las salidas son los ángulos que forman las paredes laterales de las huellas de las matrices con la dirección de desplazamiento de los utillajes móviles, que serán las que faciliten la extracción de la pieza una vez acabado el proceso. Para su cálculo se tendrá en cuenta el criterio de Mario Rossi⁵ para las salidas exteriores y el de Del Rio para las interiores.

Para las salidas exteriores tanto del cono superior cómo de la base, Mario Rossi propone utilizar ángulos de 5° a 7°.

Las salidas interiores se obtienen mediante la tabla 5, que según el criterio de Del Rio habrá que sumarles 2° por ser salidas internas. Con los valores de H ; altura interior del nervio, b ; espesor del nervio y L longitud del nervio en la parte superior, y utilizando las expresiones (2) y (3) se consiguen los valores con los que entrar en la tabla.

$$\frac{H}{b} \tag{2}$$

$$\frac{L}{b} \quad (3)$$

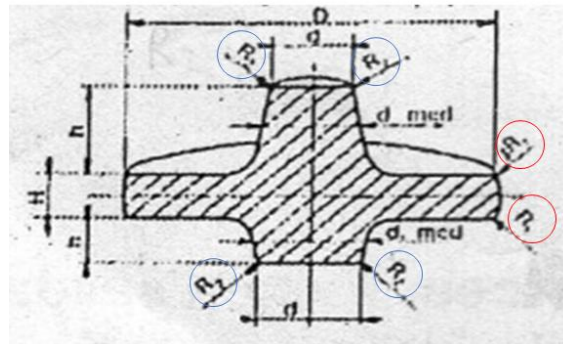
5. Tabla. Ángulos de salida para paredes externas

L/b	H/b					
	1	1.3	3-4,5	4,5-6,5	6,5-8	8
<1,5	-	-	2°	2°	2°	2°
>1,5	3°	5°	7°	10°	12°	15°

Radios de redondeo de aristas

En este apartado se explicará el criterio utilizado para los cálculos de las aristas salientes (Corner) y aristas entrantes (Filllet). Para estos cálculos se han utilizado los parámetros anteriormente obtenidos, como son, el sobre espesor, el sobre espesor del alma y las salidas.

Por una parte, se encuentran los radios de fondo o de Corner., dentro de los cuales se distinguen dos tipos, los radios de fondo del cono superior; R_2 , y los radios de fondo de la base; R_1 . En la imagen inferior se muestra un ejemplo con los dos tipos de radios de fondo, los redondeados de rojo serían R_1 , y los redondeados de azul R_2 .

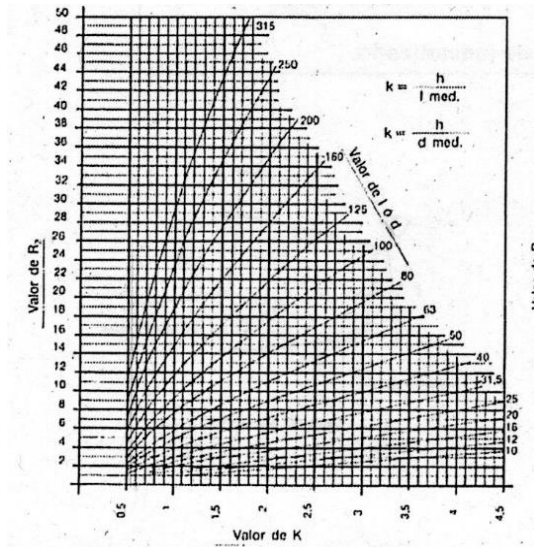


8. Ilustración. Radios de fondo R_1 y R_2

Para el cálculo de R_2 se utilizará el gráfico 2, que entrando con los valores de K y del diámetro superior del cono permitirá obtener su valor. Al haber dos radios de fondo, uno por la parte exterior y otro por la parte interior, se calcularán los dos y se aplicará el mayor.

Para el cálculo de K se utiliza la ecuación (4) siendo h la altura del cono y d_{medio} el diámetro medio del cono. Cada radio tendrá un valor de K distinto, ya que tienen un diámetro medio distinto.

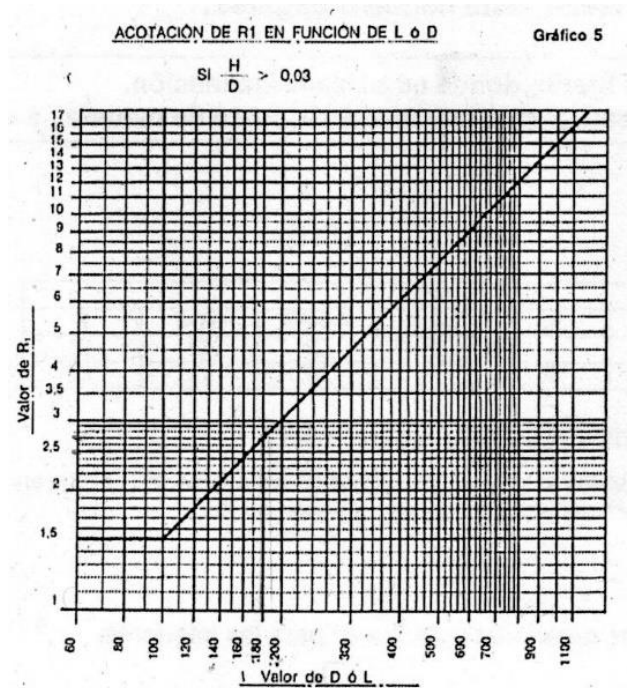
$$K = \frac{h}{d_{medio}} \quad (4)$$



2. Gráfico. Cálculo de R_2

El radio R_1 se obtendrá mediante el gráfico 3, ya que se cumple la condición necesaria de la expresión (5). Siendo H la altura de la base y D su diámetro.

$$\frac{H}{D} > 0,03 \text{ mm} \quad (5)$$



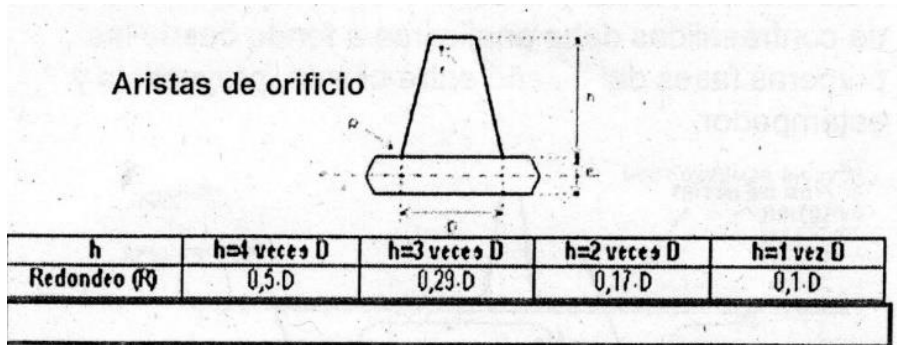
3. Gráfico. Cálculo de R_1

Por otra parte, se calcularán los radios de Fillet, que se dividen en dos tipos; aristas de orificio; las de la parte exterior del cono, y aristas de núcleo; las de la parte interior.

Para el cálculo de las aristas de orificio, con los valores de la altura del cono y del diámetro de la parte inferior del cono, entrando a la tabla 6 se obtiene la siguiente relación, con la que obtener el valor del radio.

$$R = 0,1 * D \tag{6}$$

6. Tabla. Aristas de orificio



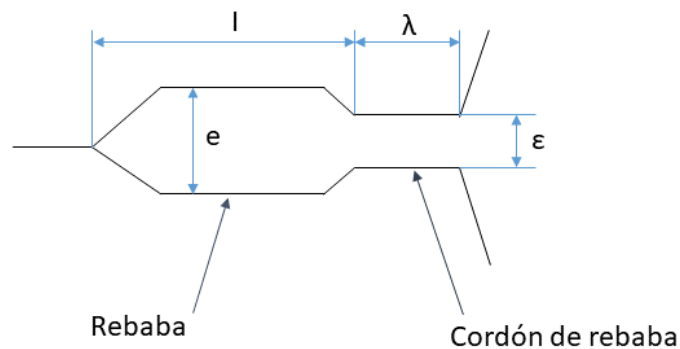
El radio de las aristas de núcleo se obtendrá entrando en la tabla 7 con los valores de h ; la altura desde la superficie de partición hasta la parte superior, e ; espesor del alma, y D ; el diámetro medio del agujero ciego. En la tabla se conseguirá el valor de radio mínimo para aplicar.

7. Tabla. Aristas de núcleo

h	e	Diámetro D o anchura L (mm)															
		12	17	23	30	38	47	58	70	90	110	140	190	250	330		
8	3	2,7	2,7	3	3,3	4,3											
8	4	2	2,3	2,7	3	3,7	5										
8	5	1,7	2	2,3	2,7	3	4,3										
12	3	2,7	3	3,3	4	4,7											
12	4	2	2,3	2,7	3,3	4	5,7	6									
12	5	1,7	2	2,3	2,7	3,3	5	5,3									
15	3	3,3	3,7	4	4,7	5,3											
15	4	2,7	3	3,3	4	4,7	5,3	6,7									
15	5	2	2,3	3	3,3	4	4,7	6									
18	3	3,7	4	5,3	6	6,7	7,4										
18	4	3	3,3	4,7	5,3	6	6,7										
18	5	2,3	2,7	3,7	4,5	5,3	6	7,3									
22	3	4,3	6	6,7	7,4												
22	4	3,7	5,3	6	6,7	8											
22	5	3	4,7	5,3	6	7,4	8										
28	4	6,7	8	8,7	9,3												
28	5	6	7,3	8	8,7	9,4											
28	6	5,3	6	6,7	7,3	8	9,3										
36	5	8,7	9,4	10	10,5	12											
36	6	8	8,7	9,3	10	11	14										
36	7	7,3	8	8,7	9,3	10	12,5										
45	7	10,5	11,3	12,5	14	16,7											
45	8	10	10,5	12	12,5	14,5	18										
45	9	8,7	9,3	10,5	12	13,3	16										
60	9	12	13,3	15,3	16,5	23											
60	10	11,3	12,5	14	16,5	20	23										
60	12	10	11,3	13,3	15,3	17,3	20										
80	12	15,3	17,3	21	27	29											
80	14	14,5	16,5	18,5	23	27	30										
80	16	13,3	14,5	17,3	19,3	23	26										
105	16	20	23	26	33	40											
105	18	18,5	21	25	30	35	39										
105	20	17,3	19,3	23	27	31	33										
140	20	26	29	37	42	50											
140	23	24	28	33	40	46											
140	26	22	25	30	39	40											

7.2. Dimensionamiento del cordón de rebaba

Otro factor importante para el diseño de las estampas es el cordón de rebaba que alojará al material sobrante, es decir, el cordón de rebaba más la rebaba. A continuación, se desarrollarán los pasos seguidos para su cálculo. En la ilustración inferior se observan los parámetros a diseñar. El dimensionamiento del cordón de rebaba se realiza a partir de los cálculos anteriormente hechos, donde el plano de la pieza forjada utilizada como referencia, se encuentra en los anexos en la ilustración 23 con sus dimensiones.



9. Ilustración. Esquema del cordón de rebaba

Estimación de λ (ancho del cordón de rebaba)

El proceso se ha decidido llevarse a cabo en una prensa mecánica, con lo que, para obtener el valor del ancho del cordón de rebaba, consultando la tabla 8 con este dato y el diámetro de la pieza en el plano de partición, se obtiene un valor de $\lambda = 9,5\text{mm}$

8. Tabla. Relación entre el ancho del cordón y el diámetro de la base

d (mm)	λ en prensa (mm)	λ en martillo (mm)	d (mm)	λ en prensa (mm)	λ en martillo (mm)
40	4	6	160	8.5	11
50	4.5	6.5	180	9	11.5
60	5	7	200	9.5	11.5
70	5.5	7.5	220	10	12
80	6	8	240	11	12.5
90	6.5	8.5	260	12	13
100	7	9	280	13	14
120	7.5	9.5	300	14	15
140	8	10	400	17	18

Cálculo de ε (espesor del cordón de rebaba)

El valor del espesor del cordón de rebaba se obtendrá mediante la ecuación (7).

$$\frac{\lambda}{\varepsilon} = \sqrt{\frac{p - a - p_b}{4 * \mu * Q}} \quad (7)$$

Para ello, previamente se calcularán los parámetros necesarios para su cálculo.

- **Cálculo de μ (coeficiente de rozamiento)**

Siendo acero el material y la temperatura de la rebaba $T=900^{\circ}\text{C}$ entrando en la tabla 9 se consigue un coeficiente $\mu=0,23$.

9. Tabla. Valores del coeficiente de rozamiento viscoplástico para diferentes materiales y temperaturas.

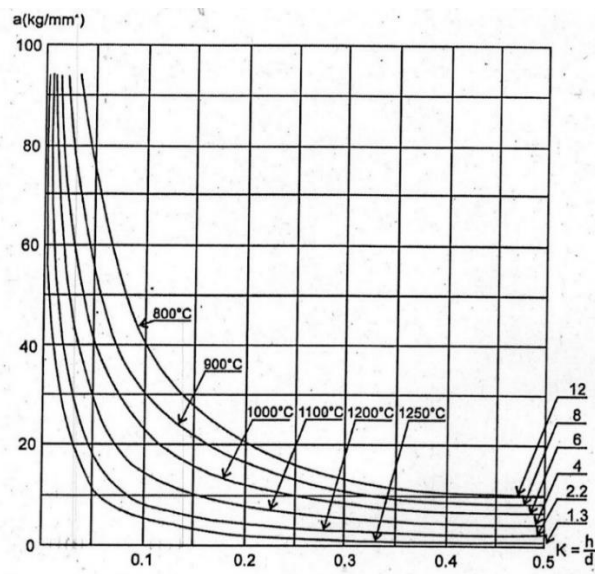
Material	Temperatura (°C)	μ
Acero	900	0.23
Acero	1.000	0.20
Acero	1.100	0.19
Acero	1.200	0.18
Cobre	850	0.16
Cobre	900	0.15
Cobre	950	0.14
Aluminio	450	0.15
Aluminio	500	0.14
Aluminio	550	0.13
Latón	650	0.18
Latón	700	0.17
Cu-Al	750	0.17
Cu-Al	800	0.16

- **Cálculo de p (presión necesaria para la forja de la pieza)**

Habiendo dos radios de fondo (R_1 y R_2) se calcularán dos presiones, una para cada radio de fondo, y se utilizará la que más carga demande.

Entrando en las curvas umbrales de plasticidad (gráfico 4) con los valores de K , obtenido mediante la expresión (8), y de la temperatura del proceso, se obtendrían las presiones necesarias. Siendo R , los radios de fondo anteriormente calculados y d , el diámetro de la pieza en el plano de partición.

$$K = \frac{2 * R}{d} \quad (8)$$



4. Gráfico. Curvas umbrales de plasticidad

- **Cálculo de a (perdida de carga correspondiente al umbral de plasticidad en el plano de la rebaba)**

Para obtener el valor de a hay que entrar en las curvas umbrales de plasticidad (gráfico 4) con los valores de la temperatura de la forja y del valor de K que se obtiene mediante la siguiente expresión (9). Siendo H , la altura de la base de la pieza y D , el diámetro de la pieza en el plano de partición.

$$K = \frac{H}{D} \quad (9)$$

- **Cálculo de p_b (resistencia a la deformación radial del anillo de rebaba)**

Esta resistencia se calcula a partir de la siguiente ecuación (10).

$$p_b = \sigma_t * \frac{2 * \lambda}{d} \quad (10)$$

Siendo σ_t la resistencia a la tracción del acero a una temperatura de 1100°C, d el diámetro de la pieza en el plano de partición y λ ancho del cordón de rebaba.

- **Cálculo de Q**

La Q se obtiene consultando la tabla 10 con el valor de la temperatura de la rebaba $T=900^\circ\text{C}$.

10. Tabla. Q en función de la temperatura de la rebaba

Temperatura de la rebaba °C	Q (kg/mm ²)
870	3,34
950	2,57
1000	2,17
1050	1,85
1100	1,52
1150	1,25
1200	1,05

Una vez obtenidos todos los parámetros necesarios para el cálculo del espesor del cordón de rebaba, sustituyéndolos en la ecuación 7, se despeja un valor de ϵ .

Después de conseguir los valores del espesor y del ancho del cordón de rebaba se comprueban las recomendaciones que se deben cumplir, siendo estas las condiciones;

$$\epsilon: 1-6 \text{ mm} \quad (11)$$

$$8 < \frac{2 * \lambda}{\varepsilon} < 14 \quad (12)$$

Si no se cumplen las condiciones, se calcularán los valores límites del espesor del cordón y se cogerá un valor que esté en ese rango.

El alojamiento de la rebaba también se debe dimensionar, para ello se siguen las siguientes recomendaciones, de donde se obtendrán los valores del ancho y el espesor del alojamiento.

$$2\varepsilon < e < 3\varepsilon \quad (13)$$

$$I > 8e \quad (14)$$

8. Dimensionamiento del taco de partida

El taco de partida será el tocho del que se consiga la pieza final, por tanto, será del mismo material que la pieza. El taco se moldeará dentro de las estampas hasta conseguir su forma final, y su dimensionamiento es fundamental, ya que no se pueden utilizar tacos con cualquier medida.

El taco de partida se dimensionará teniendo en cuenta el volumen tanto de la pieza como de la rebaba. Para ello, primero se calculará un volumen aproximado de la pieza.

Para facilitar el cálculo se obtendrán los volúmenes de la base y del cilindro superior por separado, y después se restará el volumen que ocupa el agujero ciego. Para la primera, mediante la ecuación (15) con el radio medio y la altura de la base se consigue el primer valor. El volumen del cilindro se obtiene también partiendo de la ecuación (15), pero en este caso con el radio medio y la altura del cilindro. Por último, el volumen del agujero ciego se calculará igual, pero con el radio medio y la altura del agujero.

$$V = \pi * R^2 * H \quad (15)$$

El siguiente paso, será calcular el volumen del cordón de rebaba, que se consigue mediante la siguiente ecuación (16).

$$V = \pi * \varepsilon * \lambda * (\lambda + d) \quad (16)$$

El volumen del tocho será la suma de los dos.

El taco será cilíndrico, y su volumen se calculará mediante la ecuación (15), que igualándola al volumen total obtenido, y con la condición de no pandeo (17), se conseguirán sus dimensiones.

$$H \leq 2,5 * D \quad (17)$$

Para terminar de dimensionar el tocho hay que buscar en la norma UNE-EN10060⁶ unas dimensiones normalizadas. En la tabla 11 aparece un extracto de la norma. De ahí se obtiene un diámetro inicial y una altura que servirá para empezar a simular. A medida que se hagan más simulaciones se puede cambiar de dimensiones siempre que estén normalizadas.

En la tabla inferior aparecen las dimensiones disponibles de los tacos de partida, es decir las dimensiones a las que los fabricantes producen las barras redondas que

servirán como tocho inicial. En la tabla aparecen solo los diámetros disponibles, ya que la altura del taco se podrá ajustar a lo deseado, cortando la barra a la altura necesaria. Se puede observar como hay la posibilidad de escoger entre una gran variedad de diámetros. También se puede encontrar la masa y las tolerancias dimensionales de las barras, al igual que su área de la sección transversal.

11. Tabla. Dimensiones preferentes, masa y tolerancias dimensionales de las barras redondas laminadas en caliente para usos generales y aplicaciones de precisión.

Dimensiones preferentes, masa y tolerancias dimensionales de las barras redondas laminadas en caliente para usos generales y aplicaciones de precisión						
Diámetro ^a <i>d</i> (mm)	Desviación límite ^b Normal (mm)	Desviación límite ^b Precisión (P) (mm)	Masa ^c (kg/m)	Área de la sección transversal (cm ²)		
10	± 0,4	± 0,15	0,617	0,785		
12			0,888	1,13		
13			1,04	1,33		
14			1,21	1,54		
15			1,39	1,77		
16	± 0,5	± 0,20	1,58	2,01		
18			2,00	2,54		
19			2,23	2,84		
20			2,47	3,14		
22			2,98	3,80		
24	± 0,6	± 0,25	3,55	4,52		
25			3,85	4,91		
26			4,17	5,31		
27			4,49	5,73		
28			4,83	6,16		
30	± 0,8	± 0,30	5,55	7,07		
32			6,31	8,04		
35			7,55	9,62		
36			7,99	10,2		
38			8,90	11,3		
40	± 0,40	± 0,40	9,86	12,6		
42			10,9	13,9		
45			12,5	15,9		
48			14,2	18,1		
50			15,4	19,6		
52	± 1	± 0,50	16,7	21,2		
55			18,7	23,8		
60			22,2	28,3		
63			24,5	31,2		
65			26,0	33,2		
70			30,2	38,5		
73			32,9	41,9		
75			34,7	44,2		
80			39,5	50,3		
85			44,5	56,7		
90	± 1,3	No aplicable	49,9	63,6		
95			55,6	70,9		
100			61,7	78,5		
105			68,0	86,6		
110			74,6	95,0		
115	± 1,5	No aplicable	81,5	104		
120			88,8	113		
125			96,3	123		
130			104	133		
135			112	143		
140	± 2	No aplicable	121	154		
145			130	165		
150			139	177		
155			148	189		
160			158	201		
165	± 2,5	No aplicable	168	214		
170			178	227		
175			189	241		
180			200	254		
190			223	284		
200	± 3	No aplicable	247	314		
220			298	380		
250			± 4	No aplicable	385	491

(Continúa)

9. Dimensionamiento de la prensa

En este apartado, se dimensionará la prensa para el proceso. Con lo que se calculará la fuerza máxima que realizará la prensa para la forja, y para ello, es necesario el cálculo de las presiones de llenado de los detalles de la sección de la pieza. Se cogerá como referencia las dimensiones ya calculadas del plano de la pieza forjada (Ilustración 23, anexos).

En primer lugar, se calculará la presión P_1 de llenado del radio de fondo R_1 . Para ello, con el valor de K_0 obtenido de la ecuación (18) entrando en las curvas umbrales de plasticidad (gráfico 4) con la temperatura del proceso, se consigue su valor.

$$K_0 = \frac{2 * R_1}{D} \quad (18)$$

En segundo lugar, se calculará la presión P_2 de llenado de la cavidad de radio de fondo R_2 , utilizando la expresión (19).

$$P_2 = (m - \alpha) * \left[1 + \ln \frac{S_e}{S_f} \right] * e^{4 * K_2 * \mu} + (A_m + r_m) + \alpha \quad (19)$$

Donde:

- m es la presión necesaria para el llenado de R_2 . Se obtiene entrando en las curvas umbrales de plasticidad (gráfico 4) con la temperatura de la forja y con el valor de K ; obtenido de (20).

$$K = \frac{2 * R_2}{l} \quad (20)$$

- α es la pérdida de carga en la transmisión de m a las paredes de la cavidad. Se obtiene entrando en las curvas umbrales de plasticidad (gráfico 4) con la temperatura del proceso y con el valor de K_2 ; obtenido de (21).

$$K_2 = \frac{h}{l} \quad (21)$$

Analizando los valores de m y de α conseguidos, se aprecia que la primera parte de la expresión (19) se anula, por lo que no hace falta seguir calculando los demás parámetros. Para calcular la parte final de la expresión se recurre a la tabla 12 que contiene la suma de los parámetros; A_m : umbral de plasticidad medio al aplastamiento del taco, r_m : umbral de plasticidad medio al estirado del taco, y α .

12. Tabla. Valores de $A_m + A_r + \alpha$ para diferentes materiales y temperaturas

Acero a 1000°C	$(A_m + A_r + \alpha) = 21 \text{ kg/mm}^2$
Acero a 1200°C	$(A_m + A_r + \alpha) = 10 \text{ kg/mm}^2$
Cobre a 875°C	$(A_m + A_r + \alpha) = 16,5 \text{ kg/mm}^2$
Aluminio a 525°C	$(A_m + A_r + \alpha) = 9,7 \text{ kg/mm}^2$
Latón a 675°C	$(A_m + A_r + \alpha) = 10 \text{ kg/mm}^2$

En el proceso de la forja la presión motriz está ejercida en la sección superior del cilindro, pero al existir un agujero ciego, esa presión se ejercerá en la sección restante y no en toda la sección. Al no estar centrada esa fuerza, hay que corregir el valor de P_2 sumándole una diferencia de presión que aparece en la tabla 13.

De forma, que la presión P_2 final será la siguiente:

$$P_{2 \text{ final}} = P_2 + \Delta P \quad (22)$$

13. Tabla. Corrección en la presión motriz por la posición de la cavidad.

ΔP (kg/mm ²)	Acero 1000°C	Cobre 875°C	Aluminio 1250°C	Latón 675°C	Cu-Al 800°C	Aleación ligera 450°C
Cavidad bien centrada	0	0	0	0	0	0
Cavidad a media distancia del extremo	4	3,2	1,8	1,9	2,4	6
Cavidad en el extremo	8	6,4	3,6	3,8	4,8	12

Además, se calculará q ; presión necesaria para la forja del cordón de rebaba. Para ello, con el parámetro K_1 calculado partiendo de la expresión (23) entrando en las curvas umbrales de plasticidad con la temperatura del proceso se consigue su valor.

$$K_1 = \frac{\epsilon}{2 * \lambda} \quad (23)$$

Finalmente, con esas presiones y con las secciones tanto de la pieza cómo de la rebaba se calcula la fuerza máxima necesaria para forjar la pieza. Utilizando la fórmula (24) se consigue su valor.

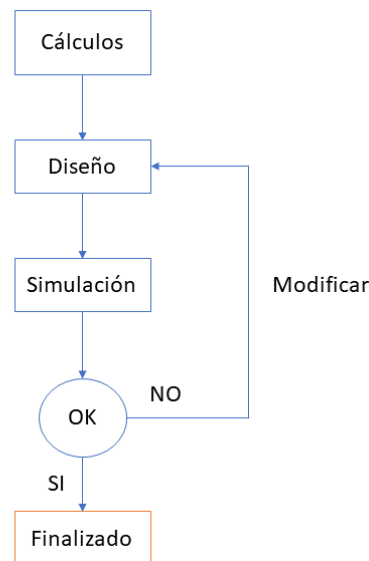
$$F_{max} = P * S_{pieza} + q * S_{rebaba} \quad (24)$$

10. Optimización del diseño mediante la simulación

Como se ha mencionado anteriormente, la simulación es la parte más importante del proyecto, y por ello es la que más tiempo acapara. Es un proceso iterativo donde en cada simulación se buscará cumplir con los objetivos propuestos para la pieza y las estampas. En el caso que no se consigan los resultados requeridos, se modificarán diferentes parámetros como pueden ser los siguientes.

- La temperatura tanto a la que se calienta el taco inicial (Siempre por encima de la T^a de recristalización), como a la que se precalientan las estampas.
- El lubricante del proceso.
- Geometría de las estampas, como serían los ángulos de salida o los diferentes radios del utillaje.
- Dimensiones del taco de partida.

Consistirá en hacer todas las simulaciones necesarias hasta conseguir los mejores resultados. En el organigrama inferior se muestra el proceso a seguir [Ilustración 10].



10. Ilustración. Organigrama del proceso de diseño

Para ello, antes de empezar con la simulación, se crea un fichero CAD (Diseño Asistido por Computadora) a partir de los planos de la pieza forjada obtenida, de donde se lograrán los planos de las estampas. Después de conseguir los planos, vendría el paso de la simulación. Como se ha comentado anteriormente, el programa que se utilizará será el simulador Qform VX.

El programa Qform VX es un programa de cálculo basado en la simulación mediante elementos finitos. Permite simular el flujo de los metales en las estampas complejas y

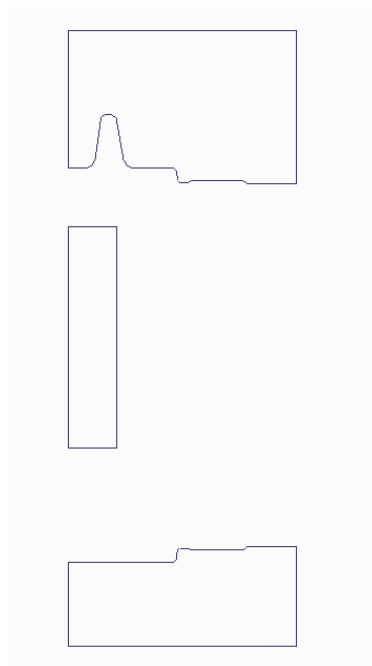
pronosticar los posibles defectos. El programa simula la distribución de la temperatura, de las deformaciones y tensiones de la pieza forjada y del utillaje, así como la forma de las fibras de la pieza final. El simulador está organizado en tres partes principales: preprocesador, procesador y post-procesador⁷.

Primero se explicará el diseño preliminar obtenido con los cálculos hechos hasta ahora, y después, se desarrollarán cada una de las tres partes del simulador, junto con la opción de la simulación a dos etapas que permite el programa.

10.1. Diseño preliminar de las estampas

Una vez realizado el diseño de la pieza forjada y el dimensionamiento del taco de partida, se consigue el diseño preliminar del utillaje. Es el primer diseño a partir del cual se obtienen las primeras estampas, que serán el punto de partida para empezar a simular. Al final de las simulaciones, estas estampas habrán cambiado en algunos aspectos consiguiendo las más óptimas para el proceso.

Para obtener los planos del prediseño, se utiliza el programa Solid Edge con el que se creará el archivo. Por una parte, al ser una pieza de revolución, todas las secciones longitudinales serán idénticas, con lo que se aplicará la simetría a las estampas. Por otra parte, cómo el programa de simulación permite trabajar en dos dimensiones, lo que facilitaría la simulación, los planos del utillaje se harán en dos dimensiones. Estas opciones facilitan la obtención de los planos, en la Ilustración 11 se muestra el primer diseño con media estampa superior, media inferior, y medio taco de partida.



11. Ilustración. Planos de las estampas

10.2. Preprocesador

El preprocesador es la parte del programa de elementos finitos donde se define el análisis que se va a realizar, y para ello se definen las siguientes variables.

Operación

En primer lugar, habría que crear un nuevo proceso. En este apartado se especifica la operación, donde habría que definir la deformación y con qué tipo de problema se va a trabajar. En cuanto a la deformación, la pieza se deformará teniendo en cuenta los procesos térmicos, y el tipo de problema será de dos dimensiones y con eje de simetría.

Geometría

En segundo lugar, se determina la geometría. Para ello, se cargará desde fichero la geometría antes definida, es decir, se ha de exportar el archivo con los planos de las estampas. Para conseguir el formato con el que se trabajará, el programa tiene una herramienta con la cual podrá cambiarse. Este subprograma obliga a posicionar el eje de simetría en la cota 0 de abscisas, para que luego a la hora de simular, éste esté bien definido. En este apartado también se deberán de concretar las estampas y el tocho.

Parámetros de la preforma

El siguiente paso, consistirá en introducir los parámetros de la preforma, cómo son el material de la pieza y la temperatura del proceso. El material de la pieza a utilizar es acero al carbono, ya definido en el apartado de la pieza. El programa ofrece una gran variedad de materiales y de sus aleaciones, con lo que no habría problema en la elección de éste. En cuanto a la temperatura del proceso, es muy importante su elección, ya que, al ser un proceso de forja en caliente, en todo momento se debe sobrepasar la temperatura de recristalización del material de la pieza. Conociendo que la temperatura de recristalización del acero al carbono ronda entre 600 y los 850°C, se elegirá una temperatura de 1100°C.

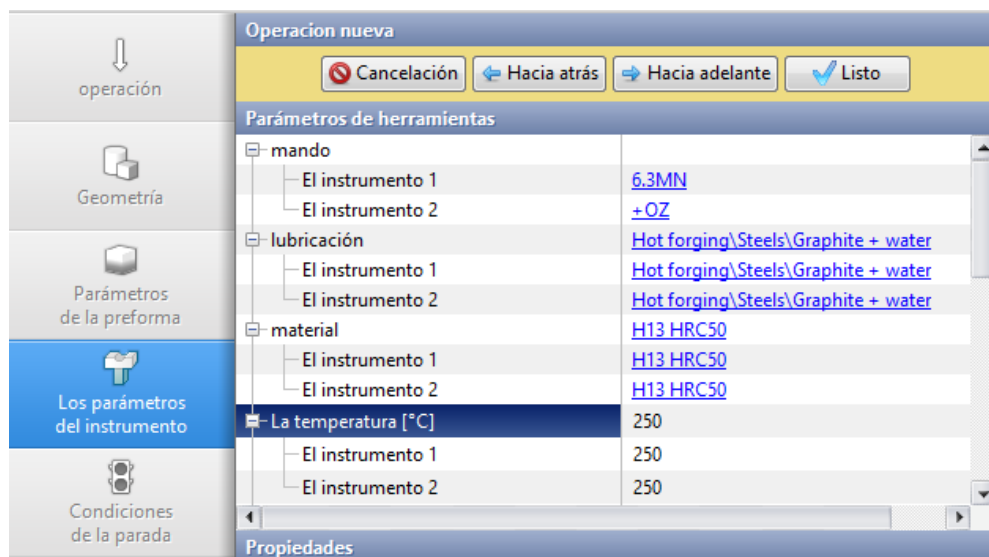
Parámetros del utillaje

Posteriormente, se definen los parámetros del utillaje, en este caso de las estampas. Para ello hay que concretar una serie de parámetros. En primer lugar, el mando de las herramientas, es decir, el movimiento o la posición que van a tomar. En este caso, el proceso se llevará a cabo mediante una prensa mecánica que será la que aplique la fuerza para deformar el tocho. Esta acción la hará la estampa superior, por lo que hay que definirla cómo prensa mecánica, e introducir el valor de la fuerza que se quiera aplicar. El valor de la fuerza se calcula teniendo en cuenta la geometría de la pieza (Los

cálculos aparecerán en un apartado más adelante). El valor de la fuerza máxima necesaria para el proceso es de 5,995MN por lo que se elegirá el valor de 6,3MN que ofrece el programa.

La estampa inferior se mantendrá fija en todo momento, con lo que se fijará en el plano OZ, es decir, el plano en el que se realizará la simulación en dos dimensiones. El siguiente paso sería elegir la lubricación. La lubricación de las matrices es una fase importante en el proceso de la forja, ya que mejora la calidad y la productividad de las piezas obtenidas. El lubricante no solo sirve para reducir la fricción entre los metales, sino que también ayuda a la hora de desmoldear, y para refrigerar y preservar la vida útil de las estampas. Por todo ello se deberá elegir adecuadamente el lubricante, en este caso se utilizará grafito disuelto en agua.

Por último, se define el material y la temperatura de las estampas. El material elegido será el acero H13, el cual cumple todas las condiciones necesarias para llevar a cabo un buen proceso. Ya que, posee buena tenacidad y una alta resistencia a la formación de grietas causadas por el choque térmico, además, tiene una buena resistencia al desgaste y mantiene la dureza y la resistencia a la tracción en altas temperaturas. La temperatura a la que se precalentarán las estampas será de 250°C. En la ilustración 12 se puede observar los parámetros del utillaje a definir.



12. Ilustración. Parámetros definidos de las estampas

Condiciones de parada

En este apartado el programa permite definir las condiciones de parada, ya sea la distancia, el tiempo, la posición final o el esfuerzo máximo que se quiera realizar. En este caso sólo se definirá la distancia final, que será nula, ya que al diseñar las estampas

se ha añadido el cordón y el alojamiento donde acabará la rebaba. Por este motivo las dos matrices se tocarán al finalizar el proceso.

Condiciones de contorno, número de golpes y parámetros de cálculo

En último lugar, se definen estas tres variables. En las condiciones de contorno el único parámetro a definir es la temperatura ambiente, que será de 20°C, la cual viene dada por defecto. Después, se define el número de golpes que se realizarán en el proceso, en este caso se hará en un solo golpe, que se llevará toda la energía del proceso. Por último, en el apartado de parámetros de cálculo, no haría falta introducir ningún dato, ya que todos vienen introducidos por defecto.

10.3. Procesador

Habiendo definido todos estos parámetros el programa está listo para simular. Es en este apartado donde el simulador genera y resuelve la operación definida. El programa permite ver el proceso de la simulación visualmente y calcula el tiempo requerido para la simulación.

10.4. Post-procesador

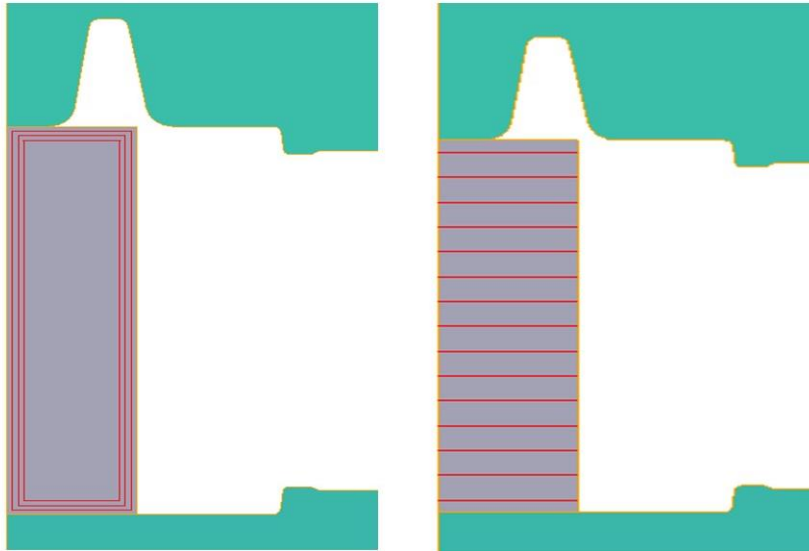
En esta última parte es donde el programa posibilita visualizar los resultados de la operación, para que se puedan conocer y así interpretar las respuestas obtenidas. El programa permite conocer los valores de las tensiones, deformaciones y temperaturas de la pieza. También permite ver visualmente si se producen fallos o errores en el proceso, que habría que corregir, como serían la falta de material y los solapes. Una vez simulado, aparecen otras herramientas que permiten analizar nuevos parámetros tanto de la pieza como de las estampas. Las cuales se especifican a continuación.

Puntos y líneas a trazar

Esta herramienta permite analizar la deformación de las fibras internas de la pieza. Para ello, posee varias opciones de uso, como la creación de puntos y de líneas sobre la superficie de la pieza, para así analizar los cambios que se producen en el fibrado de ésta. En este caso, se han usado principalmente dos opciones, la creación de una zona de líneas, y la creación de líneas superficiales.

La zona de líneas son una serie de líneas rojas que se crean sobre el tocho antes de su deformación, y al igual que él se deforman por la fuerza de las estampas, para así analizar el resultado final del fibrado. Estas líneas pueden ser tanto verticales como horizontales y se puede especificar la cantidad.

En cuanto a las líneas superficiales, siguen el mismo proceso que las anteriores. Estas líneas se crean paralelamente al contorno y al igual que antes se puede elegir la cantidad de ellas. Una vez creadas, en los dos casos se debe ejecutar el seguimiento para la operación. En la ilustración 13 aparecen los dos tipos de líneas anteriormente mencionadas, antes de la simulación.



13. Ilustración. Líneas superficiales a la izquierda y la zona de líneas horizontales a la derecha

Subprogramas

En la parte de subprogramas que facilita el simulador se encuentran las demás herramientas accesibles para analizar más variedad de resultados. Esta opción, permite añadir subprogramas ya definidos por el programa en sí. Se utilizarán dos subprogramas.

El 'Gartfield' es un instrumento del simulador para identificar los defectos del flujo del metal. Se calcula en base a la deformación por tracción en la dirección normal a la superficie de la pieza deformada. El programa define que aparecen defectos como grietas o defectos de flujo en el área donde se acumulan dichas deformaciones por tracción. La escala de valores que proporciona el programa va de 0,3 a 1, valores adimensionales, siendo 0,7 valor crítico. A partir de ese valor es probable que la pieza forjada tenga un defecto superficial, con lo que no se aceptarán valores superiores a 0,7 de 'Gartfield'.

Otro subprograma que sirve de mucha ayuda es el que permite conocer la fatiga del utillaje. La vida útil de las estampas es un parámetro importante a definir, buscando el mayor número de ciclos de vida posibles, ya que como se ha mencionado anteriormente,

es un objetivo a cumplir. Para visualizar los resultados, habría que ejecutar los subprogramas y volver a simular.

Una vez acabada la simulación el programa también permite analizar el utillaje. Para ello, habría que seguir una serie de pasos. En primer lugar, en los parámetros del utillaje, habría que definir la deformación en común de las estampas y la pieza. Después, habría que definir nuevas condiciones de contorno para el utillaje, es decir, fijar las estampas con unos soportes fijos. Para terminar, habría que realizar el cálculo independiente de las estampas. Los resultados del utillaje se pueden observar al igual que los de la preforma.

10.5. Simulación con preformas

Al igual que se puede forjar una pieza en más de una etapa, el programa también permite simular el proceso en varias etapas, ya que la mayoría de piezas se fabrican así. En este trabajo el número de etapas no está previamente definido para el proceso, se buscará el número óptimo de etapas con el fin de lograr los mejores resultados tanto en la pieza como en el utillaje. Al ser una pieza de pequeñas dimensiones sin una forma compleja se buscará hacer una o dos etapas para facilitar la simulación.

El programa permite añadir etapas al proceso cambiando de utillaje en cada etapa y manteniendo el tocho, con lo que éste se irá deformando poco a poco hasta obtener el resultado deseado en la última etapa. Para ello, en la primera etapa, gracias a unas estampas muy simples, el taco se aplastará para que el fibrado interior de la pieza vaya cogiendo forma, y en la segunda, se utilizarán las estampas ya diseñadas, donde se logrará la forma final de la pieza.

El proceso de simulación es el mismo que si fuera una sola etapa, con la característica de que, una vez acabada la simulación, se debe añadir una operación a la cadena. Al añadir una operación más, el programa parte de la preforma ya deformada de la primera etapa y permite añadir el nuevo utillaje. En este trabajo se analizarán los resultados obtenidos de la simulación a una y a dos etapas, y comparándolas se escogerá la que mejores resultados proporcione.

A la hora de simular, los parámetros a definir serían los mismos que si fuese con una sola etapa, con una sola excepción, la distancia final entre estampas. En la primera etapa al querer aplastar un poco el tocho, la distancia a la que quedarán las estampas no será nula, por lo que habría que definirla, sin haber un valor fijo. Los demás parámetros serán los mismos, pudiendo mantenerlos en las dos etapas, siempre que

para la segunda etapa se defina una distancia final nula, ya que las estampas se han diseñado para que acaben unidas.

En la ilustración 14 se puede ver un ejemplo de una simulación con dos etapas, en concreto la primera simulación con dos etapas realizada en el proyecto. En la imagen de la izquierda se puede observar el utillaje y el tocho de la primera etapa, y en la imagen de la derecha, el tocho previamente deformado con las estampas finales. Se busca anchazar el tocho inicial para que su fibrado final mejore y no se corte contra el nervio. Se puede contemplar cómo en la segunda imagen se ha anchado el tocho hasta que su extremo no se introduzca en el nervio. De esta manera, lo que deformará el taco será la base superior de la pieza y no las paredes laterales del nervio.



14. Ilustración. Ejemplo simulación dos etapas

11. Análisis de resultados

En este apartado se comentarán los resultados más destacados obtenidos en las simulaciones realizadas, y el resultado de la simulación final con el diseño terminado. También se compararán los resultados de las simulaciones tanto de una etapa como de dos etapas, escogiendo al final el número más adecuado.

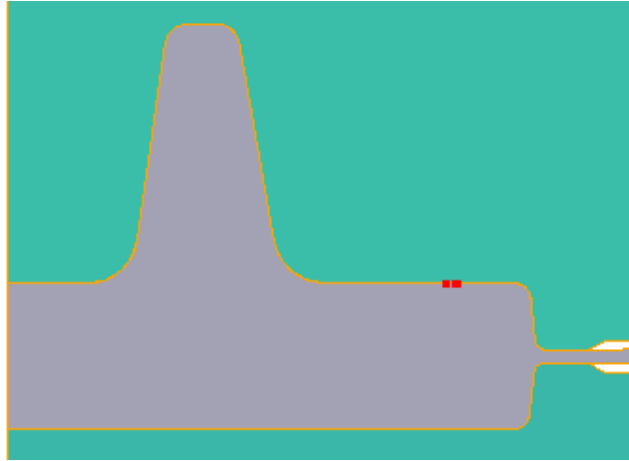
En primer lugar, como ya se ha mencionado en los objetivos del trabajo, antes de analizar resultados de la pieza y del utillaje hay que comprobar que no haya falta de material en el proceso y que no se produzcan solapes en la pieza. Estas dos acciones se pueden comprobar visualmente una vez terminada la simulación.

La falta de material se produce cuando el material del tocho no llena totalmente la cavidad entre las estampas, con lo que tampoco se llenaría el cordón de la rebaba. Este problema tendría fácil solución, habría que modificar el taco de partida inicial, distribuyendo la materia de forma diferente, siempre teniendo en cuenta que cumpla las dimensiones normalizadas. El mismo problema ocurriría cuando habría demasiado material sobrante, que imposibilita que las estampas se cierren. Se solucionaría de la misma manera.

Los solapes o pliegues⁸ se forman en los tramos de la superficie libre de la pieza bruta a deformar debido al flujo no estable del metal. Los elementos de la superficie se interaccionan y se cierran formando un defecto. El programa, mediante la generación automática de la red de elementos finitos, permite a partir de la simulación, determinar el momento y el lugar de la formación del pliegue. Los solapes se pueden identificar mediante una línea o unos puntos de color rojo en el simulador. Para evitar la formación de solapes en el proceso, habría que probar con varias variantes con distintas formas del utillaje y hallar la forma óptima del mismo.

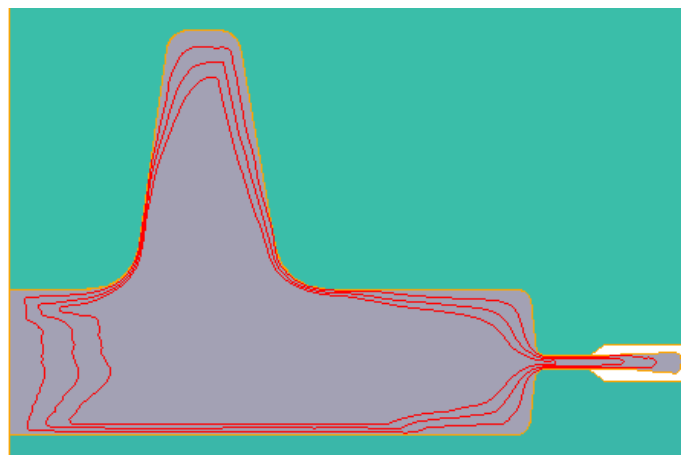
Al realizar el trabajo, en las primeras simulaciones, al no ser exacto el volumen del tocho calculado ya que se ha operado con unas dimensiones normalizadas más grandes, se producía material sobrante, problema que se soluciona modificando el taco de partida y disminuyendo su volumen. En las primeras simulaciones también se producían solapes, sobre todo en la parte superior de la base de la pieza. Estos solapes se solventaron modificando tanto el taco de partida como los radios de fondo de la base de la pieza, hasta conseguir que no se produjeran más pliegues.

En la ilustración 15 se puede observar un ejemplo de los solapes producidos en la pieza en las primeras simulaciones, los cuales se creaban en la misma zona de la pieza.



15. Ilustración. Ejemplo de solape

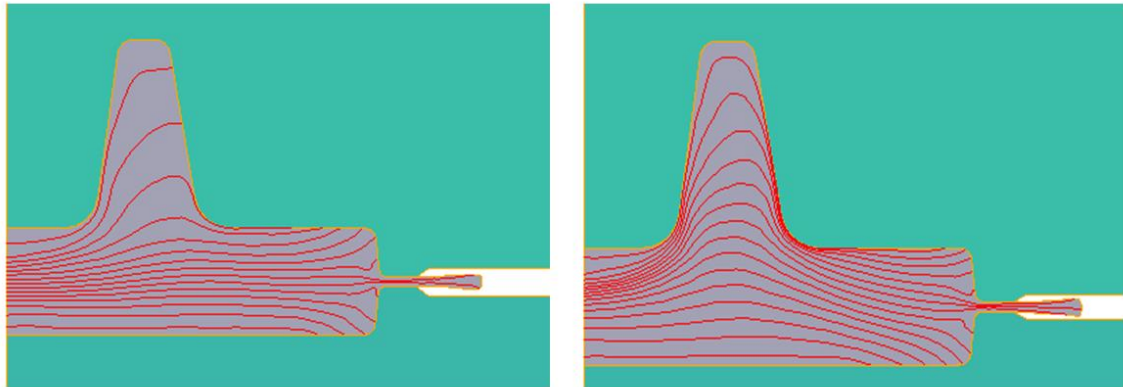
Por otro lado, se encontraría el **fibrado de la pieza**, característica muy importante de la pieza forjada para así conseguir las propiedades mecánicas deseadas. Con las herramientas que ofrece el programa antes descritas, se analizará el interior de la pieza. El objetivo a cumplir será que el fibrado sea continuo y que las líneas de proyección no se corten ni se crucen. Primero, creando las líneas superficiales sobre el tocho y simulando, se podrá ver la proyección del fibrado superficial. Observando los resultados se puede ver que hay dos zonas críticas, los dos radios de fillet de la entrada al nervio, y la entrada al cordón de rebaba. Aun así, en los resultados se puede observar que en todas las simulaciones el fibrado ha sido continuo y no se ha cortado. En la ilustración 16 se aprecia la forma del fibrado superficial.



16. Ilustración. Fibrado por líneas superficiales

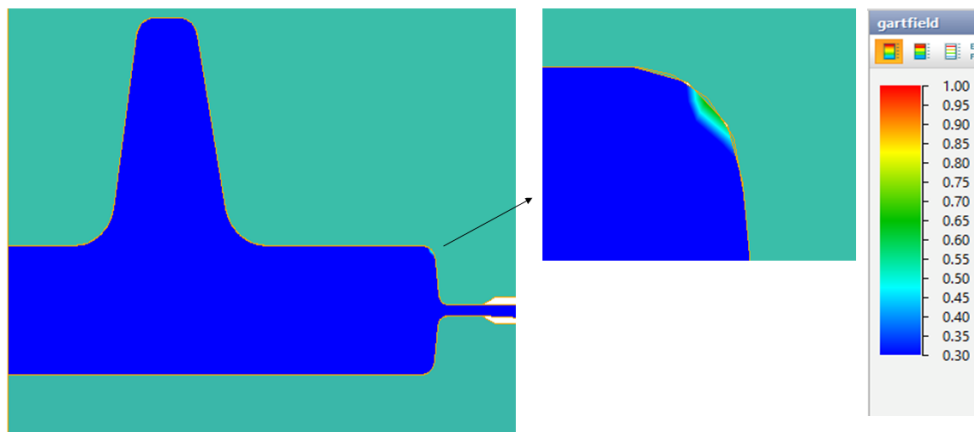
En cuanto a la zona de líneas creada para analizar el fibrado en todo el interior de la pieza, sí que el fibrado no es continuo. Se busca que las líneas vayan paralelamente al contorno de la pieza, pero en los resultados, se puede apreciar como en el nervio las líneas se cortan. Lo que no sería aceptable, por lo que se realizó la simulación a dos etapas con las mismas estampas diseñadas anteriormente, pero primero recalcando el

taco de partida un poco. En este caso, sí que se consigue un buen fibrado, en todo momento continuo y sin que las líneas se corten. En la ilustración inferior se puede observar una comparación del fibrado de la simulación a sola etapa (parte izquierda) y a dos etapas (parte derecha), se puede observar una clara mejoría.



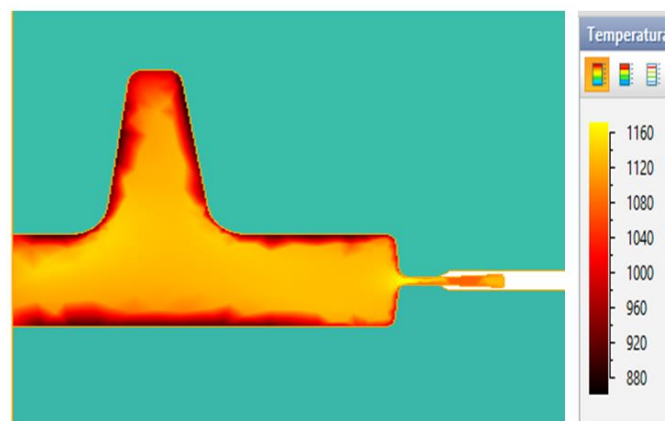
17. Ilustración. Fibrado interior en simulación a una etapa en la parte izquierda y a dos etapas en la parte derecha

El siguiente resultado a analizar será el parámetro **'Gartfield'** que servirá para identificar los defectos del flujo del metal. Como se ha comentado antes, no se admitirán valores de 'Gartfield' mayores a 0,7. Comparando la simulación a una etapa y a dos etapas, se consiguen valores máximos admisibles, aunque en una única etapa se obtiene un valor máximo bastante menor al de dos etapas. La zona donde se dan estos valores máximos es muy pequeña, siendo una zona puntual, en los radios de fondo de la base. En las demás zonas de la pieza se logra un valor mínimo de 0,3. En la simulación a una etapa se consigue un valor máximo de 0,439275 y en cambio, en la de dos etapas, un máximo de 0,603607. Se observa una diferencia destacable, pero al no exceder el valor crítico, no habría problemas en ninguna de las dos piezas. En la ilustración 18 se aprecia la zona donde se da el valor máximo de 'Garfield'.



18. Ilustración. Zona de la pieza donde se produce el máximo valor de 'Gartfield'

Siguiendo con el análisis de los campos de la pieza, lo siguiente a analizar sería **la temperatura de la preforma** durante el proceso. Esta temperatura en todo momento debe ser mayor a la temperatura de recristalización del metal. En este caso se cumple esa condición, consiguiendo una temperatura mínima en el proceso de 860,0°C, la cual es mayor a la temperatura de recristalización del acero. Esta temperatura mínima se da en el contacto con el utillaje, mientras que en interior de la pieza la temperatura se mantiene por encima de los 1000°C. En la imagen inferior se puede observar la distribución de la temperatura al finalizar el proceso.

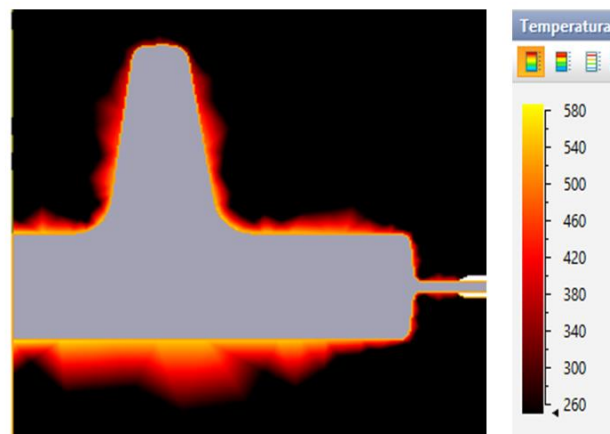


19. Ilustración. Distribución de la temperatura al terminar el proceso

Por otra parte, se encontrarían las tensiones y deformaciones producidas en la pieza. En cuanto al campo de **tensiones**, habría que analizar la tensión media producida. Sobre todo se producen tensiones a compresión, pero también se dan tensiones a tracción ya que el material se estrecha y se estira en la zona del cordón de rebaba. En ningún caso estos valores superarían la máxima tensión a tracción admisible del acero. En la ilustración 4 se puede observar la distribución de tensiones medias obtenidas en la pieza.

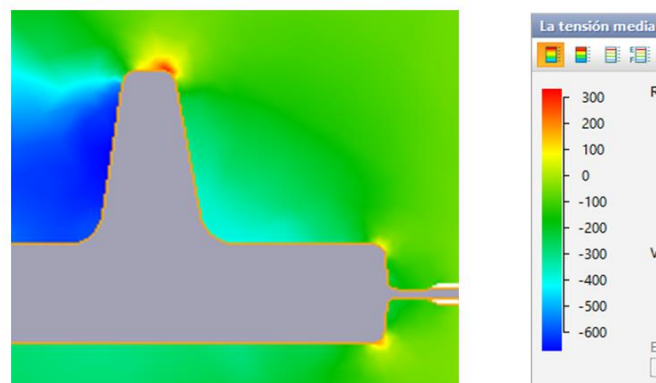
Para terminar con los resultados de la pieza, habría que estudiar la **deformación** producida en ésta. Se analizará la deformación plástica, ya que se ha superado el límite elástico y el material no recuperará su forma inicial. Es la deformación plástica del material la que se buscaba en el proceso, ya que así se consigue la forma final más fácilmente aplicando menos fuerza. Se define como deformación unitaria y es un parámetro unidimensional. Considerando los resultados obtenidos se concluye que las zonas donde se ha producido una mayor deformación han sido las zonas de entrada al nervio y al cordón de rebaba. Obteniendo unos valores máximos de 4,98986 en esas zonas.

En lo que se refiere al estudio de **resultados del utillaje**, se encontrarían el análisis de tensiones, deformaciones, temperatura y fatiga del utillaje. En cuanto a la **temperatura del utillaje**, al estar el taco inicial a una alta temperatura, las estampas se calientan. Pero esto no debe suponer un cambio en sus propiedades. Analizando los resultados se puede observar como en las zonas de contacto con el taco se consiguen unas temperaturas alrededor de los 500°C, siendo la máxima una temperatura de 587,375°C. Las demás zonas del utillaje se mantienen a la temperatura de 250°C, que es la temperatura inicial de las estampas. En la siguiente ilustración se puede observar la distribución completa de la temperatura en el utillaje al terminar el proceso.



20. Ilustración. Temperatura del utillaje

El análisis de **tensiones** al igual que con la pieza, se hará con el estudio de la tensión media ejercida en el utillaje. Estas tensiones son tanto de compresión como de tracción, siendo en la mayoría de las zonas tensiones a compresión. Las tensiones a tracción se dan en las zonas de los radios de fondo de la pieza, siendo la zona crítica la parte superior del nervio. Los valores máximos obtenidos son de 330,806 MPa a tracción y 674,984MPa a compresión. En la imagen inferior se puede observar la tensión media lograda por el utillaje.

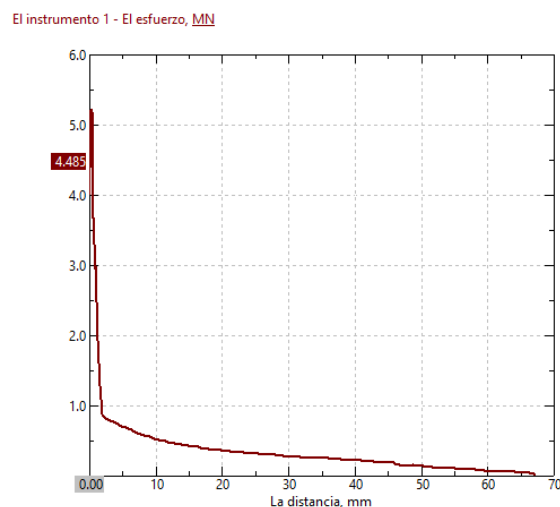


21. Ilustración. Tensión media del utillaje

El análisis de **deformaciones** del utillaje se realiza examinando la deformación elástica sufrida por las estampas. Viendo los resultados obtenidos se observa que la deformación es mínima, del valor de milésimas. Este resultado tiene sentido ya que las estampas están hechas de acero H13 que mantiene la dureza a altas temperaturas. Toda la zona de contacto con la pieza se mantiene prácticamente uniforme sin la posibilidad de ver la deformación visualmente.

Por último, sobre el utillaje, quedaría el **análisis de la fatiga**. Como se ha comentado anteriormente es un parámetro importante a la hora de su diseño. El programa proporciona la vida útil de las estampas, dando a conocer el número de ciclos que es capaz de aguantar el utillaje sin fallar. El resultado obtenido es de más de 1.000.000 de ciclos, es decir, se puede tomar como que las estampas cumplirían de sobra la vida útil propuesta.

Para finalizar con los resultados, faltaría analizar la **fuerza ejercida** por la prensa mecánica en la simulación. Para ello, se compararán las fuerzas máximas necesarias para forjar a una sola etapa y a dos etapas. Para una sola etapa se necesita menor fuerza máxima, aunque con poca diferencia respecto a la simulación con dos etapas. El valor máximo conseguido para una etapa es de alrededor de 5,25MN y para dos etapas es de 5,35MN. El programa ofrece una herramienta para estudiar los resultados de la fuerza gráficamente. En este caso se ha hecho una gráfica de la fuerza ejercida por la estampa superior (la que hace la función de la prensa) respecto a la distancia recorrida. En la gráfica inferior (simulación a una etapa) se puede observar como la fuerza crece exponencialmente a medida que se van cerrando las estampas. Obteniendo una fuerza máxima cuando el material se ha introducido en el cordón de rebaba y se ha empezado a solidificar.



5. Gráfico. Fuerza ejercida por la estampa superior respecto a la distancia recorrida, en una sola etapa

Como conclusión final, después de haber analizado todos los resultados obtenidos tanto de una etapa como de dos etapas, se puede ver como se consiguen diferentes resultados en distintas variables a estudiar, como son en el fibrado y en el 'Gartfield'. Sin embargo, en la distribución de temperatura, tensión, y deformación de la pieza como del utillaje no se consiguen cambios significativos en los resultados con respecto al número de etapas. Respecto a la vida útil de las estampas también se consiguen los mismos resultados.

En cuanto al fibrado de la pieza, la simulación a dos etapas obtiene unos resultados notablemente mejores que los de una sola etapa, ya que su fibrado final se mantiene continuo y paralelo al contorno de las estampas. Sin embargo, analizando el 'Gartfield' para determinar defectos internos del material, se logran mejores valores en la simulación a una etapa, aunque en los dos casos se obtienen resultados aceptables. El estudio de la fuerza también es ligeramente favorable en el proceso de una etapa, ya que se consigue una fuerza necesaria menor y esto conlleva un ahorro energético en el proceso.

Para terminar, se ha decidido que el diseño más óptimo sea el proceso de dos etapas, ya que respecto al fibrado de la pieza, consigue mejores resultados, que hacen que la pieza final logre unas propiedades mecánicas muy buenas, siendo esto clave en la elección. Respecto a los demás resultados, también obtiene unos valores aceptables con lo que se considera el mejor diseño.

El diseño final con el que se han conseguido los mejores resultados ha sido el obtenido en el prediseño de las estampas (sus dimensiones aparecen en los anexos, ilustración 23), y modificando el taco de partida. Las dimensiones finales del taco de partida son altura $H=161\text{mm}$ y diámetro $D=90\text{mm}$.

12. Descripción de tareas

A continuación, se definen las distintas tareas que se han realizado para llevar a cabo este trabajo, describiendo en qué consisten y una vez descritas se presenta un diagrama de Gantt para mostrar la duración aproximada de cada una de ellas, de una forma más visual.

T.1 Búsqueda de información

En primer lugar, para llevar a cabo el trabajo, se busca información tanto del proceso de fabricación; la forja, cómo del proceso del diseño del utillaje. De esta manera se conocerá mejor el proceso y los pasos a seguir. Se conocerán las ventajas y las desventajas de la forja y se analizarán diferentes alternativas por si mejorarían el proceso.

T.2 Elección de la pieza

El objetivo principal del trabajo es el diseño del utillaje de una pieza industrial, por eso, una fase necesaria e importante del mismo es la elección de la pieza. Ésta es elegida teniendo en cuenta que el diseño del utillaje y la simulación no sean excesivamente complicados. La pieza elegida es una brida con cuello de soldadura.

T.3 Diseño del utillaje

La primera parte importante del trabajo es el diseño preliminar del utillaje, que llevará bastante tiempo. Dentro de este apartado se encuentra el primer diseño de las estampas, el dimensionamiento del taco de partida y de la fuerza necesaria para la forja. Después de conseguir el diseño final se deberán de conseguir los planos para empezar a simular.

T.4 Optimización del diseño mediante la simulación

Esta tarea es la que más tiempo acapara, ya que como se ha comentado anteriormente el objetivo principal es el diseño del utillaje mediante la simulación por elementos finitos. Con la ayuda del programa se obtendrá el diseño óptimo del utillaje para el proceso. Se harán varias simulaciones para así corregir y modificar el prediseño con el fin de conseguir el mejor diseño posible. Se harán simulaciones a una etapa y a dos etapas.

T.5 Análisis de resultados

El análisis de resultados es una parte fundamental del trabajo, ya que es necesario un buen estudio de los resultados obtenidos. Se analizarán todos los resultados obtenidos en la simulación, y comparándolos se elegirá el diseño correcto modificando parámetros.

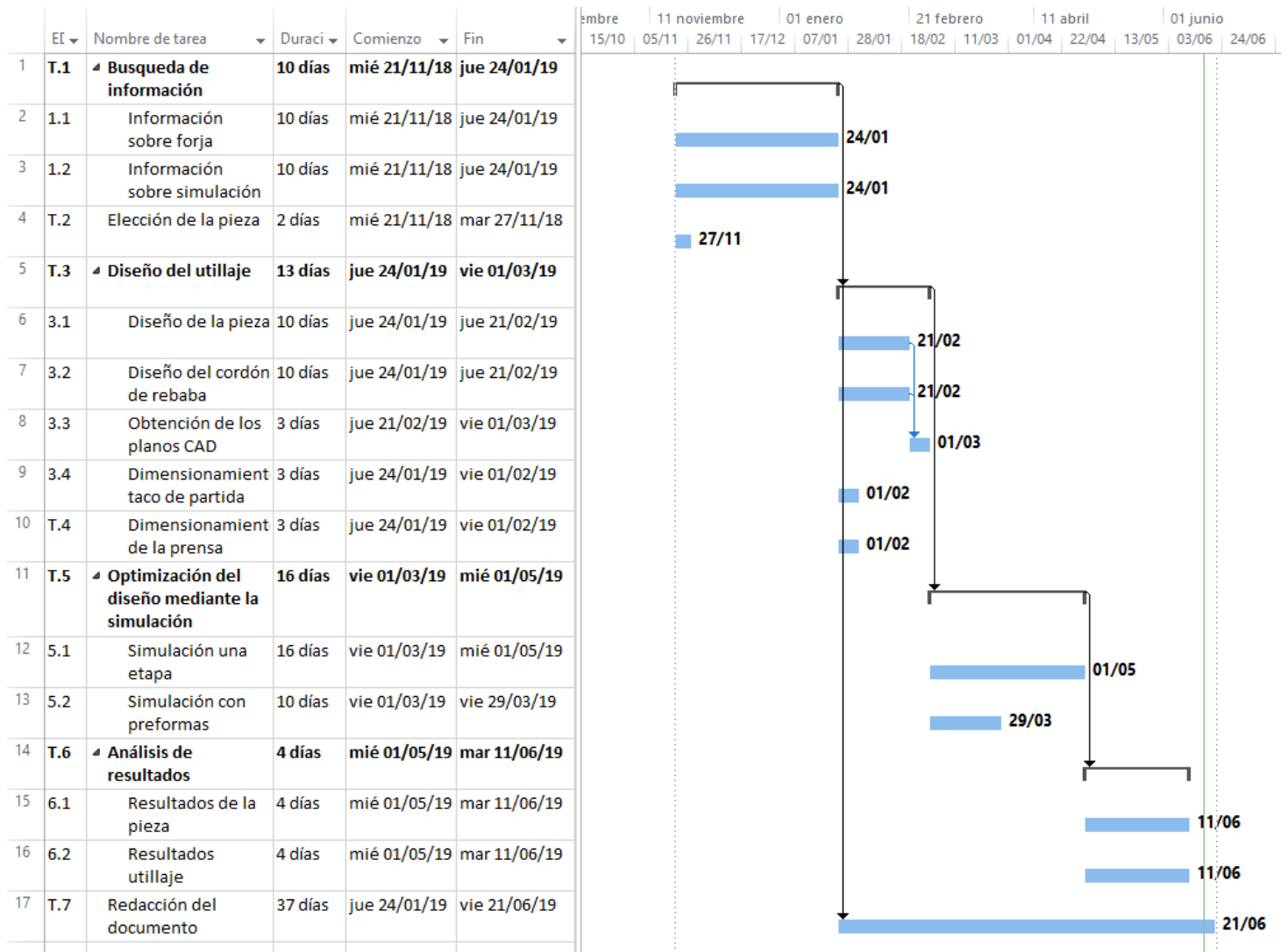
Un buen criterio de estudio lleva a conseguir el mejor diseño. La tarea se empezará según se complete la primera simulación.

T.6 Redacción del documento

Esta fase transcurre a lo largo de casi todo el proyecto, ya que se procede a redactar según se cuenta con la información.

En el diagrama de Gantt se puede observar como las tareas están unidas entre sí. Siendo las dos tareas críticas el primer diseño del utillaje (T.3) y la optimización de ese diseño mediante la simulación (T.4), que acaparan la mayor parte del proyecto. El proyecto se comenzó a inicios del mes de noviembre y se finaliza sobre el 21 de junio.

12.1. Diagrama de Gantt



22. Ilustración. Diagrama de Gantt

13. Descargo de gastos

En este apartado se estudiarán los costes equivalentes al proyecto, y para ello se desarrollará el presupuesto completo del trabajo. Los costes del presupuesto se dividirán en tres subgrupos; las horas internas, amortizaciones y gastos.

En primer lugar, se presentan las horas internas en la tabla 14, donde se incluyen las horas de trabajo realizadas con sus respectivos costes.

14. Tabla. Partida de horas internas

Concepto	Tiempo (h)	Coste unitario (€/h)	Coste total (€)
Alumno	250	25,00	6.250,00
Directora	40	45,00	1.800,00
TOTAL			8.050,00

En segundo lugar, se definen las amortizaciones. En este apartado se recogen los elementos empleados para el proyecto, pero que no son exclusivos de él (Tabla 15). Para su cálculo se realiza un prorrateo de los gastos dependiendo de las horas de uso.

15. Tabla. Partida de amortizaciones

Concepto	Nº unidades	Precio unitario (€/h)	Vida útil (h)	Uso en proyecto (h)	Coste total (€)
Ordenador	1	1.000,00	20.000	200	10
Microsoft Office	1	60,00	4.400	150	2,05
Licencia Qform	1	40,00	3.200	60	0,75
TOTAL					12,80

Por último, se recogen los gastos efectuados para este trabajo, que serían las inversiones realizadas únicamente para él. En la tabla 16 el concepto aparece como material, donde se englobaría el material fungible utilizado para la realización de trabajo, como son fotocopias, cuadernos y demás.

16. Tabla. Partida de gastos

Concepto	Coste total (€)
Material	30,00
TOTAL	30,00

Finalmente, se recogen todas las partidas en la tabla 17. Además, se añade un 10% de costes indirectos al presupuesto, con lo cual el coste total final del proyecto asciende a ocho mil novecientos dos euros con ocho céntimos.

17. Tabla. Resumen de gastos

Resumen	Coste (€)
Horas internas	8050,00
Amortizaciones	12,80
Gastos	30,00
Subtotal	8092,80
Costes indirectos (10%)	809,28
TOTAL	8.902,08 €

En la tabla anterior se puede observar como la mayor parte de los gastos del presupuesto se deben al coste de las horas internas, es decir las horas que el alumno y la directora trabajan en el proyecto. Tanto las amortizaciones como los gastos del proyecto acaparan una pequeña parte de los costes totales, en comparación con la partida de horas internas.

14. Conclusiones

Para finalizar el trabajo se presentan las conclusiones obtenidas en el proyecto. En primer lugar, se ha finalizado el proyecto consiguiendo el diseño del utillaje más óptimo para la brida, además, hay que recalcar la ayuda que ha supuesto el uso del simulador. Durante el transcurso del trabajo se ha visto la importancia del programa a la hora de facilitar el trabajo, ya que permitía analizar una gran variedad de parámetros para así modificando partes del diseño conseguir los resultados deseados en la pieza final.

A la misma vez, el programa de simulación ha permitido identificar los fallos producidos en la pieza forjada. Gracias a ello se han podido corregir y obtener una pieza final perfecta modificando el diseño anteriormente realizado. Ésto ha supuesto un beneficio tanto técnico como económico, ya que con su uso se ha logrado un diseño óptimo en cuanto a propiedades mecánicas de la pieza final, y se ha ahorrado el coste económico que supondría una pieza con fallos.

En cuanto al diseño preliminar, el hecho de haberlo realizado paso a paso y correctamente ha llevado a una simulación más sencilla y sin grandes complicaciones. El diseño de las estampas y el dimensionamiento del taco de partida realizado, ha facilitado y ha simplificado los resultados obtenidos en las simulaciones, ya que no se han producido fallos graves durante las simulaciones. El cálculo de la fuerza de la prensa, por ejemplo, ha sido muy buena, ya que el valor teórico y el valor real conseguido han sido muy parecidos. Se ha obtenido solamente un 10,75 % de diferencia. Éste hecho ha ayudado a lograr más fácilmente buenos resultados.

El número de etapas a realizar en la simulación también ha tenido repercusión en el trabajo. La comparación de resultados obtenidos en las simulaciones de una sola etapa con la de dos etapas, ha sido clave a la hora de obtener el diseño final. Los buenos resultados obtenidos en la simulación de dos etapas han hecho que el diseño final sea el realizado a dos etapas.

15. Referencias

1. *SIFE - Tecnología de forja.*
2. Vila Pastor, C. (2005). *Tecnología mecánica.* Castelló de la Plana: Publicacions de la Universitat Jaume I.
3. Nayyar, M. (2000). *Piping handbook.* New York: McGraw-Hill.
4. Río, J. (2005). *Conformación plástica de materiales metálicos (en frío y en caliente).* Madrid, España: CiE Dossat 2000.
5. Rossi, M. (1971). *Estampado en frío de la chapa.* Barcelona: Editorial Científico-Médica.
6. *Norma UNE-EN 10060:2004.*
7. Bilbao, M. A., Celaya, J. A., Martínez, I. C., & Miguel, I. H. (2017). *Guía práctica de elementos finitos en estática.* Paraninfo.
8. Romero Carrillo, P. (2009). *Software de simulación de procesos de deformación por forja.*

Anexo I. Cálculos del diseño de las estampas

En este primer anexo se definirán los cálculos; todos los valores numéricos obtenidos, sobre el diseño de las estampas anteriormente explicado. Para ello se seguirá el mismo orden anteriormente definido, primero se harán los cálculos referidos a la pieza y después los del cordón de rebaba.

Sobre espesor

En primer lugar, se definirá el sobre espesor de la pieza, que como anteriormente se ha explicado, entrando a la tabla 4 con el peso de la pieza se consigue un sobre espesor de 2mm que se aplicará en todo el volumen de la pieza.

Espesores de almas

Para su cálculo se tiene en cuenta el criterio de Del Rio que mediante el gráfico 1 se consigue el valor mínimo para el espesor del alma. Entrando con valores de h ; la altura desde la superficie de partición hasta la parte superior y l ; diámetro interior del agujero ciego.

Entrando en el gráfico 1 con el valor de l en abscisas y con la expresión (1) no se consigue un valor exacto. Para este caso no se encuentra un valor mínimo para el espesor, así que se va a coger un espesor $e=26,7\text{mm}$, igual que el espesor de la base, para facilitar su diseño.

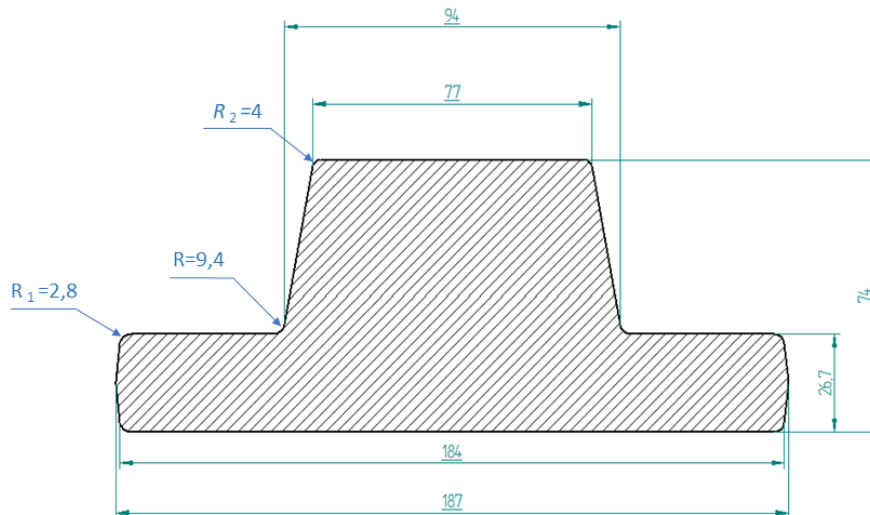
Salidas

En cuanto a las salidas que debe de tener la pieza se aplicará el criterio de Mario Rossi para las salidas exteriores y el de Del Rio para las interiores. Para la salida del cono superior, se va a usar el ángulo que trae la pieza que es de 10° , ya que es mayor que los $5-7^\circ$ que Mario Rossi propone para paredes exteriores.

Para la salida de la base, sí se ha aplicado el criterio de Mario Rossi. Desde las dos caras de la base se han añadido paredes con ángulos de 6° que acaban uniéndose en la superficie de partición de la pieza.

Para las paredes interiores del agujero ciego según el criterio de Del Rio, a el valor obtenido en la tabla 5 que son para paredes exteriores, se le suman 2° . Con los valores de H ; altura interior del nervio, b ; espesor del nervio y L longitud del nervio en la parte superior, con las expresiones (2) y (3) se consigue un ángulo de 7° . Entonces el ángulo a aplicar para las paredes interiores será de 9° .

En la ilustración 23 aparecen las dimensiones de la pieza una vez aplicado el sobre espesor y los ángulos de salidas escogidos (Se ha cogido la pieza sin el agujero ciego). Para realizar los siguientes cálculos se tomarán estas dimensiones (en milímetros) como referencia. En la imagen se pueden identificar los radios de fondo R_1 y R_2 con sus valores y el radio de fillet exterior.



23. Ilustración. Dimensiones de la pieza aplicando sobre espesores y ángulos de salidas

Radios de redondeo de aristas

Cálculo de R_2 . Se calculan mediante el gráfico 2 entrando con los valores de K y del diámetro superior del cono.

Para el cálculo de K se utiliza la ecuación (4) siendo h la altura del cono y d_{medio} el diámetro medio del cono. Cada radio tendrá un valor de K distinto, al tener un diámetro medio distinto. Siendo 1 el radio de fondo exterior y 2 el interior.

Entrando en el gráfico 2 con los valores de K distintos y los diámetros superiores, se obtienen un radio exterior $R=3$ mm y uno interior $R=4$ mm.

Analizando los resultados se aplicarán radios de fondo de $R_2=4$ mm.

Cálculo de R_1 . Al cumplirse la condición de la ecuación (5) se puede obtener mediante el gráfico 3, entrando con el valor del diámetro de la base D .

Entrando al gráfico 3 se consigue un radio $R_1= 2,8$ mm.

Cálculo de los radios de fillet. Para el cálculo de las aristas de orificio, con los valores de la altura del cono y del diámetro de la parte inferior del cono, siendo estos valores parecidos, entrando a la tabla 6 se obtiene la siguiente relación. A partir de la anterior ecuación (6) se consigue un radio $R=9,4$ mm.

El radio de las aristas de núcleo se obtendrá entrando en la tabla 7 con los valores de h ; la altura desde la superficie de partición hasta la parte superior, e ; espesor del alma, y D ; el diámetro medio del agujero ciego.

En la fila de $h=60\text{mm}$ y $e=12\text{mm}$, llegando hasta los valores del diámetro de 47 a 57mm se consigue un radio mínimo $R=8,7\text{mm}$. A partir de este valor, como radio interior final se ha cogido $R=9\text{mm}$.

Cordón de rebaba

En segundo lugar, se definen los cálculos sobre el cordón de rebaba.

- **Estimación de λ (ancho del cordón de rebaba):**

Como se ha mencionado anteriormente, para obtener el valor del ancho del cordón de rebaba, entrando en la tabla 8 con el diámetro de la pieza en el plano de partición se obtiene una longitud $\lambda =9,5\text{mm}$.

- **Cálculo de ϵ (espesor del cordón de rebaba):**

A continuación, se calculan los parámetros que aparecen en la ecuación 7

▪ **Cálculo de μ (coeficiente de rozamiento):**

Siendo acero el material y la temperatura de la rebaba $T=900^\circ\text{C}$ entrando en la tabla 9 se consigue un coeficiente $\mu=0,23$.

▪ **Cálculo de p (presión necesaria para la forja de la pieza)**

El diámetro que se utilizará será $d=187\text{mm}$.

La primera presión se calculará con el primer radio de fondo; $R_2=4\text{mm}$.

Mediante la ecuación (8) se consigue el valor de K dependiendo de los dos radios de fondo. Entrando en las curvas umbrales de plasticidad (gráfico 4) con la temperatura de 1100°C y el valor de K_1 se consigue una $p_1=41\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$

Para la segunda presión se cogerá el segundo radio de fondo $R_1=2,8\text{mm}$.

En la anterior ecuación (8) con el valor de R_1 y de d se consigue una presión $p_2=43\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$

Viendo los valores obtenidos, para el cálculo de ϵ se utilizará la presión p_2 .

▪ **Cálculo de a (perdida de carga correspondiente al umbral de plasticidad en el plano de la rebaba):**

Para los valores de $H=26,7\text{mm}$ y $D=187\text{mm}$, en la expresión (9), se consigue un valor de $K=0,1427$.

Con este valor de K y para una temperatura $T=1100^\circ\text{C}$ entrando en la curva (gráfico 4) se obtiene un valor de $a=12\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$.

▪ **Cálculo de p_b (resistencia a la deformación radial del anillo de rebaba):**

Siendo σ_t la resistencia a la tracción del acero a una temperatura $T=1100^\circ\text{C}$; en este caso $\sigma_t=51\text{MPa}$.

Sustituyendo valores en la expresión (10) se obtiene una resistencia $p_b=5,18\text{MPa}$, que cambiándolo de unidades se convierte en $p_b=0,528\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$.

- **Cálculo de Q**

Mediante la tabla 10 con el valor de la temperatura de la rebaba $T=900^\circ\text{C}$.

Interpolando se consigue un valor $Q=3,05\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$.

Una vez obtenidos todos los valores necesarios para el cálculo del espesor del cordón de rebaba sustituyendo los valores en la ecuación 7, se despeja una $\varepsilon=2,882\text{mm}$. Con este valor, se comprueban las recomendaciones, expresiones (11) y (12).

La recomendación (11) se cumple, pero la expresión (12) no se cumple. Entonces, se calculará el rango del espesor sustituyendo el valor del ancho del cordón y cogiendo los extremos de la ecuación (12).

Para el extremo menor se consigue un espesor $\varepsilon = 2,375\text{mm}$ y para el mayor $\varepsilon = 1,35\text{mm}$.

El rango será $1,35 \leq \varepsilon \leq 2,375$, por lo que se escoge un espesor $\varepsilon = 2,3\text{mm}$.

Para el alojamiento de la rebaba se siguen las expresiones (13) y (14).

De la expresión (13) cogiendo el valor medio del rango se obtiene un espesor $e=5,7\text{mm}$. Para el ancho del alojamiento, de la ecuación (14) cogiendo un ancho mayor que el del límite, se ha escogido una $l=51\text{mm}$.

Anexo II. Cálculos sobre el dimensionamiento del taco de partida

En el segundo anexo se definen los cálculos sobre el dimensionamiento del taco de partida.

Para facilitar el cálculo se calcularán los volúmenes de la base y del cilindro superior por separado, y después se restará el volumen que ocupa el agujero ciego. Para la primera, mediante la ecuación (15) con el radio medio y la altura de la base se consigue el primer valor. El volumen del cilindro se obtiene también de la ecuación (15), pero en este caso con el radio medio y la altura del cilindro. Por último, el volumen del agujero ciego se calculará igual, pero con el radio medio y la altura del agujero.

Lo siguiente es calcular el volumen del cordón de rebaba, que se consigue mediante la siguiente ecuación (16).

El volumen de la pieza; sumando el volumen de la base y del cilindro y restando el del agujero ciego, será $V=891.932,37 \text{ mm}^3$. Y el volumen del cordón $V=13.488,5 \text{ mm}^3$.

El volumen del tocho será la suma de los dos, es decir, $V=905.420,87 \text{ mm}^3$.

El tocho al ser un cilindro, su volumen se calculará mediante la ecuación (15), qué igualándola al volumen total obtenido, y con la condición de no pandeo (17), se consiguen las dimensiones del tocho; $D=77,25\text{mm}$ y $H \leq 193 \text{ 14}$.

Para terminar de dimensionar el tocho hay que buscar en la norma UNE-EN10060 unas dimensiones normalizadas. De la tabla 11 se obtiene un diámetro inicial $D=80\text{mm}$ y una altura menor que 200mm .

Anexo III. Cálculos del dimensionamiento de la prensa

A continuación, se definen los cálculos del dimensionamiento de la prensa, es decir, la fuerza necesaria para la forja.

En primer lugar, se calculará la presión P_1 de llenado del radio de fondo R_1 . Para ello, con el valor de K_0 obtenido de la ecuación (18) entrando en las curvas umbrales de plasticidad (gráfico 4) con una temperatura de 1100°C, se consigue una presión $P_1=15 \frac{kg}{mm^2}$.

En segundo lugar, para el cálculo de la presión P_2 , primero se definirán los parámetros de la expresión (19).

- El valor de m se obtiene entrando en las curvas umbrales de plasticidad (gráfico 4) con una temperatura de 1100°C y con el valor de K ; obtenido de (20). El valor de m conseguido es de $4 \frac{kg}{mm^2}$.
- El valor de α se obtiene entrando en las curvas umbrales de plasticidad (gráfico 4) con una temperatura de 1100°C y con el valor de K_2 ; obtenido de (21). El valor de α conseguido es de $4 \frac{kg}{mm^2}$.

Analizando los valores de m y de α conseguidos, se ve que la primera parte de la expresión (19) se desprecia, por lo que no hace falta seguir calculando los demás parámetros. La presión P_2 queda reducida a el parámetro de la tabla 12. En la tabla 12 para una temperatura de 1100°C interpolando, se consigue una $P_2=15,5 \frac{kg}{mm^2}$.

Para corregir la presión ejercida, en la tabla 13, siendo el material acero a una temperatura de 1000°C y estando la cavidad a media distancia del extremo, se consigue una diferencia de presión de $4 \frac{kg}{mm^2}$. La presión P_2 final; $P_{2 \text{ final}} = 19,5 \frac{kg}{mm^2}$

Por último, para el cálculo de q , con el parámetro K_1 calculado con la expresión (22) entrando en las curvas umbrales de plasticidad con una temperatura de $T=1100^\circ\text{C}$ se consigue un valor de $q=13 \frac{kg}{mm^2}$.

Finalmente, con esas presiones y con las secciones tanto de la pieza como de la rebaba se calcula la fuerza máxima necesaria para forjar la pieza. Utilizando la fórmula (23) se consigue una $F_{\text{max}}=611.798,85 \frac{kg}{mm^2}$ igual a $F_{\text{max}}=5,995 \text{ MN}$.

Anexo IV. Parámetros de la operación para la forja de la brida

En las siguientes tablas se muestra un resumen con todos los parámetros de la operación utilizados para el diseño final de la forja de la brida.

18. Tabla. Parámetros de la operación para la forja de la brida en la 1 etapa

Etapa 1 Recalcado		
Proceso	Tipo de operación	Con procesos térmicos
	Tipo de problema	2D
Geometría	Cargar desde archivo	Etapa1.crs / Etapa1.dxf
Parámetros de la preforma	Material	Acero \ Acero al carbono \ C35
	Temperatura	1100°C
Parámetros del utillaje	Mando	T1 - prensa mecánica 6,3MN T2 - Fijo +OZ
	Lubricante	T1 - Grafito disuelto en agua (Forja en caliente \ Aceros \ Grafito+Agua) T2 - Grafito disuelto en agua (Forja en caliente \ Aceros \ Grafito+Agua)
	Material	T1 & T2 H13
	Temperatura	T1 & T2 - 250°C
	Condiciones de parada	Distancia
Condiciones de contorno	Ambiente	Aire 20°C
Golpes	Número de golpes	1

19. Tabla. Parámetros de la operación para la forja de la brida en la etapa final

Etapa 2 - Etapa final		
Proceso	Tipo de operación	Con procesos térmicos
	Tipo de problema	2D
Geometría	Cargar desde archivo	Etapa1.crs / Etapa1.dxf
Parámetros de la preforma	Material	Acero \ Acero al carbono \ C35
	Temperatura	1100°C
Parámetros del utillaje	Mando	T1 - prensa mecánica 6,3MN T2 - Fijo +OZ
	Lubricante	T1 - Grafito disuelto en agua (Forja en caliente \ Aceros \ Grafito+Agua) T2 - Grafito disuelto en agua (Forja en caliente \ Aceros \ Grafito+Agua)
	Material	T1 & T2 H13
	Temperatura	T1 & T2 - 250°C
Condiciones de parada	Distancia	0 mm entre T1 & T2
Condiciones de contorno	Ambiente	Aire 20°C
Golpes	Número de golpes	1