

E.T.S. de Ingeniería Industrial,
Informática y de Telecomunicación

Diseño de una llave herramienta combinada



Grado en Ingeniería Mecánica

Trabajo Fin de Grado

Autor: Álvaro Zozaya Larequi

Director: Daniel Salcedo Pérez

Pamplona, junio 2014

Índice

CAPÍTULO 1 PLANTEAMIENTO Y OBJETIVOS	5
CAPÍTULO 2 INTRODUCCIÓN.....	7
2.1 Introducción	8
2.2 Procesos de conformación	8
2.2.1 Generalidades	8
2.2.2 Forja	9
2.2.2.1 Introducción	9
2.2.2.2 Tipos de forjado y equipos.....	10
2.2.2.3 Metales y aleaciones forjables.....	21
2.2.2.4 Lubricación	21
2.2.3 Troquelado	23
2.2.3.1 Introducción	23
2.2.3.2 Proceso.....	23
2.2.3.3 Equipos.....	24
2.2.3.4 Materiales que pueden ser cortados por troquel.....	25
CAPÍTULO 3 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.....	27
3.1 Descripción del proceso de conformado.....	28
3.1.1 Propiedades y geometría de la pieza	28
3.1.2 Propiedades y geometría de las matrices	29
CAPÍTULO 4 MODELIZACIÓN DEL PROCESO DE FORJA.....	32
4.1 Introducción a elementos finitos y volúmenes finitos	33
4.1.1 Elementos finitos	33
4.1.2 Volúmenes finitos	34

4.2 Modelos realizados	35
4.2.1 Modelo previo 1	36
4.2.2 Modelo previo 2	38
4.2.3 Modelo completo 1	39
4.2.4 Modelo completo 2	57
4.3 Modelo definitivo	62
CAPÍTULO 5 MECANIZADO DE LAS MATRICES	69
CAPÍTULO 6 CONCLUSIONES	79
CAPÍTULO 7 BIBLIOGRAFÍA.....	82
CAPÍTULO 8 ANEXOS.....	84

AGRADECIMIENTOS

Quisiera aprovechar estas líneas para agradecer a todas las personas que me han ayudado y me han apoyado a lo largo de estos años de carrera, así como en la elaboración del presente Trabajo Fin de Grado.

En primer lugar, quisiera agradecer a mi tutor Daniel Salcedo Pérez, por aceptar mi propuesta para realizar este Trabajo Fin de Grado bajo su dirección. Ha sido esencial su ayuda a lo largo de estos meses sin la cual no hubiese sido posible la elaboración de este trabajo.

Asimismo, me gustaría agradecer la ayuda de Juan Pablo por haber empleado parte de su tiempo enseñándome a utilizar el software Surfcam.

Por último, no puedo olvidar a mis amigos, a mi novia, y muy especialmente a mi familia que, me ha brindado la oportunidad de estudiar y me ha ofrecido su apoyo a lo largo de todos estos años.

Muchas gracias a todos.

RESUMEN

En el presente Trabajo Fin de Grado se desarrolla el diseño de una llave herramienta combinada mediante el proceso de forja. Asimismo, se programa el proceso de mecanizado de las matrices.

Para la elaboración de este trabajo, en primer lugar, se realiza una introducción a los principales procesos de conformado de sólido y chapa, necesarios en este trabajo. A continuación, se muestran los elementos y datos más relevantes para la realización y desarrollo del TFG. Posteriormente, se presenta el análisis, diseño y simulación del proceso de forja y mecanizado, con diferentes softwares de CAD y, elementos y volúmenes finitos.

Finalmente, se plantean e interpretan los resultados obtenidos en los desarrollos anteriores y, se exponen las conclusiones más relevantes acerca de la elaboración del presente Trabajo Fin de Grado.

LISTA DE PALABRAS CLAVE

- Deformación plástica
- Elementos finitos
- Volúmenes finitos
- Forja en caliente
- Forja isoterma
- Mecanizado

CAPÍTULO 1

Planteamiento y objetivos

1.1 PLANTEAMIENTO Y OBJETIVO DEL TRABAJO FIN DE GRADO

El presente Trabajo Fin de Grado tiene como objetivo el diseño de una llave herramienta combinada mediante un proceso de forja. Por tanto, este trabajo se encuadra dentro del campo de la ingeniería de materiales y procesos de fabricación.



Ilustración 1.1 Llave herramienta combinada

Para la elaboración de este trabajo, en primer lugar, se realizará un repaso a los procesos más importantes de conformado de sólido y de chapa. A continuación, se presentarán los elementos y datos más relevantes para conseguir el objetivo.

Con todos los datos de partida planteados, se comenzará el proceso de análisis, diseño y simulación apoyándose en diferentes softwares de elementos finitos (Marc Mentat), CAD (SolidWorks y Surfcam) y optimización de procesos de fabricación por deformación plástica (Simufact).

Finalmente, se expondrán los resultados y se realizará una interpretación de los mismos.

CAPÍTULO 2

Introducción

2.1 INTRODUCCIÓN

En este capítulo se va a exponer un breve resumen sobre el actual estado del arte de los distintos procesos de conformado por deformación y corte, y más concretamente de los que serán utilizados en este trabajo.

2.2 PROCESOS DE CONFORMACIÓN

2.2.1 Generalidades

La conformación por deformación y corte se realiza sometiendo los metales, en caliente o en frío a esfuerzos de toda clase, principalmente de compresión.

La conformación puede realizarse por sólo deformación, por deformación y corte, y también por corte puro.

Los procedimientos empleados pueden clasificarse con arreglo a la clase de productos que se desee obtener y la clase de esfuerzo principal empleado para fabricarlos, como se observa en la tabla 2.1.

<i>Productos fabricados</i>	<i>Clases de esfuerzo</i>	<i>Procedimiento</i>
Piezas diversas	Compresión en caliente	Forja-Estampación en caliente
	Compresión con fluencia	Extrusión
Piezas de chapa	Compresión rectilínea	Estampación en frío
	Compresión rotativa	Perfilado
	Corte	Cizallamiento
Perfiles	Compresión entre cilindros	Laminación
	Tracción	Estirado y trefilado
	Diversos	Conformación de tubos

Ilustración 2.1 Principales procedimientos de conformación de los metales por deformación y corte [1]

Para la elaboración de este trabajo solo se emplearán los procesos de forja y troquelado.

2.2.2 Forja

2.2.2.1 Introducción

La forja es un proceso de deformación en el cual se comprime el material de trabajo entre dos matrices, usando impacto o presión gradual. Por tanto, a medida que la fuerza aplicada aumenta, se supera el límite de fluencia del material produciendo la deformación del mismo.

La forja es uno de los métodos más antiguos utilizados para la conformación de los metales, pues ya en Egipto, hacia el año 550 a.C. se forjaba el cobre y sus aleaciones para la fabricación de armas y utensilios domésticos.

En la actualidad, la forja se sigue empleando para la fabricación de infinidad de piezas de diversas formas y tamaños, desde pequeñas llaves hasta grandes rotores de turbinas y alternadores.

El forjado se lleva a cabo de diversas maneras. Una manera de clasificar las operaciones de forja es mediante la temperatura de trabajo. La mayoría de las operaciones de forja se realizan en caliente, dada la deformación que demanda el proceso y la necesidad de reducir la resistencia e incrementar la ductilidad del metal de trabajo. Sin embargo, el forjado en frío también es muy común para ciertos productos. La ventaja del forjado en frío es la mayor resistencia del componente que resulta del endurecimiento por deformación.

En el forjado se aplica la presión por impacto o en forma gradual. La diferencia depende más del tipo de equipo que de las diferencias en la tecnología de los procesos.

Otra diferencia entre las operaciones de forjado es el grado en que las matrices restringen el flujo del metal de trabajo. Atendiendo a esta clasificación hay dos tipos de operaciones de forjado: forja libre y forja con estampa.

2.2.2.2 Tipos de forjado y equipos

La forja se puede clasificar según diferentes criterios como la temperatura o la rebaba.

En función de la temperatura de trabajo se puede dividir el proceso de forja en: forja en frío, tibio o caliente (con el caso concreto de forja isoterma) [2].

Forja en frío. La forja en frío se define como el conformado de un tocho a la temperatura ambiente sin un calentamiento inicial de la preforma.

Las ventajas que presenta este tipo de forja son: ratio de producción alto, excelentes tolerancias dimensionales, buen acabado superficial, flujo del grano favorable para mejorar la dureza y, ahorros de material y maquinaria.

Sin embargo, desventajas como la corta vida de las herramientas, los defectos durante el proceso o la limitación de forjar únicamente formas simples hacen que este proceso no sea el más utilizado.

Forja en tibio. En este tipo de forja el tocho es calentado hasta una temperatura por debajo de la temperatura de recristalización (700-800 °C para aceros) con el fin de reducir las tensiones residuales de la pieza.

Forja en caliente. En el caso de forja en caliente el material es calentado a una temperatura superior a la de recristalización pero inferior a la de fusión. A estas temperaturas no sólo pueden darse a los metales grandes deformaciones con pequeños esfuerzos, sino que la magnitud de la deformación es prácticamente ilimitada, sin que se produzca nunca acritud.

Las fases principales a las que se reduce el proceso de forja en caliente son tres: calentamiento, deformación y enfriamiento.

El calentamiento se ha de realizar teniendo en cuenta que el material, al comenzar el proceso de deformación, debe hallarse a la máxima temperatura posible, pero sin alcanzar el punto de fusión. Además, la elevación de la temperatura debe hacerse lo más suavemente posible, pues si se calienta bruscamente, se establece una gran diferencia de temperatura entre la periferia y el núcleo y, por tanto, una gran diferencia de dilatación de ambas zonas que se traduce en tensiones que pueden producir grietas.

La deformación producida durante la forja es debida a esfuerzos de compresión, donde una vez que se supera el límite de fluencia, los materiales tienen comportamientos distintos: frágiles o dúctiles.

El enfriamiento se produce desde que la pieza sale del horno. No debe ser tan grande que provoque un descenso de la temperatura por debajo de la de recristalización. Y a su vez no debe ser brusco, ya que así se evitan las grietas.

Con la forja en caliente se realizan dos clases de trabajos:

- a) Piezas acabadas, a las que por forja se les da su forma definitiva.
- b) Piezas de desbaste, a las que por forja se les da una forma aproximada a la definitiva, y se terminan por mecanizado.

Además, con la forja se logra una positiva mejora en las propiedades mecánicas de los metales y aleaciones, como consecuencia del *afino del grano*, y de la *disminución de las sopladuras, segregaciones y dendritas*.

Afino del grano en la forja: si la forja se realiza a golpes y a temperaturas adecuadas se produce el afino del grano de los metales por trituración del mismo y reconstrucción inmediata en tamaño más pequeño. Este afino es tanto mayor cuanto más baja sea la temperatura de forja, siempre que no descienda de la recristalización, y cuanto más enérgicamente se golpee el metal.

Si en lugar de forjar a golpes se forja en prensas, se obtienen mejoras en la macroestructura, pero no el afino del grano. Además, en este caso se deforma más el núcleo que la zona superficial.

También se obtienen distintos efectos con golpes fuertes y espaciados que con golpes suaves y rápidos. En el primer caso es el núcleo de la pieza el más afectado, y en el segundo la zona superficial.

La forja, es decir, el martillado del metal, debe continuarse mientras no descienda la temperatura de la recristalización, pues si se interrumpiese antes comenzaría el crecimiento del grano a partir de este momento.

Naturalmente, el afino del grano se traduce en una mejora de las propiedades mecánicas del metal. La ley de Hall-Petch establece la variación del límite elástico (σ_y) de un metal con el tamaño de grano (d), según:

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{k}{\sqrt{d}}$$

donde k es una constante, propia de cada metal, y el parámetro σ_0 representa el valor del límite elástico para cada material en estado recocido.

La siguiente figura ejemplifica el efecto del tamaño de grano en el comportamiento de un metal en tensión uniaxial.



Ilustración 2.2 Ley de Hall-Petch

Disminución de las sopladuras, segregaciones y dentritas: como la forja produce un aplastamiento de la masa del metal, las cavidades que contiene (sopladuras) por defectos de solidificación, quedan también aplastadas, y si sus paredes están limpias y no oxidadas, al ponerse en contacto íntimo a temperaturas elevadas, se sueldan y desaparecen las sopladuras. Esta soldadura es muchas veces perfecta pues los granos de las paredes al recrystalizar y crecer, lo hacen entre caras de las sopladuras.

Por otra parte las segregaciones y dentritas, por efecto combinado de la alta temperatura y de la forja resultan disminuidos, mejorando la homogeneidad del metal.

Forja isoterma. Se trata de un trabajo en caliente en el que las matrices se calientan a la misma temperatura que la probeta. Como las matrices y la pieza se mantienen a la misma temperatura, la transferencia de calor del uno al otro se minimiza, resultando una deformación más uniforme del material. Las principales ventajas que presenta es que, este tipo de forja se puede utilizar para producir formas próximas al diseño final, con menos número de golpes, y tiene un mejor control de la microestructura y temperatura de la pieza durante la forja.

Respecto a los diferentes equipos de forja, se utilizan gran diversidad de ellos, con distintas capacidades, velocidades y características de carrera y velocidad. Esas máquinas se clasifican, en general, en prensas y en martillos o martinets [2].

Prensas

Prensas hidráulicas. Estas prensas funcionan a velocidad constante y están limitadas o restringidas por la carga. En otras palabras, la prensa se detiene si la carga requerida es mayor que su capacidad. Se transfiere una gran cantidad de energía a la pieza, mediante una carga constante durante una carrera, cuya velocidad se puede controlar. Como el forjado en prensa hidráulica tarda más que en otros tipos de máquina para forjar, la pieza se puede enfriar con rapidez, a menos que se caliente las matrices.

En comparación con las prensas mecánicas, las hidráulicas son más lentas e implican mayor costo inicial, pero requieren menos mantenimiento.



Ilustración 2.3 Prensa hidráulica

Prensas mecánicas. Estas prensas son, fundamentalmente, de manivela o excéntrica. Su velocidad, varía desde un máximo al centro de la carrera hasta cero, en el término de la carrera, por lo que están limitadas por la carrera. En una prensa mecánica se genera la energía mediante un gran volante, accionado por un motor eléctrico. Un embrague acopla al volante de inercia con un eje excéntrico. Una biela transforma el movimiento en movimiento lineal alternativo.



Ilustración 2.4 Prensa mecánica

Prensas de tornillo. Estas prensas obtienen su energía de un volante, por lo que son de energía limitada. La carga de forjado se transmite por un tornillo vertical. Si no se cierran las matrices al final del ciclo, se repite la operación hasta que se termina el forjado.



Ilustración 2.5 Prensa de tornillo

Martinetes

Los martinetes obtienen su energía de la energía potencial del ariete, que se convierte en energía cinética; por consiguiente, son limitadas por la energía. A diferencia de las prensas hidráulicas, éstos trabajan con grandes velocidades, y el tiempo de conformación minimiza el enfriamiento de la forja en caliente. Las bajas velocidades de enfriamiento permiten forjar formas complicadas, en especial las que tienen oquedades delgadas y profundas. Para completar el forjado se suelen dar varios golpes sucesivos en la misma matriz. Los martinetes pueden tener varios diseños; son los más versátiles y menos costosos entre los equipos de forjado.

Martinetes de gravedad. En la operación de este martillo, proceso que se conoce como forja por gravedad, la energía se obtiene de la caída libre del ariete. La energía disponible en el martinete es el producto del peso del ariete por su altura de caída.

$$E_p = m \times g \times h$$

donde m es la masa del ariete, g la gravedad y h la altura de caída.

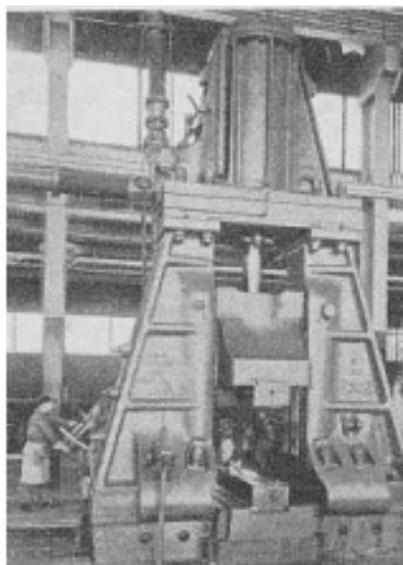


Ilustración 2.6 Martinete por gravedad

Martinete accionado por energía. En estas máquinas la carrera del ariete hacia abajo se acelera con vapor, aire o presión hidráulica.



Ilustración 2.7 Martinete accionado por energía

Martinetes de contragolpe. Este martinete tiene dos arietes que se acercan entre sí, de forma simultánea, en dirección horizontal o vertical, para forjar la pieza. Como en las operaciones de forjado con matriz abierta, puede girar la pieza entre los golpes, para conformarla bien durante el forjado. Los martinetes de contragolpe trabajan a grandes velocidades y transmiten menos vibración a sus cimientos.



Ilustración 2.8 Martinete de contragolpe

Máquinas de gran potencia. En una máquina de gran potencia, el ariete se acelera mediante un gas inerte a alta presión, y la pieza se forja en un golpe a muy alta velocidad. Aunque hay diversos tipos de estas máquinas hay varios problemas relacionados con su funcionamiento y mantenimiento, y con consideraciones de seguridad y fractura de matrices, que han limitado su uso en plantas actuales de forjado.

Según el tipo de matrices, los procesos de forja se pueden clasificar en forja libre y forja con estampa [3].

Forja libre. Es el proceso más antiguo y se caracteriza porque la herramienta no tiene ninguna restricción en cuanto a forma y masa. Se limita principalmente a la fabricación de piezas aisladas y de gran tamaño, tales como ejes y recipientes de alta presión.

Forja con estampa. En contraste con la anterior, la estampa tiene la forma y dimensiones de la pieza a fabricar. Suele ser rentable sólo para lotes de piezas grandes, debido al coste que supone la fabricación de las matrices. Si se tiene en cuenta el grado de limitación del flujo del material que ejerce la estampa, se puede hablar de: forja con estampas abiertas, forja con estampas cerradas y forja sin rebaba.

- Forja con estampas abiertas. Si el forjado con estampas abiertas se lleva a cabo bajo condiciones ideales, sin fricción entre el trabajo y la superficie de la matriz, ocurre una deformación homogénea y el flujo radial de material es uniforme a lo largo de su altura como se representa en la siguiente figura.

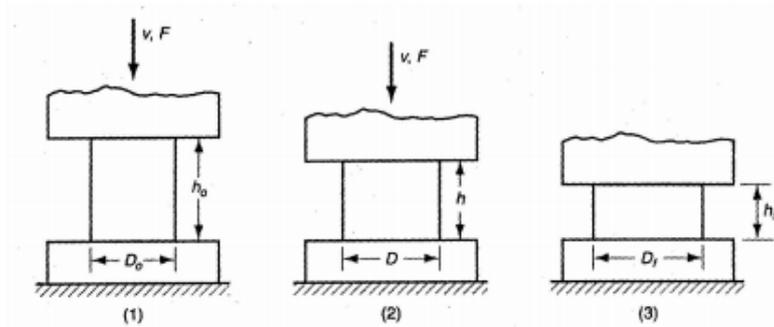


Ilustración 2.9 Proceso ideal forja con estampas abiertas

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

$$\varepsilon = \ln \frac{h_0}{h}$$

Donde h_0 = altura inicial del trabajo; y h = altura de un punto intermedio en el proceso.

Se puede obtener la fuerza requerida con la siguiente expresión:

$$F = Y_f A$$

Donde F = fuerza; A = área de la sección transversal, Y_f = esfuerzo de fluencia correspondiente al esfuerzo dado. El área A se incrementa continuamente al reducirse la altura durante la operación.

Sin embargo, en una operación de forja real, existe fricción entre la pieza y las estampas, generándose un efecto de abarrilamiento.

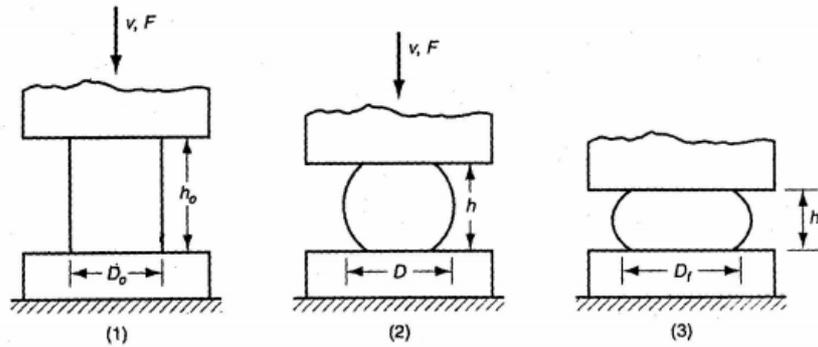


Ilustración 2.10 Proceso real forja con estampas abiertas

De este modo, la fuerza es mayor:

$$F = K_f Y_f A$$

Donde F , Y_f y A tiene las mismas definiciones que en el caso anterior y K_f es el factor de forma del forjado, definido como:

$$K_f = 1 + \frac{0.4\mu D}{h}$$

Donde μ = coeficiente de fricción; D = diámetro; y h = altura.

- Forja con estampas cerradas. Este tipo de forja se realiza con matrices que tienen la forma inversa de la pieza requerida. Este proceso se ilustra en la siguiente imagen.

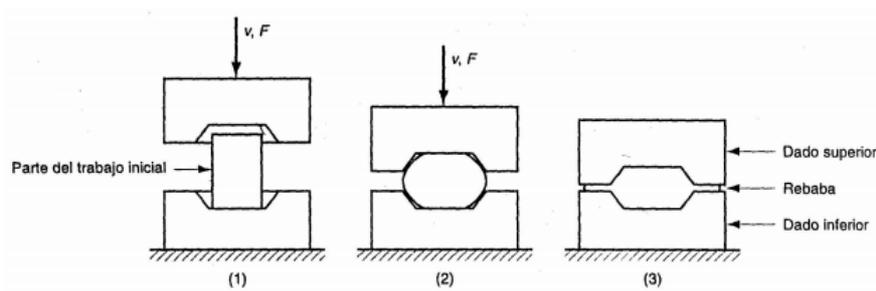


Ilustración 2.11 Proceso forja con estampas cerradas

Debido a la formación de rebaba y a las formas más complejas de este tipo de forja, las fuerzas en este proceso son considerablemente más grande y más difíciles de analizar que en el caso de estampas abiertas. Sin embargo, se suelen utilizar fórmulas y factores de diseño relativamente simples.

$$F = K_f Y_f A$$

Donde F = fuerza máxima en la operación; A = área; Y_f = esfuerzo de fluencia del material; y K_f = factor de forma del forjado.

- Forja sin rebaba. En este tipo de forja la pieza queda contenida completamente dentro de la cavidad de la matriz durante la compresión y no se forma rebaba. La secuencia del proceso se ilustra en la siguiente imagen.

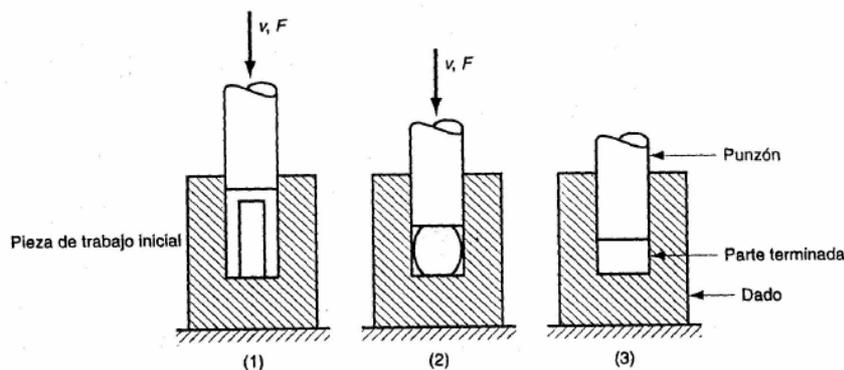


Ilustración 2.12 Proceso forja sin rebaba

La forja sin rebaba impone ciertos requerimientos sobre el control del proceso, más exigentes que el forjado con estampas cerradas. Más importante es que el volumen del material de trabajo debe igualar al volumen de la cavidad de la matriz dentro de muy estrechas tolerancias.

Las fuerzas en la forja sin rebaba alcanzan valores comparables a las de la forja con estampas cerradas. Estas fuerzas se pueden estimar usando los mismos métodos que para la forja con estampas cerradas.

2.2.2.3 Metales y aleaciones forjables

En general, todos los metales son más o menos forjables, puesto que la propiedad primordial que deben reunir los materiales para poder ser conformados por forja es la plasticidad, que es una propiedad típicamente metálica.

Sin embargo, las aleaciones constituidas en parte por compuestos químicos, que no son plásticos serán medianamente forjables si la proporción de éstos es pequeña, y no forjables si la proporción es grande.

Se podrán forjar:

- Metales metálicos puros: aluminio, cobre, hierro, titanio y zinc.
- Aleaciones formadas por una o varias soluciones sólidas: de todas ellas, la más importante es el acero no aleado o simplemente aleado. Los aceros altamente aleados exigen, en general, grandes esfuerzos, lo cual es un grave inconveniente para la duración de las matrices. Son forjables las aleaciones de aluminio (Al-Cu, Al-Mg, Al-Zn y Al-Mn), de magnesio (Mg-Al, Mg-Zn y Mg-Mn), de cobre (latones de los tipos Cu-Zn, Cu-Zn-Sn, Cu-Zn-Pb, Cu-Zn-Ni y especiales; bronces, Cu-Al, Cu-Ni, Cu-Si).

2.2.2.4 Lubricación

En muchos de los procesos de conformado de acero la pieza es deformada por contacto con la matriz. La presión requerida para la deformación genera una tensión normal a la superficie de la matriz, y el movimiento de la pieza en relación a la superficie de la matriz genera una fuerza por desgaste entre ambos cuerpos. Se trata de una situación clásica de tribología, con fricción en la interfaz matriz-pieza. Para reducir y suavizar estos efectos se requiere de la aplicación de lubricante [4]. Otro papel importante del lubricante es servir como agente de desprendimiento, esto es, que inhiba que la pieza forjada se pegue a las matrices, y que ayude a la extracción de la misma.

Hay cuatro tipos de lubricación, de interés general en las operaciones de manufactura [2]:

1. En la lubricación de película gruesa, las superficies están totalmente separadas y la viscosidad del lubricante es el factor de importancia. Esas películas se pueden formar en ciertas regiones de la pieza en operaciones de gran velocidad, y también se pueden formar con lubricantes de alta viscosidad que queden atrapados en las interfaz en la matriz y la pieza. Una película gruesa de lubricante produce un aspecto de superficie opaco y granular, en la pieza; el grado de rugosidad depende del tamaño del grano.
2. Conforme aumenta la carga entre la matriz y la pieza, o cuando disminuye la velocidad y la viscosidad del fluido de corte, la película de lubricante se adelgaza (lubricación de capa delgada). Esta condición aumenta la fricción en las interfaces de deslizamiento y ocasiona un poco de desgaste.
3. En la lubricación mixta una parte importante de la carga la soporta el contacto físico entre las dos superficies. El resto lo soporta la película fluida atrapada en oquedades, como los valles de las asperezas.
4. En la lubricación marginal la carga está sostenida por las superficies en contacto cubiertas con una capa marginal de lubricante. Es una capa de lubricante delgada que atraída físicamente a las superficies metálicas evitando así el contacto directo entre los metales de los dos cuerpos, reduciendo entonces el desgaste. Los lubricantes marginales suelen ser aceites, grasas, ácidos grasos, ésteres o jabones naturales. Sin embargo, las películas marginales se pueden romper como resultado de la desorción, causada en general por altas temperaturas en las interfaces deslizantes, o el frotamiento durante el deslizamiento. Al privarse de esta película protectora las superficies metálicas deslizantes se pueden desgastar y rayar de forma severa.

En el forjado se puede usar una gran variedad de lubricantes. Para una forja en caliente se usan grafito, disulfuro de molibdeno y, a veces, vidrio. Para la forja en frío los lubricantes comunes son aceites minerales y jabones. En la forja en caliente se suele aplicar el lubricante directamente a los dados; en la forja en frío se aplica a la pieza. Son importantes para la calidad del producto el método de aplicación y uniformidad del espesor del lubricante.

2.2.3 Troquelado

2.2.3.1 Introducción

El troquelado se compone de dos operaciones principales: *punzonado* y *corte*. El *punzonado* consiste en practicar en una chapa mediante una estampa apropiada, un agujero de una forma determinada. Se denomina *corte* a la operación de separar de una chapa a una pieza de una forma determinada.

2.2.3.2 Proceso

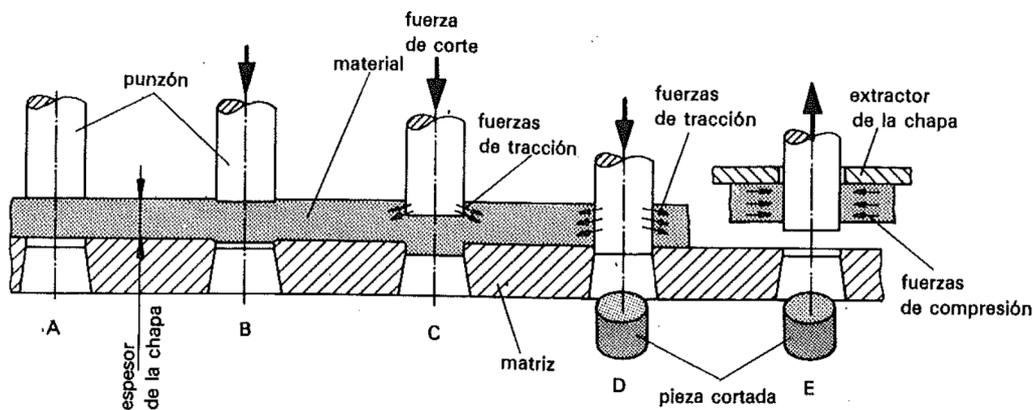


Ilustración 2.13 Proceso troquelado [5]

El material sufre, antes de ser cortado, una deformación elástica. Conforme el punzón va aumentando su acción, penetrará en el metal a cierta profundidad, forzando una porción del metal del mismo espesor dentro de la matriz. Al rebasar el límite elástico, las fibras del material son cortadas.

2.2.3.3 Equipos

Los equipos para llevar a cabo la operación de troquelado se componen principalmente de dos partes: *prensas* y *troqueles*.

Las *prensas* son máquinas herramientas de fabricación robusta, que aplicando presión a las piezas, consiguen cortar, doblar, repujar o embutir sin eliminación de material.



Ilustración 2.14 Prensa industrial

El *troquel* se considera la herramienta activa de una prensa. Es el conjunto de piezas que relacionadas y adaptadas a la prensa, ejecutan las operaciones de producción en serie.



Ilustración 2.15 Troquel

Las principales piezas que componen un troquel se pueden distinguir en la siguiente imagen.

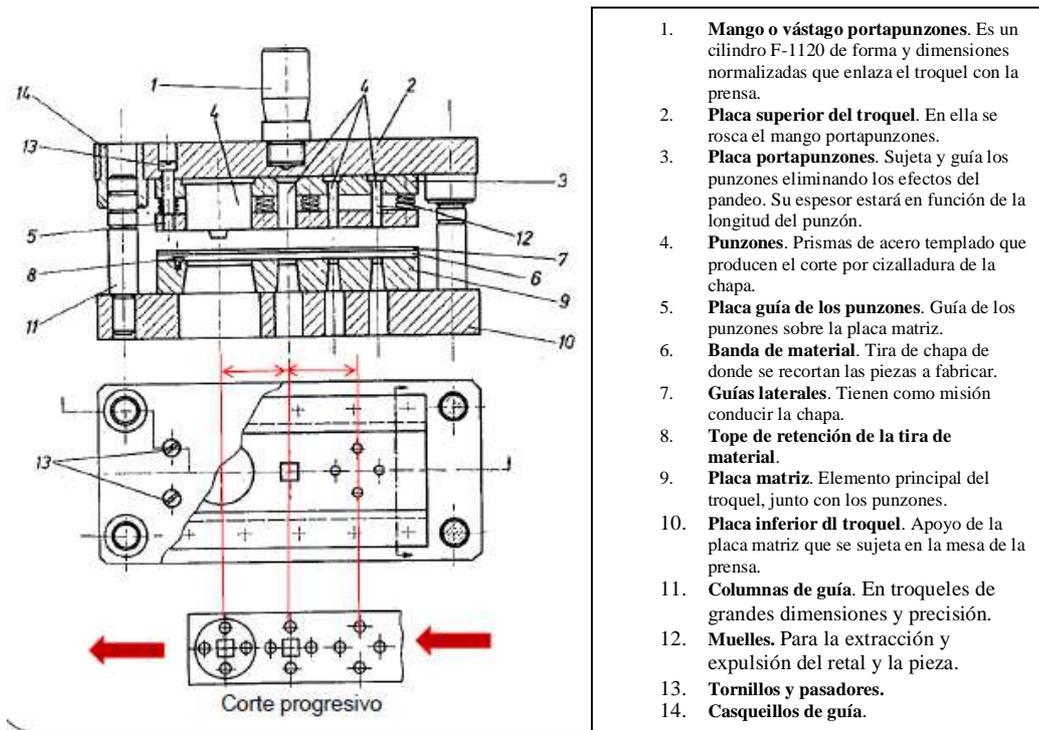


Ilustración 2.16 Partes principales de un troquel

2.2.3.4 Materiales que pueden ser cortados por troquel

Son susceptibles de ser tratados mediante troquelado todos aquellos metales que sean dúctiles. Los más comunes son: aceros al carbono, aleaciones de aluminio, aleaciones de cobre, níquel, titanio, cinc y aleaciones de magnesio [6].

La resistencia a la cizalladura de algunos materiales se muestra en la siguiente tabla.

Material	Resistencia a la cizalladura σ_T en kgf/mm ²				
	Estado		Material	Estado	
	Blando	Duro		Blando	Duro
Goma	0-7	2-7	Cuero	0-7	—
Mica	5-8	—	Madera	1-3	—
Celuloide	4-6	—	Papel y cartón	2,5	—
Cartón duro	7-9	—	Cartulina de resina sintética	10-14	—
Plomo	2-3	—	Chapa de hierro comercial	—	40
Estaño	3-4	—	Chapa de hierro embutible	30-35	—
Aluminio	6-11	13-16	Chapa de acero semiduro comercial	45-50	55-60
Duraluminio	15-22	30-38	Acero lam. con 0,1 % C	25	32
Siluminio	10-12	20	» » » 0,2 % C	32	40
Anticorodal	9-10	25-29	» » » 0,3 % C	35	48
Cinc	12	20	» » » 0,4 % C	45	56
Cobre	12-22	25-30	» » » 0,6 % C	56	72
Latón	22-30	35-40	» » » 0,8 % C	72	90
Bronce laminado	32-40	40-60	» » » 1 % C	80	105
Alpaca laminada	28-36	45-46	» al silicio	45	56
Plata laminada	23-24	—	» inoxidable	50-55	55-60

Ilustración 2.17 Resistencia a la cizalladura (σ_T) de los materiales que pueden ser cortados con troquel

Las aplicaciones más comunes para las que se utiliza este proceso son: arandelas, piezas para máquinas, pequeñas piezas de relojes, etc.

En este capítulo se ha expuesto un breve resumen de los procesos de conformación de conformado por deformación y corte, profundizando en los conceptos clave sobre forja y troquelado, ambos necesarios para el diseño y fabricación de una llave herramienta combinada.

CAPÍTULO 3

Descripción del proceso

3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO DE CONFORMADO

En esta sección se detallarán los elementos necesarios para la fabricación de la llave herramienta. En primer lugar, se describirán los pasos y equipos necesarios para el conformado de las matrices. Y a continuación, se proporcionarán los detalles acerca de las herramientas necesarias en el punzonado.

En primer lugar, es necesario comentar que el proceso de forja se va a llevar a cabo en dos golpes. Un golpe inicial para dar la forma general, y un segundo para definir en detalle la pieza.

3.1.1 Propiedades y geometría de la pieza

En este apartado conviene distinguir entre la geometría de la preforma original, la preforma intermedia y la pieza final.

La forma final de la misma constituye el de una llave combinada. En uno de los extremos, la tradicional llave utilizada para apretar tuercas y tornillos; y en el otro extremo una llave “estriada” de doce puntos para aprietes más difíciles.

En cuanto a la geometría de la preforma inicial, se escogerá una probeta con la geometría mostrada en la figura. La parte central mide 20 mm de diámetro por 198 mm de largo, mientras que cada una de las cabezas mide 46 mm de diámetro. Esta geometría ha sido optimizada gracias a las diferentes simulaciones.

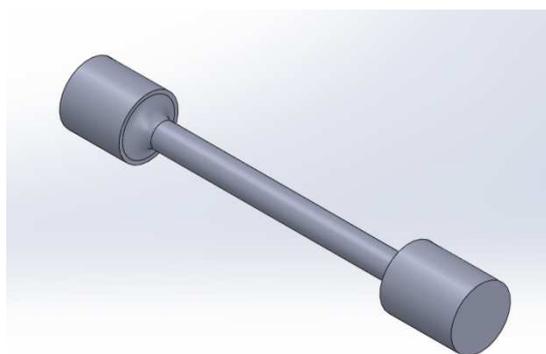


Ilustración 3.1 Geometría inicial de la preforma

El material empleado para la fabricación de la herramienta será un acero aleado al cromo-vanadio, concretamente el AISI 6150 (50CrV4).

	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	S	P	Cu
50CrV4	0,48	0,30	0,91	0,95	0,20	0,05	0,14	0,008	0,016	0,28

Ilustración 3.2 Composición 50CrV4

Los aceros al cromo-vanadio se caracterizan por una alta resistencia, fina estructura y crecimiento de la resistencia del grano principalmente por la presencia del vanadio, unido a la resistencia a la descarburación de la superficie (pérdida de parte del carbono de su composición química durante un tratamiento a elevada temperatura, debido a su interacción con una atmósfera gaseosa. Esto suele conducir a un empeoramiento de sus propiedades mecánicas, sobre todo en zonas próximas a la superficie del material ([7] y [8]). Al poseer dureza y resistencia a los golpes, se trata de una buena aleación para maquinaria pesada expuesta a golpes y vibraciones. Es por ello, que se utilizan para resortes de tamaños variados, engranajes, piñones, ejes y herramientas de mano que es por lo que fue escogido para este estudio.

3.1.2 Propiedades y geometría de las matrices

Al igual que en el caso de la preforma existirán dos matrices diferentes. Una primera, para darle la forma inicial y una segunda, con la geometría de la forma final de la llave.

Para fabricar las matrices se usan varios métodos de manufactura, sean aislados o en combinación. Entre ellos están la fundición, la forja, mecanizado, y métodos electroquímico y eléctrico de estampado de matrices [2].

Para mejorar la dureza, resistencia al desgaste y resistencia en general, los aceros para las matrices se tratan térmicamente en la mayor parte de los casos. Un mal tratamiento térmico es una de las causas más comunes de falla en las matrices.

Después del tratamiento térmico, las matrices se someten a operaciones de acabado, como rectificado, pulido y procesos químicos y eléctricos, para obtener el acabado y la precisión dimensional deseados. El proceso de rectificado, si no se controla bien, puede causar daños en la superficie, debidos al calor excesivo, y puede inducir esfuerzos residuales de tensión en la superficie de la matriz que reducen su vida a la fatiga. Las rayaduras en la superficie de una matriz pueden actuar como concentrador de esfuerzos.

Geoméricamente, hay que tener en cuenta que en las zonas con esquinas se deben buscar radios de acuerdo adecuados para facilitar el correcto flujo de material en el proceso de forja y aligerar las tensiones en esos puntos. Asimismo, se debe considerar un cierto ángulo de despulla para facilitar la extracción de la pieza tras la forja. La línea de partición se situará en el centro de la sección que se muestra a continuación (entre ambas matrices).



Ilustración 3.3 Ángulo de despulla y radios de acuerdo [9]

En el apartado correspondiente al mecanizado de las matrices se comentarán los diferentes tipos de herramientas utilizados.

En el diseño, fabricación y uso de las matrices hay que tener en cuenta los fallos que pueden aparecer en las mismas. Los fallos en las operaciones de manufactura se deben, en general, a una o más de las causas siguientes: diseño inadecuado, defectos del material, tratamiento térmico y operaciones de acabado inadecuados, sobrecalentamiento y agrietamiento térmico, desgaste excesivo, sobrepeso (carga), mal uso y manejo inadecuado.

A continuación, se describen algunos de los factores principales que causan la rotura de las matrices. Aunque esos factores se aplican a las matrices hechas con aceros para herramientas, muchos también se aplican a otros materiales.

El diseño adecuado de las matrices es tan importante como la selección adecuada de sus materiales. Para resistir las fuerzas en los procesos de manufactura, una matriz debe cumplir los aspectos geométricos comentados anteriormente.

A pesar de su dureza y resistencia a la abrasión, materiales para la matriz tales como los carburos y el diamante son susceptibles al agrietamiento debido a fuerzas de impacto, o por esfuerzos térmicos causados por gradientes de temperatura en el interior. Son importantes la preparación y el acabado de la superficie. Hasta los fluidos de trabajo pueden afectar negativamente los materiales para herramienta y matriz.

Aun cuando se fabriquen de forma correcta, las matrices se someten a grandes esfuerzos y altas temperaturas durante su empleo, factores que pueden causar desgaste y, en consecuencia, cambios de forma. El desgaste de las matrices es importante, porque cuando cambia su forma, las piezas producidas a su vez tendrán dimensiones incorrectas.

Durante su empleo, las matrices también pueden sufrir agrietamiento térmico, debido a ciclos térmicos. Para reducir el agrietamiento térmico y la rotura eventual en operaciones de trabajo en caliente, se suelen precalentar las matrices en función del material a forjar.

CAPÍTULO 4

Modelización del proceso de forja

4.1 INTRODUCCIÓN A ELEMENTOS FINITOS Y VOLUMENES FINITOS

4.1.1 Elementos finitos

El método de los elementos finitos (MEF) ha adquirido en los últimos tiempos gran importancia en la solución de problemas ingenieriles, físicos, etc., ya que permite resolver casos que hasta hace pocos años eran prácticamente imposibles de resolver por métodos matemáticos tradicionales. Esta circunstancia obligaba a realizar prototipos, ensayarlos e ir realizando mejoras de forma iterativa, lo que traía consigo un elevado coste tanto económico como en tiempo de desarrollo.

Sin embargo, el MEF ha permitido realizar un modelo matemático de cálculo del sistema real, más fácil y económico de modificar que un prototipo. A pesar de ello, no deja de ser un método aproximado de cálculo debido a las hipótesis básicas del método. Por tanto, los prototipos siguen siendo necesarios, pero en menor número, ya que el primero puede acercarse bastante más al diseño óptimo.

La idea general del método de los elementos finitos es la división de un continuo en un conjunto de pequeños elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos. Las ecuaciones que rigen el comportamiento del continuo regirán también el del elemento. De esta forma se consigue pasar de un sistema continuo, que es regido por una ecuación diferencial o sistema de ecuaciones diferenciales, a un sistema con un número de grados de libertad finito cuyo comportamiento se modela por un sistema de ecuaciones, lineales o no.

En general, hay tres fases en cualquier tarea asistida por computador para simulación:

- Pre-procesamiento: el primer paso es construir un modelo de elementos finitos de la estructura a ser analizada. Una vez creada la geometría, se utiliza un procedimiento para definir y dividir el modelo en “pequeños” elementos (mallado). Asimismo en esta sección se deben escoger las propiedades del material, el tipo de elementos, condiciones de contorno, etc.
- Análisis: en el proceso de análisis de elementos finitos se lleva a cabo una serie de procesos computacionales. Tal análisis estructural permite la determinación de efectos como lo son las deformaciones, estiramiento o esfuerzos que son causados por fuerzas estructurales.
- Post-procesamiento: estos resultados pueden ser estudiados utilizando herramientas visuales para identificar completamente las implicaciones del análisis. Herramientas numéricas y gráficas permiten la localización precisa de información como esfuerzos y deformaciones a ser identificadas.

4.1.2 Volúmenes finitos

El método de elementos finitos es un método de discretización muy útil para simulaciones numéricas de varios tipos (elípticas, parabólicas o hiperbólicas). Al igual que el método de elementos finitos, es utilizado en numerosos campos de ingeniería. Asimismo, algunas de las características importantes de este método son similares a las de los elementos finitos. Una de las principales características de los volúmenes finitos es la conservación del flujo de una celda a su vecina. Este último distintivo toma gran importancia en problemas en los que el flujo es un factor importante como en el campo de los fluidos, calor, etc. [10]

4.2 MODELOS REALIZADOS

En este apartado se lleva a cabo un repaso a la evolución de los diferentes modelos de matrices realizados y el posterior flujo de material en su interior. El orden de acciones que se ha seguido es:

- 1) Diseño de las matrices y simulación de la forja de las cabezas y la zona central, mediante el software de elementos finitos Marc Mentat.
- 2) Si no había problemas en la anterior simulación se continuaba con el diseño de las matrices en 3D a través del software de CAD SolidWorks y la simulación de la forja mediante el programa Simufact.
- 3) Comparación de resultados entre la información obtenida a través de Marc Mentat y Simufact.
- 4) Elección del modelo óptimo y elaboración de las matrices con Surfcam.

En primer lugar, se muestran algunos de los primeros modelos que se llevaron a cabo. En estos ensayos solo se completó el primer paso descrito en el anterior apartado, ya que únicamente se realizó la simulación de la zona central de la herramienta mediante Marc Mentat.

La simulación mediante elementos finitos se ha calculado considerando deformación plana. Esto se puede suponer porque se considera el flujo de material contenido en el “plano de corte”. Es decir, no se considerará dirección del flujo en el plano perpendicular a la sección tratada. Las secciones calculadas son la zona central y la zona de las cabezas pero únicamente para el primer golpe, puesto que para el segundo golpe ya no se puede considerar deformación plana.

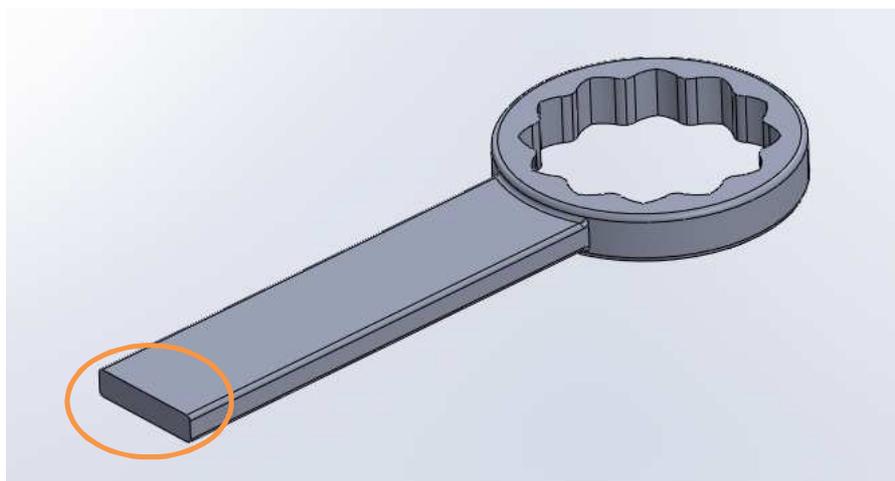


Ilustración 4.1 Sección central (consideración deformación plana)

4.2.1 Modelo previo 1

En el primer modelo previo se cometieron numerosos errores. Para este primer ensayo se escogió un tocho de 30 mm de diámetro.

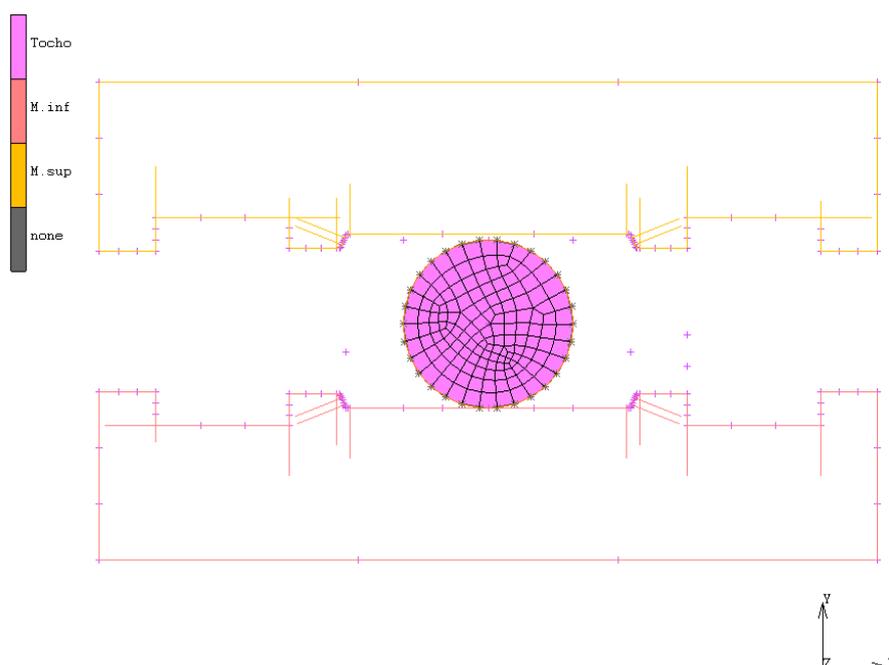


Ilustración 4.2 Identificación de los cuerpos

El primero de los errores cometidos fue que no existía restricción de movimiento del tocho en el eje “x”, no siendo suficiente con el rozamiento para mantener la preforma quieta. A continuación, se muestra el tocho desplazado.

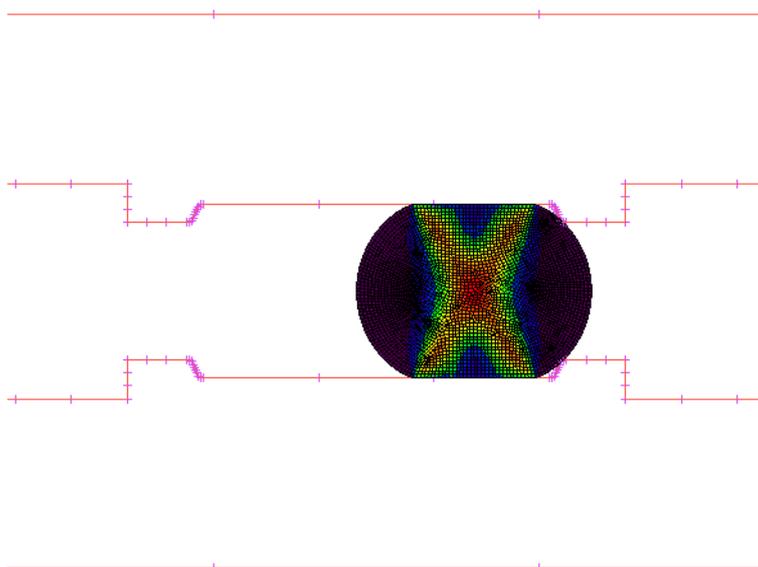


Ilustración 4.3 Desplazamiento de la pieza en el eje “x”

Otro de los errores cometidos en este primer intento fue el exceso de material, lo que conllevó una reducción del diámetro para los ensayos posteriores. En la siguiente imagen se muestra una captura del momento en el que el material ya ha llenado la matriz pero seguía sobrando demasiada cantidad.

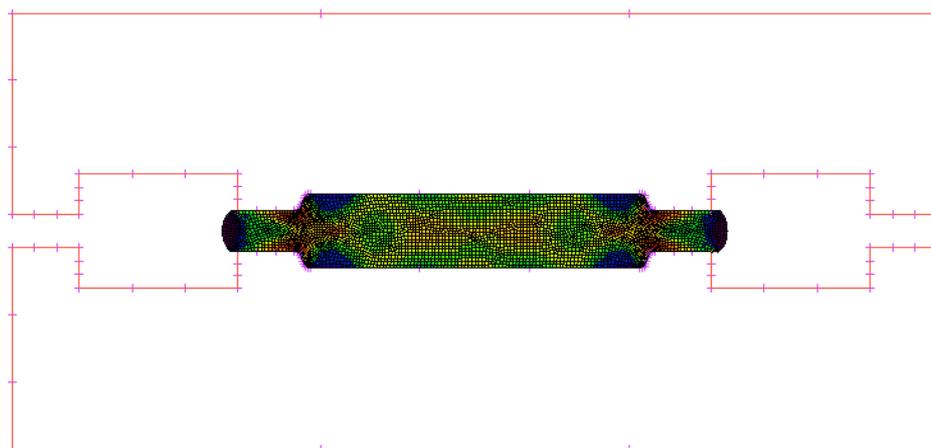


Ilustración 4.4 Exceso de material

Por último, en este primer intento no se colocaron en algunas esquinas radios de acuerdo, provocando en la simulación algunos casos de penetración del material como muestra la siguiente imagen. Este fallo provocó la detención de los cálculos antes de terminar la simulación.

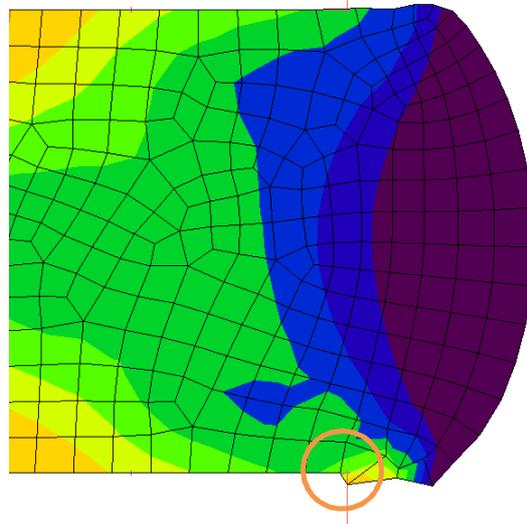


Ilustración .4.5 Fallo por falta de radios de acuerdo

4.2.2 Modelo previo 2

En el segundo intento se redujo el diámetro de la preforma y se corrigieron algunos radios que provocaban fallos en la simulación anterior. En la siguiente imagen se aprecia una esquina transformada en radio.

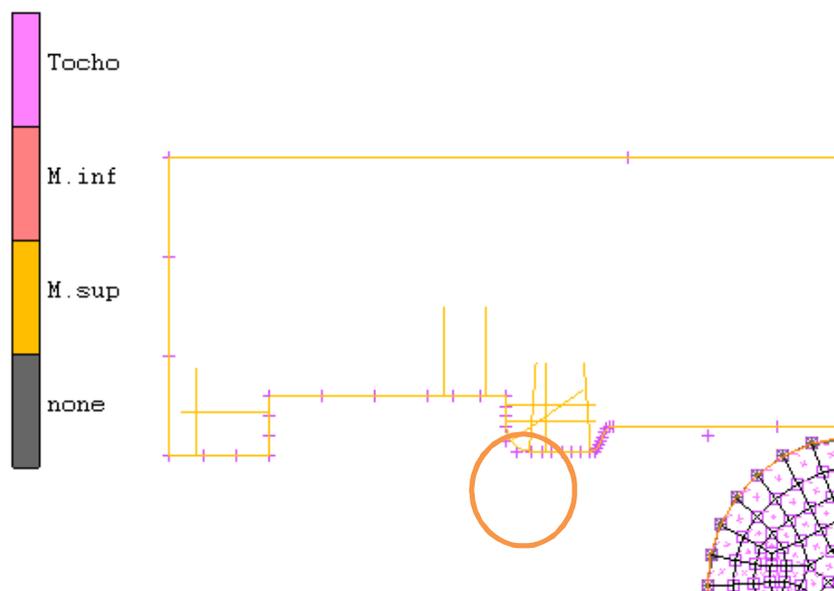


Ilustración 4.6 Transformación de esquina en radio

Además, se comprobó que la cantidad de material seguía siendo excesiva, lo que también producía un aumento excesivo de las fuerzas de forja.

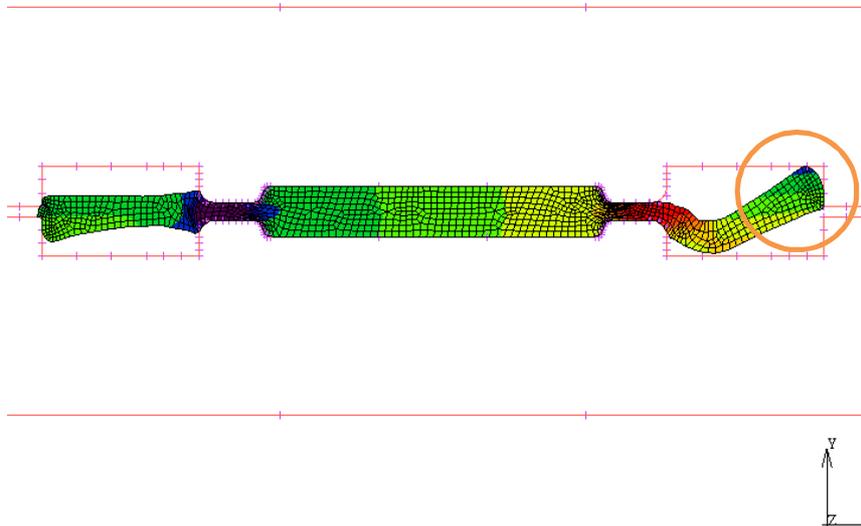


Ilustración .4.7 Exceso de material

Una vez comprobados algunos de los errores más comunes en los modelos previos se procedió a realizar el modelo completo y sus correspondientes mejoras. En estos ensayos se obtendrán una serie de resultados que se compararán con diferentes softwares.

4.2.3 Modelo completo 1

Datos de partida

Para la elaboración del modelo se llevaron a cabo las siguientes consideraciones para ambos golpes:

- Ángulos de despulla de 5°.
- Temperatura de las matrices: 550 °C.
- Temperatura del tocho: 1200 °C.
- Coeficiente de rozamiento: 0.3.
- Material de las matrices: acero de herramienta (límite elástico 2000 MPa).

- Temperatura ambiente: 25°C.
- Coeficiente de transmisión de calor al ambiente:

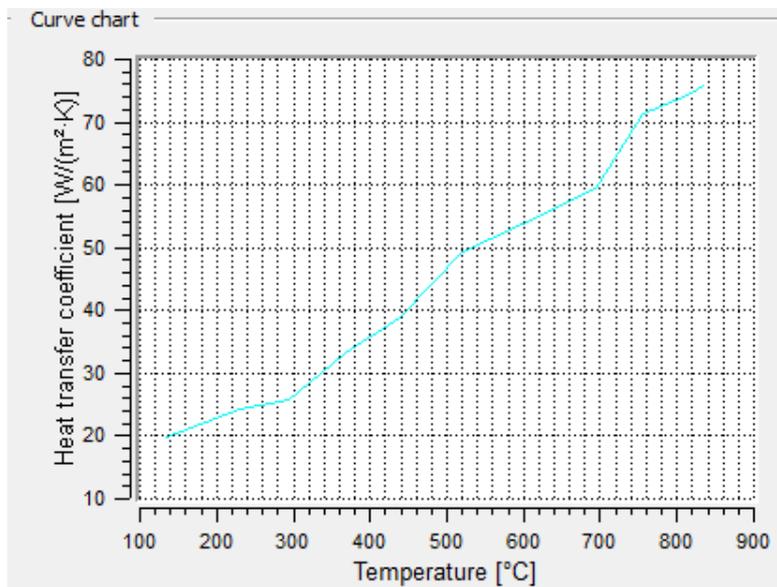


Ilustración 4.8 Transmisión de calor al ambiente

Como se puede observar en la anterior gráfica, el coeficiente de transmisión de calor aumenta a medida que se incrementa la temperatura.

- Coeficiente de transmisión de calor a la pieza de trabajo (función del cociente entre la tensión de contacto y el límite elástico del material a forjar):

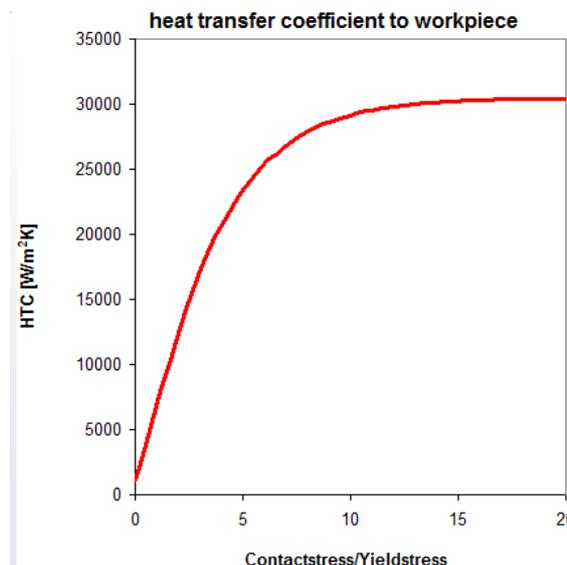


Ilustración 4.9 Transmisión de calor pieza-matriz

Como se aprecia en las imágenes existe un flujo de temperatura desde la pieza hacia las matrices y al ambiente. En concreto, en la segunda captura se aprecia cómo se transmite el calor desde el tocho a las matrices. La forma de la función se debe al hecho de que cuando la presión aumenta, el área de contacto (referida al área de contacto microscópica) entre la pieza y la matriz crece gradualmente. Cuando la presión aumenta hasta un cierto valor, el contacto entre pieza y matriz es cercano al 100% y el coeficiente de transmisión alcanza el valor máximo, que se mantiene hasta el final del proceso.

Esto mismo se ha observado experimentalmente en ensayos encontrados en bibliografía. Por ejemplo, a continuación se observa esta misma gráfica para una pieza cilíndrica Ti-6Al-4V de 80 mm de diámetro [11].

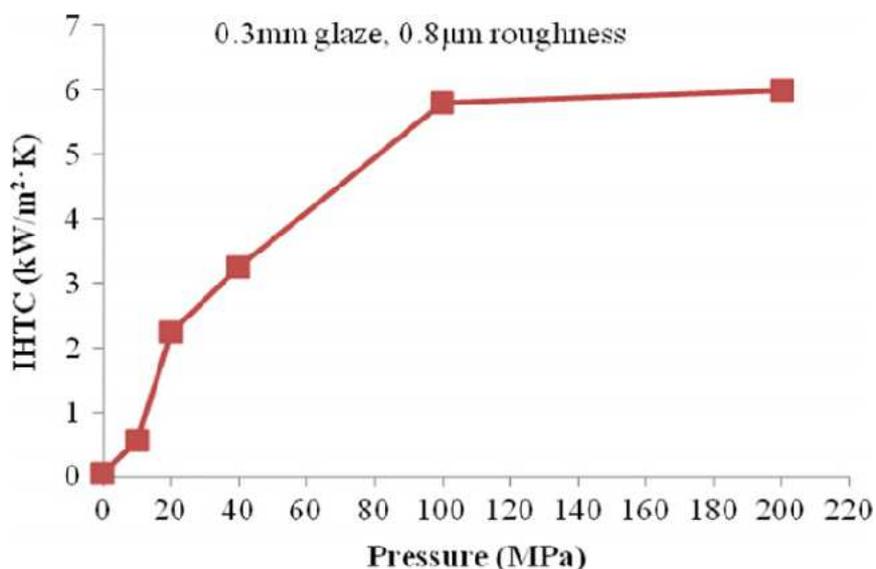


Ilustración 4.10 Transmisión de calor pieza-matriz

El tocho inicial tendrá la forma que aparece en la ilustración 4.11 con el objetivo de no perder excesivo material. Estará compuesto de menos material en la parte central puesto que se requiere menos cantidad en esa zona para llenar la matriz. Los dos extremos también contendrán diferente cantidad de material puesto que los orificios de las cabezas son de diferente tamaño. Se puede observar que la zona de unión entre la parte central y las cabezas está compuesta por radios de acuerdo para mejorar el flujo de material.

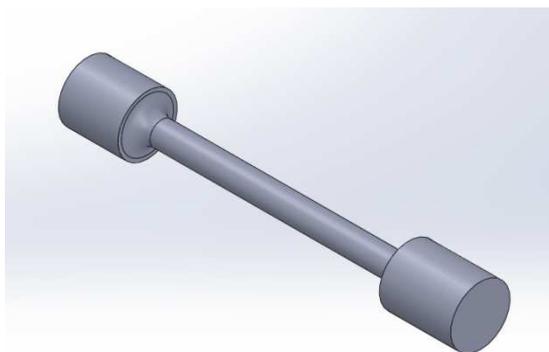


Ilustración 4.11 Probeta inicial

Las matrices para el primer golpe tendrán la siguiente geometría:

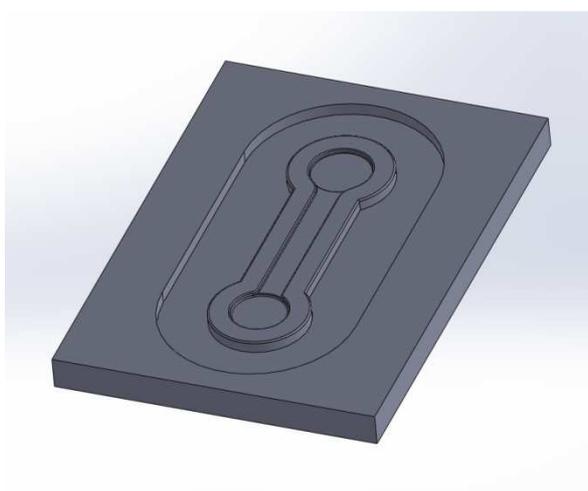


Ilustración 4.12 Matriz golpe 1

Las matrices para el segundo golpe tendrán la siguiente geometría:

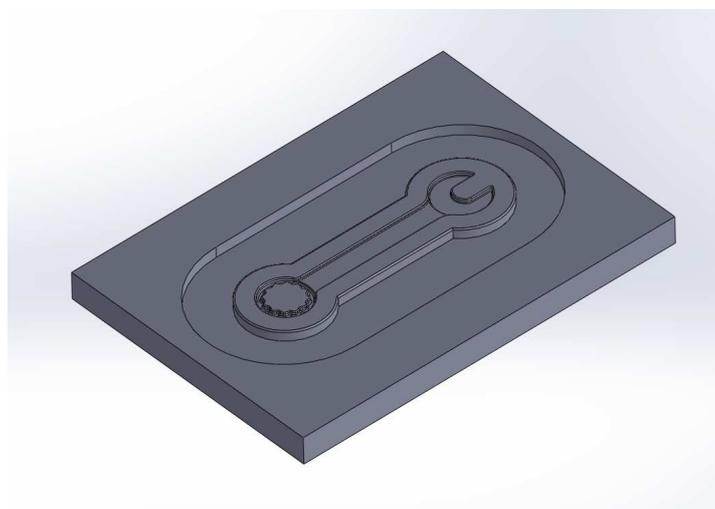


Ilustración 4.13 Matriz golpe 2

Sin embargo, antes de realizar los diseños de las matrices y del tocho mediante Solidworks se debe realizar la simulación en MarcMentat. De esta forma, al considerar deformación plana el proceso se simplificará. Con ello, se comprobará si el material empleado para la preforma es suficiente. Una vez realizadas estas comprobaciones se procederá al diseño en 3D.

Para comenzar, como ya se comentó anteriormente, se distinguirán entre la sección de la cabeza y la sección central. Para ambos casos se generarán tres cuerpos: dos matrices (cuerpos no deformables) y el tocho (deformable).

Asimismo, en ambos casos al cuerpo deformable (tocho) se le aplicará un mallado y un remallado puesto que va a haber gran deformación. Se escogerán elementos cuadriláteros ya que son preferibles para simulaciones de deformación de metales [12]. Como se aprecia en la siguiente imagen, se ha escogido 1,25 mm el tamaño de arista de elemento, y 30 el número de incrementos tras el que se realiza el remallado.



Ilustración 4.14 Remallado

Entre las matrices y la pieza se escogió un rozamiento tipo *Shear* que, es más adecuado para modelizar el rozamiento en procesos en los que existen altas presiones. El valor escogido fue de 0.3.

Para los ensayos simulados con MarcMentat se ha creado una tabla tensión-deformación básica para metales, que modelizará el comportamiento plástico del material.

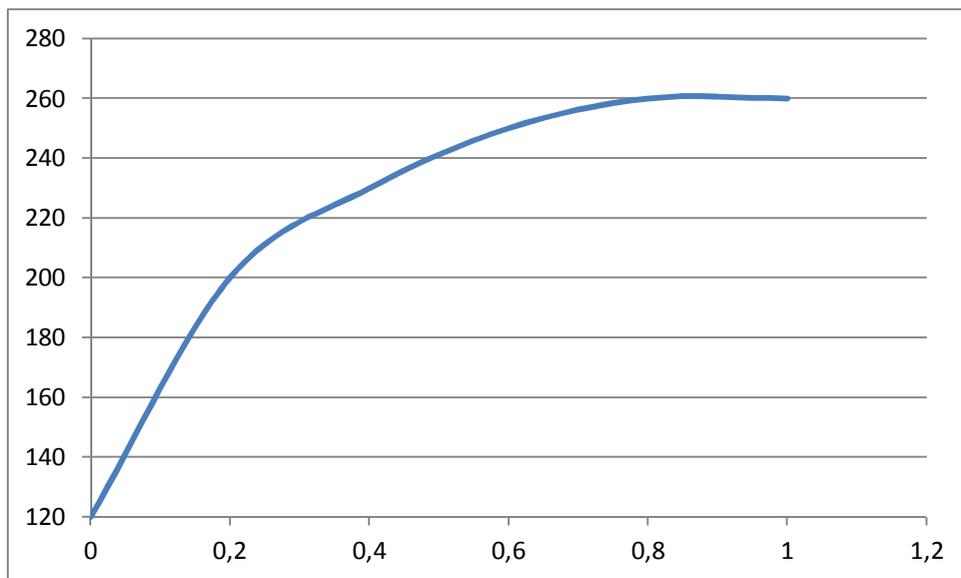


Ilustración 4.15 Tabla tensión (MPa)-deformación

- Sección de las cabezas

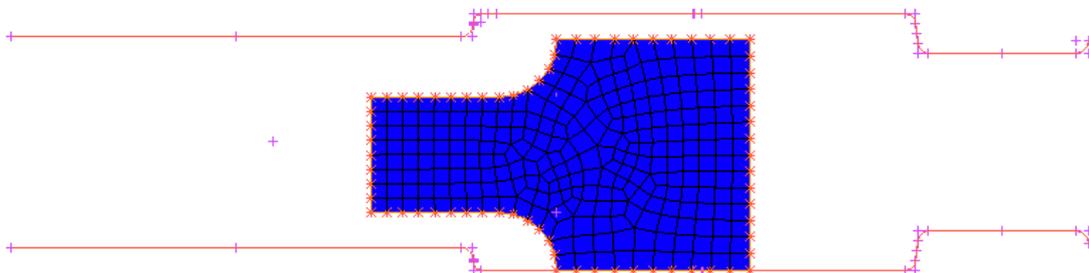


Ilustración 4.16 Cabeza de la pieza antes del primer golpe

En la imagen superior se observa una de las cabezas de la herramienta antes de comenzar el proceso de forjado.

En la imagen inferior se aprecia el estado de la cabeza al finalizar el proceso. Como se puede observar, el material empleado es suficiente puesto que rellena correctamente la cavidad y rebosa una cantidad de rebaba aceptable. Asimismo, se observa que la mayor deformación se encuentra en la zona de la rebaba, lo cual no es preocupante puesto que posteriormente será eliminada mediante el proceso de troquelado. De igual manera, destaca la homogeneidad de la zona central que, se traducirá en la similitud de las propiedades mecánicas para esa zona.

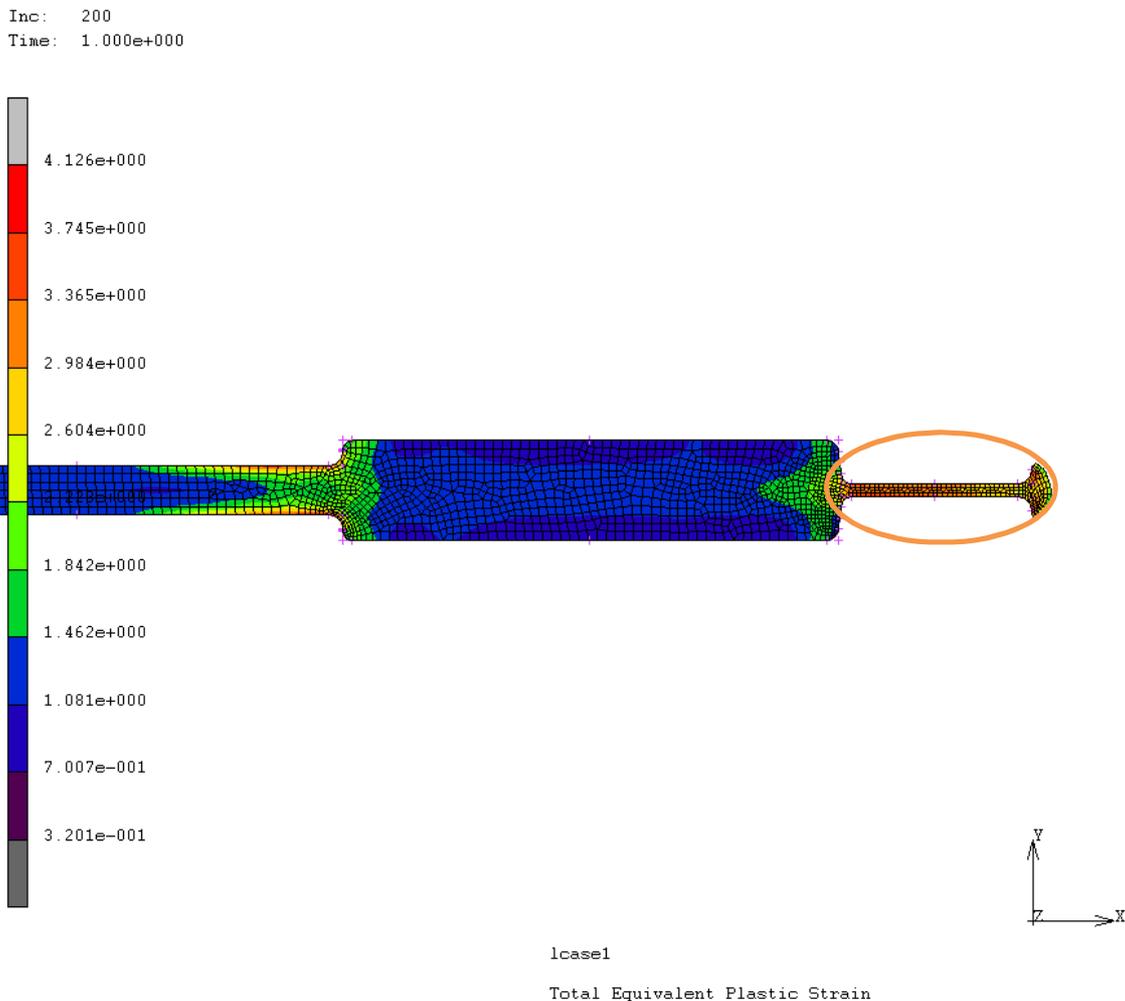


Ilustración 4.17 Deformación de la pieza

A continuación, se muestra el daño sufrido por la pieza. Se puede apreciar que el mayor valor se encuentra, de nuevo, en la zona de la rebaba que será eliminada posteriormente.

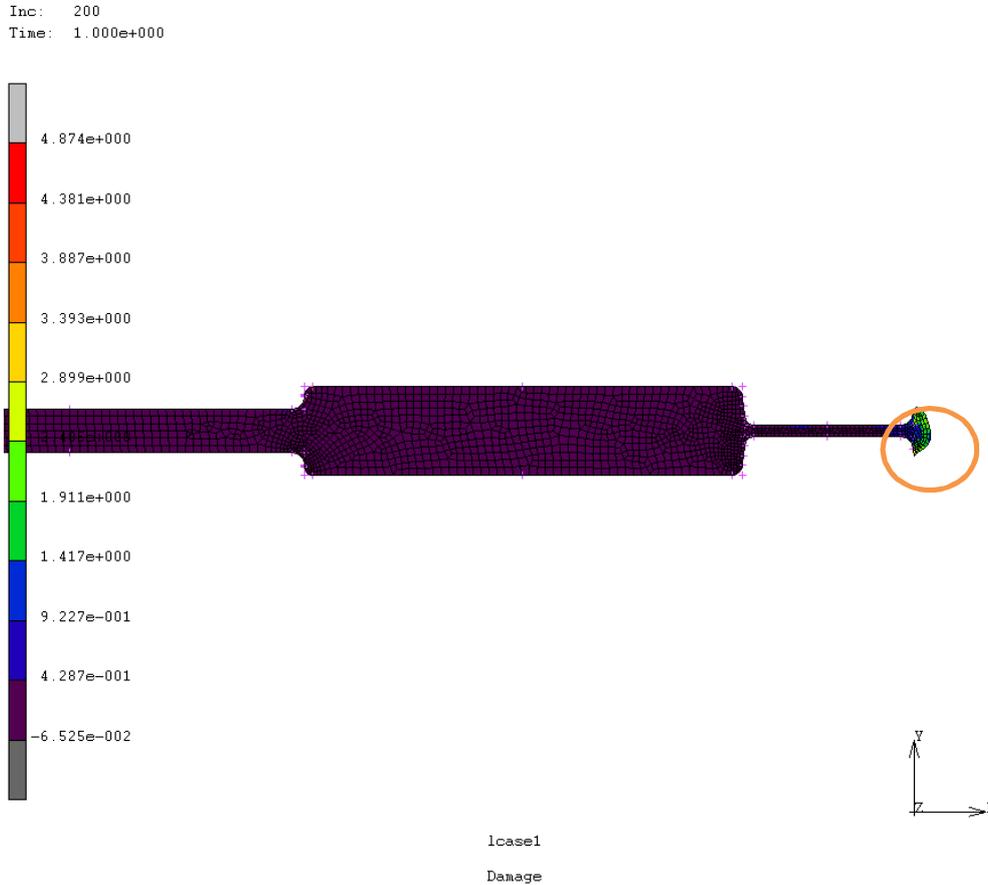


Ilustración 4.18 Daño sufrido por la pieza

- Sección central

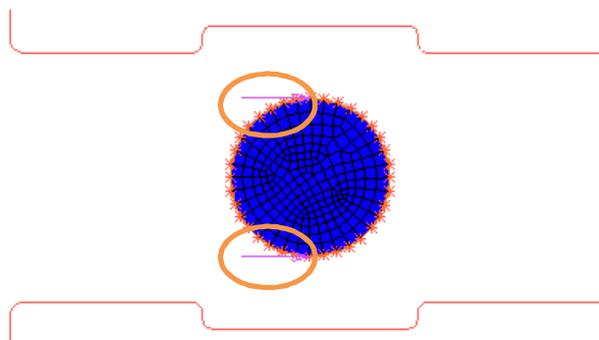


Ilustración 4.19 Sección central

En la imagen anterior se muestra una captura de la sección central de la herramienta antes de ser forjada. Como se puede apreciar, la parte central de la herramienta no está apoyada, son los extremos de la misma los que se sustentan sobre las matrices. Asimismo, se puede observar como en el software MarcMentat se ha ordenado una restricción sobre dos de los nodos (indicados en la imagen) para evitar la rotación y desplazamiento de la pieza durante el proceso de forja.

En la siguiente imagen se pueden apreciar las deformaciones de la pieza. Al igual que en el caso de las cabezas la mayor deformación se acumula en la zona de la rebaba. También se aprecia que la cantidad de material es suficiente para llenar la cavidad y además, obtener una cantidad de rebaba aceptable. Asimismo, se observa como la zona central tiene una mayor deformación que, se traduce en una mayor dureza del material.

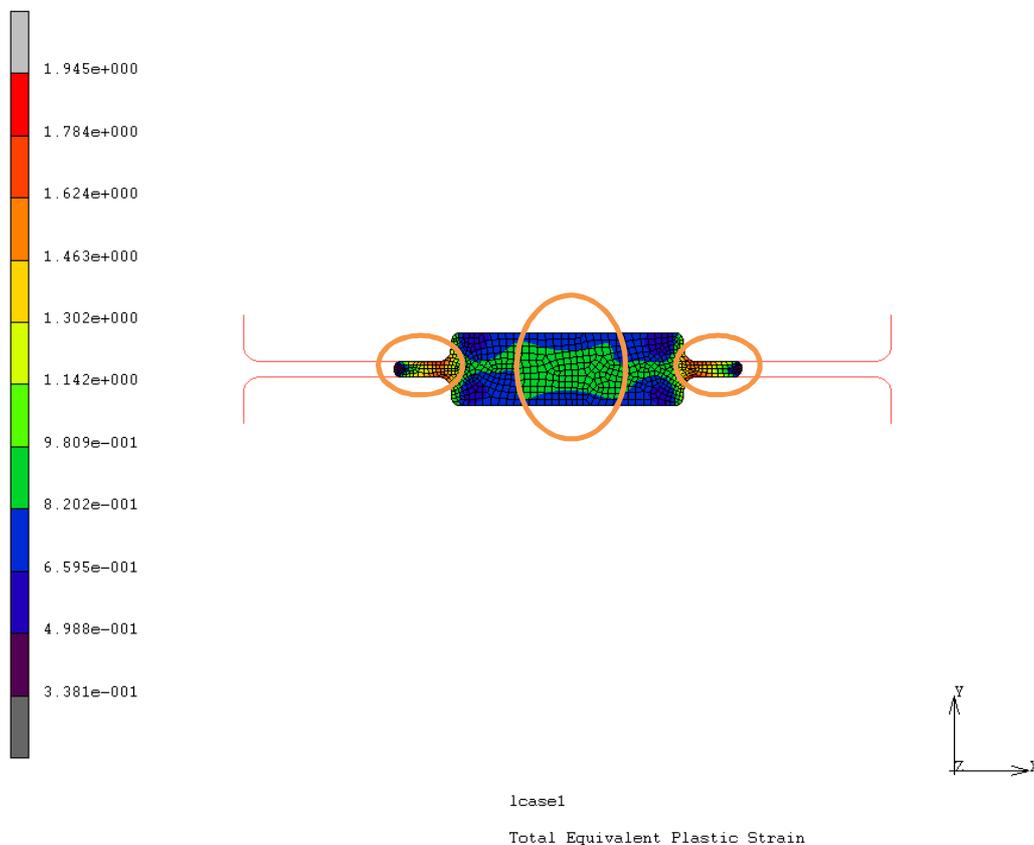


Ilustración 4.20 Deformación de la zona central

En la siguiente figura se aprecia el daño de la zona central. De nuevo, el mayor daño lo sufre la zona de la rebaba y es despreciable en la parte útil de la pieza.

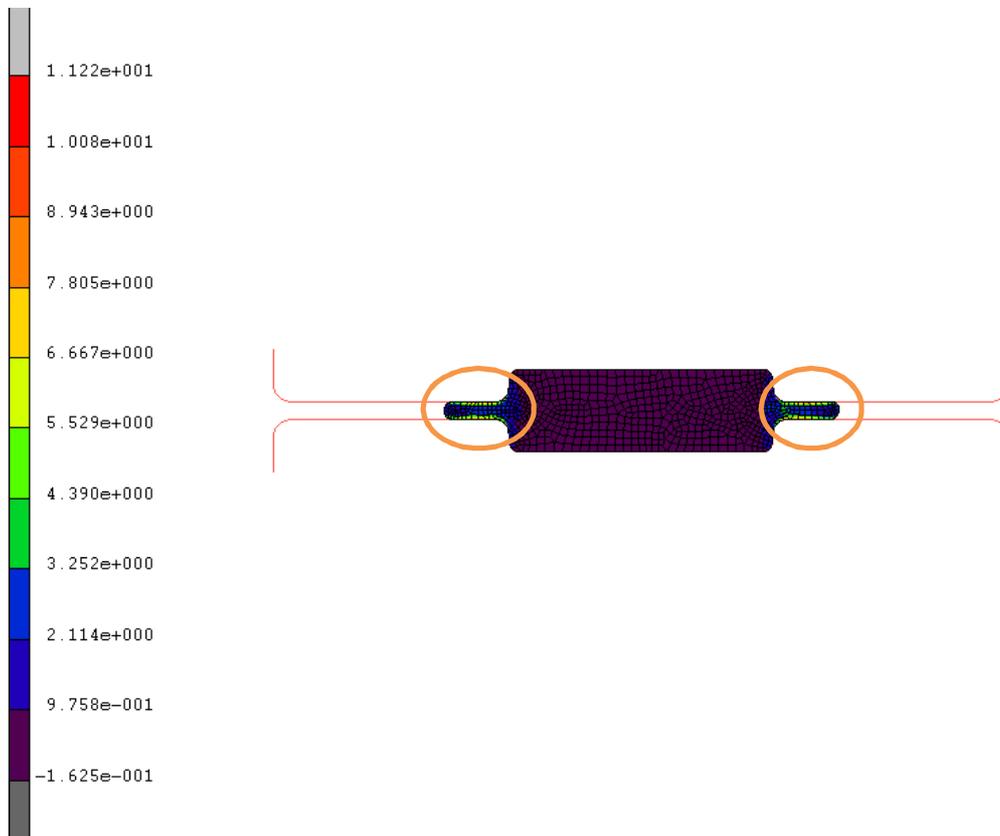


Ilustración 4.21 Daño de la zona central

Respecto a las simulaciones con Simufact, al igual que en las simulaciones con MarcMentat se debe mallar la probeta.

Para llevar a cabo las simulaciones de volúmenes finitos mediante Simufact, se importaron los cuerpos diseñados en SolidWorks.

A continuación, de entre los materiales ofrecidos por la librería del programa se aplicó el AISI 6150 para pieza. Asimismo, se introdujeron los datos referentes a al rozamiento (0.3 *Shear*), a la temperatura de los cuerpos (en este modelo 1200 °C la probeta y 550 °C las matrices) y a la distancia de la carrera (33 mm) con una velocidad de bajada de 3 mm/segundo.

El número de elementos resultantes del mallado de la probeta es 9764 con un tamaño de 2.73 mm cada elemento. Además, se observa como el tamaño en la zona de los radios es menor puesto que son las zonas con mayor deformación y de esta forma, se representan los resultados con una mayor fiabilidad.

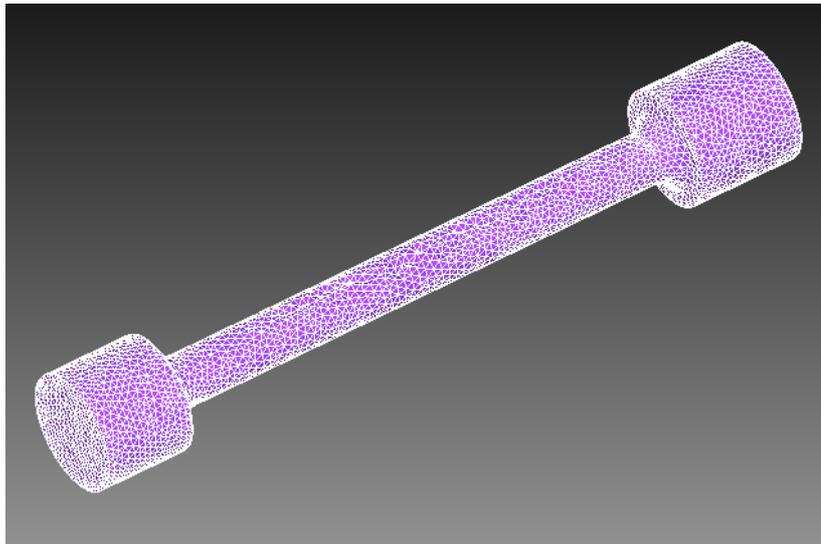


Ilustración 4.22 Mallado de la probeta

A continuación, se muestran los mismos resultados (tensiones y daño) realizados mediante Simufact.

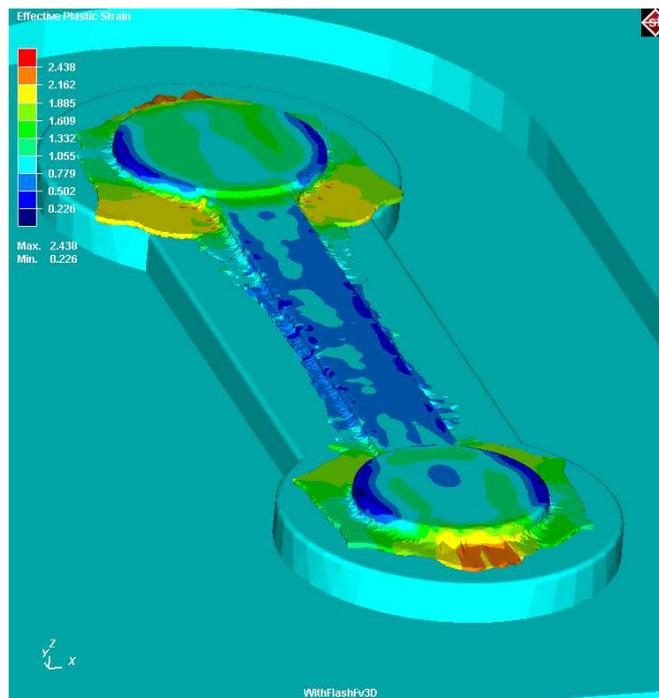


Ilustración 4.23 Deformación de la pieza (golpe 1)

Se observa que la mayor deformación se produce en la zona de la rebaba (2.43) corroborando lo que ya se había comprobado a través de MarcMentat. Por tanto, serán las zonas con mayor dureza. Asimismo, se aprecia la homogeneidad en la deformación de la parte central, por lo tanto mayor homogeneidad de propiedades (dureza, límite elástico, etc.).

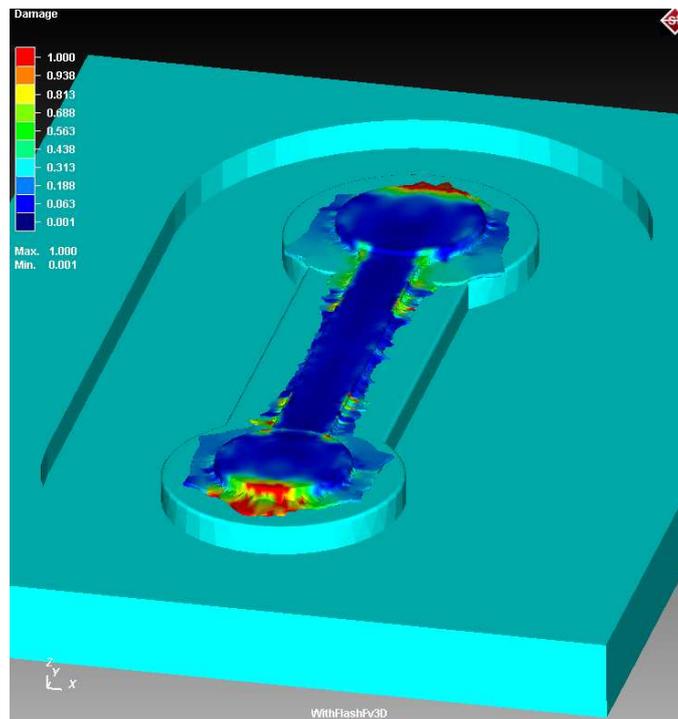


Ilustración 4.24 Análisis de daño (golpe 1)

En este caso, se observa que la zona que sufre mayor daño es la zona final de las cabezas. Esto se debe a la forma del tocho inicial.

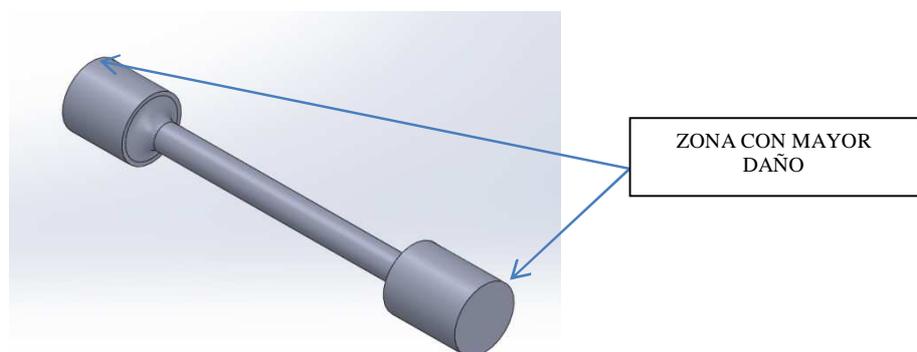


Ilustración 4.25 Probeta inicial

Sería recomendable que esa zona fuese semiesférica pero ello conllevaría también una mayor dificultad de mecanizado y un mayor coste económico.

La fuerza que realiza la matriz superior se puede apreciar en la siguiente gráfica. Crece exponencialmente cuando empieza a aparecer rebaba ya que aumenta el área rápidamente. Como se puede observar, la máxima fuerza es de aproximadamente 71 kN para el primer golpe.

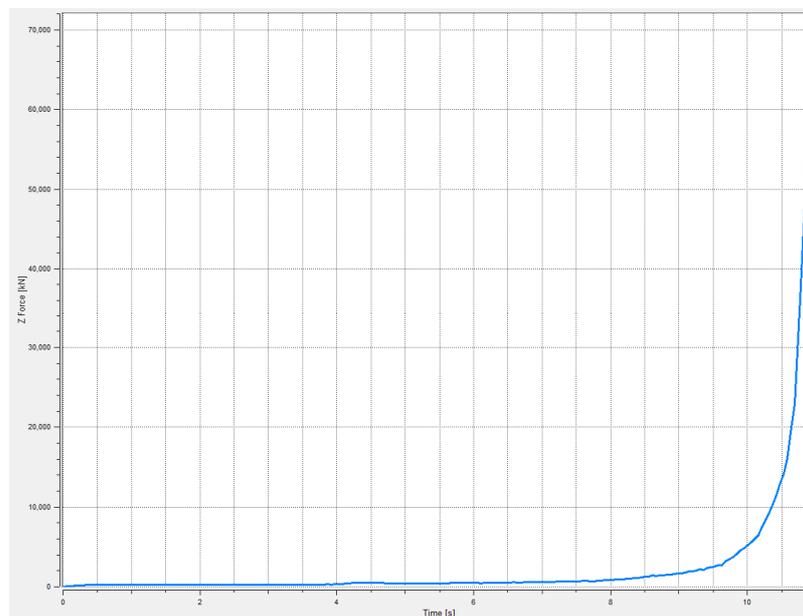


Ilustración 4.26 Fuerza matriz superior (golpe 1)

El siguiente paso es comprobar las tensiones que soportan las matrices tras el primer golpe. Para ello, en primer lugar se malla la matriz y, se importan las presiones de la simulación anterior (golpe 1), para después resolver por elementos finitos cada incremento como un caso de carga lineal y estático. Para el mallado se escogieron elementos tetraedros de tamaño 10 mm cada uno. En total, resultaron 126077 elementos.

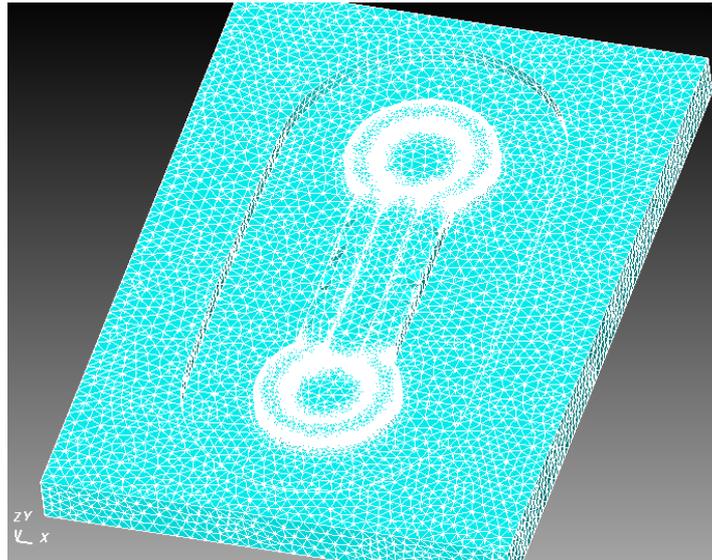


Ilustración 4.27 Mallado matriz (golpe 1)

En ambos extremos de la llave se realizará un mallado más fino puesto que se trata de la zona más conflictiva desde el punto de vista de las tensiones.

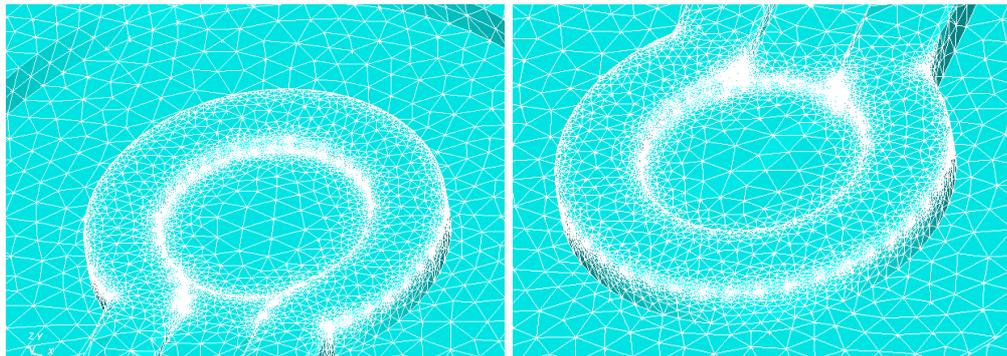


Ilustración 4.28 Mallado fino (golpe 1)

En la siguiente figura se observan las tensiones que soporta la matriz cuando ha terminado el proceso. Como se puede observar en la leyenda, los valores de tensión en algunas zonas, hasta un máximo de 6911.72 MPa, son mayores que el propio límite elástico del material escogido para la matriz (2000 MPa). Por tanto, la matriz se rompería sin poder conseguir completar el golpe. Habría que incrementar la temperatura de forja o aumentar los radios de acuerdo ya que es donde se dan las tensiones máximas.

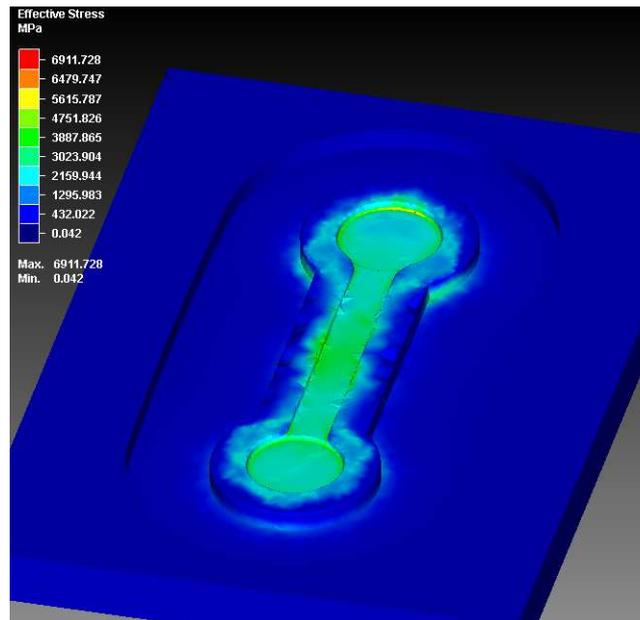


Ilustración 4.29 Tensiones en la matriz (golpe 1)

A continuación, se realiza el mismo proceso para el segundo golpe. Para ello, se realiza el mismo procedimiento que en el primer golpe. Se importa la geometría final de la primera simulación con los valores de deformación y daño. Asimismo, se vuelven a aplicar las condiciones de temperatura, rozamiento, etc. al igual que se hizo anteriormente. La única diferencia significativa es la reducción de la carrera a 12 mm puesto que el volumen de la pieza ya ha sido reducido con el primer golpe.

En primer lugar, se comienza analizando las deformaciones.

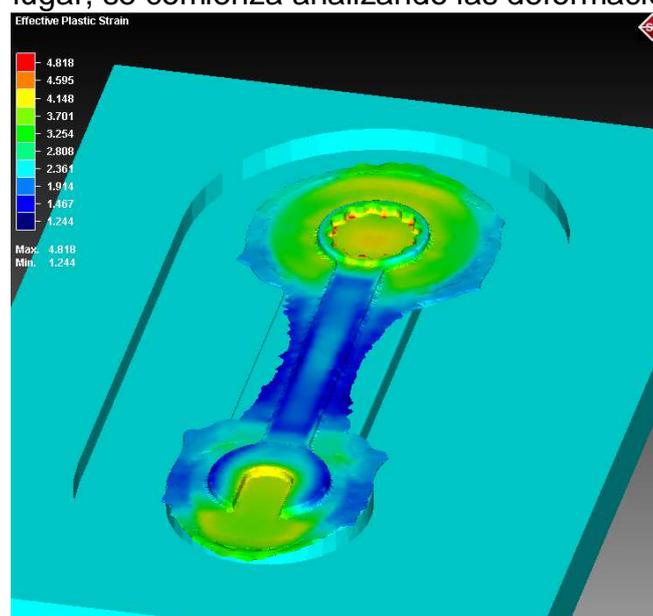


Ilustración 4.30 Análisis de deformaciones

Puede apreciarse un exceso de material pero se debe a que la rebaba del primer golpe no ha sido retirada ya que, será retirada en un proceso de troquelado posterior.

Para el segundo golpe, la evolución en la fuerza que realiza la matriz superior es la mostrada en la siguiente figura. El máximo es de aproximadamente 150 kN y, de nuevo, crece exponencialmente al aparecer la rebaba.

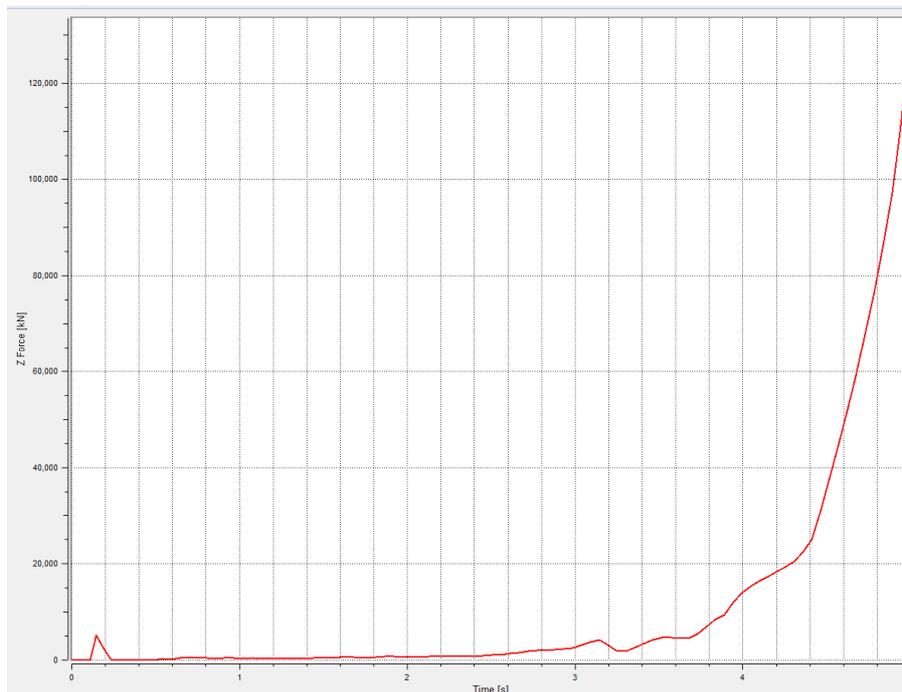


Ilustración 4.31 Fuerza matriz superior (golpe 2)

El siguiente paso, es mallar la matriz correspondiente al segundo golpe, resultando la siguiente imagen. El número de elementos resultante es de 168732 con un tamaño de 10 mm por elemento.

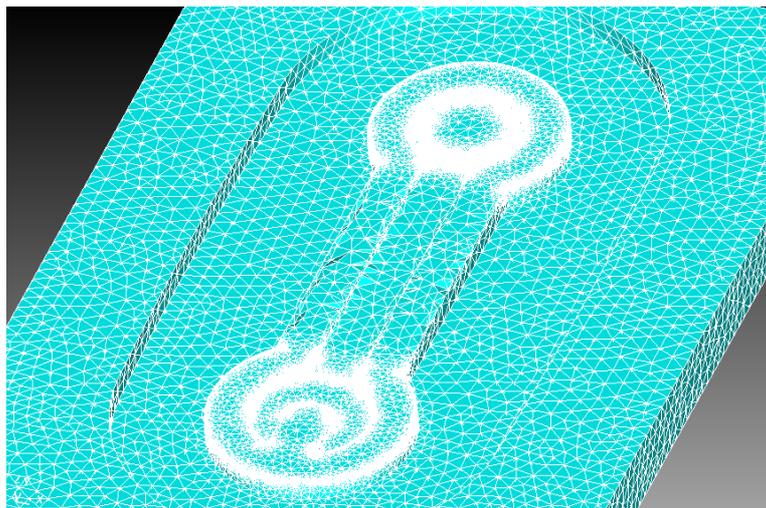


Ilustración 4.32 Mallado matriz (golpe 2)

En las siguientes imágenes se observa al igual que en el primer golpe, como en las zonas curvas de las cabezas la matriz tiene un mallado más fino puesto que será ahí donde se acumularán más tensiones.

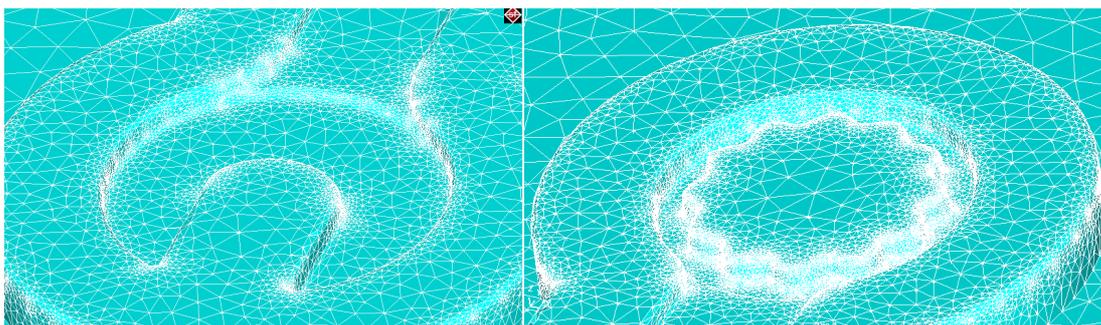


Ilustración 4.33 Mallado fino (golpe 2)

En la siguiente figura se observan las tensiones que soporta la matriz tras el segundo golpe. Al igual que en el primer golpe, los valores de tensión máxima (3892.3 MPa) sobrepasan los del límite elástico del material de la matriz (2000 MPa), por tanto ésta se rompería en este primer diseño.

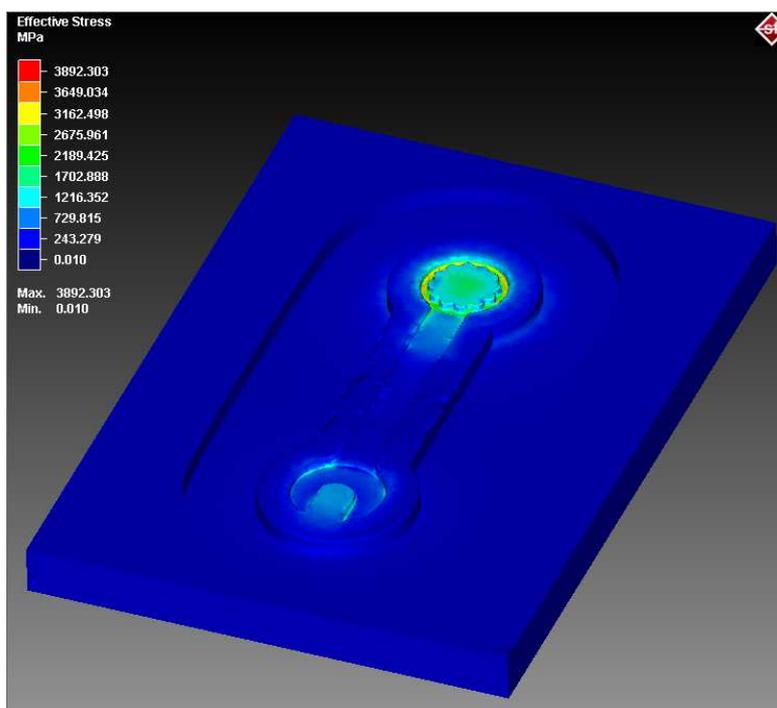


Ilustración 4.34 Tensiones en la matriz (golpe 2)

Como se observa en la siguiente imagen, la temperatura de la pieza al final del proceso es de aproximadamente 800 °C. Esto se debe a que las matrices, inicialmente, se encuentran a 550 °C, y hacen que se enfríe la pieza que partía de 1200 °C originalmente.

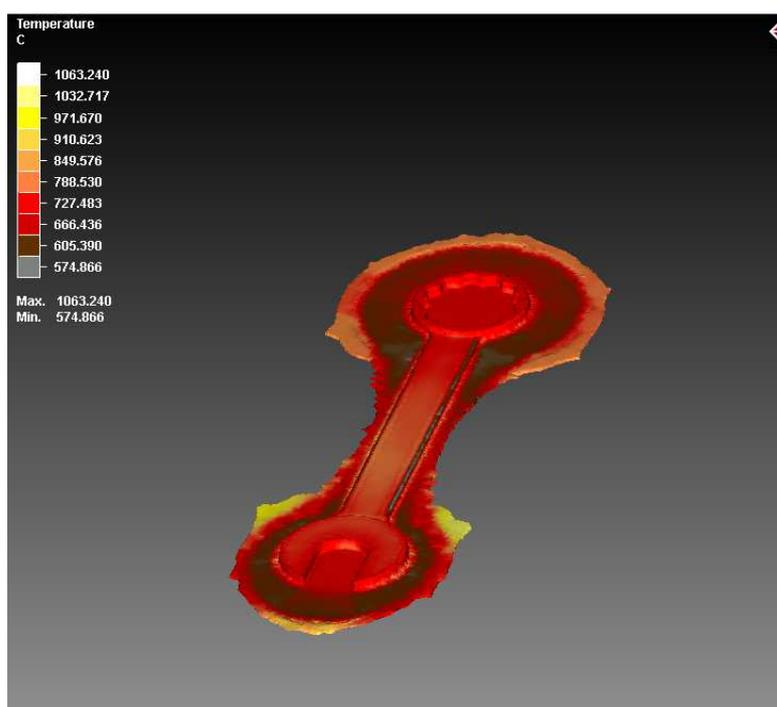


Ilustración 4.35 Temperatura de la pieza (golpe 2)

Observando la respuesta del material con la temperatura se dedujo que una de las posibles causas de que las tensiones en la matriz fuesen tan altas era la gran diferencia de temperatura a la que se sometieron las matrices y la pieza. En la siguiente gráfica se observa como la línea roja representa las tensiones para una temperatura de 800 °C (muy altas) mientras que la morada lo hace para 1250 °C (más bajas). Por tanto, si se conseguía reducir el enfriamiento de la pieza se conseguiría una reducción de las tensiones en la matriz debido a que al disminuir la temperatura aumenta la tensión de fluencia del material.

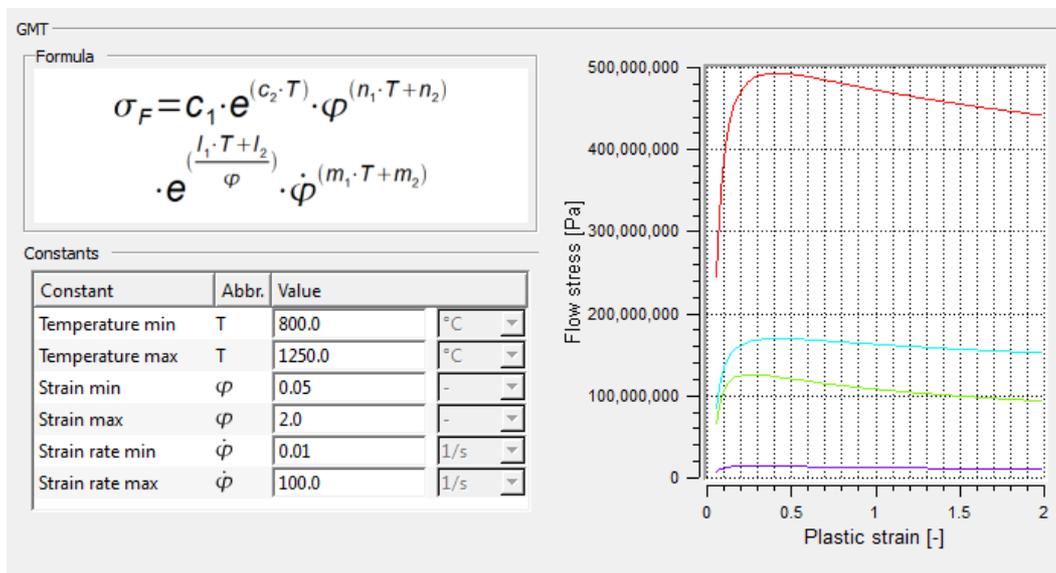


Ilustración 4.36 Respuesta del material con la temperatura (ley de fluencia)

4.2.4 Modelo completo 2

Tras realizar el modelo completo anterior se decidió realizar algunas modificaciones para intentar reducir las tensiones de la matriz. Los cambios que se llevaron a cabo fueron:

- Ampliación de la cavidad de la pieza. Se sobredimensionó un poco más de forma que el espacio fuese mayor para el flujo del material pero suficiente para el llenado completo de la matriz. Un ejemplo se muestra a continuación reduciendo el diámetro interior y ampliando el exterior. Mediante un posterior mecanizado se reducirá el material hasta la forma deseada.

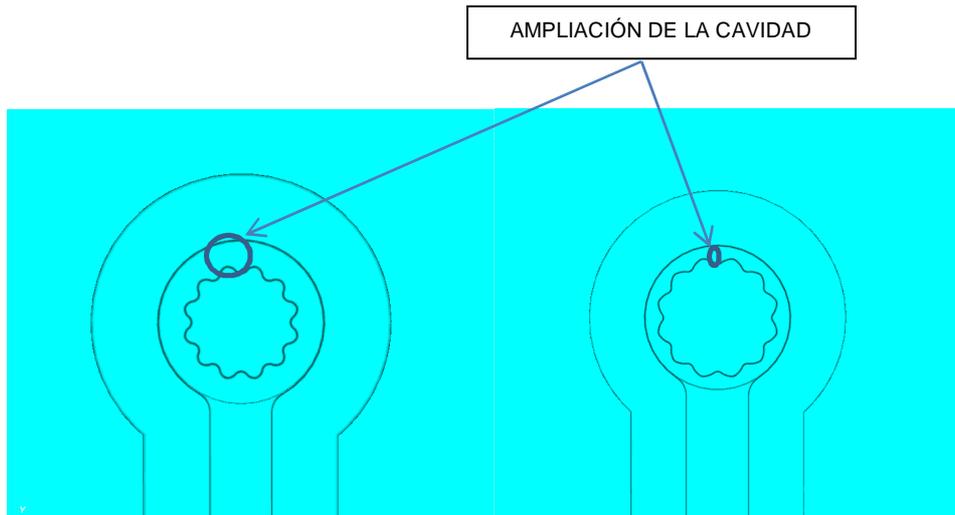


Ilustración 4.37 Ejemplo ampliación de la cavidad en la matriz del segundo golpe

- Ampliación del ángulo de despulla de 5° a 10° e incremento de los radios de acuerdo.
- Incremento de la velocidad de forjado de 3 mm/s a 30 mm/s. Con ello se deseaba conseguir que el proceso fuese mucho más rápido y no hubiese tiempo suficiente para que la pieza se enfriase tanto como ocurría en el primer modelo.

Una vez aplicadas las modificaciones anteriores se procedió a simular de nuevo el modelo. A continuación se muestran imágenes de la deformación y temperatura de la pieza y, tensiones de las matrices para ambos golpes.

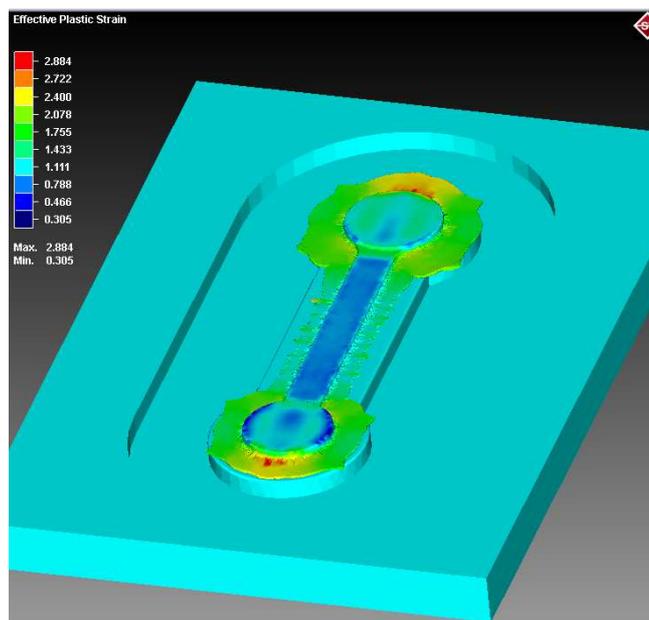


Ilustración 4.38 Deformación de la pieza (golpe 1)

Se puede apreciar como la deformación no sufre grandes variaciones con respecto al primer modelo (incremento de 0.446).

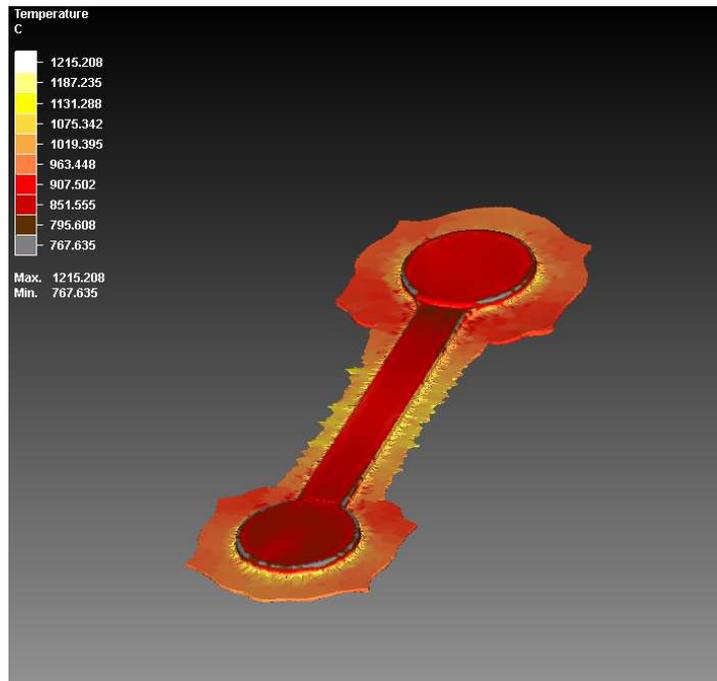


Ilustración 4.39 Temperatura de la pieza (golpe 1)

A pesar de que se había aumentado la velocidad para intentar mantener la temperatura de la pieza se observa en la imagen superior que la temperatura seguía reduciéndose hasta 950 °C aproximadamente.

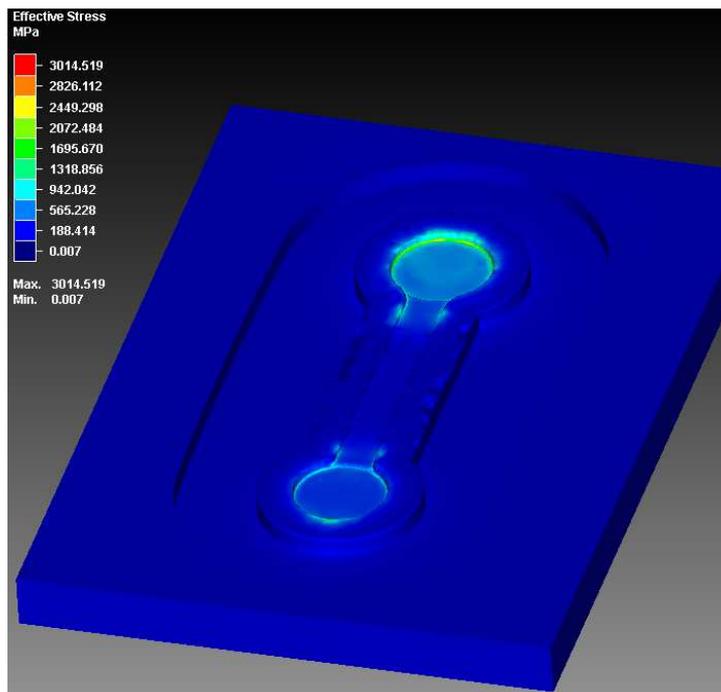


Ilustración 4.40 Tensiones de la matriz (golpe 1)

Se observa como ahora la tensión máxima en la matriz, 3014.51 MPa, se reduce considerablemente a pesar de que sigue tomando valores por encima del límite elástico de la matriz.

A continuación se procede a realizar el mismo procedimiento para el segundo golpe.

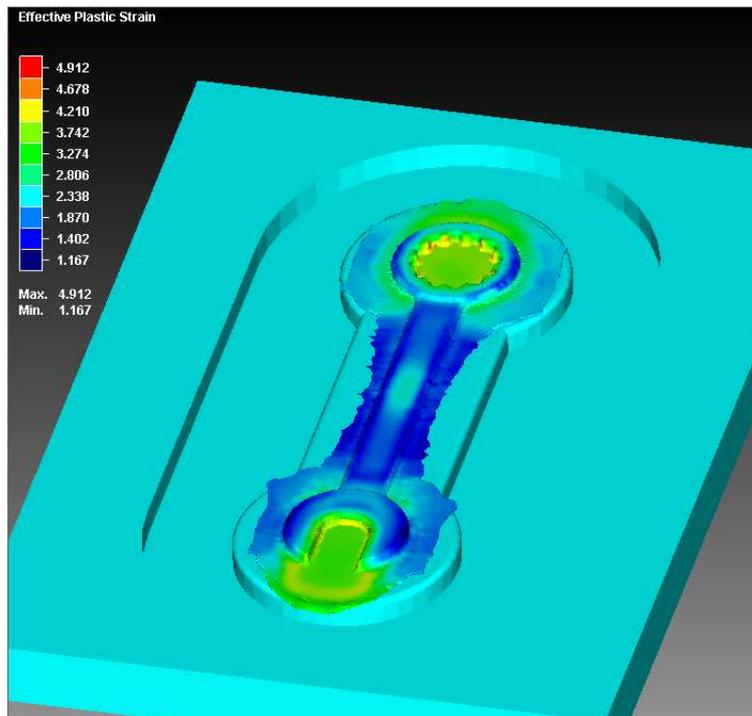


Ilustración 4.41 Deformación de la pieza (golpe 2)

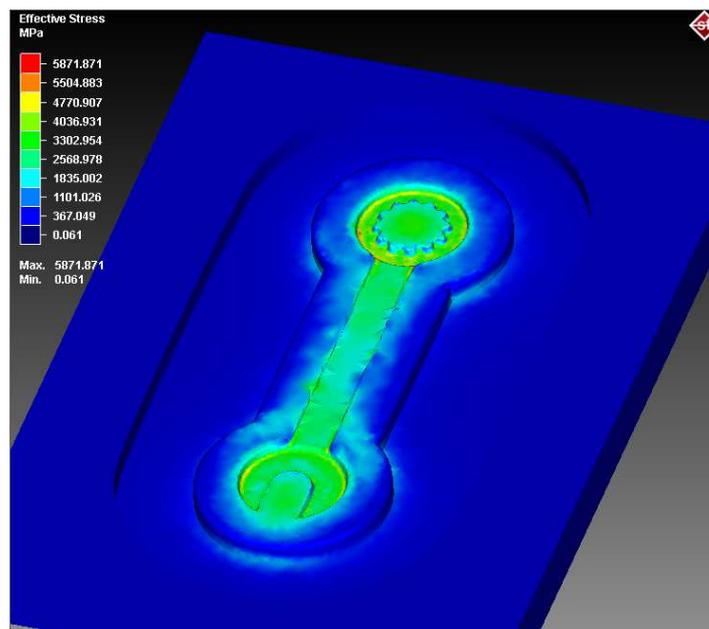


Ilustración 4.42 Tensiones en la matriz (golpe 2)

Como se puede observar las tensiones en la matriz aumentan con respecto al modelo 1, incrementándose en 1979.5 MPa. Por tanto, se puede concluir que este modelo no es el adecuado.

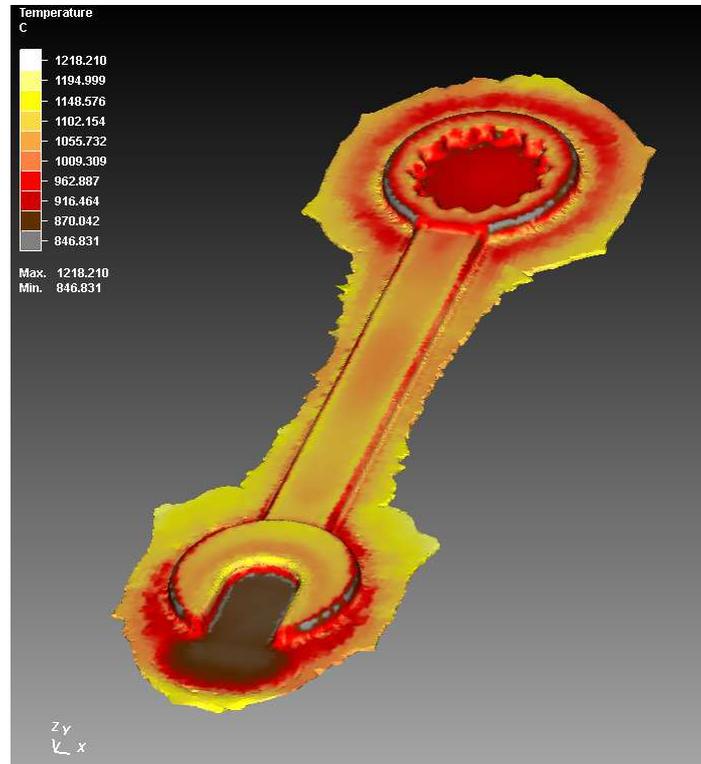


Ilustración 4.43 Temperatura de la pieza (golpe 2)

Se apreció como la zona de las cabezas se enfriaba en exceso. Sin embargo, según la leyenda de temperaturas había zonas en las que la temperatura aumentaba cerca de 200 °C con respecto al golpe 1. Esto ocurre porque cuando el proceso de forja es rápido (en este caso se aumentó la velocidad) se produce más generación de calor al no haber tanto tiempo para su transmisión.

4.3 MODELO DEFINITIVO

Para este modelo se realizaron las siguientes modificaciones respecto al primer modelo:

- Ampliación de la cavidad de la pieza. Se realizó el mismo sobredimensionamiento que para el modelo 2.
- Ampliación del ángulo de despulla de 5° a 10° e incremento de los radios de acuerdo igual que los del segundo modelo.
- Incremento de la temperatura de las matrices hasta la temperatura de la probeta (forja isoterma a 1200 °C). Aumentar la temperatura de las matrices reduce la posibilidad de grandes tensiones [13]. En ocasiones la forja isoterma se considera un proceso adiabático, es decir, no hay intercambio de calor. Por lo tanto, al final del proceso la temperatura de las matrices y la pieza no será tan distante y, como consecuencia se tiene mayor control de la microestructura del material.

Tras realizar las modificaciones anteriores se vuelven a dar los mismos pasos que en los modelos anteriores (incremento de 0.221 respecto al modelo 2).

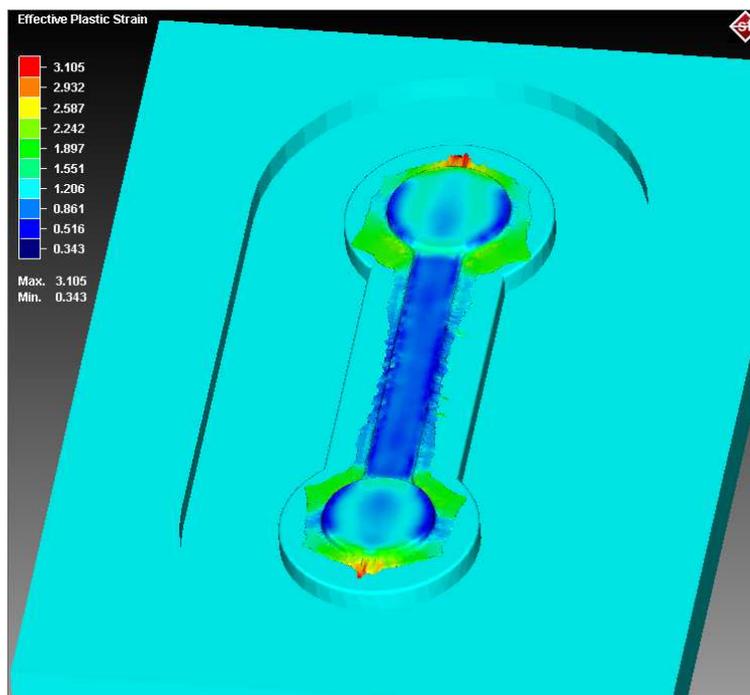


Ilustración 4.44 Deformación de la pieza (golpe 1)

En este caso, la deformación aumenta ligeramente con respecto a los modelos anteriores.

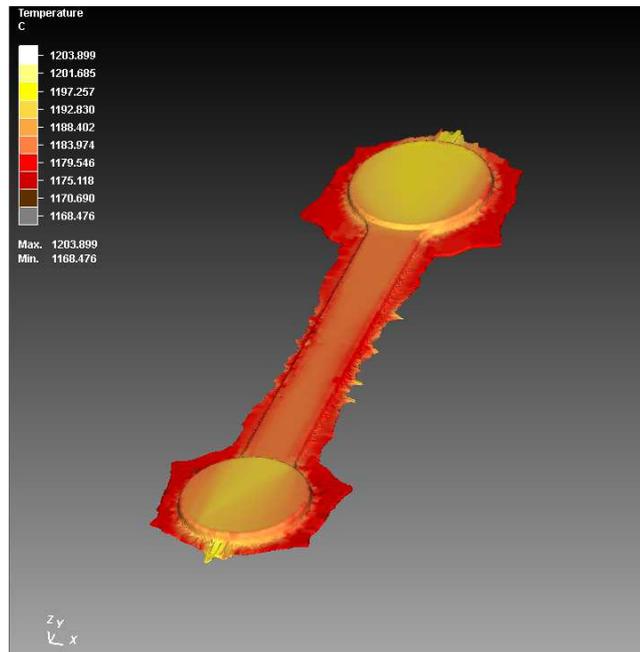


Ilustración 4.45 Temperatura de la pieza (golpe 1)

Se observa como en este caso la pieza ya no pierde tanto calor puesto que las matrices se encuentran a su misma temperatura.

A continuación, se aprecia como el análisis de daño es semejante al del modelo 1, en el cual las zonas que más sufren son los extremos de ambas cabezas.

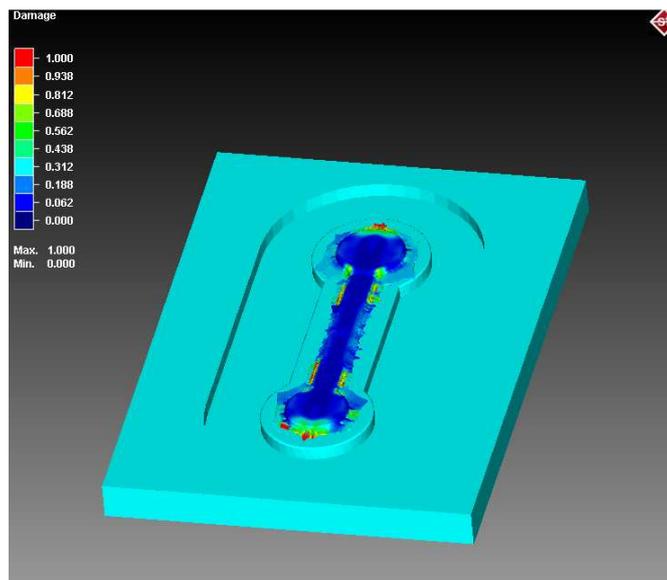


Ilustración 4.46 Daño (golpe 1)

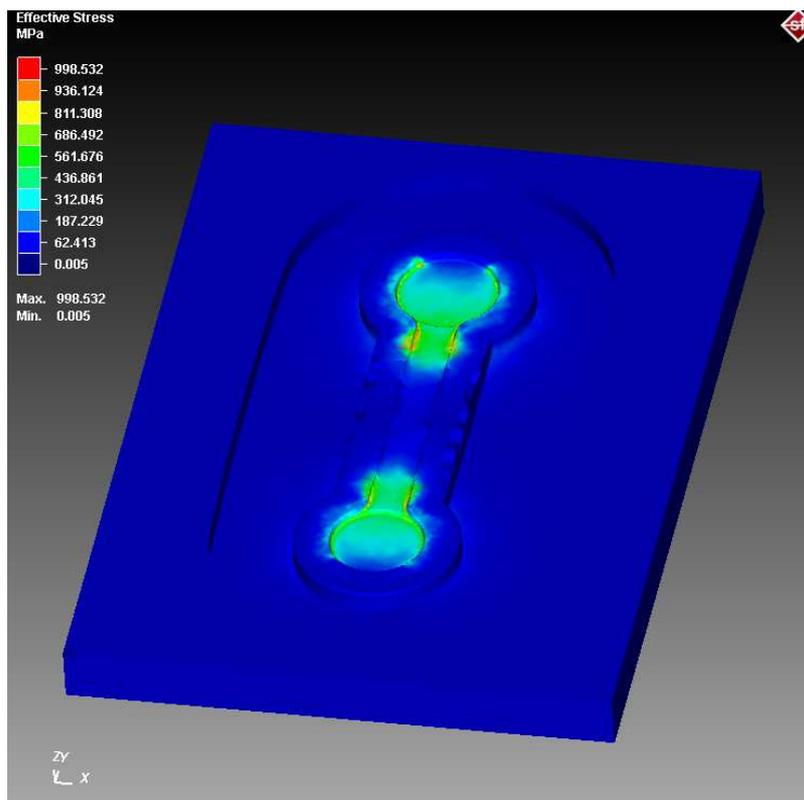


Ilustración 4.47 Tensiones de la matriz (golpe 1)

En la imagen superior se muestran las tensiones en la matriz para el 98% del proceso, alcanzando un máximo de 998.5 MPa. En este instante, cuando la matriz superior ejerce 60 kN aproximadamente, dado que la matriz ya ha llenado y las tensiones son aceptables, ampliamente inferiores al límite elástico, se detiene el proceso. Esta situación es muy habitual a nivel industrial en la que se controla la prensa por presión en lugar de por posición. En estos casos, cuando la matriz superior alcanza un valor determinado de fuerza, el proceso se detiene y sube la matriz.

A continuación, se muestra la evolución de la fuerza soportada por la matriz inferior a lo largo del primer golpe que, al igual que en los modelos anteriores tiene forma exponencial alcanzando 62 kN.

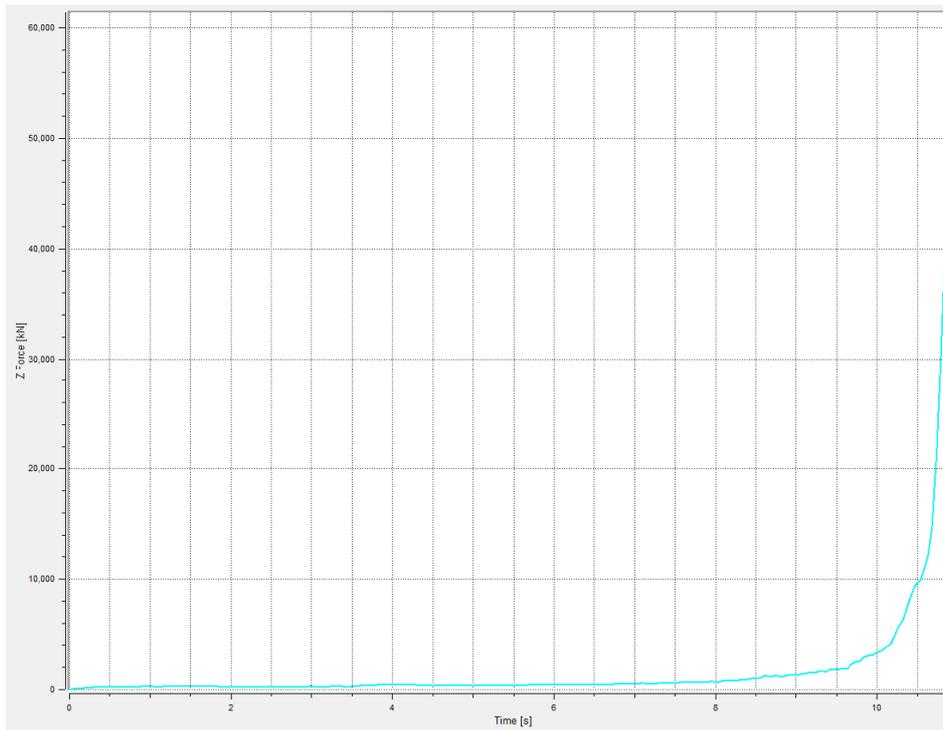


Ilustración 4.48 Fuerza matriz superior (golpe 1)

De nuevo se realizan los mismos estudios para el segundo golpe.

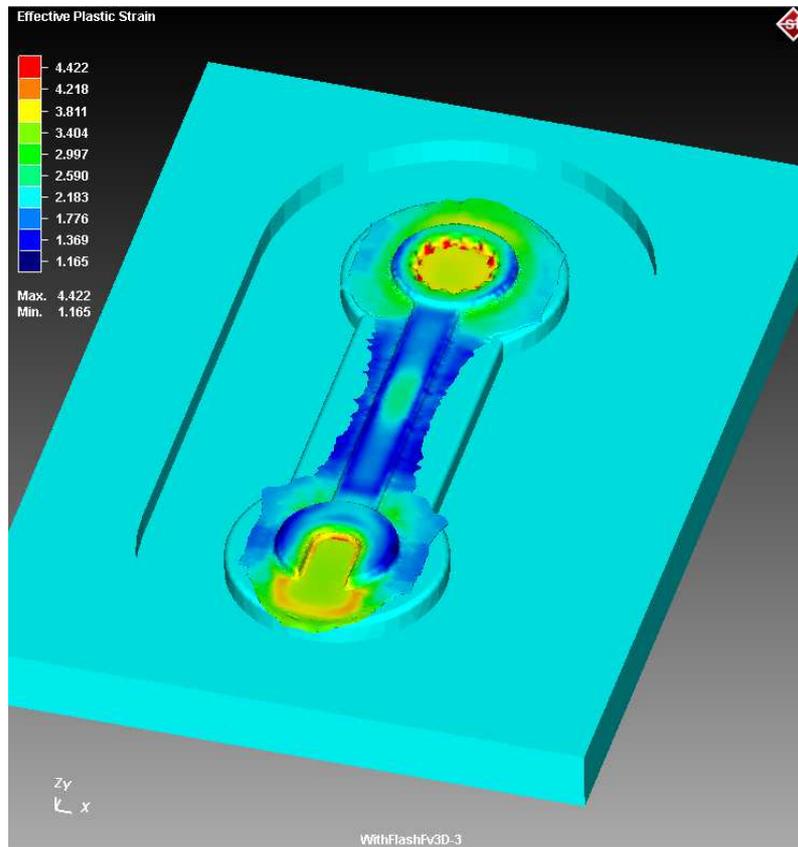


Ilustración 4.49 Deformación de la pieza (golpe 2)

Tal y como muestra la imagen anterior hay una mayor diferenciación de las deformaciones que en los casos anteriores, entre las cabezas y el resto de la llave. Es interesante que la máxima deformación, 4.422, se acumule en estas zonas puesto que serán las que más esfuerzos van a soportar, lo que mejorará la vida de llave fabricada.

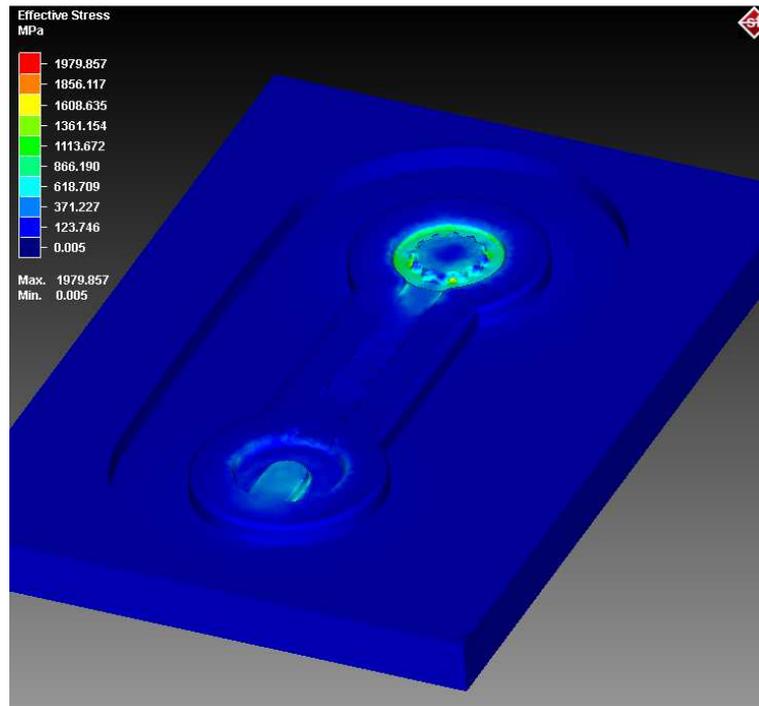


Ilustración 4.50 Tensiones de la matriz (golpe 2)

Se puede apreciar una bajada significativa de la tensión máxima en la matriz, 1979.85 MPa, por debajo del límite elástico del material elegido, pudiendo considerar el aumento de la temperatura de las matrices como buena solución.

En la siguiente imagen, se puede observar la fuerza ejercida por la matriz superior que, alcanza un máximo de 88 kN. Esta fuerza es significativamente menor que la resultante del anterior modelo (150 kN). Esta reducción se debe a la ampliación de la cavidad.

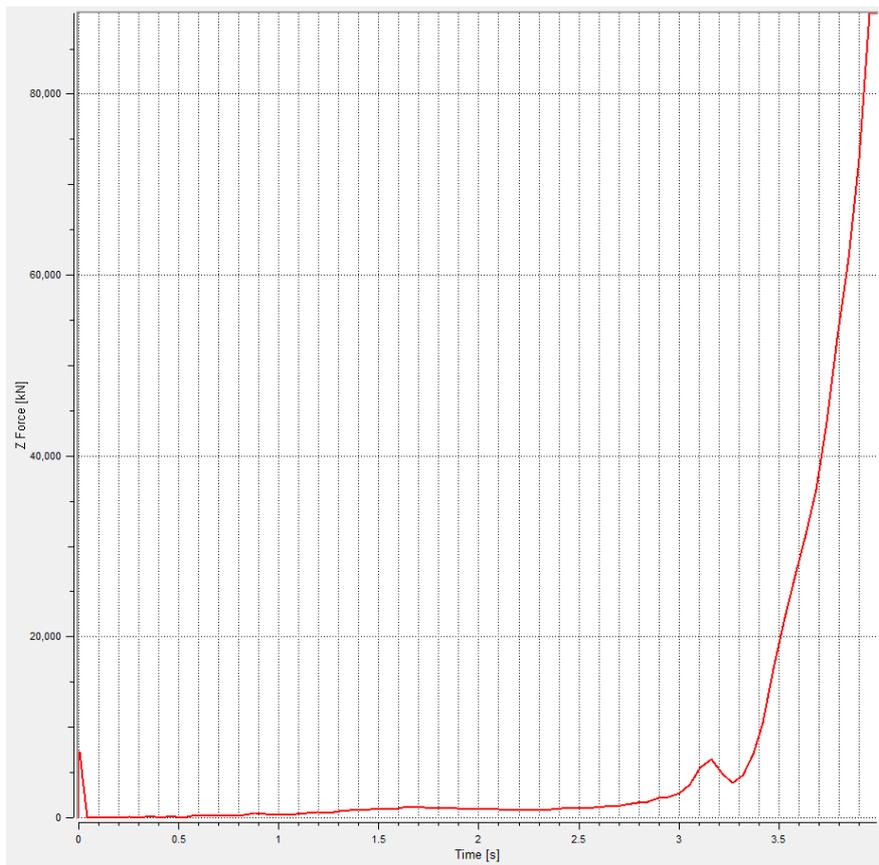


Ilustración 4.51 Fuerza matriz superior (golpe 2)

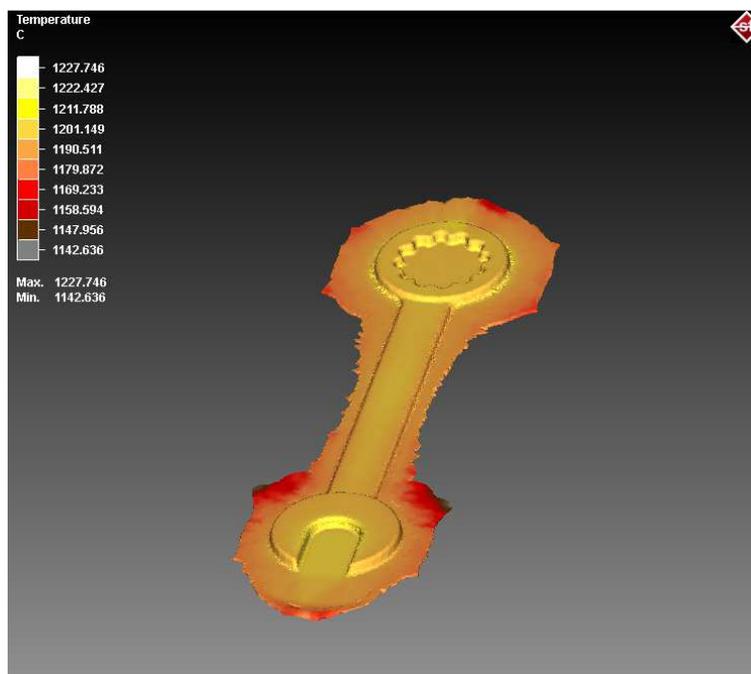


Ilustración 4.52 Temperatura de la pieza (golpe 2)

Al igual que en el primer golpe, se puede apreciar como la temperatura ya no baja, sino que se mantiene alrededor de la temperatura inicial. Incluso en algunas zonas la temperatura de la pieza excede los 1200°C. Esto se debe a que parte del trabajo se traduce en deformación y otra parte se traduce en generación de calor (disipado al ambiente o incrementando la temperatura de la pieza, como en este caso) [14].

Con este último modelo, se ha comprobado como se consigue forjar la herramienta cumpliendo con la geometría diseñada, alcanzando tensiones en la matriz por debajo del límite elástico y con una fuerza de 62 kN.

Tiene la desventaja de tener que calentar a mayor temperatura las matrices, lo que conlleva un mayor gasto energético y una menor vida del utillaje empleado.

CAPÍTULO 5

Mecanizado de las matrices

5.1 MECANIZADO DE LAS MATRICES

Tras realizar simulaciones con la ayuda de los softwares MarcMentat y Simufact y, conseguir el modelo óptimo se procedió al mecanizado de las matrices para dar por finalizado el proceso. Para ello, se empleó el programa Surfcam en el cual se siguieron los siguientes pasos.

1. En primer lugar, se importaron las matrices diseñadas mediante SolidWorks.

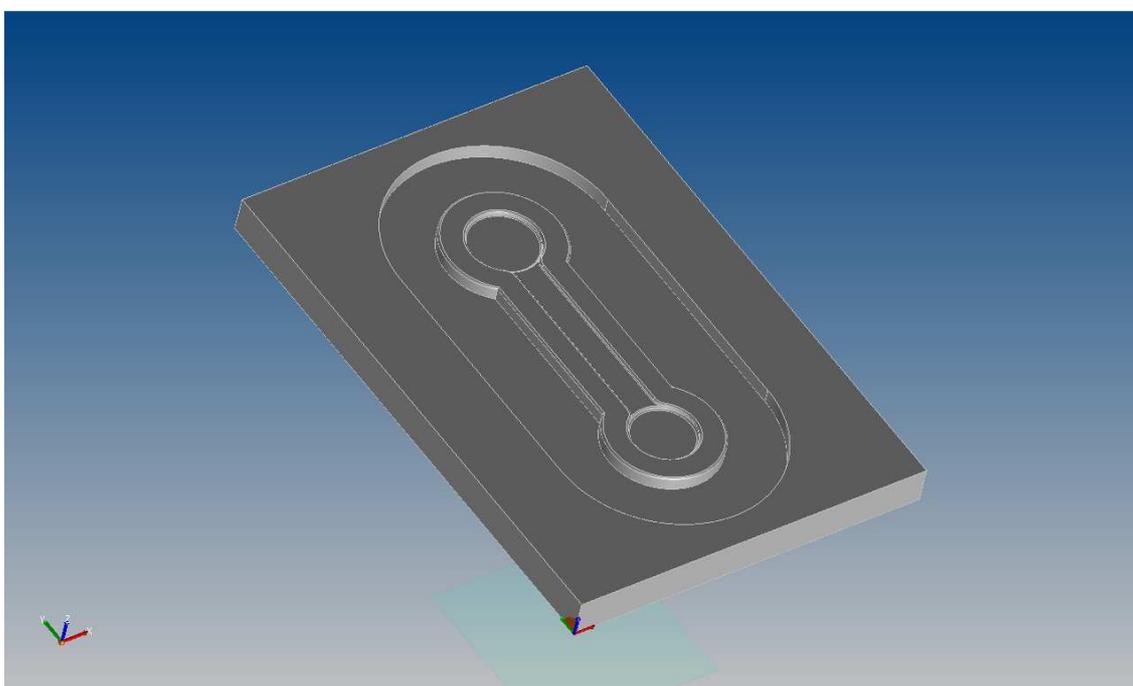


Ilustración 5.1 Diseño matriz en SolidWorks (golpe 1)

2. A continuación, se creó un tocho de partida sobredimensionado desde el que comenzar el mecanizado. De esta manera, se dotó de 2 mm más de los necesarios al material para evitar eliminación excesiva de material en las primeras pasadas.

- La primera operación consistió en el planeado de la superficie, reduciendo los 2 mm de exceso en dirección horizontal y, con una pasada final, puliendo la superficie de la pieza.

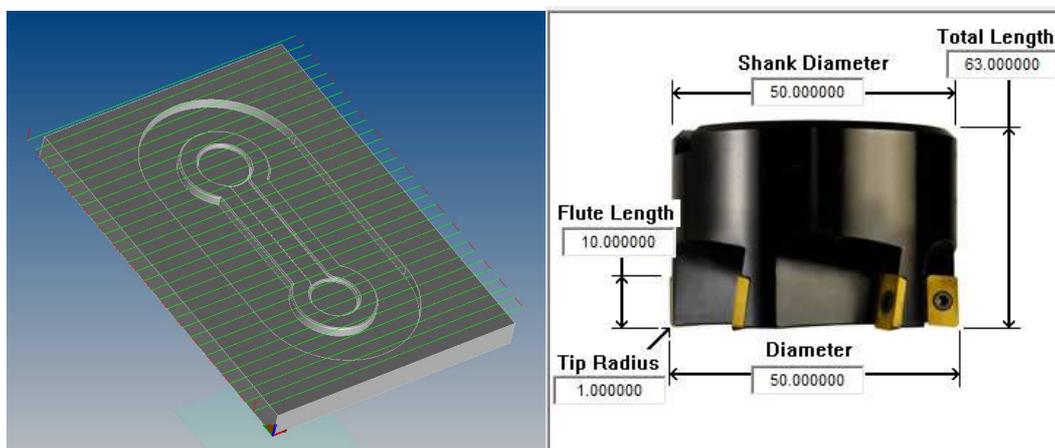


Ilustración 5.2 Trayectoria y herramienta (operación 1)

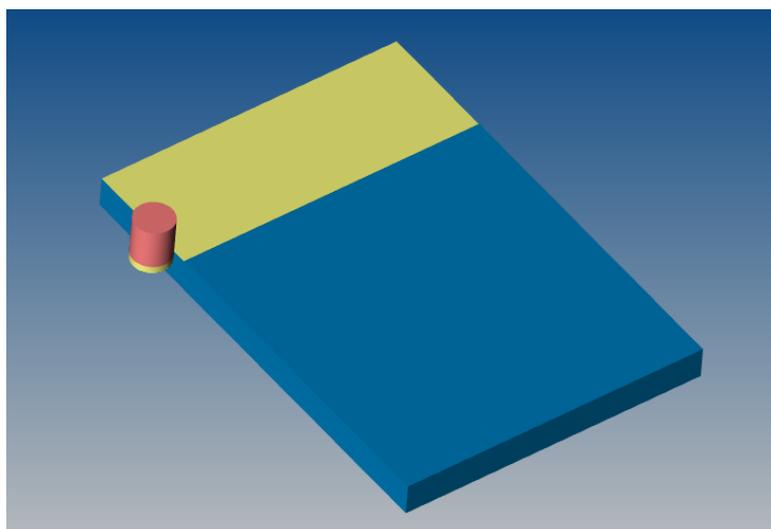


Ilustración 5.3 Simulación mecanizado (operación 1)

4. La siguiente operación consiste en un cajeado, realizado mediante una trayectoria de “ziz-zag”.

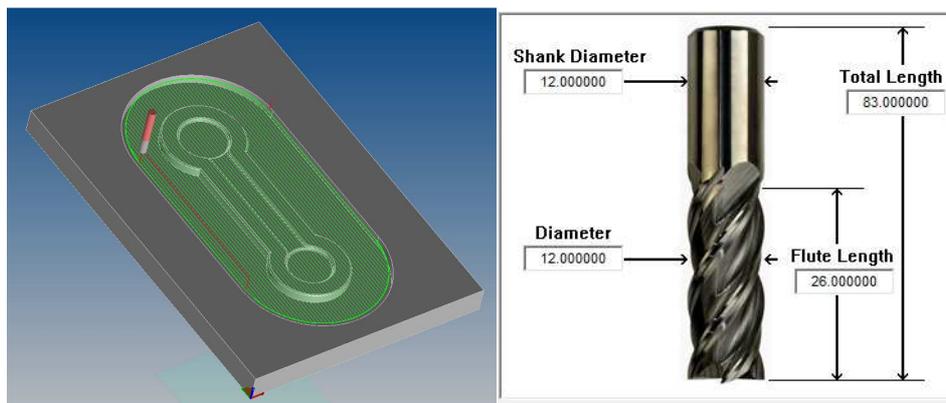


Ilustración 5.4 Trayectoria y herramienta (operación 2)

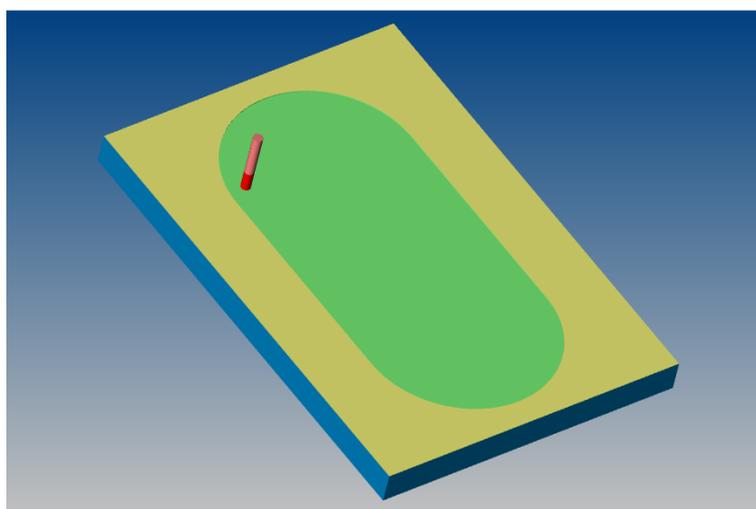


Ilustración 5.5 Simulación mecanizado (operación 2)

5. Al igual que la operación anterior, se realizó un cajeado con una trayectoria “zig-zag”.

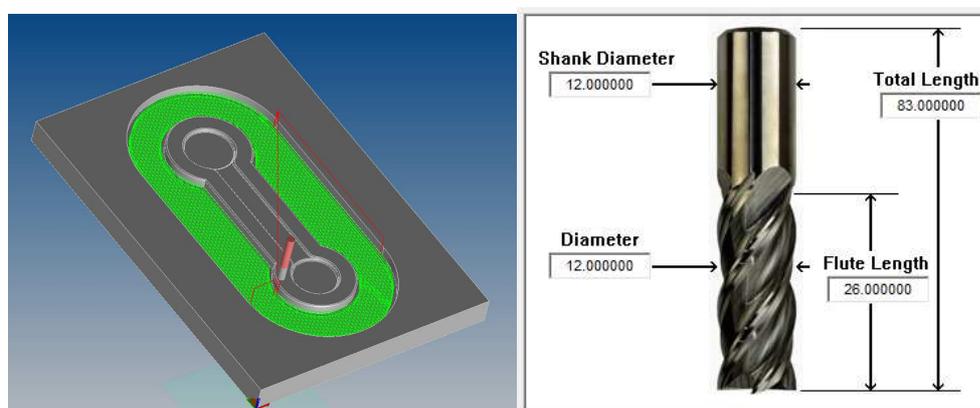


Ilustración 5.6 Trayectoria y herramienta (operación 3)

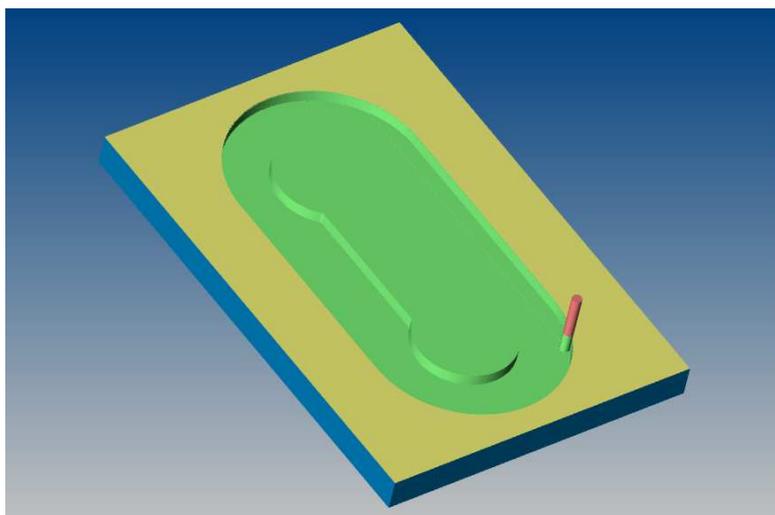


Ilustración 5.7 Simulación mecanizado (operación 3)

6. A continuación, se llevó a cabo un contorneado para mecanizar el radio exterior.

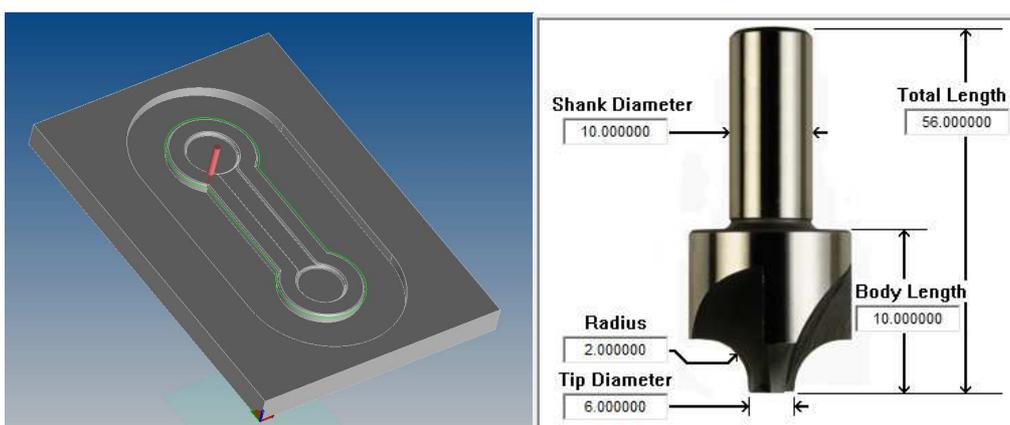


Ilustración 5.8 Trayectoria y herramienta (operación 4)

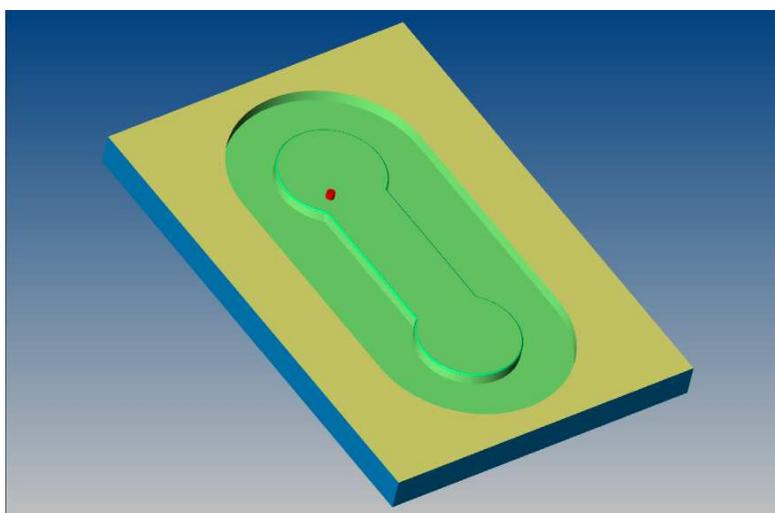


Ilustración 5.9 Simulación mecanizado (operación 4)

- De nuevo, se realizó un cajeado de la cavidad interior. A diferencia de los cajeados anteriores, en este se siguió una trayectoria “en espiral”, al resultar más cómodo en la zonas circulares.

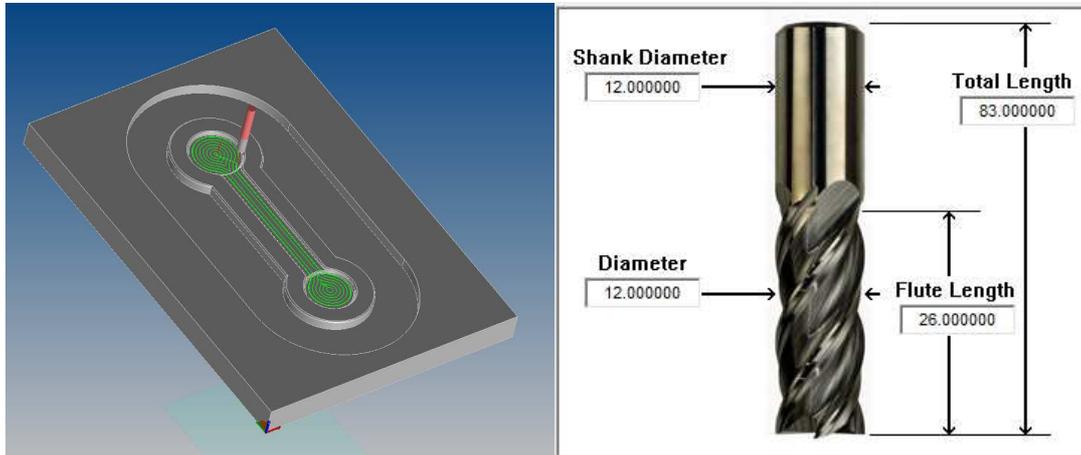


Ilustración 5.10 Trayectoria y herramienta (operación 5)

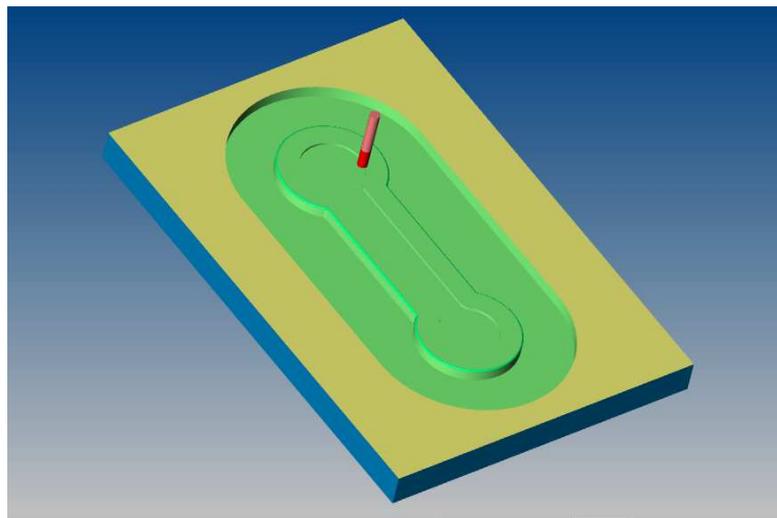


Ilustración 5.11 Simulación mecanizado (operación 5)

- En este paso, se llevaron tres operaciones simultáneamente pues se mecanizaron las cavidades de las cabezas con un cajeado (“espiral”), el radio interno y el ángulo de despulla.

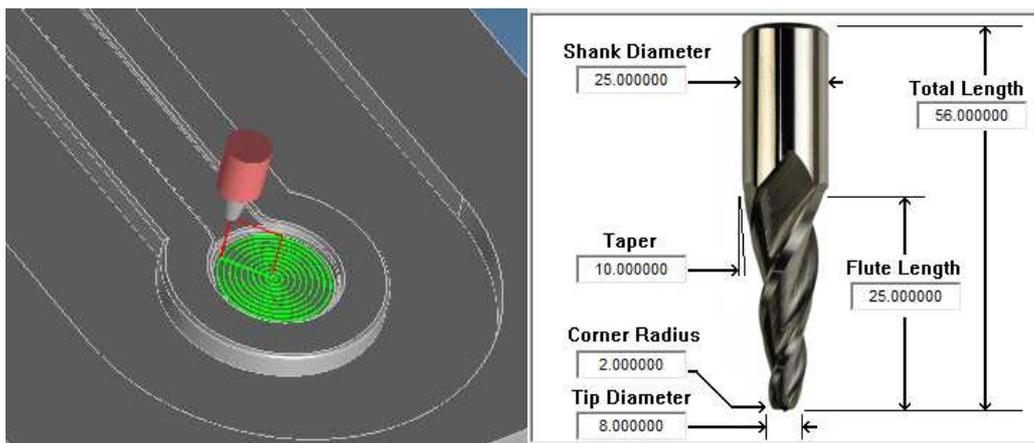


Ilustración 5.12 Trayectoria y herramienta (operación 6)

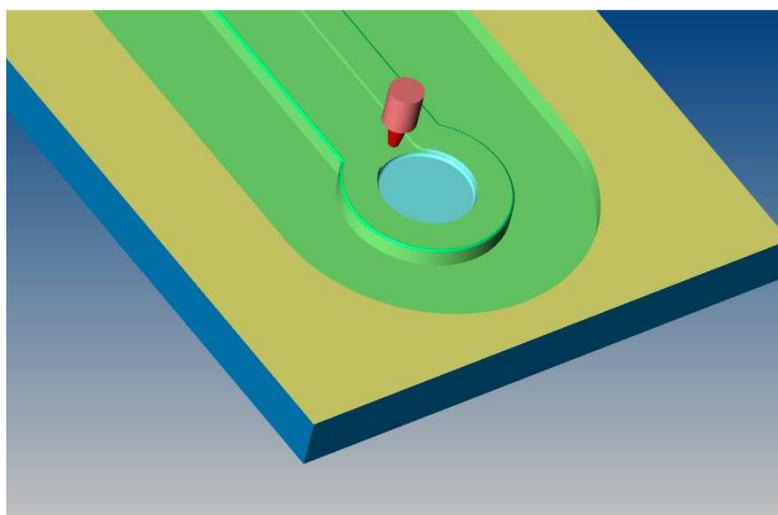


Ilustración 5.13 Simulación mecanizado (operación 6)

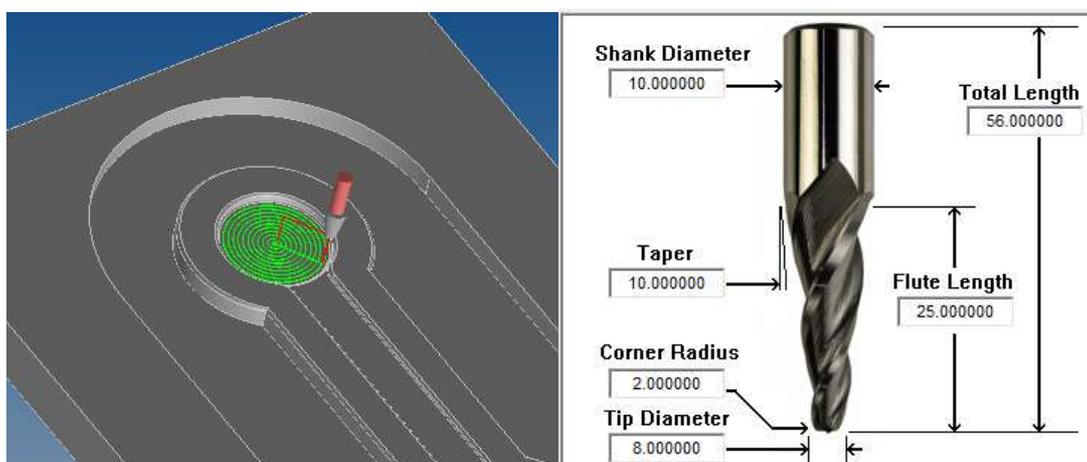


Ilustración 5.14 Trayectoria y herramienta (operación 6 bis)

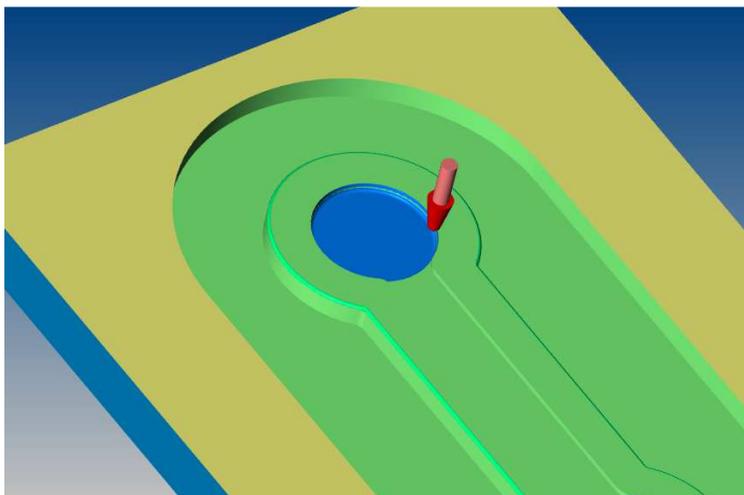


Ilustración 5.15 Simulación mecanizado (operación 6 bis)

9. A continuación, se realizó el contorneado del radio interior.

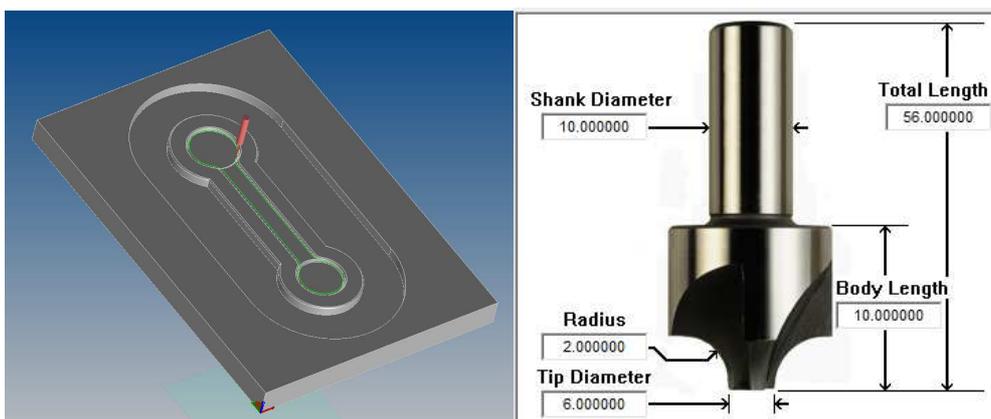


Ilustración 5.16 Trayectoria y herramienta (operación 7)

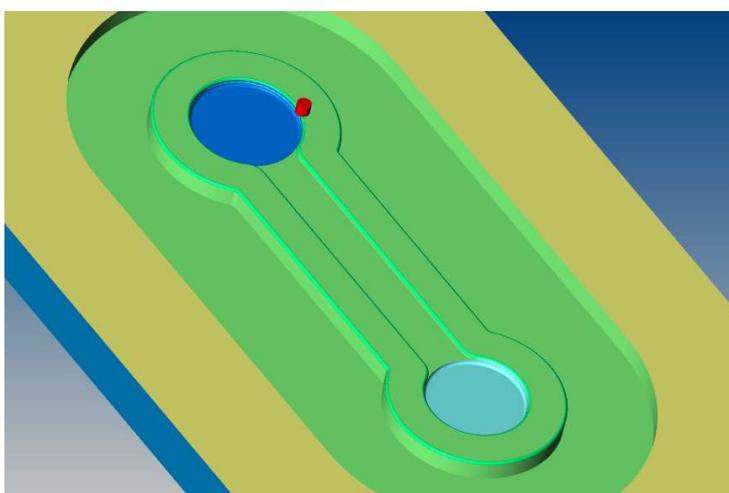


Ilustración 5.17 Simulación mecanizado (operación 7)

10. El último paso que se llevó a cabo fueron los radios que conectan las cabezas con la zona central.

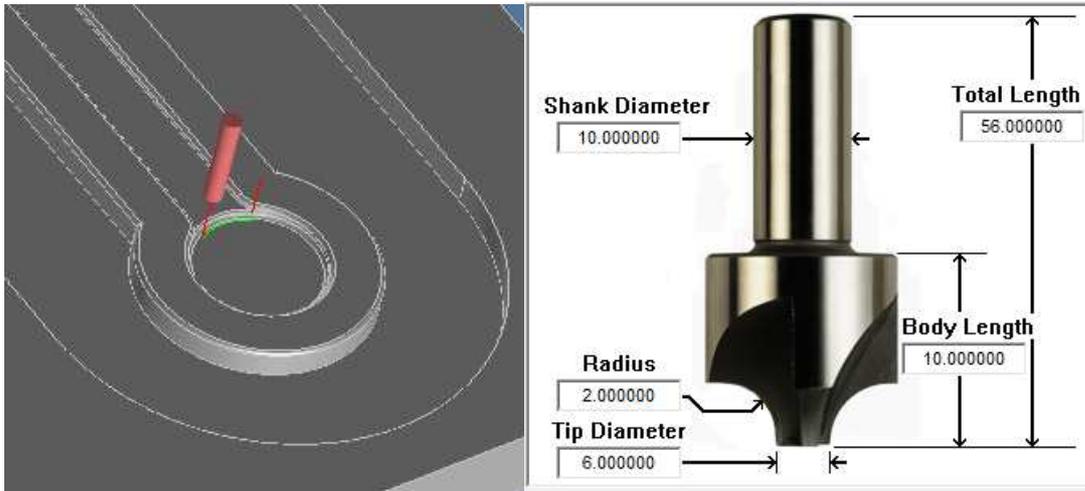


Ilustración 5.18 Trayectoria y herramienta (operación 8)

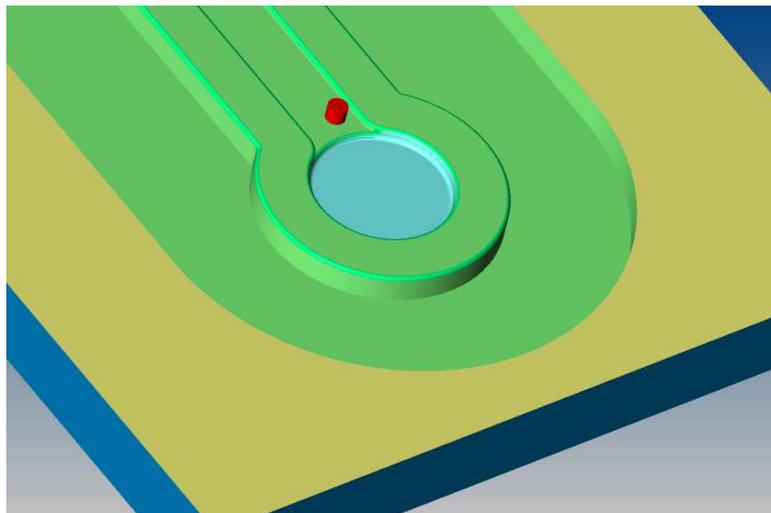


Ilustración 5.19 Simulación mecanizado (operación 8)

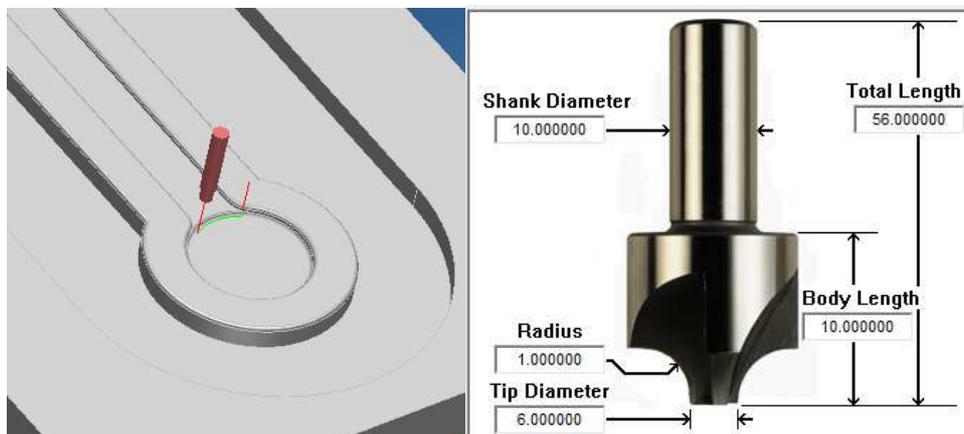


Ilustración 5.20 Trayectoria y herramienta (operación 8 bis)

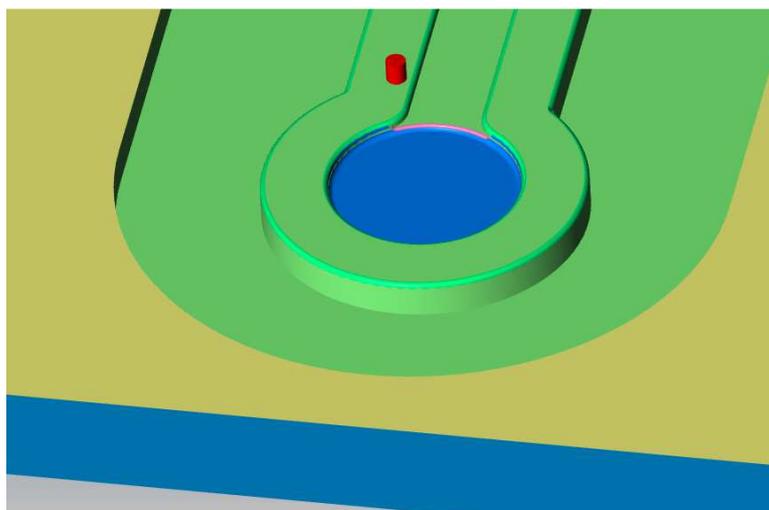


Ilustración 5.21 Simulación mecanizado (operación 8 bis)

11. A continuación, se muestra la imagen de la matriz tras el mecanizado.

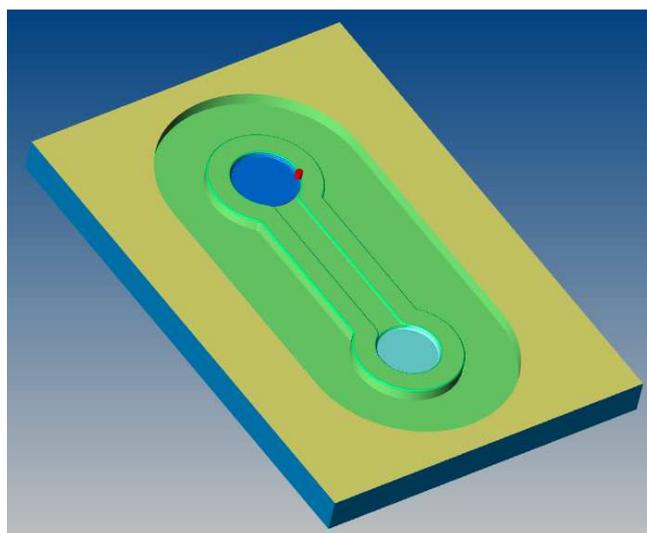


Ilustración 5.22 Resultado tras el mecanizado

En el capítulo de anexos se mostrará el código ISO del mecanizado de esta primera matriz.

Para la matriz del segundo golpe sería necesario fabricarla mediante un proceso de electroerosión debido a la compleja geometría de la cabeza estriada.

CAPÍTULO 6

Conclusiones

CONCLUSIONES

En el presente Trabajo Fin de Grado se ha estudiado el diseño de una llave herramienta combinada mediante un proceso de forja en dos etapas y en el que se ha programado el mecanizado de la matriz del primer golpe. Para llevar a cabo estos procesos y el diseño de las matrices, se han generado simulaciones a través de los softwares Marc Mentat y Simufact y se ha empleado el software SolidWorks para el diseño y Surfcam para la programación del mecanizado.

Tras realizar el análisis completo de los resultados se han concluido algunos aspectos fundamentales acerca de estos procesos. Algunos de ellos, se exponen a continuación:

1. Ángulos de despulla. El aumento del ángulo de despulla hasta un valor óptimo permite un mejor flujo de material y facilita la extracción de la pieza.
2. Radios de acuerdo. Al igual que los ángulos de despulla facilita el flujo de material, reduce tensiones, evita posibles defectos en la pieza como la aparición de grietas y alarga la vida de las matrices.
3. Concordancia entre el material a forjar y la cavidad de las matrices. Hay que buscar la cantidad óptima de material para forjar. Si hay volumen insuficiente de material y no se llena la cavidad de la matriz, el alma puede torcerse durante el forjado y producir pliegues. Pero tampoco debe haber material en exceso puesto que supone un desperdicio, traducido en una demasía de rebaba y un aumento de las fuerzas de procesado. En este caso, al hacer las simulaciones sí había un exceso de material, pero esto ocurría porque no se consideró la simulación de troquelado.

4. Temperatura. Se ha comprobado la importancia de la temperatura en la reducción considerable de tensiones. Una pérdida de temperatura puede suponer una mayor fuerza y, por tanto, mayores tensiones en la matriz.

En el modelo definitivo se obtuvo un prototipo con las siguientes características:

1. Golpe 1:

- Deformación máxima → 3,105
- Temperatura máxima → 1203 °C
- Máxima tensión en matrices → 998,53 MPa
- Fuerza máxima → 62 kN

2. Golpe 2:

- Deformación máxima → 4,422
- Temperatura máxima → 1227°C
- Máxima tensión en matrices → 1979,85 MPa
- Fuerza máxima → 88 kN

Por último, se ha conseguido realizar con éxito la programación del mecanizado de la matriz del primer golpe de forja.

CAPÍTULO 7

Bibliografía

BIBLIOGRAFÍA

- [1] TECNOLOGÍA MECÁNICA Y METROTECNIA, vol.1.
- [2] COLD AND HOT FORGING: FUNDAMENTALS AND APPLICATIONS, Shen Gangshu, Ngaile, Gracious Atlan, Taylan.
- [3] FUNDAMENTOS DE MANUFACTURA MODERNA, Mikell P. Groover.
- [4] HANDBOOK OF METAL FORMING, 6.2. Kurt Lange
- [5] CÁLCULO Y DISEÑO DE PROCESOS DE FABRICACIÓN, Universidad Pública de Navarra.
- [6] Process Selection (Second Edition), 2003, Página 114. K.G. Swift, J.D. Booker.
- [7] Análisis termodinámico de la descarburación de aceros, Página 1. T. Gómez-Acebo, F. Castro.
- [8] Mechanical properties of spring steels at room and low temperatures, Página 2. E. Gariboldi, W. Nicodemi, G. Silva, M. Vedani.
- [9] FEM analysis of the isothermal forging of a connecting rod from material previously deformed by ECAE, 2013, Página 3. R. Luri, C.J. Luis, D. Salcedo, J. León, J.P Fuertes, I. Puertas.
- [10] Finite Volume Methods, Página 4. Robert Eymard (Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Marne-la-Vallée, et Université de Paris XIII), Thierry Gallouët (Ecole Normale Supérieure de Lyon), Raphaèle Herbin (Université de Provence, Marseille).
- [11] An efficient closed-form method for determining interfacial heat transfer coefficient in metal forming, 2012, Página 108-109. Q. Bai, J. Lin, L. Zhan, T.A. Dean, D.S. Balint, Z. Zhang.
- [12] Numerical simulation of the forging process, Página 8. P. Harthley, I. Pillinger.
- [13] Evaluation of temperature and heat transfer conditions at the metal-forming interface, 1995, Página 1. W. Nshama, J. Jeswiet.
- [14] Determination of temperature rise during high strain rate deformation, 1997, Página 1. Rajeev Kapoor, Sia Nemat-Nasser.

CAPÍTULO 8

Anexos

ANEXOS**CODIGO ISO: Fagor 8050**

G90 G80 G40 G17
T167 D167
M6
G53
G0 G90 X0 Y0 Z0
G92 X0 Y0 Z0
S446 M3
G0 X-27.1144 Y584.5865
G43 Z67.
G0 Z41.
G1 X432.1163 F278.5
G0 X432.5009
Y565.1699
G1 X-27.499
G0 Y545.7532
G1 X432.5009
G0 Y526.3365
G1 X-27.499
G0 Y506.9199
G1 X432.5009
G0 Y487.5032
G1 X-27.499
G0 Y468.0865
G1 X432.5009
G0 Y448.6699
G1 X-27.499
G0 Y429.2532
G1 X432.5009
G0 Y409.8365
G1 X-27.499
G0 Y390.4199
G1 X432.5009
G0 Y371.0032
G1 X-27.499
G0 Y351.5865
G1 X432.5009
G0 Y332.1699
G1 X-27.499
G0 Y312.7532
G1 X432.5009
G0 Y293.3365
G1 X-27.499
G0 Y273.9199
G1 X432.5009
G0 Y254.5032
G1 X-27.499
G0 Y235.0865
G1 X432.5009
G0 Y215.6699

G1 X-27.499
G0 Y196.2532
G1 X432.5009
G0 Y176.8365
G1 X-27.499
G0 Y157.4199
G1 X432.5009
G0 Y138.0032
G1 X-27.499
G0 Y118.5865
G1 X432.5009
G0 Y99.1699
G1 X-27.499
G0 Y79.7532
G1 X432.5009
G0 Y60.3366
G1 X-27.499
G0 Y40.9199
G1 X432.5009
G0 Y21.5032
G1 X-27.499
G0 Z67.
T139 D139
M6
S796 M3
G43 Z67.
G0 X317.4856 Y427.431 Z43.5
G1 Z40. F162.3
Y152.5754 F324.7
X312.6856 Y120.4551
Y459.5513
X307.8856 Y472.6682
Y107.3383
X303.0856 Y97.6191
Y482.3873
X298.2856 Y490.2856
Y89.7209
X293.4856 Y83.0272
Y496.9792
X288.6856 Y502.7868
Y77.2197
X283.8856 Y72.108
Y507.8985
X279.0856 Y512.4388
Y67.5676
X274.2856 Y63.512
Y516.4944
X269.4856 Y520.1285
Y59.8779

X264.6856 Y56.6178
 Y523.3886
 X259.8856 Y526.3114
 Y53.6951
 X255.0856 Y51.0807
 Y528.9258
 X250.2856 Y531.2549
 Y48.7516
 X245.4856 Y46.689
 Y533.3174
 X240.6856 Y535.1287
 Y44.8778
 X235.8856 Y43.3055
 Y536.7009
 X231.0856 Y538.0443
 Y41.9621
 X226.2856 Y40.8393
 Y539.1672
 X221.4856 Y540.0759
 Y39.9305
 X216.6856 Y39.2308
 Y540.7756
 X211.8856 Y541.2703
 Y38.7361
 X207.0856 Y38.444
 Y541.5625
 X202.2856 Y541.6537
 Y38.3527
 X197.4856 Y38.4619
 Y541.5445
 X192.6856 Y541.2343
 Y38.7722
 X187.8856 Y39.2851
 Y540.7213
 X183.0856 Y540.0029
 Y40.0035
 X178.2856 Y40.9312
 Y539.0752
 X173.4856 Y537.9329
 Y42.0735
 X168.6856 Y43.4371
 Y536.5693
 X163.8856 Y534.976
 Y45.0304
 X159.0856 Y46.8636
 Y533.1428
 X154.2856 Y531.057
 Y48.9494
 X149.4856 Y51.3033
 Y528.7031
 X144.6856 Y526.0621
 Y53.9444
 X139.8856 Y56.8961
 Y523.1104
 X135.0856 Y519.8184

Y60.1881
 X130.2856 Y63.8579
 Y516.1486
 X125.4856 Y512.0522
 Y67.9542
 X120.6856 Y72.5418
 Y507.4646
 X115.8856 Y502.2963
 Y77.7101
 X111.0856 Y83.5881
 Y496.4183
 X106.2856 Y489.6322
 Y90.3742
 X101.4856 Y98.4038
 Y481.6026
 X96.6856 Y471.6685
 Y108.3379
 X91.8856 Y121.9344
 Y458.072
 X87.5163 Y427.431
 Y152.5754
 G0 Z67.
 X87.5138 Y426.6667
 Z43.5
 G1 Z40. F162.3
 Y153.3397 F324.7
 G3 X317.4881 I114.9872 J0
 G1 Y426.6667
 G3 X87.5138 I-114.9871 J0
 G1 X87.0338
 Y153.3397
 G3 X317.9681 I115.4672 J0
 G1 Y426.6667
 G3 X87.0338 I-115.4671 J0
 G0 Z67.
 X87.5163 Y152.5754
 Z42.5
 G1 Z35.2 F162.3
 Y427.431 F324.7
 X92.3163 Y459.5513
 Y120.4551
 X97.1163 Y107.3383
 Y472.6682
 X101.9163 Y482.3873
 Y97.6191
 X106.7163 Y89.7209
 Y490.2856
 X111.5163 Y496.9792
 Y83.0272
 X116.3163 Y77.2197
 Y502.7868
 X121.1163 Y507.8985
 Y72.108
 X125.9163 Y67.5676
 Y512.4388

X130.7163 Y516.4944
 Y63.512
 X135.5163 Y59.8779
 Y142.5096
 G3 X140.3163 Y126.1864 I66.9847
 J10.8301
 G1 Y56.6178
 X145.1163 Y53.6951
 Y117.1287
 G3 X149.9163 Y110.4551 I57.3847
 J36.211
 G1 Y51.0807
 X154.7163 Y48.7516
 Y105.1644
 G3 X159.5163 Y100.8368 I47.7847
 J48.1753
 G1 Y46.689
 X164.3163 Y44.8778
 Y97.249
 G3 X169.1163 Y94.266 I38.1847
 J56.0907
 G1 Y43.3055
 X173.9163 Y41.9621
 Y91.7999
 G3 X178.7163 Y89.7903 I28.5847
 J61.5398
 G1 Y40.8393
 X183.5163 Y39.9305
 Y88.1951
 G3 X188.3163 Y86.9844 I18.9847
 J65.1446
 G1 Y39.2308
 X193.1163 Y38.7361
 Y86.1373
 G3 X197.9163 Y85.6403 I9.3847
 J67.2024
 G1 Y38.444
 X202.7163 Y38.3527
 Y85.4855
 G3 X207.5163 Y85.6708 I-0.2153
 J67.8542
 G1 Y38.4619
 X212.3163 Y38.7722
 Y86.1989
 G3 X217.1163 Y87.0779 I-9.8153
 J67.1408
 G1 Y39.2851
 X221.9163 Y40.0035
 Y88.3222
 G3 X226.7163 Y89.9532 I-19.4153
 J65.0175
 G1 Y40.9312
 X231.5163 Y42.0735
 Y92.0018

G3 X236.3163 Y94.5115 I-29.0153
 J61.3379
 G1 Y43.4371
 X241.1163 Y45.0304
 Y97.5447
 G3 X245.9163 Y101.1924 I-38.6153
 J55.795
 G1 Y46.8636
 X250.7163 Y48.9494
 Y105.5955
 G3 X255.5163 Y110.9887 I-48.2153
 J47.7442
 G1 Y51.3033
 X260.3163 Y53.9444
 Y117.8205
 G3 X265.1163 Y127.1949 I-57.8153
 J35.5192
 G1 Y56.8961
 X269.9163 Y60.1881
 Y145.6325
 G2 X135.5163 Y164.1698 I-67.4153
 J7.7072
 G1 Y403.5709
 G3 X140.3163 Y392.7046 I66.9847
 J23.0958
 G1 Y180.493
 G2 X145.1163 Y189.5507 I62.1847 J-
 27.1533
 G1 Y385.1052
 G3 X149.9163 Y379.1776 I57.3847
 J41.5615
 G1 Y196.2243
 G2 X154.7163 Y201.515 I52.5847 J-
 42.8846
 G1 Y374.3505
 G2 X135.5163 Y449.7626 I47.7847
 J52.3162
 G1 Y520.1285
 X140.3163 Y523.3886
 Y460.6289
 G2 X145.1163 Y468.2283 I62.1847 J-
 33.9622
 G1 Y526.3114
 X149.9163 Y528.9258
 Y474.1559
 G2 X154.7163 Y478.983 I52.5847 J-
 47.4892
 G1 Y531.2549
 X159.5163 Y533.3174
 Y482.9933
 G2 X164.3163 Y486.3517 I42.9847 J-
 56.3266
 G1 Y535.1287
 X169.1163 Y536.7009
 Y489.1633

G2 X173.9163 Y491.4994 I33.3847 J-
 62.4966
 G1 Y538.0443
 X178.7163 Y539.1672
 Y493.4099
 G2 X183.5163 Y494.9305 I23.7847 J-
 66.7432
 G1 Y540.0759
 X188.3163 Y540.7756
 Y496.0869
 G2 X193.1163 Y496.897 I14.1847 J-
 69.4202
 G1 Y541.2703
 X197.9163 Y541.5625
 Y497.3727
 G2 X202.7163 Y497.5209 I4.5847 J-
 70.706
 G1 Y541.6537
 X207.5163 Y541.5445
 Y497.3435
 G2 X212.3163 Y496.8381 I-5.0153 J-
 70.6768
 G1 Y541.2343
 X217.1163 Y540.7213
 Y495.9975
 G2 X221.9163 Y494.8093 I-14.6153 J-
 69.3308
 G1 Y540.0029
 X226.7163 Y539.0752
 Y493.2549
 G2 X231.5163 Y491.3078 I-24.2153 J-
 66.5882
 G1 Y537.9329
 X236.3163 Y536.5693
 Y488.9313
 G2 X241.1163 Y486.0739 I-33.8153 J-
 62.2646
 G1 Y534.976
 X245.9163 Y533.1428
 Y482.662
 G2 X250.7163 Y478.5863 I-43.4153 J-
 55.9953
 G1 Y531.057
 X255.5163 Y528.7031
 Y473.6745
 G2 X260.3163 Y467.627 I-53.0153 J-
 47.0078
 G1 Y526.0621
 X265.1163 Y523.1104
 Y459.8281
 G2 X269.9163 Y448.4734 I-62.6153 J-
 33.1614
 G1 Y519.8184
 Y448.4734
 G2 Y404.8601 I-67.4153 J-21.8067

G1 Y161.0469
 G3 X265.1163 Y179.4845 I-67.4153 J-
 7.7072
 G1 Y393.5054
 G2 X260.3163 Y385.7065 I-62.6153
 J33.1613
 G1 Y188.8589
 G3 X255.5163 Y195.6907 I-57.8153 J-
 35.5192
 G1 Y379.659
 G2 X250.7163 Y374.7472 I-53.0153
 J47.0077
 G1 Y201.0839
 G2 X264.0589 Y124.7942 I-48.2153 J-
 47.7442
 G1 X274.7163 Y63.8579
 Y516.1486
 X279.5163 Y512.0522
 Y67.9542
 X284.3163 Y72.5418
 Y507.4646
 X289.1163 Y502.2963
 Y77.7101
 X293.9163 Y83.5881
 Y496.4183
 X298.7163 Y489.6322
 Y90.3742
 X303.5163 Y98.4038
 Y481.6026
 X308.3163 Y471.6685
 Y108.3379
 X313.1163 Y121.9344
 Y458.072
 X317.4856 Y427.431
 Y152.5754
 G0 Z67.
 X317.4881 Y426.6667
 Z42.5
 G1 Z35.2 F162.3
 G3 X87.5138 I-114.9871 J0 F324.7
 G1 Y153.3397
 G3 X317.4881 I114.9872 J0
 G1 Y426.6667
 G0 Z67.
 X129.2481 Y152.8528
 Z42.5
 G1 Z35.2 F162.3
 X134.648 Y152.8887 F324.7
 G2 X154.7434 Y201.5418 I67.853
 J0.451
 G1 Y374.3258
 G2 X250.4524 Y374.5033 I47.7576
 J52.3409
 G1 Y201.349

G2 X134.648 Y152.8887 I-47.9514 J-48.0093
 G0 Z67.
 X87.5163 Y152.5754
 Z37.7
 G1 Z30.4 F162.3
 Y427.431 F324.7
 X92.3163 Y459.5513
 Y120.4551
 X97.1163 Y107.3383
 Y472.6682
 X101.9163 Y482.3873
 Y97.6191
 X106.7163 Y89.7209
 Y490.2856
 X111.5163 Y496.9792
 Y83.0272
 X116.3163 Y77.2197
 Y502.7868
 X121.1163 Y507.8985
 Y72.108
 X125.9163 Y67.5676
 Y512.4388
 X130.7163 Y516.4944
 Y63.512
 X135.5163 Y59.8779
 Y142.5096
 G3 X140.3163 Y126.1864 I66.9847
 J10.8301
 G1 Y56.6178
 X145.1163 Y53.6951
 Y117.1287
 G3 X149.9163 Y110.4551 I57.3847
 J36.211
 G1 Y51.0807
 X154.7163 Y48.7516
 Y105.1644
 G3 X159.5163 Y100.8368 I47.7847
 J48.1753
 G1 Y46.689
 X164.3163 Y44.8778
 Y97.249
 G3 X169.1163 Y94.266 I38.1847
 J56.0907
 G1 Y43.3055
 X173.9163 Y41.9621
 Y91.7999
 G3 X178.7163 Y89.7903 I28.5847
 J61.5398
 G1 Y40.8393
 X183.5163 Y39.9305
 Y88.1951
 G3 X188.3163 Y86.9844 I18.9847
 J65.1446
 G1 Y39.2308
 X193.1163 Y38.7361
 Y86.1373
 G3 X197.9163 Y85.6403 I9.3847
 J67.2024
 G1 Y38.444
 X202.7163 Y38.3527
 Y85.4855
 G3 X207.5163 Y85.6708 I-0.2153
 J67.8542
 G1 Y38.4619
 X212.3163 Y38.7722
 Y86.1989
 G3 X217.1163 Y87.0779 I-9.8153
 J67.1408
 G1 Y39.2851
 X221.9163 Y40.0035
 Y88.3222
 G3 X226.7163 Y89.9532 I-19.4153
 J65.0175
 G1 Y40.9312
 X231.5163 Y42.0735
 Y92.0018
 G3 X236.3163 Y94.5115 I-29.0153
 J61.3379
 G1 Y43.4371
 X241.1163 Y45.0304
 Y97.5447
 G3 X245.9163 Y101.1924 I-38.6153
 J55.795
 G1 Y46.8636
 X250.7163 Y48.9494
 Y105.5955
 G3 X255.5163 Y110.9887 I-48.2153
 J47.7442
 G1 Y51.3033
 X260.3163 Y53.9444
 Y117.8205
 G3 X265.1163 Y127.1949 I-57.8153
 J35.5192
 G1 Y56.8961
 X269.9163 Y60.1881
 Y145.6325
 G2 X135.5163 Y164.1698 I-67.4153
 J7.7072
 G1 Y403.5709
 G3 X140.3163 Y392.7046 I66.9847
 J23.0958
 G1 Y180.493
 G2 X145.1163 Y189.5507 I62.1847 J-27.1533
 G1 Y385.1052
 G3 X149.9163 Y379.1776 I57.3847
 J41.5615
 G1 Y196.2243

G2 X154.7163 Y201.515 I52.5847 J-
 42.8846
 G1 Y374.3505
 G2 X135.5163 Y449.7626 I47.7847
 J52.3162
 G1 Y520.1285
 X140.3163 Y523.3886
 Y460.6289
 G2 X145.1163 Y468.2283 I62.1847 J-
 33.9622
 G1 Y526.3114
 X149.9163 Y528.9258
 Y474.1559
 G2 X154.7163 Y478.983 I52.5847 J-
 47.4892
 G1 Y531.2549
 X159.5163 Y533.3174
 Y482.9933
 G2 X164.3163 Y486.3517 I42.9847 J-
 56.3266
 G1 Y535.1287
 X169.1163 Y536.7009
 Y489.1633
 G2 X173.9163 Y491.4994 I33.3847 J-
 62.4966
 G1 Y538.0443
 X178.7163 Y539.1672
 Y493.4099
 G2 X183.5163 Y494.9305 I23.7847 J-
 66.7432
 G1 Y540.0759
 X188.3163 Y540.7756
 Y496.0869
 G2 X193.1163 Y496.897 I14.1847 J-
 69.4202
 G1 Y541.2703
 X197.9163 Y541.5625
 Y497.3727
 G2 X202.7163 Y497.5209 I4.5847 J-
 70.706
 G1 Y541.6537
 X207.5163 Y541.5445
 Y497.3435
 G2 X212.3163 Y496.8381 I-5.0153 J-
 70.6768
 G1 Y541.2343
 X217.1163 Y540.7213
 Y495.9975
 G2 X221.9163 Y494.8093 I-14.6153 J-
 69.3308
 G1 Y540.0029
 X226.7163 Y539.0752
 Y493.2549
 G2 X231.5163 Y491.3078 I-24.2153 J-
 66.5882

G1 Y537.9329
 X236.3163 Y536.5693
 Y488.9313
 G2 X241.1163 Y486.0739 I-33.8153 J-
 62.2646
 G1 Y534.976
 X245.9163 Y533.1428
 Y482.662
 G2 X250.7163 Y478.5863 I-43.4153 J-
 55.9953
 G1 Y531.057
 X255.5163 Y528.7031
 Y473.6745
 G2 X260.3163 Y467.627 I-53.0153 J-
 47.0078
 G1 Y526.0621
 X265.1163 Y523.1104
 Y459.8281
 G2 X269.9163 Y448.4734 I-62.6153 J-
 33.1614
 G1 Y519.8184
 Y448.4734
 G2 Y404.8601 I-67.4153 J-21.8067
 G1 Y161.0469
 G3 X265.1163 Y179.4845 I-67.4153 J-
 7.7072
 G1 Y393.5054
 G2 X260.3163 Y385.7065 I-62.6153
 J33.1613
 G1 Y188.8589
 G3 X255.5163 Y195.6907 I-57.8153 J-
 35.5192
 G1 Y379.659
 G2 X250.7163 Y374.7472 I-53.0153
 J47.0077
 G1 Y201.0839
 G2 X264.0589 Y124.7942 I-48.2153 J-
 47.7442
 G1 X274.7163 Y63.8579
 Y516.1486
 X279.5163 Y512.0522
 Y67.9542
 X284.3163 Y72.5418
 Y507.4646
 X289.1163 Y502.2963
 Y77.7101
 X293.9163 Y83.5881
 Y496.4183
 X298.7163 Y489.6322
 Y90.3742
 X303.5163 Y98.4038
 Y481.6026
 X308.3163 Y471.6685
 Y108.3379
 X313.1163 Y121.9344

Y458.072
 X317.4856 Y427.431
 Y152.5754
 G0 Z67.
 X317.4881 Y426.6667
 Z37.7
 G1 Z30.4 F162.3
 G3 X87.5138 I-114.9871 J0 F324.7
 G1 Y153.3397
 G3 X317.4881 I114.9872 J0
 G1 Y426.6667
 G0 Z67.
 X129.2481 Y152.8528
 Z37.7
 G1 Z30.4 F162.3
 X134.648 Y152.8887 F324.7
 G2 X154.7434 Y201.5418 I67.853
 J0.451
 G1 Y374.3258
 G2 X250.4524 Y374.5033 I47.7576
 J52.3409
 G1 Y201.349
 G2 X134.648 Y152.8887 I-47.9514 J-
 48.0093
 G0 Z67.
 X87.5163 Y152.5754
 Z32.9
 G1 Z25.6 F162.3
 Y427.431 F324.7
 X92.3163 Y459.5513
 Y120.4551
 X97.1163 Y107.3383
 Y472.6682
 X101.9163 Y482.3873
 Y97.6191
 X106.7163 Y89.7209
 Y490.2856
 X111.5163 Y496.9792
 Y83.0272
 X116.3163 Y77.2197
 Y502.7868
 X121.1163 Y507.8985
 Y72.108
 X125.9163 Y67.5676
 Y512.4388
 X130.7163 Y516.4944
 Y63.512
 X135.5163 Y59.8779
 Y142.5096
 G3 X140.3163 Y126.1864 I66.9847
 J10.8301
 G1 Y56.6178
 X145.1163 Y53.6951
 Y117.1287
 G3 X149.9163 Y110.4551 I57.3847
 J36.211
 G1 Y51.0807
 X154.7163 Y48.7516
 Y105.1644
 G3 X159.5163 Y100.8368 I47.7847
 J48.1753
 G1 Y46.689
 X164.3163 Y44.8778
 Y97.249
 G3 X169.1163 Y94.266 I38.1847
 J56.0907
 G1 Y43.3055
 X173.9163 Y41.9621
 Y91.7999
 G3 X178.7163 Y89.7903 I28.5847
 J61.5398
 G1 Y40.8393
 X183.5163 Y39.9305
 Y88.1951
 G3 X188.3163 Y86.9844 I18.9847
 J65.1446
 G1 Y39.2308
 X193.1163 Y38.7361
 Y86.1373
 G3 X197.9163 Y85.6403 I9.3847
 J67.2024
 G1 Y38.444
 X202.7163 Y38.3527
 Y85.4855
 G3 X207.5163 Y85.6708 I-0.2153
 J67.8542
 G1 Y38.4619
 X212.3163 Y38.7722
 Y86.1989
 G3 X217.1163 Y87.0779 I-9.8153
 J67.1408
 G1 Y39.2851
 X221.9163 Y40.0035
 Y88.3222
 G3 X226.7163 Y89.9532 I-19.4153
 J65.0175
 G1 Y40.9312
 X231.5163 Y42.0735
 Y92.0018
 G3 X236.3163 Y94.5115 I-29.0153
 J61.3379
 G1 Y43.4371
 X241.1163 Y45.0304
 Y97.5447
 G3 X245.9163 Y101.1924 I-38.6153
 J55.795
 G1 Y46.8636
 X250.7163 Y48.9494
 Y105.5955

G3 X255.5163 Y110.9887 I-48.2153
J47.7442
G1 Y51.3033
X260.3163 Y53.9444
Y117.8205
G3 X265.1163 Y127.1949 I-57.8153
J35.5192
G1 Y56.8961
X269.9163 Y60.1881
Y145.6325
G2 X135.5163 Y164.1698 I-67.4153
J7.7072
G1 Y403.5709
G3 X140.3163 Y392.7046 I66.9847
J23.0958
G1 Y180.493
G2 X145.1163 Y189.5507 I62.1847 J-
27.1533
G1 Y385.1052
G3 X149.9163 Y379.1776 I57.3847
J41.5615
G1 Y196.2243
G2 X154.7163 Y201.515 I52.5847 J-
42.8846
G1 Y374.3505
G2 X135.5163 Y449.7626 I47.7847
J52.3162
G1 Y520.1285
X140.3163 Y523.3886
Y460.6289
G2 X145.1163 Y468.2283 I62.1847 J-
33.9622
G1 Y526.3114
X149.9163 Y528.9258
Y474.1559
G2 X154.7163 Y478.983 I52.5847 J-
47.4892
G1 Y531.2549
X159.5163 Y533.3174
Y482.9933
G2 X164.3163 Y486.3517 I42.9847 J-
56.3266
G1 Y535.1287
X169.1163 Y536.7009
Y489.1633
G2 X173.9163 Y491.4994 I33.3847 J-
62.4966
G1 Y538.0443
X178.7163 Y539.1672
Y493.4099
G2 X183.5163 Y494.9305 I23.7847 J-
66.7432
G1 Y540.0759
X188.3163 Y540.7756
Y496.0869

G2 X193.1163 Y496.897 I14.1847 J-
69.4202
G1 Y541.2703
X197.9163 Y541.5625
Y497.3727
G2 X202.7163 Y497.5209 I4.5847 J-
70.706
G1 Y541.6537
X207.5163 Y541.5445
Y497.3435
G2 X212.3163 Y496.8381 I-5.0153 J-
70.6768
G1 Y541.2343
X217.1163 Y540.7213
Y495.9975
G2 X221.9163 Y494.8093 I-14.6153 J-
69.3308
G1 Y540.0029
X226.7163 Y539.0752
Y493.2549
G2 X231.5163 Y491.3078 I-24.2153 J-
66.5882
G1 Y537.9329
X236.3163 Y536.5693
Y488.9313
G2 X241.1163 Y486.0739 I-33.8153 J-
62.2646
G1 Y534.976
X245.9163 Y533.1428
Y482.662
G2 X250.7163 Y478.5863 I-43.4153 J-
55.9953
G1 Y531.057
X255.5163 Y528.7031
Y473.6745
G2 X260.3163 Y467.627 I-53.0153 J-
47.0078
G1 Y526.0621
X265.1163 Y523.1104
Y459.8281
G2 X269.9163 Y448.4734 I-62.6153 J-
33.1614
G1 Y519.8184
Y448.4734
G2 Y404.8601 I-67.4153 J-21.8067
G1 Y161.0469
G3 X265.1163 Y179.4845 I-67.4153 J-
7.7072
G1 Y393.5054
G2 X260.3163 Y385.7065 I-62.6153
J33.1613
G1 Y188.8589
G3 X255.5163 Y195.6907 I-57.8153 J-
35.5192
G1 Y379.659

G2 X250.7163 Y374.7472 I-53.0153
 J47.0077
 G1 Y201.0839
 G2 X264.0589 Y124.7942 I-48.2153 J-
 47.7442
 G1 X274.7163 Y63.8579
 Y516.1486
 X279.5163 Y512.0522
 Y67.9542
 X284.3163 Y72.5418
 Y507.4646
 X289.1163 Y502.2963
 Y77.7101
 X293.9163 Y83.5881
 Y496.4183
 X298.7163 Y489.6322
 Y90.3742
 X303.5163 Y98.4038
 Y481.6026
 X308.3163 Y471.6685
 Y108.3379
 X313.1163 Y121.9344
 Y458.072
 X317.4856 Y427.431
 Y152.5754
 G0 Z67.
 X317.4881 Y426.6667
 Z32.9
 G1 Z25.6 F162.3
 G3 X87.5138 I-114.9871 J0 F324.7
 G1 Y153.3397
 G3 X317.4881 I114.9872 J0
 G1 Y426.6667
 G0 Z67.
 X129.2481 Y152.8528
 Z32.9
 G1 Z25.6 F162.3
 X134.648 Y152.8887 F324.7
 G2 X154.7434 Y201.5418 I67.853
 J0.451
 G1 Y374.3258
 G2 X250.4524 Y374.5033 I47.7576
 J52.3409
 G1 Y201.349
 G2 X134.648 Y152.8887 I-47.9514 J-
 48.0093
 G0 Z67.
 X87.5163 Y152.5754
 Z28.1
 G1 Z25. F162.3
 Y427.431 F324.7
 X92.3163 Y459.5513
 Y120.4551
 X97.1163 Y107.3383
 Y472.6682
 X101.9163 Y482.3873
 Y97.6191
 X106.7163 Y89.7209
 Y490.2856
 X111.5163 Y496.9792
 Y83.0272
 X116.3163 Y77.2197
 Y502.7868
 X121.1163 Y507.8985
 Y72.108
 X125.9163 Y67.5676
 Y512.4388
 X130.7163 Y516.4944
 Y63.512
 X135.5163 Y59.8779
 Y142.5096
 G3 X140.3163 Y126.1864 I66.9847
 J10.8301
 G1 Y56.6178
 X145.1163 Y53.6951
 Y117.1287
 G3 X149.9163 Y110.4551 I57.3847
 J36.211
 G1 Y51.0807
 X154.7163 Y48.7516
 Y105.1644
 G3 X159.5163 Y100.8368 I47.7847
 J48.1753
 G1 Y46.689
 X164.3163 Y44.8778
 Y97.249
 G3 X169.1163 Y94.266 I38.1847
 J56.0907
 G1 Y43.3055
 X173.9163 Y41.9621
 Y91.7999
 G3 X178.7163 Y89.7903 I28.5847
 J61.5398
 G1 Y40.8393
 X183.5163 Y39.9305
 Y88.1951
 G3 X188.3163 Y86.9844 I18.9847
 J65.1446
 G1 Y39.2308
 X193.1163 Y38.7361
 Y86.1373
 G3 X197.9163 Y85.6403 I9.3847
 J67.2024
 G1 Y38.444
 X202.7163 Y38.3527
 Y85.4855
 G3 X207.5163 Y85.6708 I-0.2153
 J67.8542
 G1 Y38.4619
 X212.3163 Y38.7722

Y86.1989
 G3 X217.1163 Y87.0779 I-9.8153
 J67.1408
 G1 Y39.2851
 X221.9163 Y40.0035
 Y88.3222
 G3 X226.7163 Y89.9532 I-19.4153
 J65.0175
 G1 Y40.9312
 X231.5163 Y42.0735
 Y92.0018
 G3 X236.3163 Y94.5115 I-29.0153
 J61.3379
 G1 Y43.4371
 X241.1163 Y45.0304
 Y97.5447
 G3 X245.9163 Y101.1924 I-38.6153
 J55.795
 G1 Y46.8636
 X250.7163 Y48.9494
 Y105.5955
 G3 X255.5163 Y110.9887 I-48.2153
 J47.7442
 G1 Y51.3033
 X260.3163 Y53.9444
 Y117.8205
 G3 X265.1163 Y127.1949 I-57.8153
 J35.5192
 G1 Y56.8961
 X269.9163 Y60.1881
 Y145.6325
 G2 X135.5163 Y164.1698 I-67.4153
 J7.7072
 G1 Y403.5709
 G3 X140.3163 Y392.7046 I66.9847
 J23.0958
 G1 Y180.493
 G2 X145.1163 Y189.5507 I62.1847 J-
 27.1533
 G1 Y385.1052
 G3 X149.9163 Y379.1776 I57.3847
 J41.5615
 G1 Y196.2243
 G2 X154.7163 Y201.515 I52.5847 J-
 42.8846
 G1 Y374.3505
 G2 X135.5163 Y449.7626 I47.7847
 J52.3162
 G1 Y520.1285
 X140.3163 Y523.3886
 Y460.6289
 G2 X145.1163 Y468.2283 I62.1847 J-
 33.9622
 G1 Y526.3114
 X149.9163 Y528.9258

Y474.1559
 G2 X154.7163 Y478.983 I52.5847 J-
 47.4892
 G1 Y531.2549
 X159.5163 Y533.3174
 Y482.9933
 G2 X164.3163 Y486.3517 I42.9847 J-
 56.3266
 G1 Y535.1287
 X169.1163 Y536.7009
 Y489.1633
 G2 X173.9163 Y491.4994 I33.3847 J-
 62.4966
 G1 Y538.0443
 X178.7163 Y539.1672
 Y493.4099
 G2 X183.5163 Y494.9305 I23.7847 J-
 66.7432
 G1 Y540.0759
 X188.3163 Y540.7756
 Y496.0869
 G2 X193.1163 Y496.897 I14.1847 J-
 69.4202
 G1 Y541.2703
 X197.9163 Y541.5625
 Y497.3727
 G2 X202.7163 Y497.5209 I4.5847 J-
 70.706
 G1 Y541.6537
 X207.5163 Y541.5445
 Y497.3435
 G2 X212.3163 Y496.8381 I-5.0153 J-
 70.6768
 G1 Y541.2343
 X217.1163 Y540.7213
 Y495.9975
 G2 X221.9163 Y494.8093 I-14.6153 J-
 69.3308
 G1 Y540.0029
 X226.7163 Y539.0752
 Y493.2549
 G2 X231.5163 Y491.3078 I-24.2153 J-
 66.5882
 G1 Y537.9329
 X236.3163 Y536.5693
 Y488.9313
 G2 X241.1163 Y486.0739 I-33.8153 J-
 62.2646
 G1 Y534.976
 X245.9163 Y533.1428
 Y482.662
 G2 X250.7163 Y478.5863 I-43.4153 J-
 55.9953
 G1 Y531.057
 X255.5163 Y528.7031

Y473.6745
 G2 X260.3163 Y467.627 I-53.0153 J-47.0078
 G1 Y526.0621
 X265.1163 Y523.1104
 Y459.8281
 G2 X269.9163 Y448.4734 I-62.6153 J-33.1614
 G1 Y519.8184
 Y448.4734
 G2 Y404.8601 I-67.4153 J-21.8067
 G1 Y161.0469
 G3 X265.1163 Y179.4845 I-67.4153 J-7.7072
 G1 Y393.5054
 G2 X260.3163 Y385.7065 I-62.6153 J33.1613
 G1 Y188.8589
 G3 X255.5163 Y195.6907 I-57.8153 J-35.5192
 G1 Y379.659
 G2 X250.7163 Y374.7472 I-53.0153 J47.0077
 G1 Y201.0839
 G2 X264.0589 Y124.7942 I-48.2153 J-47.7442
 G1 X274.7163 Y63.8579
 Y516.1486
 X279.5163 Y512.0522
 Y67.9542
 X284.3163 Y72.5418
 Y507.4646
 X289.1163 Y502.2963
 Y77.7101
 X293.9163 Y83.5881
 Y496.4183
 X298.7163 Y489.6322
 Y90.3742
 X303.5163 Y98.4038
 Y481.6026
 X308.3163 Y471.6685
 Y108.3379
 X313.1163 Y121.9344
 Y458.072
 X317.4856 Y427.431
 Y152.5754
 G0 Z67.
 X317.4881 Y426.6667
 Z28.1
 G1 Z25. F162.3
 G3 X87.5138 I-114.9871 J0 F324.7
 G1 Y153.3397
 G3 X317.4881 I114.9872 J0
 G1 Y426.6667
 X317.9681
 G3 X87.0338 I-115.4671 J0
 G1 Y153.3397
 G3 X317.9681 I115.4672 J0
 G1 Y426.6667
 G0 Z67.
 X129.2481 Y152.8528
 Z28.1
 G1 Z25. F162.3
 X134.648 Y152.8887 F324.7
 G2 X154.7434 Y201.5418 I67.853 J0.451
 G1 Y374.3258
 G2 X250.4524 Y374.5033 I47.7576 J52.3409
 G1 Y201.349
 G2 X134.648 Y152.8887 I-47.9514 J-48.0093
 G1 X134.048 Y152.8847
 X135.1279 Y152.8919
 G2 X155.2234 Y201.3413 I67.3731 J0.4478
 G1 Y374.5381
 G2 X249.9724 Y374.7145 I47.2776 J52.1286
 G1 Y201.1496
 G2 X135.1279 Y152.8919 I-47.4714 J-47.8099
 G0 Z67.
 T346 D346
 M6
 S1592 M3
 G43 Z67.
 G0 X158.2234 Y375.8847 Z42.4965
 G1 Z37.9965 F152.8
 G2 X246.9724 Y376.0544 I44.2776 J50.782 F305.6
 G1 Y199.884
 G2 X158.2234 Y200.0684 I-44.4714 J-46.5443
 G1 Y375.8847
 G0 Z67.
 T139 D139
 M6
 S796 M3
 G43 Z64.
 G0 X202.5226 Y423.5444 Z41.
 G1 Z36.653 F162.3
 X203.3117 Y424.2382 F324.7
 G3 X201.729 Y424.2256 I-0.8107 J2.4285
 G1 X202.5226 Y423.5444
 X205.4128 Y419.6941
 X205.9448 Y420.1619
 G3 X199.15 Y420.1135 I-3.4438 J6.5048

G1 X202.56 Y417.186
 X205.4128 Y419.6941
 X208.303 Y415.8438
 X208.7435 Y416.2311
 G3 X196.4017 Y416.1467 I-6.2425
 J10.4356
 G1 X202.5975 Y410.8276
 X208.303 Y415.8438
 X211.1809 Y412.0098
 X211.5614 Y412.3294
 G3 X193.5886 Y412.2369 I-9.0604
 J14.3373
 G1 X199.0213 Y407.5965
 X202.5143 Y402.9467
 X206.6216 Y408.1803
 X211.1809 Y412.0098
 X214.0668 Y408.1653
 X214.4155 Y408.4581
 G3 X190.7344 Y408.3622 I-11.9145
 J18.2086
 G1 X195.5014 Y404.2904
 X199.7479 Y398.6375
 X202.637 Y392.0883
 X205.8146 Y399.3771
 X210.0901 Y404.8251
 X214.0668 Y408.1653
 X216.9527 Y404.3207
 X217.2943 Y404.6076
 G3 X187.8523 Y404.5113 I-14.7933
 J22.0591
 G1 X191.9814 Y400.9843
 X195.5788 Y396.1955
 X198.0302 Y390.6387
 X199.0904 Y385.1175
 X199.035 Y190.606
 X197.8886 Y185.4905
 X202.5725 Y184.4409
 X199.3835 Y177.094
 X198.8318 Y176.3905
 X202.6087 Y173.4283
 X198.7849 Y168.5527
 X202.5013 Y159.0681
 X200.3712 Y157.1444
 G3 X204.4531 Y157.2386 I2.1298 J-
 3.8047
 G1 X202.5013 Y159.0681
 X202.5619 Y165.5906
 X197.4809 Y161.0019
 G3 X207.3212 Y161.1292 I5.0201 J-
 7.6622
 G1 X202.5619 Y165.5906
 X198.7849 Y168.5527
 X198.6225 Y168.3456
 X194.5543 Y164.8175

G3 X210.2914 Y164.9241 I7.9467 J-
 11.4778
 G1 X205.0629 Y169.8253
 X202.6087 Y173.4283
 X198.8318 Y176.3905
 X195.1297 Y171.6702
 X191.5924 Y168.6024
 G3 X213.3125 Y168.6713 I10.9086 J-
 15.2627
 G1 X208.7319 Y172.9651
 X204.7486 Y178.8131
 X202.5725 Y184.4409
 X197.8886 Y185.4905
 X197.7324 Y184.7934
 X195.2781 Y179.6375
 X191.637 Y174.9947
 X188.6082 Y172.368
 G3 X216.3655 Y172.3886 I13.8928 J-
 19.0283
 G1 X212.401 Y176.105
 X209.0265 Y181.0591
 X206.8341 Y186.7289
 X206.0265 Y193.2614
 X206.1612 Y385.8682
 X207.4641 Y391.6776
 X209.9193 Y396.8325
 X213.5587 Y401.4699
 X216.9527 Y404.3207
 X219.8197 Y400.5014
 X220.078 Y400.6953
 G3 X185.0673 Y400.5989 I-17.577
 J25.9714
 G1 X186.7726 Y399.3016
 X188.4855 Y397.6837
 X190.1518 Y395.7031
 X191.4316 Y393.7652
 X192.5121 Y391.6719
 X193.4385 Y389.2117
 X193.9975 Y386.9518
 X194.3035 Y384.697
 X194.3693 Y383.068
 Y193.2301
 X194.2558 Y191.1219
 X193.8796 Y188.8098
 X193.1886 Y186.365
 X192.3076 Y184.225
 X191.1894 Y182.1665
 X189.7505 Y180.1089
 X188.2099 Y178.3653
 X186.5604 Y176.8582
 X185.7134 Y176.1976
 G3 X219.3267 Y176.1695 I16.7876 J-
 22.8579
 G1 X217.6825 Y177.5448
 X216.0458 Y179.2404

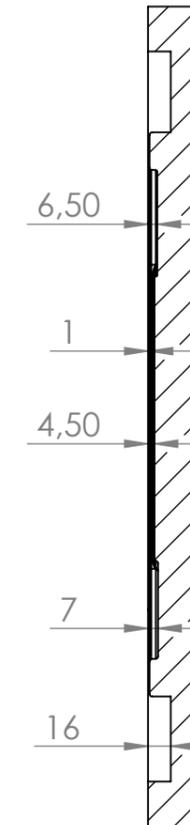
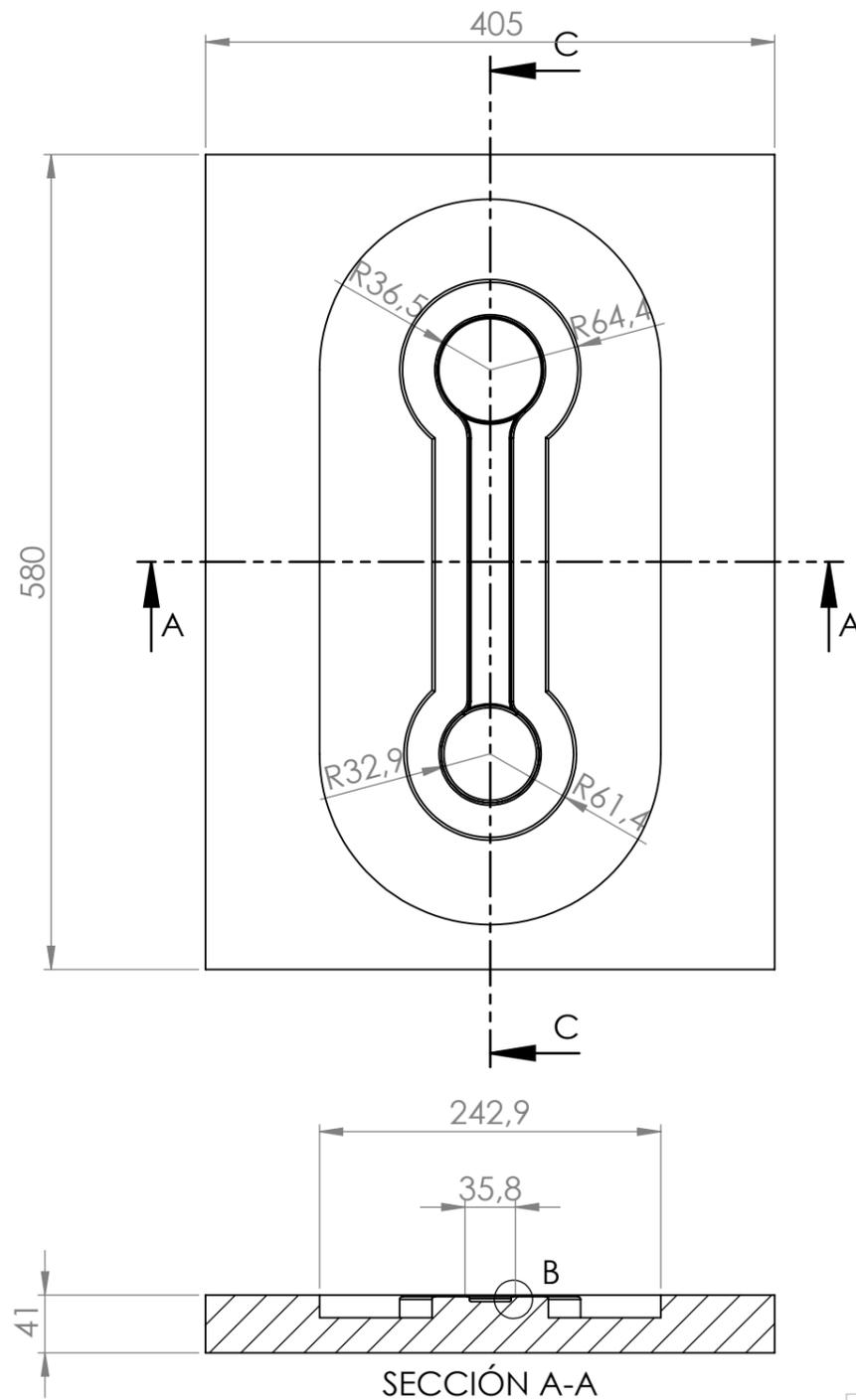
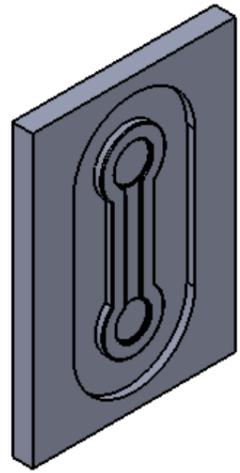
X214.4707 Y181.299
 X213.282 Y183.2945
 X212.2996 Y185.436
 X211.4872 Y187.9407
 X211.0328 Y190.2309
 X210.8396 Y192.4174
 X210.8265 Y193.2614
 Y383.2428
 X210.9403 Y385.3514
 X211.317 Y387.6631
 X212.0077 Y390.1052
 X212.8888 Y392.2445
 X214.0072 Y394.3023
 X215.4467 Y396.3593
 X216.9844 Y398.098
 X218.6795 Y399.6455
 X219.8197 Y400.5014
 X220.1078 Y400.1175
 X220.3568 Y400.3044
 G3 X184.7882 Y400.208 I-17.8558
 J26.3623
 G1 X186.4616 Y398.9351
 X188.1359 Y397.3536
 X189.7666 Y395.4154
 X191.0168 Y393.5222
 X192.0727 Y391.4766
 X192.9793 Y389.069
 X193.5254 Y386.8617
 X193.8248 Y384.6549
 X193.8893 Y383.0583
 Y193.243
 X193.7779 Y191.1735
 X193.4102 Y188.914
 X192.7342 Y186.5221
 X191.8736 Y184.4315
 X190.7806 Y182.4194
 X189.3728 Y180.4063
 X187.8672 Y178.7024
 X186.2504 Y177.2252
 X185.4237 Y176.5804
 G3 X219.6234 Y176.5471 I17.0773 J-
 23.2407
 G1 X218.0101 Y177.8965
 X216.4103 Y179.554
 X214.8688 Y181.5685
 X213.7076 Y183.518
 X212.7475 Y185.6107
 X211.9525 Y188.0619
 X211.5087 Y190.2989
 X211.3193 Y192.4424
 X211.3065 Y193.2614
 Y383.2298
 X211.4182 Y385.2997
 X211.7863 Y387.5588
 X212.4621 Y389.948

X213.3228 Y392.0379
 X214.416 Y394.0493
 X215.8244 Y396.0618
 X217.327 Y397.7608
 X218.9861 Y399.2755
 X220.1078 Y400.1175
 G0 Z64.
 T1 D0
 M6
 S1194 M3
 G43 Z67.
 G0 X201.6098 Y154.5646 Z40.674
 G1 Z34.974 F114.6
 G3 X203.3981 Y154.5603 I0.8912 J-
 1.2249 F229.2
 X201.6098 Y154.5646 I-0.8971 J-
 1.2206
 G1 X199.7271 Y157.1522
 G3 X205.2932 Y157.1387 I2.7739 J-
 3.8125
 X199.7271 Y157.1522 I-2.7922 J-3.799
 G1 X197.8445 Y159.7398
 G3 X207.1884 Y159.7171 I4.6565 J-
 6.4001
 X197.8445 Y159.7398 I-4.6874 J-
 6.3774
 G1 X195.9618 Y162.3274
 G3 X209.0836 Y162.2956 I6.5392 J-
 8.9877
 X195.9618 Y162.3274 I-6.5826 J-
 8.9559
 G1 X194.0792 Y164.915
 G3 X210.9787 Y164.874 I8.4218 J-
 11.5753
 X194.0792 Y164.915 I-8.4777 J-
 11.5343
 G1 X192.1965 Y167.5026
 G3 X212.8739 Y167.4525 I10.3045 J-
 14.1629
 X192.1965 Y167.5026 I-10.3729 J-
 14.1128
 G1 X190.3139 Y170.0902
 G3 X214.769 Y170.0309 I12.1871 J-
 16.7505
 X190.3139 Y170.0902 I-12.268 J-
 16.6912
 G1 X188.4312 Y172.6777
 G3 X216.6642 Y172.6094 I14.0698 J-
 19.338
 X188.4312 Y172.6777 I-14.1632 J-
 19.2697
 G1 X186.5486 Y175.2654
 G3 X218.5593 Y175.1878 I15.9524 J-
 21.9257

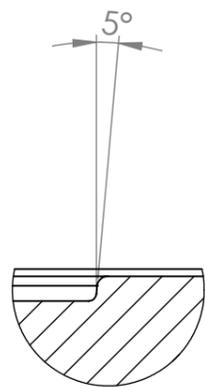
X186.5486 Y175.2654 I-16.0583 J-
 21.8481
 G1 X184.6659 Y177.8529
 G3 X220.4545 Y177.7663 I17.8351 J-
 24.5132
 X184.6659 Y177.8529 I-17.9535 J-
 24.4266
 G0 Z67.
 X201.6098 Y154.5646
 Z37.474
 G1 Z34. F114.6
 G3 X203.3981 Y154.5603 I0.8912 J-
 1.2249 F229.2
 X201.6098 Y154.5646 I-0.8971 J-
 1.2206
 G1 X199.7271 Y157.1522
 G3 X205.2932 Y157.1387 I2.7739 J-
 3.8125
 X199.7271 Y157.1522 I-2.7922 J-3.799
 G1 X197.8445 Y159.7398
 G3 X207.1884 Y159.7171 I4.6565 J-
 6.4001
 X197.8445 Y159.7398 I-4.6874 J-
 6.3774
 G1 X195.9618 Y162.3274
 G3 X209.0836 Y162.2956 I6.5392 J-
 8.9877
 X195.9618 Y162.3274 I-6.5826 J-
 8.9559
 G1 X194.0792 Y164.915
 G3 X210.9787 Y164.874 I8.4218 J-
 11.5753
 X194.0792 Y164.915 I-8.4777 J-
 11.5343
 G1 X192.1965 Y167.5026
 G3 X212.8739 Y167.4525 I10.3045 J-
 14.1629
 X192.1965 Y167.5026 I-10.3729 J-
 14.1128
 G1 X190.3139 Y170.0902
 G3 X214.769 Y170.0309 I12.1871 J-
 16.7505
 X190.3139 Y170.0902 I-12.268 J-
 16.6912
 G1 X188.4312 Y172.6777
 G3 X216.6642 Y172.6094 I14.0698 J-
 19.338
 X188.4312 Y172.6777 I-14.1632 J-
 19.2697
 G1 X186.5486 Y175.2654
 G3 X218.5593 Y175.1878 I15.9524 J-
 21.9257
 X186.5486 Y175.2654 I-16.0583 J-
 21.8481
 G1 X184.6659 Y177.8529
 G3 X220.4545 Y177.7663 I17.8351 J-
 24.5132
 X184.6659 Y177.8529 I-17.9535 J-
 24.4266
 G1 X184.4777 Y178.1117
 G3 X220.644 Y178.0241 I18.0233 J-
 24.772
 X184.4777 Y178.1117 I-18.143 J-
 24.6844
 G0 Z67.
 T2 D0
 M6
 S318 M3
 G43 Z62.
 G0 X203.2375 Y425.573 Z40.674
 G1 Z34.974 F70.3
 G3 X201.7693 Y425.5697 I-0.7365
 J1.0937 F140.7
 X203.2375 Y425.573 I0.7317 J1.097
 G1 X205.0248 Y422.9187
 G3 X199.9937 Y422.9075 I-2.5238
 J3.748
 X205.0248 Y422.9187 I2.5073 J3.7592
 G1 X206.8122 Y420.2644
 G3 X198.2182 Y420.2453 I-4.3112
 J6.4023
 X206.8122 Y420.2644 I4.2828 J6.4214
 G1 X208.5995 Y417.6101
 G3 X196.4426 Y417.5831 I-6.0985
 J9.0566
 X208.5995 Y417.6101 I6.0584 J9.0836
 G1 X210.3869 Y414.9558
 G3 X194.6671 Y414.9209 I-7.8859
 J11.7109
 X210.3869 Y414.9558 I7.8339
 J11.7458
 G1 X212.1743 Y412.3015
 G3 X192.8915 Y412.2587 I-9.6733
 J14.3652
 X212.1743 Y412.3015 I9.6095 J14.408
 G1 X213.9616 Y409.6472
 G3 X191.1159 Y409.5965 I-11.4606
 J17.0195
 X213.9616 Y409.6472 I11.3851
 J17.0702
 G1 X215.749 Y406.9929
 G3 X189.3404 Y406.9343 I-13.248
 J19.6738
 X215.749 Y406.9929 I13.1606
 J19.7324
 G1 X217.5364 Y404.3386
 G3 X187.5648 Y404.272 I-15.0354
 J22.3281
 X217.5364 Y404.3386 I14.9362
 J22.3947

G1 X219.3237 Y401.6842
 G3 X185.7892 Y401.6098 I-16.8227
 J24.9825
 X219.3237 Y401.6842 I16.7118
 J25.0569
 G1 X221.1111 Y399.0299
 G3 X184.0137 Y398.9476 I-18.6101
 J27.6368
 X221.1111 Y399.0299 I18.4873
 J27.7191
 G0 Z62.
 X203.2375 Y425.573
 Z37.474
 G1 Z34.5 F70.3
 G3 X201.7693 Y425.5697 I-0.7365
 J1.0937 F140.7
 X203.2375 Y425.573 I0.7317 J1.097
 G1 X205.0248 Y422.9187
 G3 X199.9937 Y422.9075 I-2.5238
 J3.748
 X205.0248 Y422.9187 I2.5073 J3.7592
 G1 X206.8122 Y420.2644
 G3 X198.2182 Y420.2453 I-4.3112
 J6.4023
 X206.8122 Y420.2644 I4.2828 J6.4214
 G1 X208.5995 Y417.6101
 G3 X196.4426 Y417.5831 I-6.0985
 J9.0566
 X208.5995 Y417.6101 I6.0584 J9.0836
 G1 X210.3869 Y414.9558
 G3 X194.6671 Y414.9209 I-7.8859
 J11.7109
 X210.3869 Y414.9558 I7.8339
 J11.7458
 G1 X212.1743 Y412.3015
 G3 X192.8915 Y412.2587 I-9.6733
 J14.3652
 X212.1743 Y412.3015 I9.6095 J14.408
 G1 X213.9616 Y409.6472
 G3 X191.1159 Y409.5965 I-11.4606
 J17.0195
 X213.9616 Y409.6472 I11.3851
 J17.0702
 G1 X215.749 Y406.9929
 G3 X189.3404 Y406.9343 I-13.248
 J19.6738
 X215.749 Y406.9929 I13.1606
 J19.7324
 G1 X217.5364 Y404.3386
 G3 X187.5648 Y404.272 I-15.0354
 J22.3281
 X217.5364 Y404.3386 I14.9362
 J22.3947
 G1 X219.3237 Y401.6842
 G3 X185.7892 Y401.6098 I-16.8227
 J24.9825
 X219.3237 Y401.6842 I16.7118
 J25.0569
 G1 X221.1111 Y399.0299
 G3 X184.0137 Y398.9476 I-18.6101
 J27.6368
 X221.1111 Y399.0299 I18.4873
 J27.7191
 G1 X221.2898 Y398.7645
 G3 X183.8361 Y398.6814 I-18.7888
 J27.9022
 X221.2898 Y398.7645 I18.6649
 J27.9853
 G0 Z62.
 T346 D346
 M6
 S1592 M3
 G43 Z67.
 G0 X222.1246 Y397.8878 Z42.4965
 G1 Z37.9965 F152.8
 G3 X183.0918 Y397.7427 I-19.6236
 J28.7789 F305.6
 G1 X184.5962 Y396.5964
 X186.0702 Y395.1893
 X187.3784 Y393.6257
 X188.4912 Y391.9382
 X189.4145 Y390.1252
 X190.1394 Y388.1813
 X190.6222 Y386.2182
 X190.8749 Y384.2633
 X190.9197 Y383.0273
 X190.9034 Y192.4972
 X190.6886 Y190.5031
 X190.2476 Y188.5282
 X189.5976 Y186.6445
 X188.7261 Y184.8166
 X187.6555 Y183.0959
 X186.4374 Y181.55
 X185.0223 Y180.1133
 X183.6839 Y179.0153
 G3 X221.4318 Y178.9315 I18.8171 J-
 25.6756
 G1 X219.9815 Y180.1465
 X218.5739 Y181.6204
 X217.3374 Y183.2455
 X216.3039 Y184.983
 X215.4655 Y186.8372
 X214.8306 Y188.8159
 X214.4391 Y190.8016
 X214.2801 Y192.7365
 X214.2924 Y383.975
 X214.5072 Y385.9689
 X214.9482 Y387.9432
 X215.5976 Y389.8247

X216.469 Y391.6518
X217.5395 Y393.3717
X218.7576 Y394.9164
X220.182 Y396.361
X221.6778 Y397.5739
X222.1246 Y397.8878
G0 Z67.
X216.9794 Y180.9004 Z64.
Z38.9965
G1 Z34.4965 F57.9 S637
G3 X188.1562 Y180.9702 I-14.4784 J-
27.5607 F115.9
G0 Z64.
T3 D0
M6
S637 M3
G43 Z64.
G0 X186.6175 Y395.964 Z38.9965
G1 Z35.4965 F57.9
G3 X218.5205 Y396.0348 I15.8835
J30.7027 F115.9
G0 Z64.
M5
G0 X-15. Y0 Z10.
M30



SECCIÓN C-C



DETALLE B
ESCALA 1 : 1

SECCIÓN A-A



UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA, ENERGÉTICA Y DE MATERIALES

PROYECTO: DISEÑO DE UNA LLAVE HERRAMIENTA COMBINADA

AUTOR:

ALVARO ZOZAYA LAREQUI

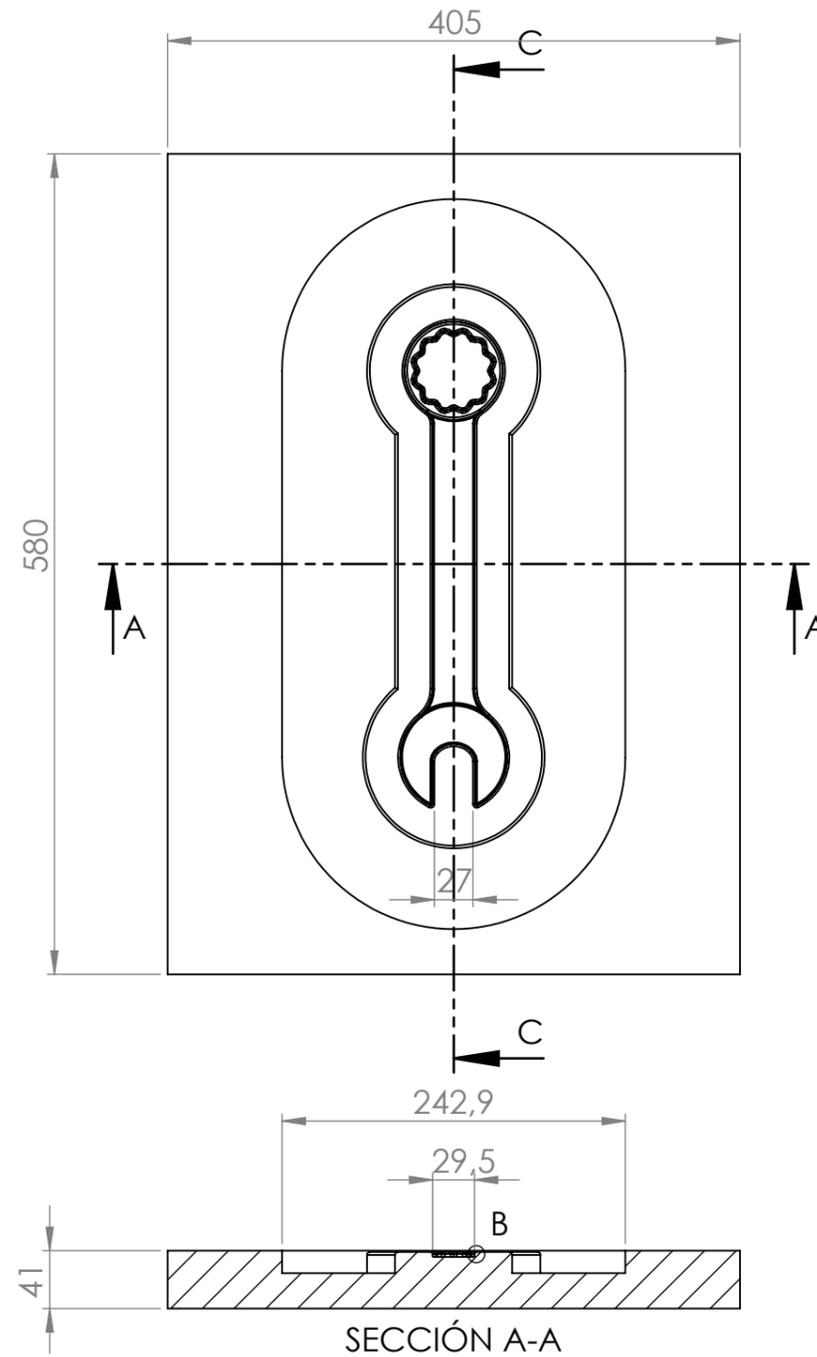
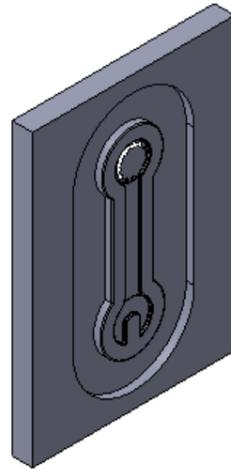
PLANO:

MATRIZ INFERIOR 5°
DESPULLA. GOLPE 1

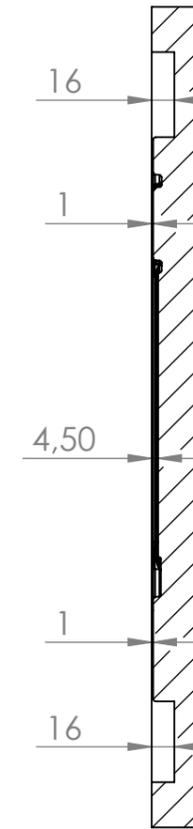
FECHA:
01/06/2014

ESCALA
1:5

Nº PLANO:
Nº1



DETALLE B
ESCALA 1 : 1



SECCIÓN C-C



UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA, ENERGÉTICA Y DE MATERIALES

PROYECTO: DISEÑO DE UNA LLAVE HERRAMIENTA COMBINADA

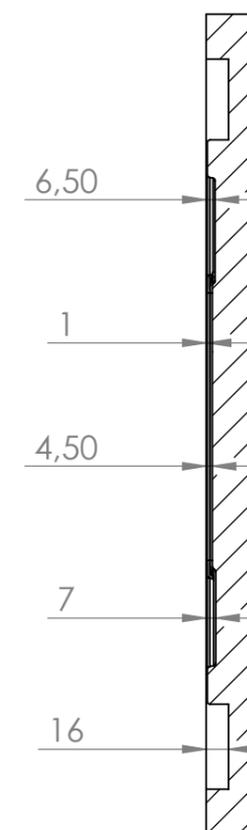
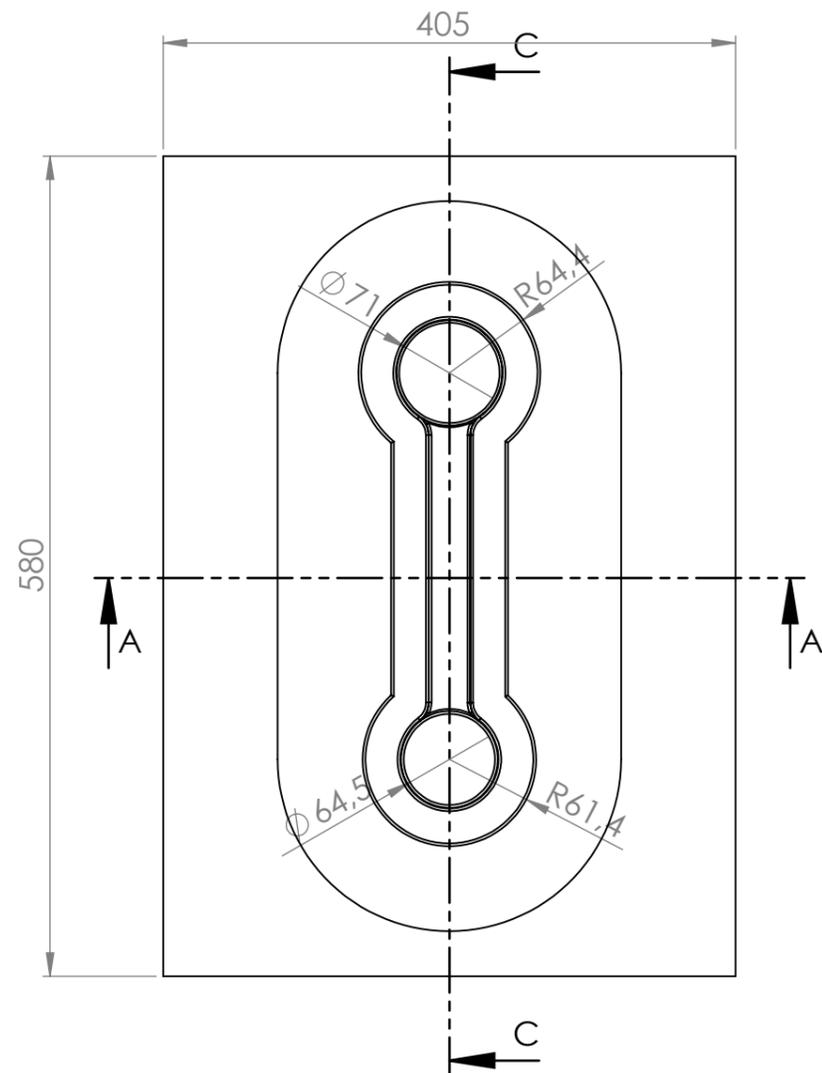
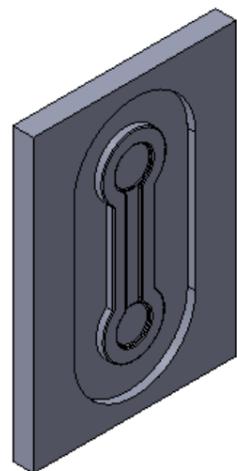
AUTOR:
ALVARO ZOZAYA LAREQUI

PLANO:
MATRIZ INFERIOR 5°
DESPULLA. GOLPE 2

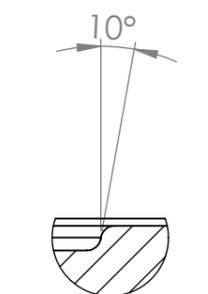
FECHA:
01/06/2014

ESCALA
1:5

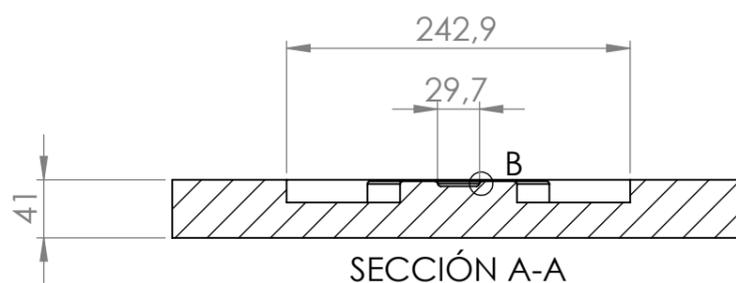
Nº PLANO:
Nº 3



SECCIÓN C-C



DETALLE B
ESCALA 1 : 1



SECCIÓN A-A



UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA, ENERGÉTICA Y DE MATERIALES

PROYECTO: DISEÑO DE UNA LLAVE HERRAMIENTA COMBINADA

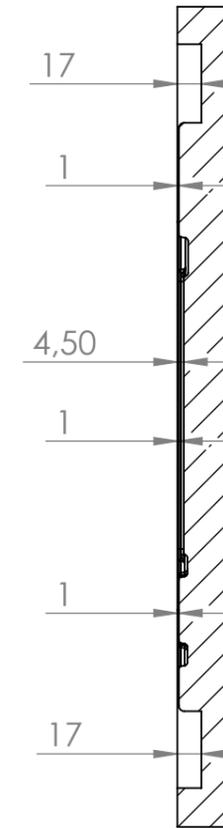
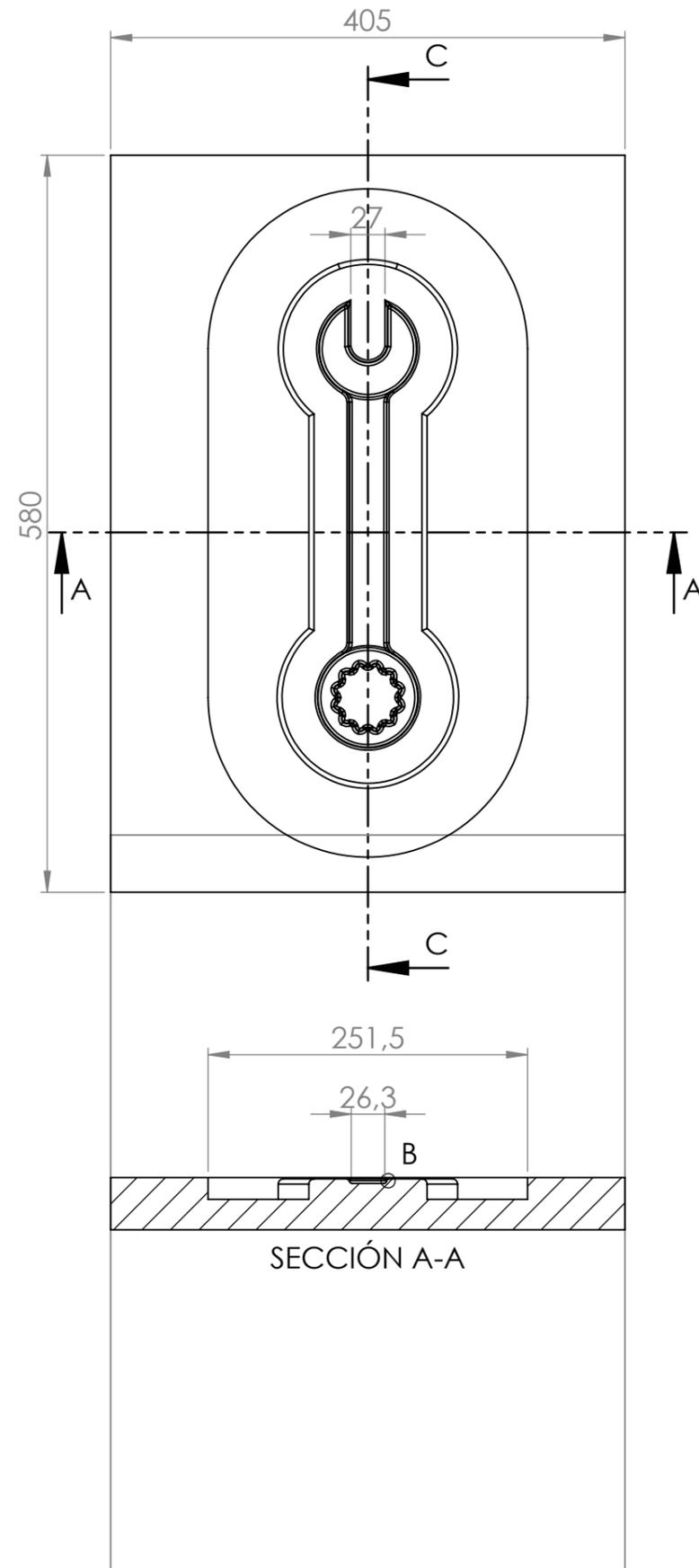
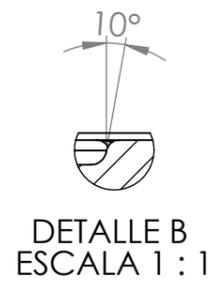
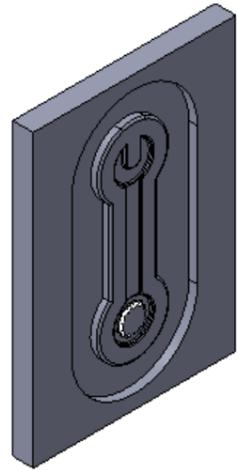
AUTOR:
ALVARO ZOZAYA LAREQUI

FECHA:
MATRIZ INFERIOR 10°
DESPULLA. GOLPE 1

FECHA:
01/06/2014

ESCALA:
1:5

Nº PLANO:
Nº 2



SECCIÓN C-C



UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA, ENERGÉTICA Y DE MATERIALES

PROYECTO: DISEÑO DE UNA LLAVE HERRAMIENTA COMBINADA

AUTOR:

ALVARO ZOZAYA LAREQUI

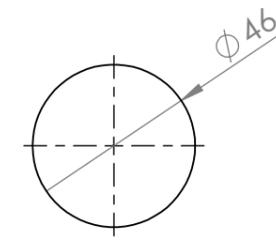
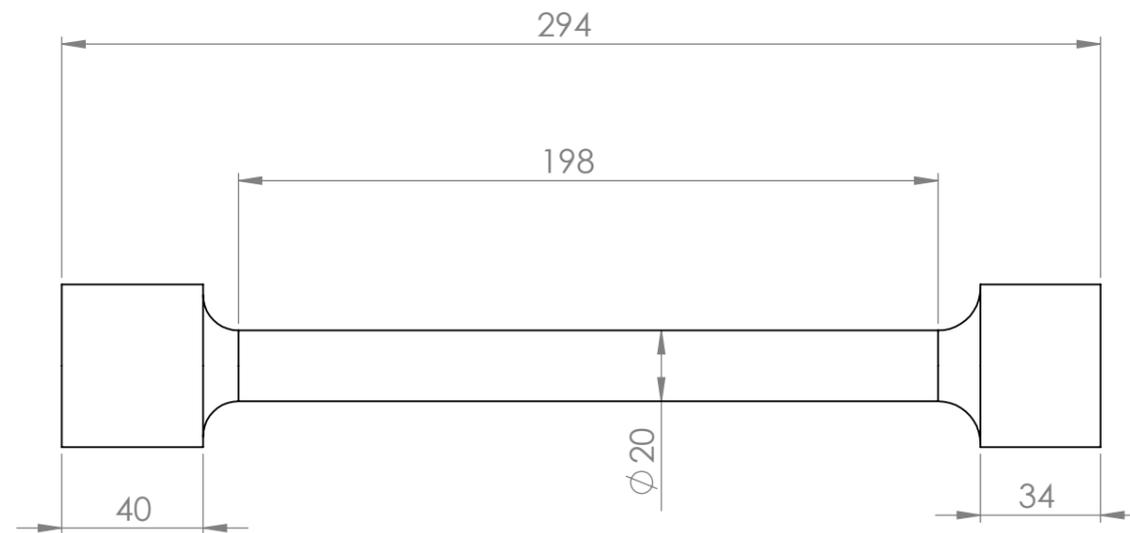
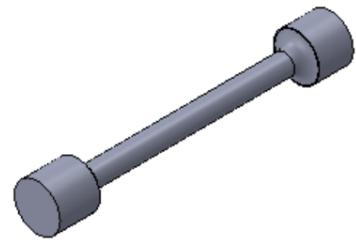
PLANO:

MATRIZ INFERIOR 10°
DESPULLA. GOLPE 2

FECHA:
01/06/2014

ESCALA
1:5

Nº PLANO
Nº 4



UNIVERSIDAD PÚBLICA DE NAVARRA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA, ENERGÉTICA Y DE
MATERIALES

PROYECTO: DISEÑO DE UNA LLAVE HERRAMIENTA COMBINADA

AUTOR:

ALVARO ZOZAYA LAREQUI

PLANO:

PROBETA

FECHA:
01/06/2014

ESCALA
1:2

Nº PLANO
Nº 5