



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TUXTLA GUTIÉRREZ



INGENIERÍA MECÁNICA

RESIDENCIA PROFESIONAL

“DISEÑO DE HERRAMENTAL PARA EL PROCESO DE
FORJA CALIENTE EN MATRIZ CERRADA.”

ALUMNO:

EDUARDO ALFONSO MARTÍNEZ

NO DE CONTROL: 13270491

ASESOR INTERNO:

M. I. LORENZO MARCIANO VAZQUEZ

ASESOR EXTERNO:

ING. CÁNDIDO VALDEZ MOLINA

INDICE

Introducción	1
Generalidades	2
• Misión.....	2
• Visión.....	2
• Política de Calidad	2
• Descripción del puesto:.....	2
• Competencias.....	3
Problemas a resolver.....	3
• Objetivos	3
Objetivo general:	3
Objetivos específicos.....	4
• Justificación	4
Marco Teórico	5
• Deformación plástica.....	5
SolidWorks.....	9
Forjado por matriz de impresión y matriz cerrada	10
Secuencia de forjado.....	10
Herramental	11
a) Dado plano.....	12
b) Dado de estampa	12
c) Dados en V.....	12
d) Dados de impresión.....	12
•Canteadoras.....	12
•Llenadoras.....	13
•Niveladoras.....	13
•Redondeadores.....	13
•Divisoras	13
• Bloqueadoras.....	13
• Acabadoras	13
Dureza Brinell	13
Desarrollo	15
Selección de materiales para fabricación de herramentales	17

L6	18
AISI H13	19
AISI D2	19
AISI S1	20
Consideraciones en el diseño de estampas.	20
Diseño mecánico de herramientas.....	21
Precisión de la forja.....	21
a) Variables antes del proceso.	22
b) Variables de la máquina.....	23
c) Variables durante el proceso.....	23
d) Variables después del proceso.....	24
Tolerancias para forja de precisión.	25
Procedimiento	26
Ángulo de Salida	28
Análisis de corte sesgado	30
Análisis de línea de partición.....	30
Líneas de separación	31
Superficies de separación.....	32
Núcleo/Cavidad	32
Análisis estructural de su funcionamiento.....	34
Análisis del dado para martillo de 3 preformas	36
Definiciones de fatiga.....	37
Límite de resistencia.....	37
Tensión alterna y tensión media	37
Ciclos de fatiga.....	37
Vida infinita	37
Resistencia a la fatiga	38
Requisitos para realizar un análisis de fatiga	38
Parámetros de ingreso	38
Definición de curvas S-N.....	40
Interacción de sucesos	41
Vida infinita	42
Resultados del análisis de fatiga	42

Vida.....	43
Daño	43
Factor de seguridad.....	43
Cálculo de fatiga	44
Mallado.....	45
Tipos de mallado	45
Malla sólida	45
Malla de vaciado.....	45
Malla de viga	46
Análisis al dado inferior	46
Mallado.....	49
Resultados	50
Análisis de fatiga.....	51
Análisis del dado superior	53
Resultados	55
Realización de pruebas y resultados finales.....	58
Dureza	60
Conclusión	61
Referencias.....	62

Introducción

Un lingote de acero tiene un uso muy limitado hasta que le es proporcionada una forma tal que pueda emplear en un proceso de manufactura. Si el lingote es admitido en frío, se vuelve bastante difícil, si no imposible, convertir el material por medios mecánicos en una forma estructural. No obstante, si el lingote se trabaja en caliente, puede martillarse, prensarse, rolarse o extrudirse y obtener diferentes formas.

A medida que pasa el tiempo, los productos fabricados pueden ser producidos de una manera más óptima en lo que respecta a tiempo, calidad y coste.

La fiabilidad del producto final es un factor muy importante a tener en cuenta cuando se realiza el diseño del mismo. En condiciones de trabajo, existe un fenómeno que causa el fallo del producto y cuya predicción es difícil de averiguar, llamado fatiga. Utilizando herramientas de simulación bajo la tecnología conocida como Ingeniería Asistida por Ordenador (CAE), es posible estudiar el producto antes de construir su prototipo. De esta manera, se consiguen ahorrar tiempo y costes en el proceso de diseño y fabricación de un producto.

El proceso de forja en matriz cerrada es considerablemente usado en la producción masiva de piezas de alta calidad como bielas, cigüeñales, etc. a costos moderados. Una biela no puede ser formada en un solo impacto; por ello los dados de forja presentan múltiples impresiones, cada paso se acerca más a la forma final.

Debido a la oxidación y otras desventajas del trabajo en caliente a temperaturas elevadas, la mayoría de los metales ferrosos se trabajan en frío o se terminan en frío después del trabajo en caliente para obtener un buen acabado superficial, alta exactitud dimensional y mejorar las propiedades mecánicas.

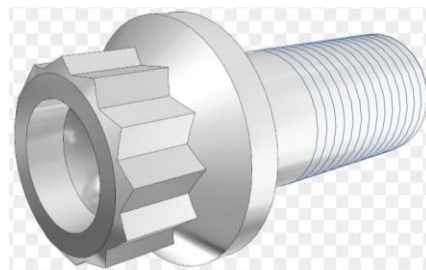


Fig: 1 Tornillo dibujado en software CAD

Generalidades

- **Misión**

Technoforge es una empresa mexicana dedicada a la fabricación de piezas forjadas y maquinadas para el sector industrial, comprometida a cumplir los requisitos de nuestros clientes, mediante un sistema de gestión de la calidad con procesos estandarizados.

- **Visión**

Aumentar nuestra presencia en el mercado nacional e internacional en un lapso no mayor a 2 años. Abasteciendo al sector petrolero, minero y gas, en materia de forja y maquinado, incrementando nuestra familia de productos y mejorando continuamente nuestros procesos productivos.

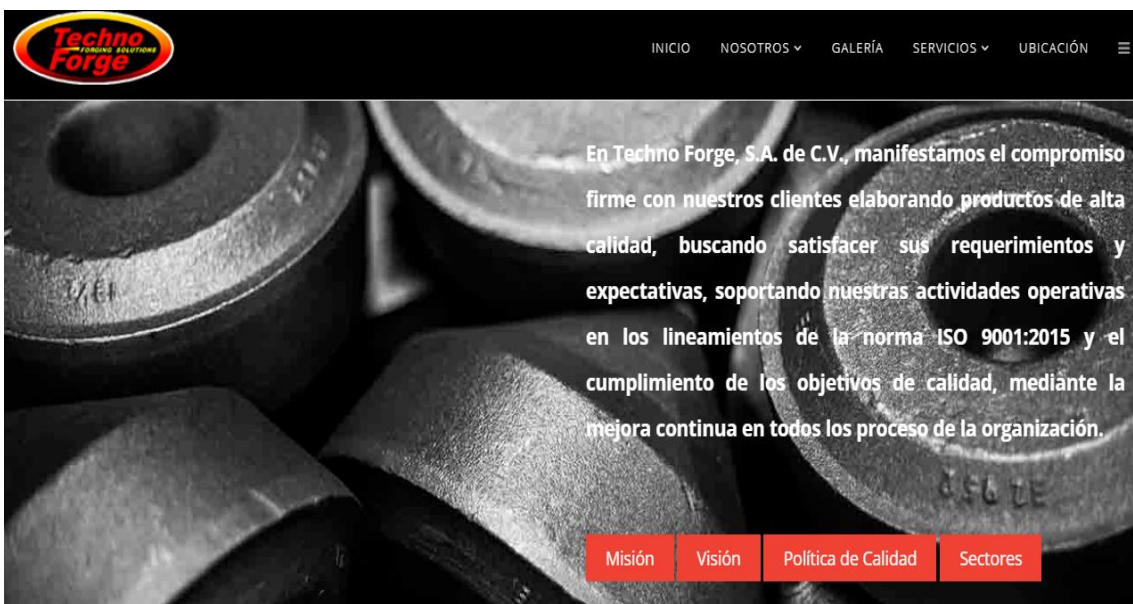


Fig: 2: Sitio web de la empresa <http://www.technoforge.mx>

- **Política de Calidad**

Technoforge es una empresa mexicana dedicada a la producción de piezas forjadas y maquinadas. Nuestro compromiso es la satisfacción total de nuestros clientes, manteniendo altos niveles de calidad. Soportamos nuestras actividades en los lineamientos y mejora continua de nuestro sistema de gestión de calidad.

- **Descripción del puesto:**

Como inspector de control de calidad, se supervisan que los productos cumplan con las

normas de calidad y seguridad. Entre sus funciones concretas están la elaboración de un plan de control; comprobar las muestras y examinar los productos; registrar los controles realizados y elaborar informes.

- **Competencias**

Aptitudes para redactar informes.

Capaz de prestar atención al detalle.

Capaz de utilizar equipo técnico.

Discreto.

Habilidad para la estadística.

Habilidad para los números.

Habilidades comunicativas.

Habilidades interpersonales.

Metódico.

Observador.

Paciente.

Preciso.

Problemas a resolver

Se requiere la fabricación de una pieza en serie de aplicación ferroviaria, ésta debe ser fabricada a partir del método de forja, para esto, es necesario un herramental específicamente diseñado para la producción, partiendo de las especificaciones que el cliente ha determinado. Anteriormente, dicha pieza esa fabricaba mediante fundición de acero y se ha de realizar ahora, por el proceso de forja, y reducir costos y tiempos de fabricación.

- **Objetivos**

Objetivo general:

Diseñar un herramental para la fabricación de una pieza en serie por medio del proceso de forja caliente en matriz cerrada, cumpliendo con las especificaciones del cliente para el diseño de la pieza.

Objetivos específicos

- Identificar las características del proceso de manufactura
Generar el diseño mecánico del herramental
Selección de un acero apto para la fabricación del herramental
Fabricar la mejor opción de modelo diseñado
Verificar y validar del herramental

- **Justificación**

Con el propósito de reducir el tiempo y recursos empleados en el diseño, elaboración y fabricación de una pieza que pudiera producirse en fundición, se emplea el método de forja en matriz cerrada pues, provee de propiedades mecánicas diferentes a una pieza de fundición, además de reducir los desperdicios o retrabajos que se pudieran realizar, resultando para el cliente un proceso más rentable.

Debido a la elevada cantidad de piezas que el cliente solicita, es indispensable que se fabriquen en poco tiempo, y es posible otorgar dimensiones muy precisas.

Marco Teórico

- **Deformación plástica.**

Los dos tipos principales de trabajo mecánico en los cuales el material puede sufrir una deformación plástica y cambiar su forma, son trabajos en caliente y trabajos en frío. Sin embargo, como en muchos conceptos metalúrgicos, la diferencia entre el trabajo en caliente y en frío no es fácil de distinguir, pero se puede expresar de la siguiente manera; cuando al metal se trabaja en caliente, las fuerzas requeridas para deformarlo son menores y las propiedades mecánicas se cambian moderadamente cuando un metal se trabaja en frío, se requieren grandes fuerzas, por lo que el esfuerzo propio del metal se incrementa permanentemente.

Para el acero, la recristalización permanece alrededor de 500 a 700 °C, la cual le afecta en el sentido que puede llegar a fracturarse la materia prima a forjar, aunque la mayoría de los trabajos en caliente del acero se hacen a temperaturas considerablemente arriba de este rango. (Altan, 2005)

No existe tendencia al endurecimiento por trabajo mecánico hasta que el límite inferior del rango recristalino se alcanza.

Las aleaciones producidas por los primeros artesanos del hierro se clasificarían en la actualidad como hierro forjado. Para producir esas aleaciones se calentaba una masa de mineral de hierro y carbón vegetal en un horno o forja con tiro forzado. Ese tratamiento reducía el mineral a una masa esponjosa de hierro metálico llena de una escoria formada por impurezas metálicas y cenizas de carbón vegetal. Esta esponja de hierro se retiraba mientras permanecía incandescente y se golpeaba con pesados martillos para expulsar la escoria y soldar y consolidar el hierro.

El hierro producido en esas condiciones solía contener un 3% de partículas de escoria y un 0,1% de otras impurezas. (Dieter, 1961)

Con el pasar de los años se aumentó el tamaño de los hornos utilizados para la fundición y se incrementó el tiro para forzar el paso de los gases de combustión por la carga o mezcla de materias primas. En estos hornos de mayor tamaño el mineral de hierro de la parte superior del horno se reducía a hierro metálico y a continuación absorbía más carbono como resultado de los gases que lo atravesaban. El producto de estos hornos era el llamado arrabio, una aleación que funde a una temperatura menor que el acero o el hierro forjado. El arrabio se refinaba después para fabricar acero.



Fig: 3 Forja manual

Para la obtención de piezas con formas y dimensiones determinadas, se necesita la elaboración del acero como cualquier otro material metálico. Esta conformación plástica se puede realizar en caliente o en frío. La deformación plástica se consigue mediante una variedad de técnicas que, utilizando instalaciones y ciclos de fabricación apropiados, permiten diversas modalidades de deformación del material a escoger en función de la forma final deseada. Sin embargo, la deformación plástica en caliente o el conformado en caliente, se realiza llevando el material a elevadas temperaturas, a fin de obtener deformaciones importantes aplicando esfuerzos relativamente limitados. Además, los procesos de conformado en caliente permiten la modificación de la estructura metalográfica y el tamaño de grano.



Fig 4: Ejemplos de piezas forjadas

Los metales y aleaciones poseen muchas propiedades útiles en ingeniería, por lo que presentan gran aplicación en los diseños de ingeniería. Desde su utilización como materiales estructurales, resistentes a la oxidación, resistencia a altas y bajas

temperaturas, resistencia a la fatiga y elevada tenacidad son las propiedades que han permitido el enorme desarrollo de los metales hasta la actualidad y la optimización de sus propiedades.

Con la forja se realizan dos clases de trabajo:

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

Se pueden considerar las siguientes clasificaciones:

Según la geometría del proceso:

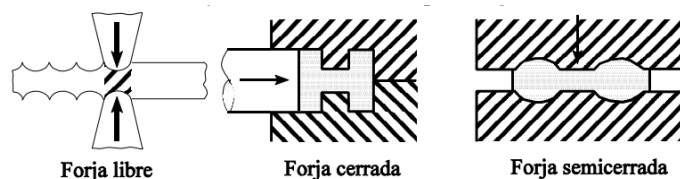


Fig 5: Tipos de forja, según simetría de proceso

Forja libre: El material se deforma libremente entre las superficies activas de los dispositivos de forja. Las herramientas se desplazan unas contra otra y carecen total o parcialmente de medidas y forma. Se fabrican piezas grandes o en número reducido.

Forja con estampa: Se utilizan herramientas conformadoras que se desplazan una contra otra (estampas) y que circundan a la pieza totalmente o en una extensión importante. Es un procedimiento de fabricación en serie. Puede ser cerrada o semicerrada.

Martillo o martinets de forja: Atacan la superficie del metal con golpes rápidos. La presión alcanza su intensidad máxima en el momento en que el martillo toca al metal y disminuye rápidamente cuando la energía del golpe se consume en la deformación del metal. En consecuencia se produce la deformación, en primer lugar, de las capas superficiales del metal.

Los martillos para forjar pueden considerarse en dos grupos, de acuerdo a sus funciones:

Para forja abierta se usan únicamente 2 dados planos para forjar la pieza requerida, para forja cerrada se utilizan dados con una forma específica, con las dimensiones requeridas por el cliente.

Prensa de forja: Se somete metal a una fuerza de compresión de poca velocidad. La presión aumenta cuando el metal se está deformando y alcanza su valor máximo en el último instante antes de la descarga y produce una zona deformada más profunda.

Durante todas las operaciones de trabajo en caliente, el metal está en estado plástico y es formado rápidamente por presión. Adicionalmente, el trabajo en caliente tiene las ventajas siguientes:

- La porosidad en el metal es eliminada. La mayoría de los lingotes fundidos contienen muchas pequeñas sopladuras. Estas son prensadas y a la vez eliminadas por la alta presión de trabajo.
- Las impurezas en forma de inclusiones son destrozadas y distribuidas a través del metal.
- Los granos gruesos o prismáticos son refinados, dado que este trabajo está en el rango recristalino, sería mantenido hasta que el límite inferior es alcanzado para que proporcione una estructura de grano fino.
- Las propiedades físicas generalmente se mejoran, principalmente debido al refinamiento del grano. La ductilidad y la resistencia al impacto se perfeccionan, su resistencia se incrementa y se desarrolla una gran homogeneidad en el metal. La mayor resistencia del acero laminado existe en la dirección del flujo del metal.
- La cantidad de energía necesaria para cambiar la forma del acero en estado plástico es mucho menor que la requerida cuando el acero está frío.

Todos los procesos de trabajo en caliente presentan unas cuantas desventajas que no pueden ignorarse. Debido a la alta temperatura del metal existe una rápida oxidación o escamado de la superficie con acompañamiento de un pobre acabado superficial.

Como resultado del escamado no pueden mantenerse tolerancias cerradas. Así mismo, el equipo para trabajo en caliente y los costos de mantenimiento son altos, pero el proceso es económico comparado con el trabajo de metales a bajas temperaturas. El término acabado en caliente, se refiere a barras de acero, placas o formas estructurales que se usan en estado "laminado" en el que se obtienen de las operaciones de trabajo en caliente. Se hacen algunos desescamados pero por lo demás el acero está listo para usarse en puentes, barcos, carros de ferrocarril, y otras aplicaciones en donde no se requieren tolerancias cerradas. El material tiene buena soldabilidad y maquinabilidad, dado que el contenido de carbono es menor del 0.25%. Algunos de los principales métodos de trabajo en caliente de los metales son; Laminado, Forjado, Estampado, Extrusión, Embutido, etc.

Mecanismo de la deformación plástica (permanente).

Los materiales en su totalidad se deforman a una carga externa, se sabe además que hasta cierta carga límite el sólido recobra sus dimensiones originales cuando se le quita la carga. La recuperación de las dimensiones originales al eliminar la carga es lo que caracteriza como comportamiento elástico, pero al sobrepasar el límite elástico, el cuerpo sufre cierta deformación permanente, entonces se dice que ha sufrido una deformación plástica permanente. El comportamiento general de los materiales bajo carga se puede clasificar como dúctil o frágil según el material muestre o no capacidad para sufrir deformación plástica.

SolidWorks

SolidWorks es un software CAD (diseño asistido por computadora) para modelado mecánico en 2D y 3D, desarrollado en la actualidad por SolidWorks Corp., una filial de Dassault Systèmes, S.A. (Suresnes, Francia), para el sistema operativo Microsoft Windows. Su primera versión fue lanzada al mercado en 1995 con el propósito de hacer la tecnología CAD más accesible.



Fig 6: Logo de SolidWorks

El programa permite evaluar de una forma rápida el rendimiento del modelo de análisis. La gran ventaja de éste frente al método analítico es la posibilidad de poder modificar las condiciones de contorno y criterios del análisis de una manera mucho más dinámica, además de la obtención de resultados más precisos. En lo que respecta al análisis de fatiga, es un programa que ofrece unos resultados orientativos a la hora de determinar la zona de fallo, y una buena aproximación en lo que respecta a la vida de la pieza. (Solidworks, 2017)

Forjado por matriz de impresión y matriz cerrada

No se puede crear formas complejas con gran precisión por medio de técnicas de forjado en matriz abierta. Se requiere modelos especialmente preparados que contienen la forma negativa de la forja que se va a producir: el proceso se simplifica hasta una secuencia de carreras sencillas de compresión, a costa de una forma compleja de la matriz. Teniendo presente que la mayor preocupación es debida a que el material debe llenar en su totalidad la matriz sin defectos en su flujo, como podrían ocurrir cuando las partes del material de la pieza de trabajo se pellizcan, se doblan o se cortan por completo y sí así sucediera debe rediseñarse el herramental para promover un flujo uniforme del material.

Secuencia de forjado.

Una forma compleja no se puede llenar sin defectos (y desgaste excesivo de la matriz), simplemente forjando la barra de inicio en la cavidad de la matriz terminada. Son precisos varios pasos intermedios:

1. El primer objetivo es distribuir el material en forma correcta, de manera que cambie poco el área de la sección transversal en la matriz de acabado. Para este fin, se deben realizar operaciones de forjado libre (en matriz abierta) en superficies formadas especialmente en los bloques de la matriz, en equipo de forjado separado o incluso por otros métodos de separación como la laminación.

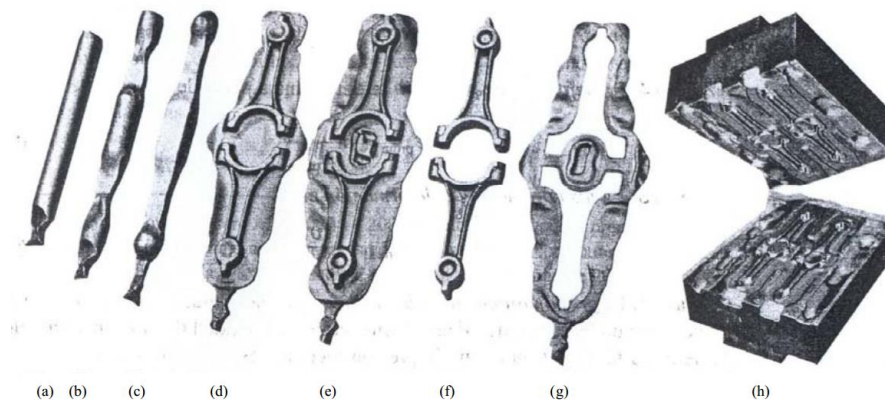


Fig 7: Forjado en martinete de dos bielas; a) Material en barra, b) Batanear, c) Laminado
d) Conformado aproximado e) Terminado, f) Recortado, g) Rebaba, h) Matrices de forjado

2. La preforma se puede acercar más a la configuración final forjando en una *matriz* de bloques, lo cual asegura la distribución adecuada del material pero no proporciona la forma final (Figura 7a). Se permite que el exceso de material salga entre las superficies planas de la matriz, y luego esta *rebaba* se remueve algunas

veces (recorta) antes del forjado posterior.

3. La forma final se imparte en la matriz de acabado. De nuevo se permite que el material en exceso escape en forma de rebaba, la cual ahora debe ser delgada para ayudar al llenado de la matriz y producir tolerancias cerradas.

Como regla general el espesor de la rebaba es $h = 0.015(A)^{0.5}$ (mm), donde A es el área proyectada de la forja (mm^2). Una rebaba delgada que sale entre superficies paralelas de la matriz conduce a, razones elevadas L/h y a grandes presiones de la matriz. Por lo tanto, L se reduce cortando un canal para rebaba (Figura 7b); esto permite su libre flujo y limita su espesor mínimo a sólo un ancho pequeño, el *campo* de la rebaba (generalmente, con un ancho de $3h$ a $5h$). La rebaba se recorta ya sea en caliente o en frío, en una matriz separada que parece una matriz para blancos.



Fig 8: Sobrante de una pieza forjada después del corte y a temperatura ambiente

Herramental

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

a) **Dado plano.** La superficie de los dados debe ser paralela para evitar el adelgazamiento en algunas zonas de la pieza de trabajo. Tienen un ancho que va de 305 a 510 mm, sin embargo, la mayoría de los dados existentes se encuentran en un rango de 405 a 455 mm de ancho. Los vértices de los dados son redondeados para prevenir pellizcos o rasgaduras a la pieza de trabajo en la etapa de deformación. Los dados planos son usados para forjar barras, formas planas y redondas. Dados grandes son usados cuando el flujo cruzado es necesario o bien, cuando la pieza de trabajo es estampada mediante cargas repetidas. Dados más estrechos son empleados para cortar o rebajar secciones cruzadas.

b) **Dado de estampa.** Son básicamente dados planos con forma semicircular insertada en sus centros. El radio del semicírculo corresponde al diámetro más pequeño de eje que es posible producir. Los dados para estampa ofrecen las siguientes ventajas sobre los dados planos en la formación de barras redondas: Mínimo lado de pandeo, movimiento longitudinal del metal, mayor deformación en el centro de la barra y una operación más rápida. Algunas desventajas son la imposibilidad de forjar barras con más de una medida, en la mayoría de los casos y marcar o cortar las piezas.

c) **Dados en V.** Llegan a ser usados para producir partes redondas, pero generalmente se emplean para forjar cilindros huecos, de tochos huecos. Un mandril es usado con los dados en V para formar el centro del cilindro. El ángulo normalmente usado se encuentra entre 90 y 120°.

d) **Dados de impresión.** Los dados para el proceso de forja de dado cerrado son normalmente diseñados para forjar la pieza en un solo golpe, algunos mecanismos de eyección se usan y se incorporan en el mismo dado. Algunos dados contienen las impresiones de varias partes.

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

- **Canteadoras.** El material se mueve para crear secciones gruesas que serán formadas en bloques o estampas de acabado. Las canteadoras pueden estar abiertas de un lado o cerradas. En ocasiones se emplean en combinación con un doblador, en un troquel común de estampa.

- **Llenadoras.** El propósito de ellas es reducir la sección transversal de una pieza, alargándola. Su acción es opuesta a la de la estampa canteadora. Para producir un flujo óptimo de material sin crear defectos como dobleces, traslapes o pliegues, estas estampas son ovales o elípticas en su sección transversal longitudinal. Pueden estar combinadas con estampas canteadoras o de rodillo o ser la única estampa antes de las etapas de bloqueo o acabado. Debido a que las estampas llenadoras con frecuencia son la primera etapa en la operación de forja, por lo común se encuentran localizadas en el extremo de la matriz.

- **Niveladoras.** Como el nombre lo indica, este tipo de estampas extienden la pieza de trabajo de tal forma que llene la siguiente estampa de la matriz. Otro de sus propósitos es reducir la anchura al tamaño de la matriz de la estampa, rotando el material con giros de 90°.

- **Redondeadores.** Con este tipo de estampas, el material es redondeado a partir de una forma cuadrada o es formado para prepararlo para la siguiente etapa. Su acción es similar a la de la canteadora, pero en este caso el metal está encerrado por todos lados. El dado superior e inferior contienen cavidades parecidas a razones poco profundas.

- **Divisoras.** Las forjas tipo trinche se suelen llevar a cabo en este tipo de estampas en las cuales se fuerza el material hacia afuera en el sentido del eje longitudinal. Para evitar la formación de dobleces, traslapes o pliegues se dejan radios amplios en el dado.

- **Bloqueadoras.** Esta estampa precede a la estampa de acabado y se encarga de refinar la forma de la pieza de trabajo para la última etapa y tienen casi la misma forma de la estampa de acabado. Esto ayuda a facilitar el flujo de metal y disminuye las posibilidades de defectos. De hecho algunas estampas bloqueadoras se hacen en la misma forma que las de acabado y después algunas proporciones se redondean para suavizar la transición. (Davis, 1996)

- **Acabadoras.** En este tipo, el exceso de material en la pieza de trabajo sale por los rebordes. En otras máquinas, la pieza es desbarbada y en algunos casos, acuñada o dimensionada.

Dureza Brinell

Es una escala de medición de la dureza de un material mediante el método de Indentación, midiendo la penetración de un objeto en el material a estudiar. Fue propuesto por el ingeniero sueco Johan August Brinell en 1900, siendo el método de dureza más antiguo. (Fundación Wikimedia, Inc., 2018)

Este ensayo se utiliza en materiales blandos (de baja dureza) y muestras delgadas. El indentador o penetrador usado es una bola de acero templado de diferentes diámetros. Para los materiales más duros se usan bolas de carburo de tungsteno. En el ensayo típico se suele utilizar una bola de acero de 1 a 12 milímetros de diámetro, con una fuerza de 3.000 kilopondios. (Fundación Wikimedia, Inc., 2018)



Fig 9: Durómetro Brinell

El valor medido es el diámetro del casquete en la superficie del material. Las medidas de dureza Brinell son muy sensibles al estado de preparación de la superficie, pero a cambio resulta en un proceso barato, y la desventaja del tamaño de su huella se convierte en una ventaja para la medición de materiales heterogéneos, como la fundición, siendo el método recomendado para hacer mediciones de dureza de las fundiciones.

Desarrollo

Las características de las estampas de forja son muy variables y se puede considerar que no existe una solución única para cada caso. Para definir la precisión de la forja, el material de la estampa y la forma cómo se llevará a cabo el proceso, es necesario considerar:

1. Número de piezas que van a producirse, geometría y peso de dichas piezas:

La cantidad de piezas por lote de producción es considerada a 350 piezas.

2. Material de las piezas:

El acero que se usará será un AISI 1029, que es el acero designado por el cliente

3. Equipo disponible:

Dentro de la planta se cuenta con 5 martillos de forja neumáticos, con diferente capacidad de presión de trabajo y 3 prensas de forja, en la Tabla 1 se muestra las diferentes capacidades de cada prensa.

Tabla 1: Capacidad de los diferentes martillos de forja en la planta

MARTILLO	CAPACIDAD	MARCA	PESO DE PIEZA
1	1000 PSI	BANING	0.5 – 2 KG
2	2000 PSI	BANING	0.5 – 5 KG
3	3000 PSI	BANING	8 – 20 KG
6	6000 PSI	ZYGMUNT	15 – 25 KG
8	8000 PSI	BANING	25 – 55 KG



Fig 10: Martillo BANNING 3000 PSI

Tabla 2: Capacidad de las prensas en la planta

PRENSA	CAPACIDAD	MARCA	PESO DE PIEZA
P 750	750 TONS	NATIONAL	0.5 – 4.5 KG
P 2000	2000 TONS	NATIONAL	8 – 20 KG
P 2500	2500 TONS	AJAX	20 – 30 KG



Fig 11: Prensa AJAX 2500

4. Número y configuración de los pasos de preformado

Para esto será necesario definir el número de piezas, las características del material de partida, el equipo y las tolerancias de la forja.

5. Dimensiones de la rebaba en preformas y pasos acabadores

6. Carga y energía para cada operación de forja

7. Tolerancias requeridas, así como en acabado

No es requerido ningún tratamiento térmico, solamente un acabado de granallado sobre la superficie de la pieza.

Selección de materiales para fabricación de herramientas

La elección de un material adecuado y su transformación posterior en un producto utilizable, con una forma y unas propiedades prefijadas, es un proceso complejo. Los artículos manufacturados casi todos atraviesan la secuencia: proyecto - selección de materiales - evaluación- rediseño. En el método del historial se admite que antes ya funcionó algo con éxito y que piezas similares pueden construirse con los mismos materiales y los mismos métodos. Este punto de vista es útil, pero leves variaciones en las condiciones de servicio pueden perfectamente requerir unos materiales o unas operaciones distintos. Además, excluye el uso de nuevas técnicas, nuevos materiales y otros adelantos industriales que hubieran aparecido desde la formulación de la solución anterior. Igualmente, imprudente sería ignorar por completo lo valioso de las experiencias pasadas.

Sin prejuicios relativos a materiales ni métodos de fabricación, el diseñador debe formarse una imagen clara de las características que necesariamente debe cumplir la pieza para que se ajuste aceptablemente a su misión. Los condicionantes generales podrían ser divididos en tres categorías principales: consideraciones de forma o geometría, características físicas en general, y aspectos de fabricación. Las consideraciones acerca de la forma influyen primordialmente en la elección del método de fabricación.

La definición de las propiedades físicas acostumbra a ser una labor mucho más compleja. Entre los aspectos a considerar tenemos: Propiedades mecánicas, Propiedades físicas. Otra zona importante para evaluar es el ambiente en que el producto debe prestar servicio a lo largo de su vida. Una última categoría de condicionantes atañe a los diversos factores que influyen en el método de fabricación. (Paul DeGarmo, 2015)

Los aceros para herramientas son hechos y procesados para lograr altos estándares de control y calidad y son utilizados principalmente para herramientas, troqueles y diversos componentes mecánicos que demandan aceros con propiedades especiales. Para la fabricación del herramental es necesario que soporten grandes cantidades de carga, aceros especiales que pueden soportar las condiciones de temperatura, fricción, fatiga, etc.

El agrupamiento de los aceros para herramienta publicados por la AISI han sido de utilidad y los 9 grupos principales y sus símbolos correspondientes son dados como sigue:

Tabla 3: Tipos de acero.

Nombre	Símbolo
Acero para herramientas endurecidas en agua	W
Acero para herramientas resistentes al impacto	S
Acero para herramientas endurecidas en aceite	O
Acero para herramientas endurecidas al aire	A
Acero para herramientas alto carbón y alto cromo	D
Acero para herramientas para formado	P
Acero para herramientas para trabajo en caliente cromo, tungsteno, y molibdeno	H
Aceros para herramienta de tungsteno, alta velocidad	T
Acero para herramienta de molibdeno alta velocidad	M

De empresa se manejan 4 aceros de grado herramental diferentes para fabricar dados, aunque existen otros en el mercado, estos son:

L6:

Acero grado herramienta para temple al aceite, de uso general para herramientas de trabajo en frío, así como para piezas de maquinaria que requieren alta dureza y alta tenacidad. Por su contenido de níquel ofrece mayor tenacidad comparado con otros aceros de temple al aceite.

Tabla 4: Composición química del L6.

COMPOSICIÓN QUÍMICA - % PROMEDIO:						
C	Mn	Si	V	Cr	Mo	Ni
0.70	0.65	0.25	0.25	0.75	0.30	1.45

AISI H13

El acero H13 es un acero para herramientas de trabajo en caliente con una excelente combinación de dureza y resistencia a la fractura, con el mantenimiento de estas propiedades a temperaturas de hasta 600 ° C, la resistencia a los choques térmicos y grietas por fatiga térmica, este acero también tiene niveles maquinabilidad, pulido y la respuesta al importante texturización para el segmento de fabricación de moldes para inyección de plástico. Apropiado utilizar en muchas aplicaciones diferentes, tales como matrices de forja en caliente en prensas, moldes para aleaciones de aluminio de extrusión, de fundición a presión o de gravedad aleaciones no lo hacen, polímeros ferrosos moldes de inyección abrasivos tales como termoestable.

Tabla 5: Composición química del AISI H13.

C: 0.40	Mn:0,4	Si: 1.0	Cr: 5.0	Mo: 1.30	V: 1.0
----------------	---------------	----------------	----------------	-----------------	---------------

Se suministra en estado recocido con una dureza máxima de 230 HB.

AISI D2

El acero GGD D2 es un acero de herramientas para trabajo en frío más frecuentemente utilizados en la industria del metal y mecánica, en particular en el frío. La industria de conformación y corte se trata térmicamente a alta dureza manteniendo una buena resistencia a la fractura. Es un acero con alta dureza de la dureza de penetración y excelente estabilidad dimensional y forma. Debido a su estructura, carburos duros que contienen cromo y una alta dureza después del tratamiento térmico, el acero GGD D2 tiene excelente resistencia al desgaste abrasivo tanto como adhesivo.

El acero de herramienta D2 GGD se utiliza matrices y punzones conformación y corte, herramientas para el plegado, una fuente, extrusión, hilos peines y cuchillos de rodadura en general. (GDD METALS, 2017)

Tabla 6: Composición química del AISI D2.

Composición Química

C	Mn	Si	Cr	Mo	V
1,50	0,60	0,60	12,0	1,00	1,00

AISI S1

El acero GGD de S1 tiene una alta resistencia al impacto en un amplio intervalo de dureza. Por lo tanto, se puede utilizar en aplicaciones de trabajo en caliente o en frío. Tiene buena resistencia a la fatiga y al desgaste. En casos especiales se puede cementar para optimizar el compromiso entre su alta dureza con la resistencia a desgaste de la superficie.

Se utiliza en la fabricación de cinceles, cinceles, cuchillos para cortar placas de acero, muere por estampación, estampación en frío. En el trabajo en caliente se utiliza en punzones, cuchillos para moler, martillos de apoyo para la forja, moldes para plásticos, martillos neumáticos, herramientas para la represión y ejercicios concretos. (GDD METALS, 2017)

Tabla 7: Composición química del AISI S1.

C	Mn	Cr	W	V
0,50	0,25	1,50	2,00	0,20

El tipo de acero más adecuado para elaborar los herramientales es el H13, o alguno de la serie H que por las características y la disponibilidad se escogerá el H13, Las herramientas fabricadas con el acero H13 pueden ser usadas a temperaturas de hasta aprox. 540°C (1000°F) con exposiciones breves de hasta 595°C (1100°F), siendo ideal para dados de forja, herramienta para extruido en caliente y moldes de fundición a presión.

Consideraciones en el diseño de estampas.

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

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

El dado de terminado es diseñado con tolerancias que incluyen rebaba, desmoldeo, contracción de material, biseles y radios de esquina, líneas de división y posicionamiento. En forjas de múltiple etapa, las geometrías de las preformas son seleccionadas, los dados de bloqueo son diseñados, y la geometría inicial del lingote es

determinada. Al realizar estas selecciones, el diseñador de forja considera parámetros como flujo de grano, líneas divisoras, dimensiones de la rebaba, ángulos de desmoldeo, biseles y radio de las esquinas.

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

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

Diseño mecánico de herramientas.

Se puede crear un molde con una secuencia de herramientas integradas para controlar el proceso completo de creación de moldes. Estas herramientas de molde se pueden utilizar para analizar y corregir deficiencias en modelos de piezas SOLIDWORKS o importados que se desean moldear.

Las herramientas de moldes van desde el análisis inicial a la creación de operaciones Núcleo/Cavidad. El resultado de Núcleo/Cavidad es una pieza multicuerpo que contiene sólidos independientes para la pieza moldeada, el núcleo, la cavidad y otros sólidos opcionales, como por ejemplo núcleos laterales. El archivo de la pieza multicuerpo conserva su intención de diseño una ubicación conveniente. Los cambios en la pieza moldeada se reflejan automáticamente en los sólidos de moldeo. (Solidworks, 2017)

Precisión de la forja.

La precisión del proceso de forja es afectada por diversas variables, las cuales se muestran en la Tabla 8, estas variables se encuentran clasificadas en tres principales categorías. En el primer grupo pueden ser modificadas antes de comenzar con el proceso. El segundo grupo incluye aquellas variables que son afectadas durante el proceso; y finalmente el tercer grupo incluye las variables que llegan a afectar una vez terminado el proceso de forja.

Tabla 8: Precisión de forja.

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

a) Variables antes del proceso.

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

La Tabla 9 muestra los métodos comunes de maquinado con sus respectivas precisiones. La precisión posicional es afectada en gran medida por el hundimiento del dado y la capacidad para colocar una impresión en el bloque del dado relativo a las superficies de referencia. En los dados bien hechos, la posición de la impresión debe estar cerca de 0.01 mm de referencia. (Douglas, 2000)

Tabla 9: Proceso de manufactura de dado con relativas precisiones (Douglas, 2000)

Proceso	Precisión dimensional (μm)	Superficie de Rugosidad Rt(μm)
En frio	10	< 5
En caliente	50	< 15
Torneado	10	< 12
Fresado	200	< 15
Electro erosionado	5	< 5

b) Variables de la máquina.

La precisión de la forja depende de la máquina también, dicha precisión es afectada por la rigidez, dirección, cargas y energía repartida por el sistema. En las prensas mecánicas, como la carga varía el espesor de forja varía también. La prensa de forja permite una configuración guiada de los dados y eyectores, esto mejora la precisión horizontal. Los eyectores permiten un forjado de formas más exactas. En prensas de tornillo y martinete se tiene un excelente control de la dimensión del grosor.

c) Variables durante el proceso.

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

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

La formación de óxido y descarburación están relacionados con el tiempo, temperatura, atmósfera del horno y el material. El acero comienza a oxidarse cerca de los 204°C (400 °F), sin embargo la oxidación grave comienza hasta que el material alcanza los 843 °C (1550 °F). El lingote no debe mantenerse por un largo tiempo a la misma temperatura, una atmósfera protectora o un revestimiento protector resultan útiles para prevenir óxido, si éste es inevitable debe ser removido, al menos antes de la primera etapa de forjado. (Dieter, 1961)

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

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

El desgaste es un factor que no solo afecta la precisión sino también la economía del proceso, normalmente 70% de la sustitución de dados es debido este fenómeno.

Estos son cambiados porque ya no mantienen las tolerancias requeridas.

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

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

d) Variables después del proceso.

El desbastado es usado para incrementar la precisión de la forja. En algunos casos para remover el ángulo de desmoldeo y mejorar el radio de las esquinas. Sin embargo, este proceso deforma la pieza de trabajo y modifica su precisión. En los casos más sencillos donde se emplea para remover el cordón resultante de rebaba, si la herramienta se encuentra excesivamente desgastada o desalineada, el resultado de distorsión es inaceptable. En otros casos, donde la forma es más compleja, la pieza es sujeta cuidadosamente, para evitar la más mínima distorsión.

Una práctica normal de tratamiento térmico, empleado en forja convencional, es inaceptable en una de precisión y resulta en exceso de óxido, superficie descarburizada, o distorsión.

Tolerancias para forja de precisión.

La norma alemana para tolerancia de forja, DIN 7526 (1969), presenta valores de tolerancia para ambos casos, un proceso normal o de precisión. Es conocido que esto toma en cuenta el peso, complejidad, y la dificultad del material a ser forjado. La Tabla 10 ilustra un ejemplo de tolerancias de la norma mencionada. Las tolerancias de esta aplican para dimensiones de largo, ancho y alto, incluyen los diámetros de un lado de la línea de partición; todas las variaciones, incluyendo aquellas relacionadas debido al desgaste del dado.

Tabla 10: Tolerancias de forja para el largo, ancho y alto de un lado de la línea de partición de la DIN 7526 (Norma alemana, 1969)

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

Procedimiento:

Se partió de la pieza final deseada. En la Fig 13 Se aprecia la geometría obtenida después de realizar el último paso de forja, corte de rebaba y operaciones de maquinado. Dicha pieza fue elaborada mediante SolidWorks, partiendo de la pieza original y de planos otorgados por el cliente.



Fig 12: Vista isométrica de la pieza final requerida

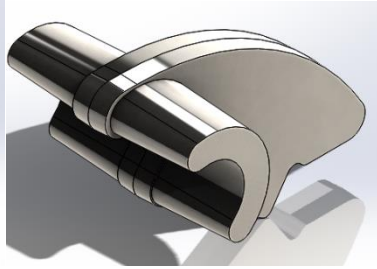


Fig 13: Vista lateral de la pieza final requerida



Fig 14: Figura Original

En el proceso de forja, el dado aplica cargas normales a la pieza; por lo que existen elementos dentro de la biela que sólo pueden ser obtenidos mediante operaciones de maquinado posteriores al último proceso de forjado. Por ello se deben eliminar estas operaciones al momento de diseñar los herramientales.

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

El factor de tolerancia largo/ancho es ± 0.003 mm por cada mm y aplica a todas las dimensiones largo/ancho e incluye diámetros. Esta tolerancia incluye contracción, hundimiento del herramental y variaciones de pulido. (FIA Global, s.f.)

Las tolerancias para el desgaste del material son aplicadas junto con las de largo/ancho. Para las dimensiones del largo, ancho y diámetros menores de 750 mm, se calculan multiplicando la longitud o diámetro de la pieza por el factor de 0.005, considerando como material acero al carbono de baja aleación. (FIA Global, s.f.)

Ambos valores son sumados y llevados al decimal próximo ascendente. Finalmente el valor obtenido es sumado a la dimensión inicial si se trata de una medida exterior, o restado si es interior.

En el siguiente paso se eliminan las geometrías difíciles de alcanzar mediante el proceso de forja, dada la complejidad del flujo de material a través de esas regiones y en que la fuerza necesaria para lograr la deformación es mayor.



Fig 15: Pieza original a detalle

Estas operaciones podrán mecanizarse después, o en el caso de las letras es posible grabarlas dentro del herramental.

Ángulo de Salida:

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

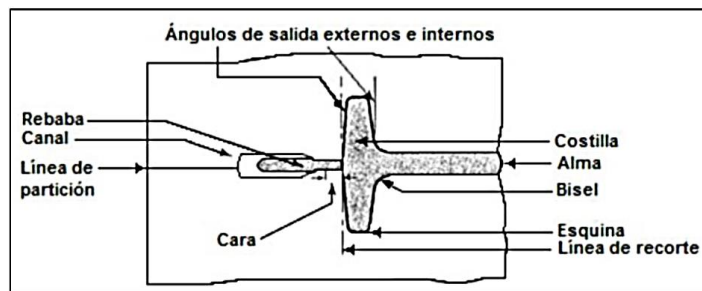


Figura 16: Diseño general de un dado por forja cerrada (Schey, 2002)

Tabla 11: Valores generales para los ángulos en una matriz de forja, de acuerdo al tipo de ángulo (Schey, 2002).

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

Para evitar que una pieza forjada se atore dentro del molde al momento de accionar la prensa o martillo, es necesario agregar un ángulo de salida e inspeccionar si no existen geometrías que puedan generar malformaciones en las piezas forjadas, para esto se usan las herramientas de moldeo en Solidworks, Fig 17.

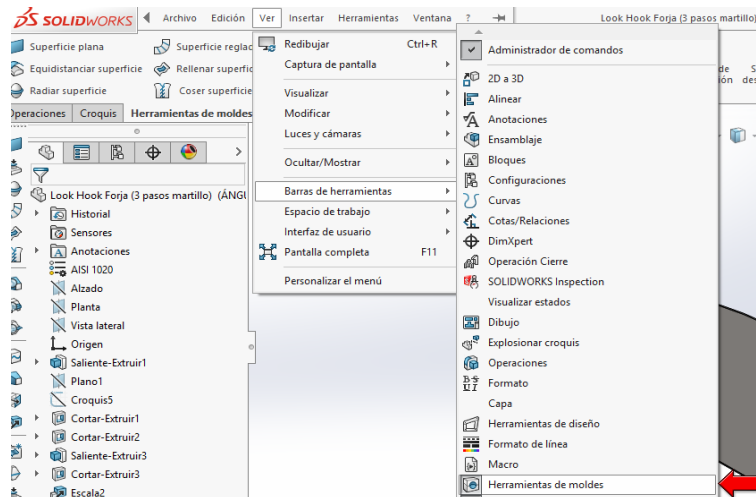


Fig 17: Ubicación de herramientas de moldes.

El proceso es el siguiente:

Examina las caras del modelo para determinar si el ángulo de salida es suficiente para asegurar que la pieza se pueda expulsar correctamente del núcleo/cavidad, introduciendo un ángulo de 5° , arroja un ángulo de salida necesario.(Fig 18)

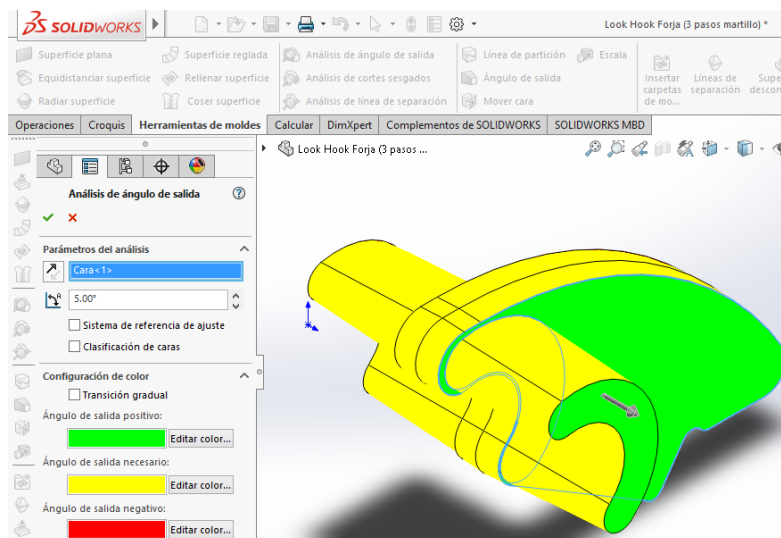


Fig 18: Análisis de ángulo de salida.

Se puede reducir el ángulo de salida a 3° , ángulo máximo permisible sin que cause interferencia. En la Fig 19 se muestra una pieza libre de interferencia y se podrá construir el molde o los posibles moldes.

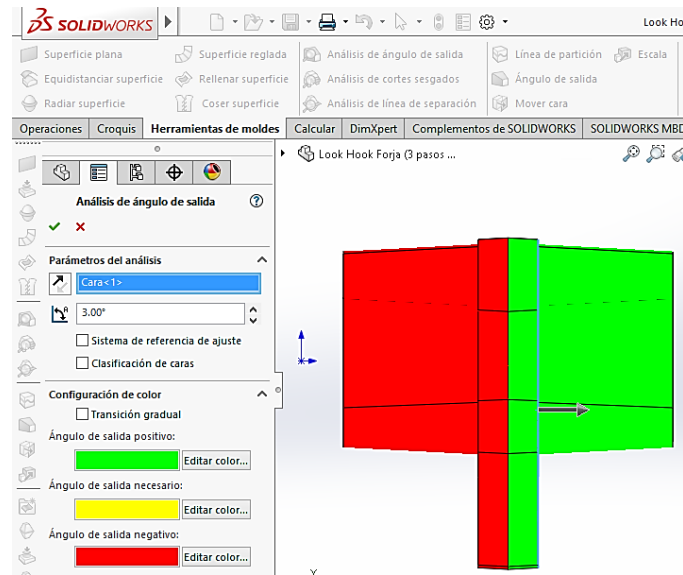


Fig 19: Determinación del ángulo de salida.

Análisis de corte sesgado:

Identifica áreas atrapadas que no permiten expulsar la pieza, en este caso la pieza es simétrica y se puede identificar fácilmente una dirección de desmolde, en este caso se debe evitar las zonas con color rojo.

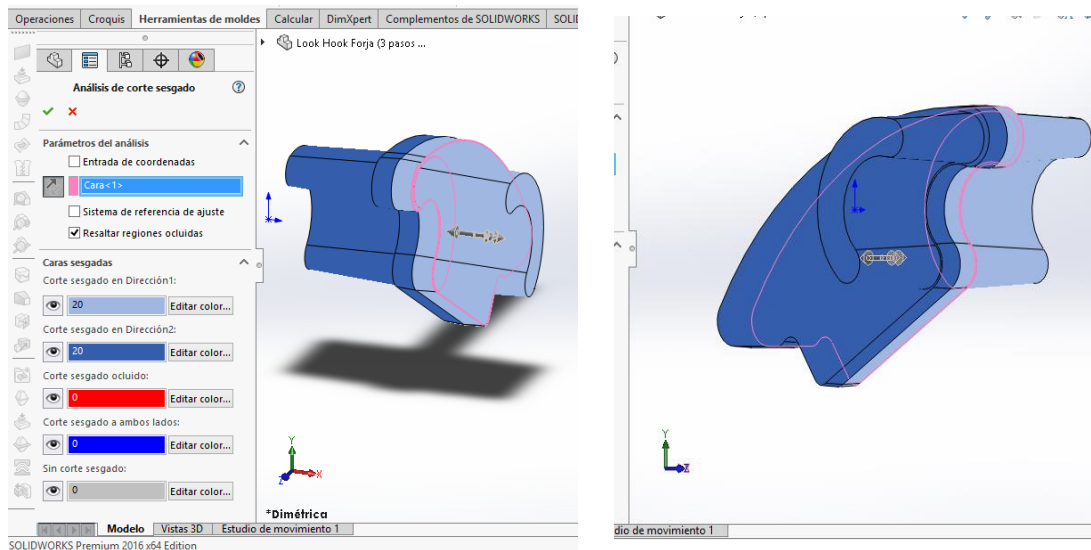


Fig 20: Línea de partición.

Análisis de línea de partición:

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

determina el costo del dado, los requerimientos del diseño, flujo del material y los procedimientos de corte.

En la mayoría de las forjas, la línea de partición se encuentra en la sección transversal más grande, ya que resulta más sencillo dispersar el material por la acción de la forja, que por la fuerza de una impresión profunda. En este caso la sección transversal más grande coincide con un lado plano de la forja y no hay zonas o geometrías que no permitan expulsar la pieza, existe una ventaja particular en la localización de la línea de partida a lo largo de las aristas de sección plana, por ello se posiciona la impresión completa en una mitad del dado. Los costos del dado se reducen, porque un dado es simplemente una superficie plana, además elimina la posibilidad de desajustes entre el dado superior e inferior, favoreciendo el corte de rebaba.

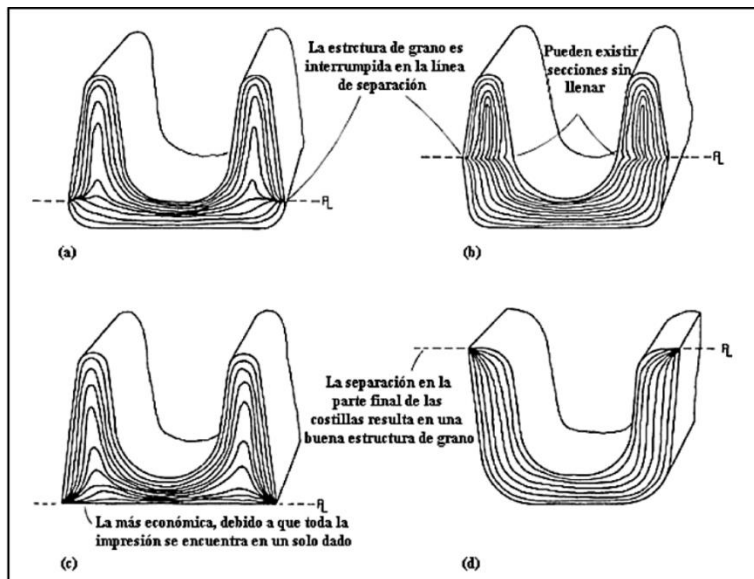


Fig 21: Efecto en los patrones de flujo de varias colocaciones de la línea de partición en una sección canal a) y b) No deseado; estas líneas resultan en un flujo de grano que produce defectos de forja. c) y d) Recomendado; patrones de flujo de metal suaves en acciones sometidas a esfuerzos grandes (Davis, 1996)

Líneas de separación:

Esta herramienta tiene dos funciones:

- Verifica si se ha aplicado el ángulo de salida a su modelo, con base en el ángulo especificado por usted.
- Crea una línea de separación desde la cual se crea una superficie de separación.

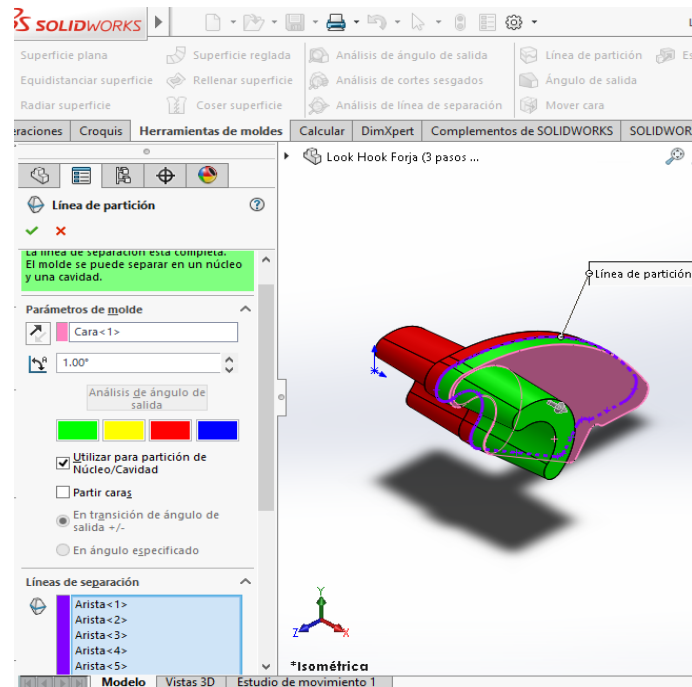


Fig 21: Línea de separación determinada.

Superficies de separación:

Se extrude desde la línea de separación para separar la cavidad del núcleo del molde. También puede utilizar una superficie de separación para crear una superficie de bloqueo. A partir de esta superficie se crean los dados o moldes inferior y superior de una matriz.

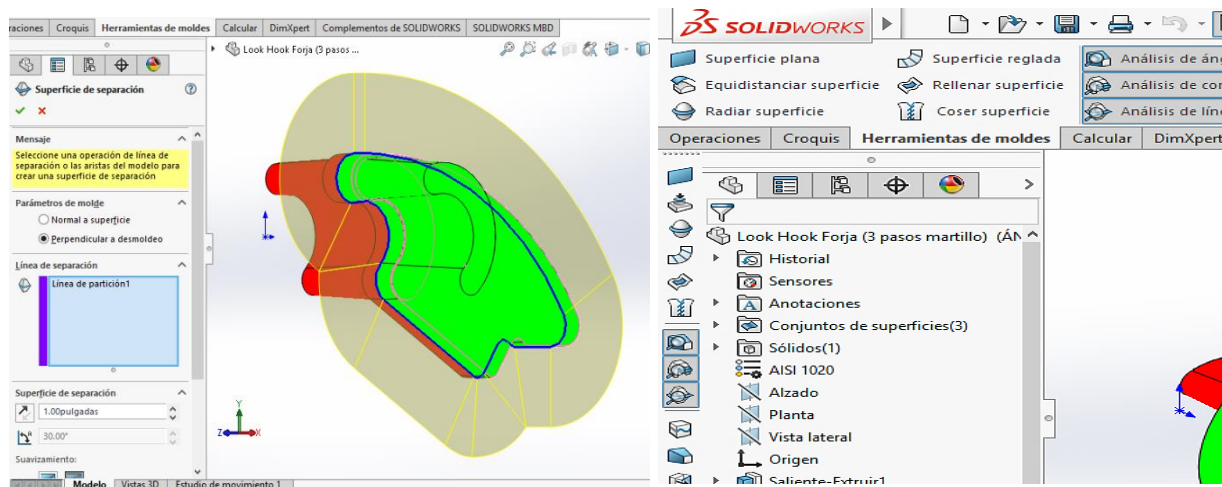


Fig 22: Geometría de separación.

Núcleo/Cavidad:

Se pueden crear las geometrías de los dados, crea los sólidos del núcleo y la cavidad basándose en los pasos realizados anteriormente.

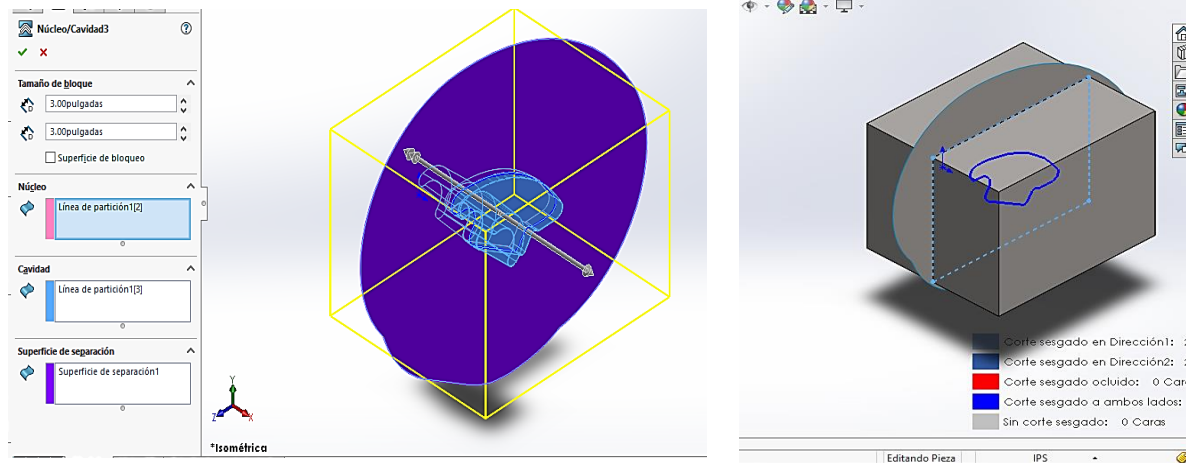


Fig 23: Núcleo/Cavidad.

Una vez dibujados ambos dados, se pueden guardar por separado, para ser modificados y dibujar las partes faltantes como la “Cola de milano” en caso de que el molde vaya a ser utilizado en un martillo o barrenos en caso de sujetarlos en una prensa.

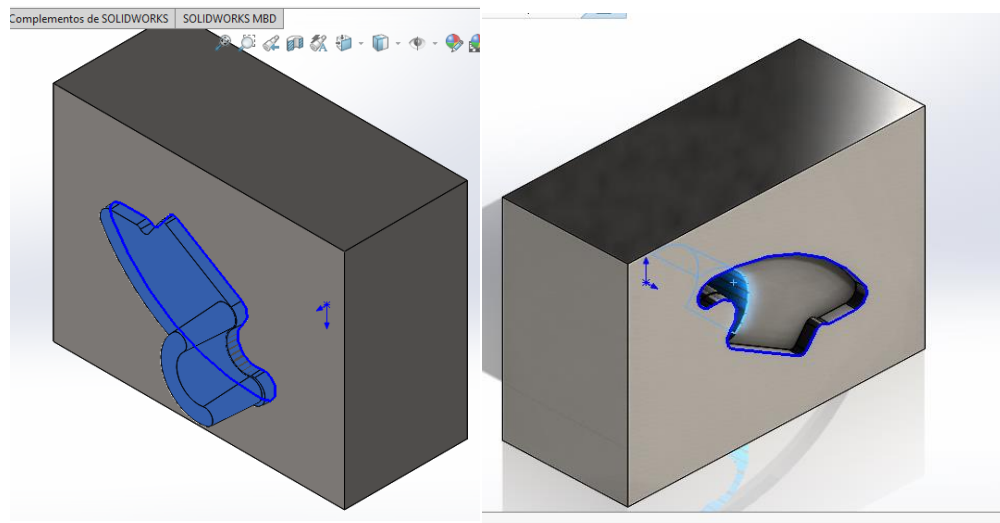


Fig 24: Molde primario.

Una vez conocido el procedimiento de cómo crear moldes mediante Solidworks se propusieron los modelos de las Fig 25, 26 y 27:

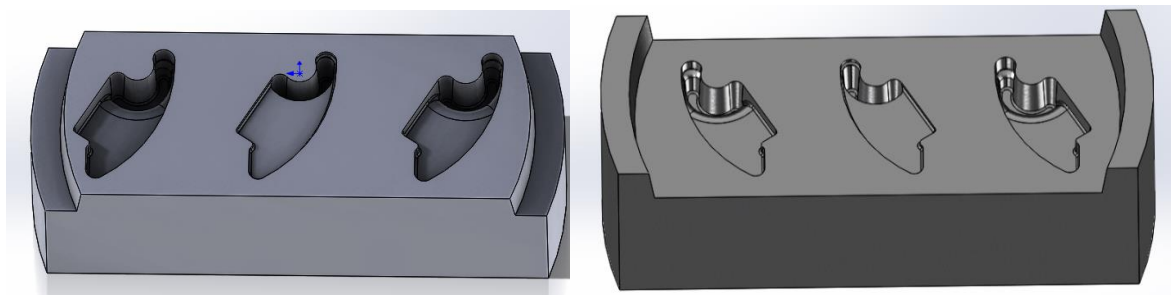


Fig 25: Dado de tres preformas para prensa.



Fig 26: Dados para martillo con 3 preformas, inferior y superior.

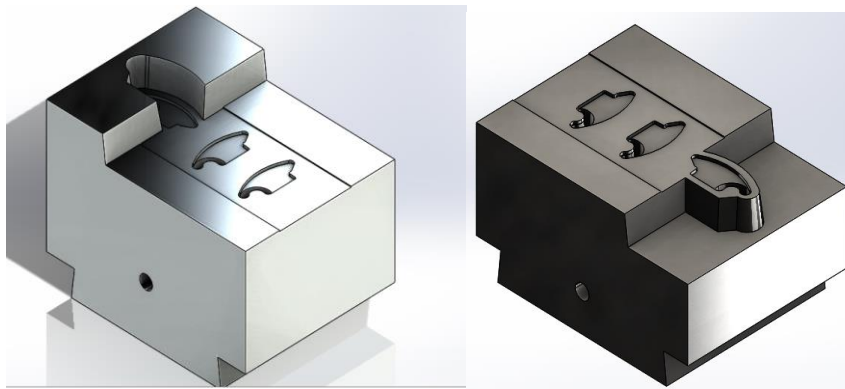


Fig 27: Dado de tres preformas para prensa inferior y superior.

Es conocido que se debe contar con un sobre volumen del material de trabajo para garantizar el completo llenado de las cavidades del dado; el exceso de material debe ser desplazado formando la denominada rebaba, sus dimensiones influyen en la fuerza de forja, la energía de forja y la tolerancia de rebaba empleada para determinar el volumen inicial del lingote. Las dimensiones de la rebaba sólo pueden variar de las siguientes tres maneras: cambiando el ancho de la rebaba, manteniendo un espesor constante; cambiando el espesor y manteniendo un ancho constante; y cambiando el ancho y espesor con una relación constante.

Análisis estructural de su funcionamiento

El análisis estructural es el proceso de cálculo y la determinación de los efectos de las cargas y fuerzas en una estructura de, edificio u objeto. El análisis estructural es particularmente importante para los ingenieros de diseño estructural para asegurar

que entienden por completo las vías de carga y los impactos de las cargas de tener en su diseño de ingeniería. Se permite a los ingenieros y diseñadores para asegurar una pieza de equipo o estructura es segura para su uso bajo las cargas estimadas que se espera para soportar. Un análisis estructural se puede realizar durante el diseño, prueba o posterior a la construcción y en general representarán los materiales utilizados, la geometría de la estructura y las cargas aplicadas.

De las 3 propuestas presentadas, se selecciona sólo una para su posterior fabricación, debido a la geometría de la pieza es muy difícil que se logre fabricar con una sola preforma, además de que sería necesario muchos golpes de recalque, lo que reduciría la vida útil del dado herramental, por lo que el dado de una sola preforma fue descartado.



Fig 28: Lingotes de acero.

Son necesarias preformas, debido a que la materia prima son cilindros de acero, físicamente muy diferentes a la pieza terminada. Además de que ayuda a tener mejor acabado dimensional.

Se diseñaron dos dados con 3 preformas para evitar el desgaste prematuro o falla del dado, uno para martillo y otro para forja. De estos dos dados restantes, el más idóneo para fabricar la pieza es el de martillo puesto que la pieza posee geometrías complejas, que la prensa podría no fabricar.

En la Tabla 12 se comparan las propiedades de un dado con preformas a un dado con una sola forma, según pruebas realizadas en piezas anteriores con un proceso de manufactura similar.

Tabla 12: Ventajas y desventajas de preformas.

Dado de una forma		Dado de tres preformas	
Ventajas	Desventajas	Ventajas	Desventajas
Rápida fabricación	Menor vida útil	Piezas con poco error dimensional	Pesado
Es más económico	Falla dimensional	Piezas con mejor acabado	Tiempo de fabricación prolongado
Ligero	Muchos golpes de remarque	Mayor tiempo de vida útil	Costos de fabricación mayores
	Tendencia a agrietarse	Poca tendencia a fisurarse	

En conclusión, es conveniente emplear el dado de tres preformas, dado que la calidad de las piezas a fabricar es mucho mayor en un dado multi formas, además de que se requiere fabricar más de un dado de una sola preforma, lo que no es rentable, por su poca durabilidad.

Análisis del dado para martillo de 3 preformas

Tomando lo anteriormente explicado se concluye que la mejor opción es un dado para martillo de forja de tres preformas, se construye una especie de barrera alrededor de la primer preforma, con el fin de que el lingote abarque por completo la forma de la pieza.

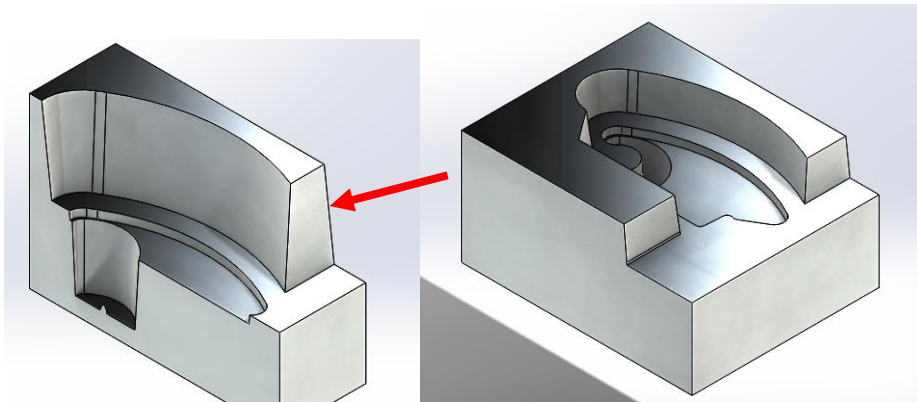


Fig 29: Barrera para preforma.

Las preformas son dimensionalmente mayores a la forma final, para facilitar que el lingote caliente recubra todas la cavidades de la pieza.

Con ayuda del software Solidworks se hace un análisis estático a uno de los herramientas para calcular los efectos de las cargas sobre la estructura.

Se ha realizado un análisis estático para determinar la vida de los dados de forja

tomando en cuenta los esfuerzos más importantes estos son, la presión del martillo de forja sobre los dados, la temperatura de precalentamiento de los dados, gravedad, y una masa distribuida que intenta simular al lingote que será moldeado.

SW Simulation entiende el fenómeno de la fatiga como un proceso que sucede en tres etapas:

- Etapa 1: En esta primera etapa se producen una o más grietas en el material. Estas grietas pueden producirse en cualquier zona del material, pero generalmente se producen en las zonas donde existe concentración de tensiones.
- Etapa 2: Alguna o algunas de las grietas aumentan su tamaño a causa de las cargas alternas.
- Etapa 3: La continua aplicación de las cargas alternas provoca que las grietas crezcan hasta producirse el fallo.

Definiciones de fatiga

SW Simulation utiliza una terminología propia, que en su mayoría es común a la terminología bibliográfica que corresponde a fatiga.

Límite de resistencia

El límite de resistencia o como generalmente se conoce al límite a fatiga, es la tensión alterna mayor que no provoca un fallo por fatiga. Cuando la tensión alterna es igual o menor a dicho límite, la cantidad de ciclos que causan el fallo es muy grande, por eso se dice en estos casos que la vida del material es infinita.

Tensión alterna y tensión media

La tensión alterna se define como $S\alpha$ y la tensión media como Sm . Éstas se calculan mediante las siguientes expresiones, donde σ_{\max} y σ_{\min} son las tensiones máxima y mínima.

$$S\alpha = \frac{(\sigma_{\max} - \sigma_{\min})}{2} \dots \text{Eq 1}$$

$$Sm = \frac{(\sigma_{\max} + \sigma_{\min})}{2} \text{Eq 2}$$

Ciclos de fatiga

A un nivel de tensión alterna y media, es la cantidad de ciclos requeridos para que se produzca el fallo por fatiga.

Vida infinita

Son los números de ciclos a partir de los cuales no existe fallo por fatiga. A partir de este número de ciclos la resistencia a fatiga deja de disminuir.

Resistencia a la fatiga

La resistencia a la fatiga es la tensión en la que se produce el fallo por fatiga después de una cantidad de ciclos de carga dada.

Requisitos para realizar un análisis de fatiga

Para poder realizar un análisis a fatiga hay que realizar las siguientes acciones, con el fin de que el estudio de fatiga contenga los datos necesarios para arrancar el análisis:

- Crear uno o varios análisis estáticos. De esta manera se definen las condiciones de contorno del sistema o pieza en cuestión, y se obtienen los resultados de tensiones.
- Definir uno o varios sucesos de fatiga. Una vez creado el análisis de fatiga, se deben definir los sucesos correspondientes, en base al estudio(s) estático(s) previamente definido(s).
- Asociar al menos una curva S-N al material activo. Algunos de los materiales de la biblioteca de materiales tienen curvas S-N previamente definidas. Por lo tanto, podemos utilizar las curvas que nos proporciona la biblioteca de materiales, o bien podemos introducir una curva personalizada.

Parámetros de ingreso

Una vez creado y simulado el estudio estático, y creado el estudio de fatiga, antes de ejecutar éste último es necesario introducir una serie de parámetros dentro del apartado Carga del estudio de fatiga:

- Número de ciclos: es el número de ciclos para el cual se va probar o ensayar el modelo en cuestión.
- Tipo de carga: mediante éste parámetro se define el tipo de carga, y por tanto, los valores de tensión máximos y mínimos. Los diferentes casos de tipo de carga están relacionados con el factor de carga $R = \sigma_{\min} / \sigma_{\max}$.
 - Completamente invertida (LR=-1): en este caso la tensión media es cero $\sigma_m = 0$, ya que se el valor absoluto de la tensión mínima y la tensión máxima son iguales $\sigma_{\max} = |\sigma_{\min}|$.

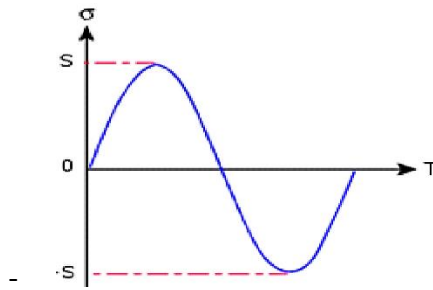


Fig 30: Carga con tensión media nula

- Base cero (LR=0): en este caso bien la tensión máxima o la tensión mínima es nula, por lo que el valor absoluto de la tensión media y el valor absoluto de la tensión alterna son iguales $|\sigma_m| = |\sigma_a|$.

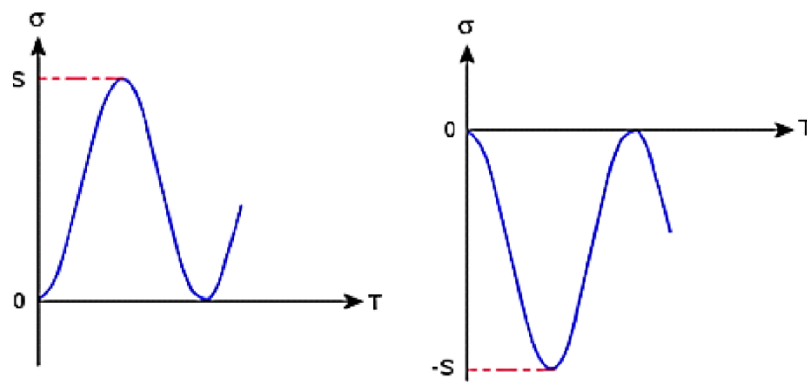


Fig 31: Cargas de tracción y compresión

- Relación de carga: en este caso podemos modificar la tensión alterna introduciendo el factor de carga R. Cada componente de tensión del estudio de referencia (el estudio estático definido previamente) cambia proporcionalmente desde la tensión máxima σ_{max} hasta el valor mínimo definido $R \cdot \sigma_{max}$.

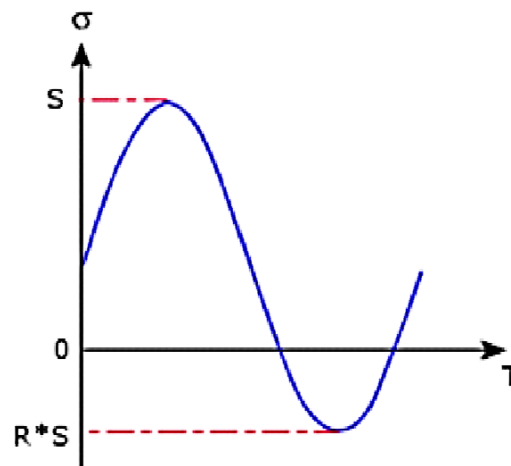


Fig 32: Carga personalizada mediante el factor R

- Buscar picos del ciclo: En este caso, el suceso de fatiga se basa en varios casos de carga. Mediante esta opción se pueden escoger varios estudios estáticos de referencia. El programa calcula las tensiones alternas considerando la combinación de picos de cargas diferentes. A continuación, determina la combinación de cargas que produce la fluctuación de tensión mayor.
- Asociación de estudios: mediante esta opción se puede establecer la influencia de cada estudio de referencia.
 - N° (Número): es el contador de estudios de referencia.
 - Estudio: permite seleccionar el estudio de referencia deseado.
 - Escala: mediante esta opción se ingresa el factor por el cual serán multiplicados los resultados de tensión del estudio de referencia para calcular los valores tensión que serán utilizados para calcular la tensión alterna.
 - Paso: Configura el paso de solución para el estudio de referencia no lineal o dinámico lineal. El programa utiliza los resultados de tensión de este paso en concreto para calcular las tensiones alternas.

Definición de curvas S-N

Como se ha comentado anteriormente, para resolver un estudio de fatiga, se debe definir al menos una curva S-N para el material activo. A la hora de definir la curva S-N del material, se dispone de las tres siguientes opciones:

- a) Curvas S-N definidas por SW: algunos materiales de la biblioteca de materiales tienen curvas S-N previamente definidas. Estos materiales están identificados mediante un sufijo (SN) situado al final de cada nombre en el cuadro de la lista. Como información adicional, los materiales con el sufijo (SS) contienen curvas de tensión-deformación unitaria, y los que tienen el sufijo (SS, SN) contienen los dos tipos de curva.
- b) Derivar del módulo elástico del material: otra opción es derivar la curva S-N automáticamente basándose en las curvas S-N de la American Society of Mechanical Engineers (ASME) y en los módulos de elasticidad del material referencia y del material activo. Para el material de referencia se pueden seleccionar las opciones: Con base en curvas de acero austenítico ASME o Basado en curvas de acero al carbono ASME. (CALLISTER, 2002)
 La curva S-N se obtiene dividiendo cada valor de tensión de la curva S-N de referencia por el módulo de elasticidad del material de referencia ASME y multiplicándolo por el módulo de elasticidad del material actual.
 Al utilizar esta opción, es necesario conocer si el material activo es un acero

austenítico o un acero al carbono, con el fin de no incurrir en errores graves de diseño.

- c) Definición personalizada: mediante esta última opción se define la curva S-N deseada introduciendo los puntos de tensión y número de ciclos en una tabla. SW permite definir múltiples curvas S-N para un mismo análisis de fatiga. Cuando se define más de una curva para el mismo análisis, también se puede definir el Factor de tensión R diferente para cada una de ellas. Este factor define la relación entre la tensión alterna mínima y la tensión alterna máxima.

$$R = \frac{Sa_{min}}{Sa_{max}} \dots \text{Eq 3}$$

El programa usa una interpolación lineal para extraer los datos de las múltiples curvas S-N y así calcular la tensión alterna resultante. Este factor tiene únicamente influencia en los resultados cuando se definen múltiples curvas S-N en el mismo análisis de fatiga.

Fig 33: Definición de las propiedades del análisis de fatiga.

Interacción de sucesos

Los análisis de fatiga pueden estar basados en un solo suceso o en varios sucesos.

Cuando se trata del segundo caso, se puede definir el tipo de interacción que se dará entre los sucesos.

- Interacción aleatoria: SW considera la posibilidad de mezclar tensiones de pico de diferentes sucesos para la evaluación de la tensión alterna.
- Sin interacción: el programa evalúa la tensión alterna por separado para cada suceso. Cada suceso de fatiga se produce independientemente de los otros sucesos, ocurriendo éstos uno detrás de otro.

Vida infinita

Esta opción es una herramienta útil cuando se está trabajando con tensiones alternas por debajo del límite a fatiga del material. El programa utiliza el número de ciclos que se definen cuando la tensión alterna corregida sea menor que el límite a fatiga del material.

Por lo tanto, cuando se utiliza esta opción, el número de ciclos para el caso descrito no será el correspondiente al último punto de la curva S-N, sino el definido en la casilla de Ciclos. Este valor sólo se utilizará para curvas S-N cuyo número máximo de ciclos sea menor que el número especificado.

Resultados del análisis de fatiga

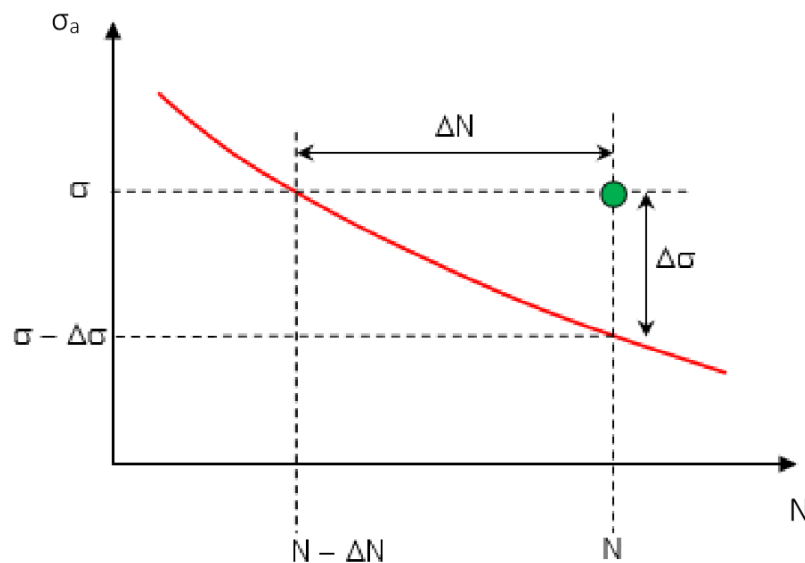


Fig 34: Resultados para un nodo específico.

Se supone que se ha ejecutado un análisis estático y se define un análisis de fatiga, dónde el único suceso ocurre N veces. Como se puede observar en la curva S-N el programa determina la tensión alterna corregida a partir del valor de tensión del estudio estático para cada nodo.

El punto verde representa la tensión alterna en el eje de ordenadas y el número de

ciclos en los que ocurre el suceso en el eje de abscisas. Se pueden dar diferentes casos dependiendo de la posición del punto:

- Fallo: el punto se encuentra por encima de la curva.
- No hay fallo: el punto se encuentra por debajo de la curva.
- Fuera del intervalo de la curva: cuando el punto no está dentro del intervalo, es debido a: la tensión alterna corregida es mayor que el valor máximo de tensión alterna de la curva S-N; la tensión alterna corregida es menor que el límite a fatiga del material. En el primer caso, los resultados de tensión y número de ciclos serán los correspondientes al primer punto de la curva, mientras que en el segundo, los resultados serán los correspondientes al último punto.

Una vez ejecutado el análisis se pueden visualizar los siguientes trazados de fatiga:

Vida

Este trazado muestra el número de ciclos que producen fallos en la ubicación del modelo. Es la intersección entre el valor de la tensión alterna y la curva S-N.

$$Vida = N - \Delta N \dots \text{Eq 4}$$

El trazado de vida está disponible únicamente cuando el análisis de fatiga está basado en un solo suceso. Por otro lado, el valor de Vida depende exclusivamente de la tensión en una ubicación y la curva S-N.

Daño

El trazado de daño muestra el porcentaje de vida consumida bajo los sucesos definidos en el análisis. Por ejemplo, si el porcentaje de daño acumulado es del 15%, quiere decir que los sucesos consumen el 15% de la vida del modelo. Los porcentajes iguales o mayores al 100% indican fallo.

$$Daño = \frac{N}{(N - \Delta N)} \dots \text{Eq 5}$$

Factor de seguridad

Este trazado muestra la relación del valor de la tensión que origina el fallo de fatiga con respecto a la tensión σ . Por ejemplo, un factor de seguridad de 3 en una ubicación se traduce en fallo cuando las cargas aplicadas se multiplican por 3.

$$FDS = \frac{(\sigma - \Delta\sigma)}{\sigma} \dots \text{Eq 6}$$

Al igual que el trazado de Vida, éste solo está disponible cuando se define un suceso.

Cálculo de fatiga

El cálculo del análisis de fatiga en SW Simulation se realiza mediante dos herramientas: la curva S-N del material y la teoría del daño acumulativo.

El cálculo de la vida total del modelo se realiza mediante la curva S-N del material. Primeramente, se calcula la tensión alterna corregida que produce el fallo. Esta tensión alterna corregida, se obtiene mediante las tensiones alterna y media, que se calculan mediante la tensión del estudio de referencia y la definición del tipo de carga, junto con la final definición del criterio de corrección de la tensión media.

Una vez calculada la tensión alterna corregida, se ingresa en la curva S-N con dicha tensión, y se determina el número de ciclos que le corresponde, obteniéndose así la vida total del modelo.

Por otro lado, el cálculo del porcentaje de daño se realiza mediante la curva S-N del material y la teoría del daño acumulativo, concretamente mediante la regla de Miner. La teoría del daño acumulativo supone que el ciclo de tensión con una tensión alterna sobre el límite de resistencia causa un daño permanente.

Ésta es la regla de Miner. El factor de daño representa la relación de la vida útil de la pieza que se ha consumido. Un factor de daño de 0,25 significa que el 25% de la vida útil de la pieza se consumió. El fallo por fatiga se produce cuando el factor de daño alcanza la unidad.

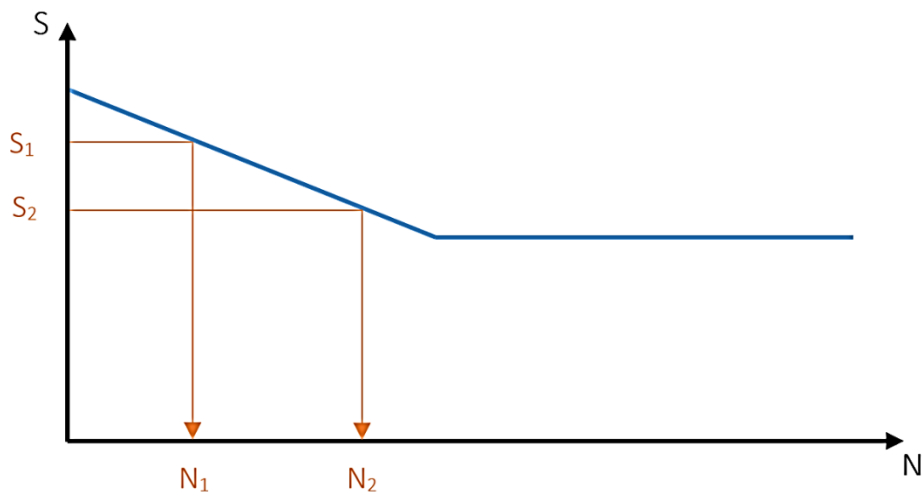


Fig 35: Curva S-N para el caso de dos tensiones alternas S_1 y S_2

La regla de Miner no considera los efectos de la secuencia de carga, y supone que la tasa de acumulación de daño es independiente del nivel de tensión. El comportamiento observado en materiales indica que las fisuras se inician en algunos ciclos con amplitudes de tensión altas, mientras que la iniciación de las fisuras a amplitudes de tensión bajas, consumiendo casi toda la vida útil de la pieza.

Cuando se especifica la opción “sin interacción” entre los sucesos de fatiga, el programa hace uso de la regla Miner en su forma más simple. Por otro lado, cuando se elige la opción Interacción aleatoria, el programa hace uso del código ASME para evaluar el daño, combinando los picos de los sucesos como se verá más adelante.

Mallado

Como se comentó en la introducción al capítulo, los programas de elementos finitos subdividen los modelos geométricos en partes sencillas llamadas elementos. Estos elementos están interconectados mediante una serie de puntos llamados nodos. A este proceso subdividir el modelo en pequeñas partes se le llama mallado. El tipo de mallado y propiedades de la malla juega un papel fundamental en el análisis del sistema en cuestión.

Tipos de mallado

Malla sólida

Este tipo de mallado se utiliza para modelos gruesos o de espesores grandes, y en cuanto al uso, es el tipo de mallado más utilizado. El programa genera dos tipos de elementos dependiendo de las opciones de malla que se establezcan:

- Malla con calidad de borrador: compuesta por elementos sólidos tetraédricos lineales.
- Malla de alta calidad: compuesta por elementos sólidos tetraédricos parabólicos.

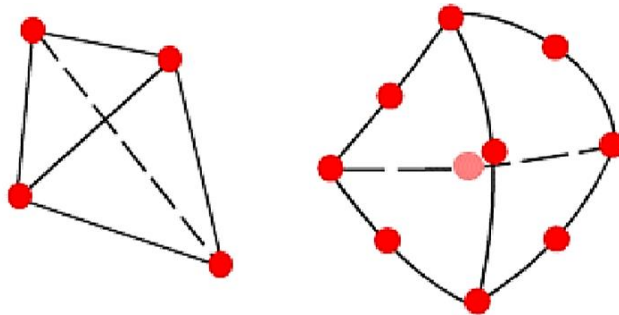


Fig 36: Elementos sólidos tetraédricos lineales y parabólicos.

Malla de vaciado

Este mallado se utiliza para modelos que están formados por partes delgadas o chapas metálicas. Al igual que en el caso de la malla sólida, el programa genera elementos lineales y parabólicos, pero de diferentes tipos:

- Malla con calidad de borrador: Compuesta por elementos de vaciado triangulares lineales.
- Malla de alta calidad: Compuesta por elementos de vaciado triangulares parabólicos.

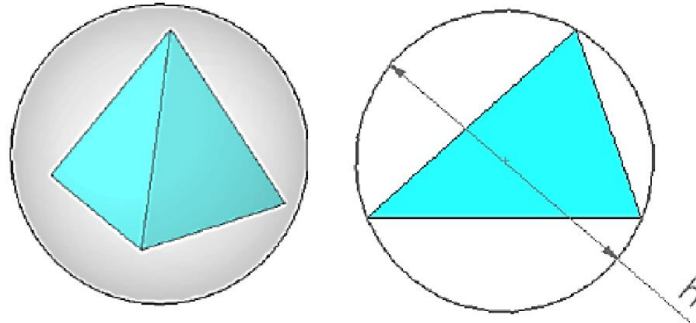


Fig 37: Diferencia entre elemento tetraédrico y triangular.

En la Fig 37 se muestra un elemento tetraédrico y uno triangular, ambos para casos lineales.

Malla de viga

En este caso, los miembros estructurales y soldaduras se malla con elementos en viga. Un elemento viga es un elemento de línea definido por dos puntos finales y una sección transversal. El programa utiliza una malla de viga e identifica miembros estructurales que se tocan o interfieren y miembros que no se tocan a una cierta distancia.

Análisis al dado inferior

Se comenzó con un análisis estático, para esto se seleccionaron las 4 caras que son sujetas en el martillo de forja, como geometrías fijas.

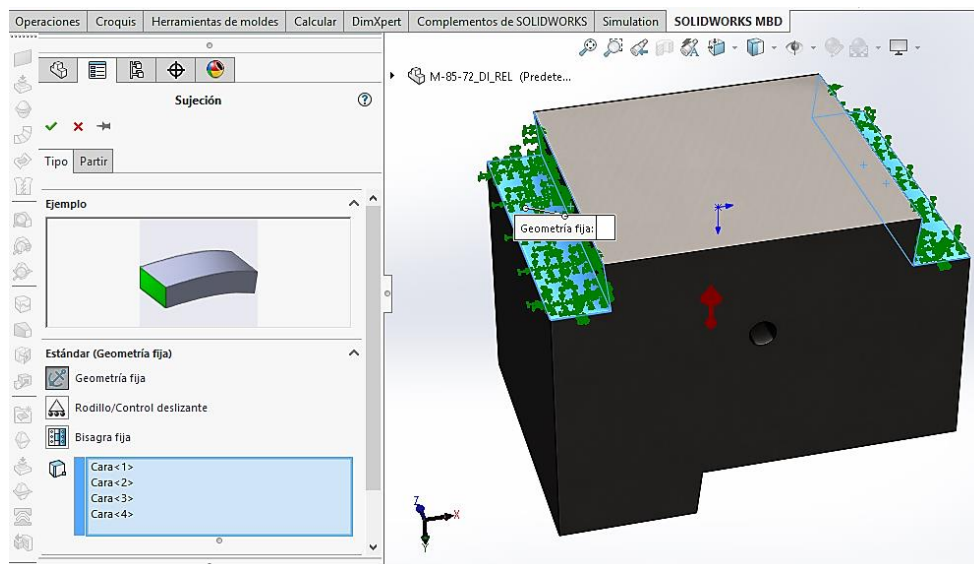


Fig 39: Selección de geometrías fijas.

Luego se coloca la presión máxima del martillo de trabajo en las caras normales a la carga esto es 2000 PSI.

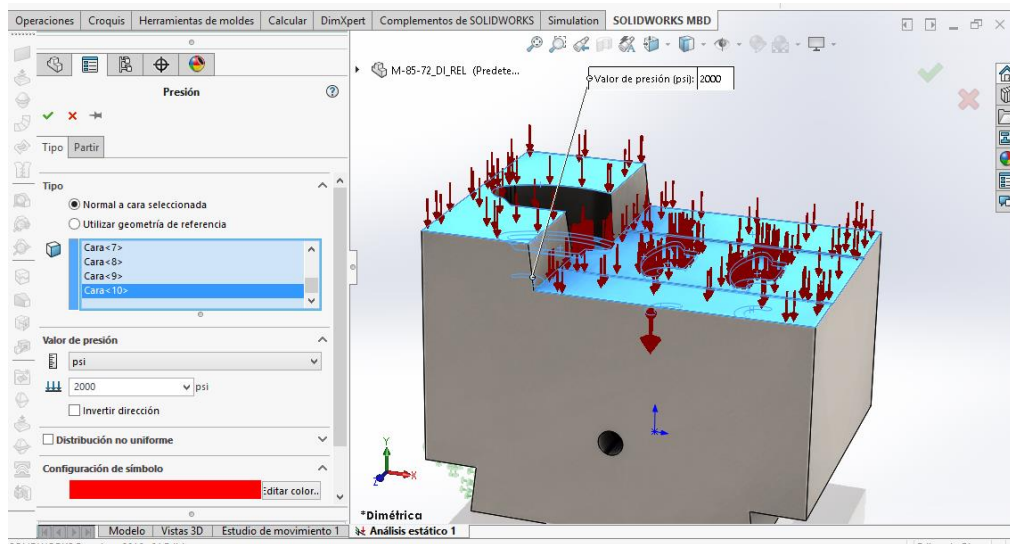


Fig 40: Colocación de carga externa: Presión.

Se introduce el dato de una temperatura estimada de las caras expuestas a los lingotes recién calentados, la temperatura del lingote se encuentra dentro de un rango de 650° a 800° C.

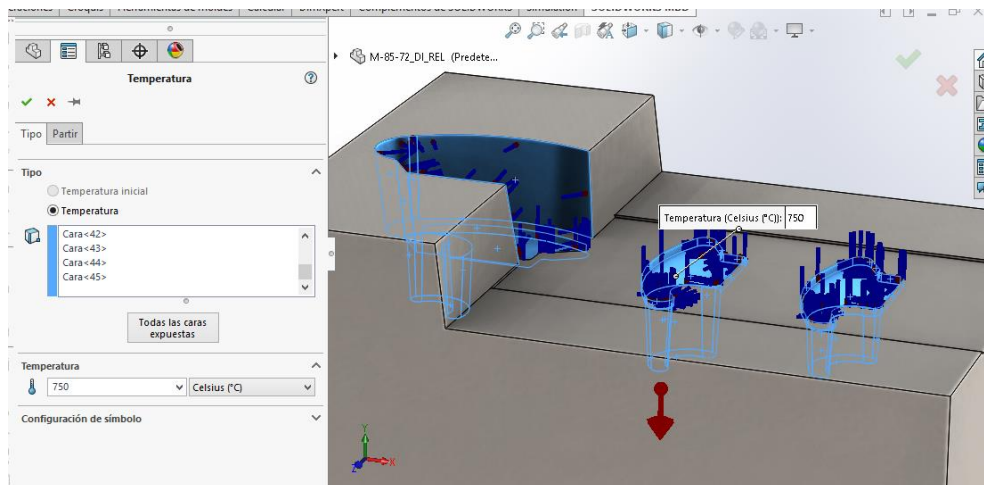


Fig 41: Colocación de carga externa: Temperatura.

Se coloca una masa distribuida que simula la masa del lingote que será forjado.

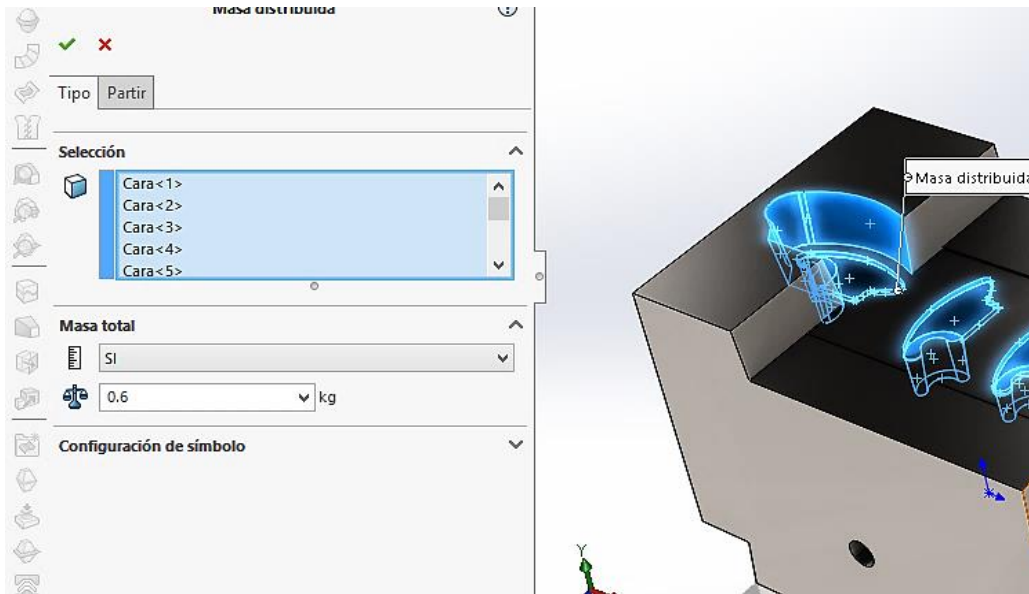


Fig 42: Colocación de carga externa: Masa distribuida.

Y por último se introduce la gravedad en dirección de las caras expuestas a los lingotes.

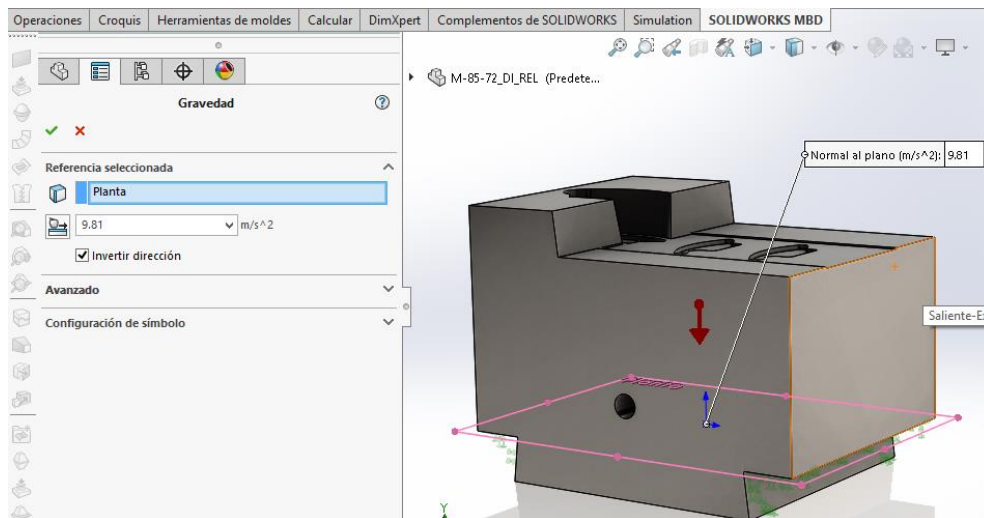


Fig 43: Colocación de carga externa: gravedad.

Mallado

Se usa un tipo de malla sólida de 16 puntos jacobianos. Para una malla sólida, la precisión numérica se logra mejor mediante una malla con elementos tetraédricos perfectos y uniformes cuyas aristas sean de igual longitud.

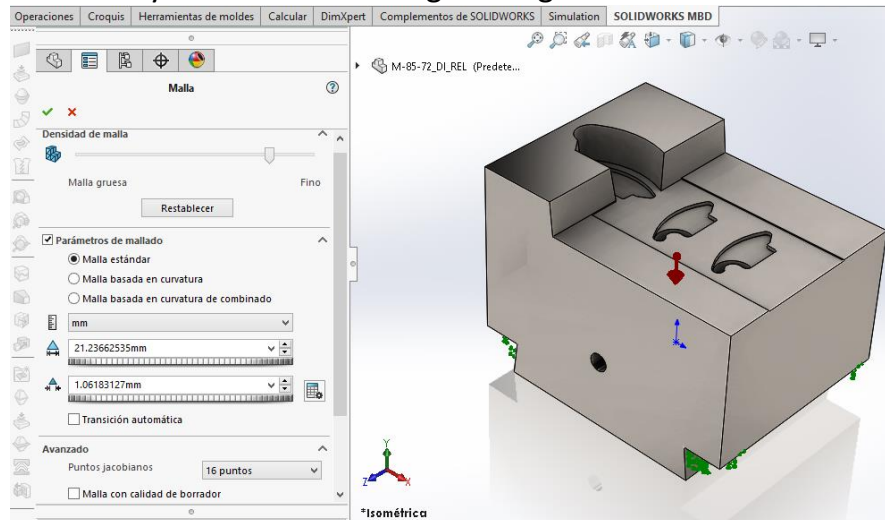


Fig 44: Características del mallado.

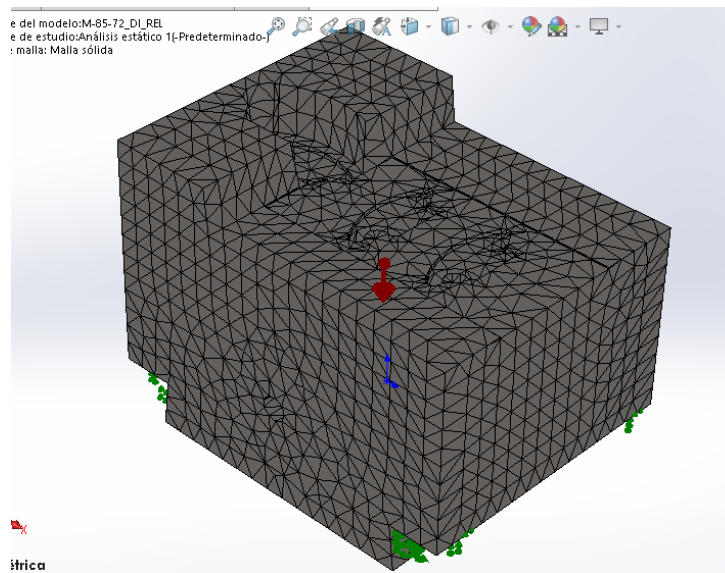


Fig 45: Modelo con malla sólida.

Resultados

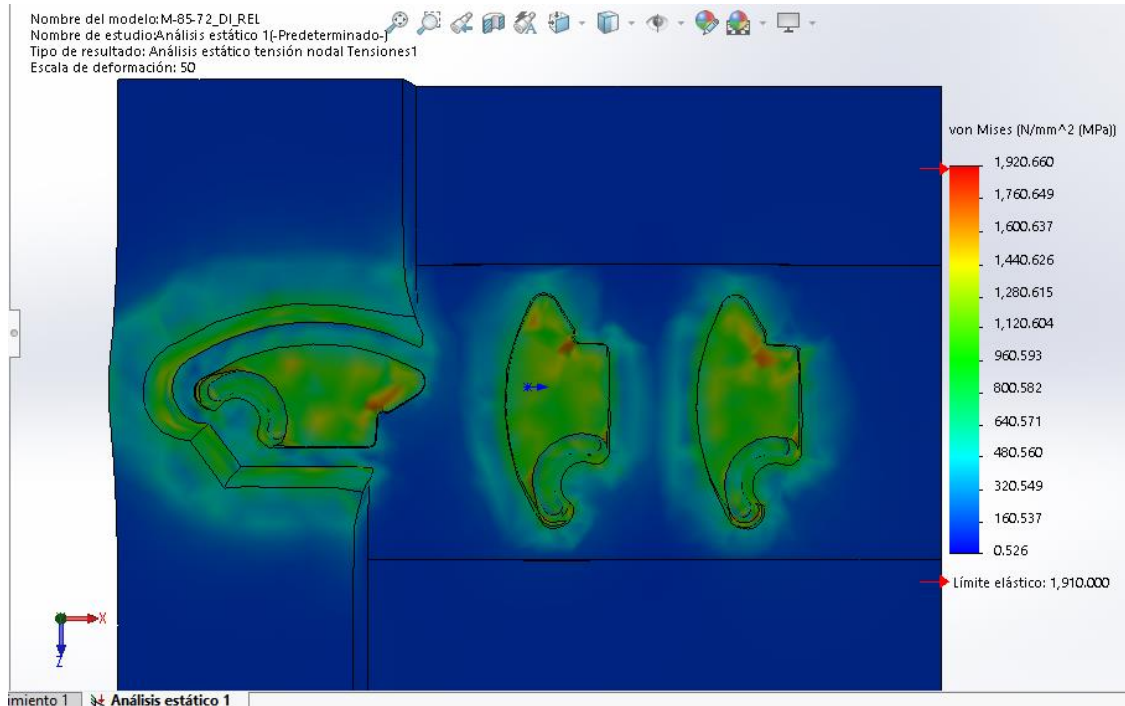


Fig 46: Modelo con la deformación aumentada visualmente 50 veces.

Definidas las condiciones de contorno para cada análisis estático, se simula cada uno de éstos para poder visualizar la distribución de tensiones en cada caso.

Los valores de máxima tensión superan por poco la tensión de fluencia de material en ciertas zonas. Esto significa que después del esfuerzo al que se someta el dado, este se deformará, es decir tendrá una vida finita.

Se observa que la parte más afectada es donde se colocan los lingotes y en los surcos en donde se forman las extremidades de la pieza. El valor máximo de tensión alcanza un valor de 1920.6 MPA como se muestra.

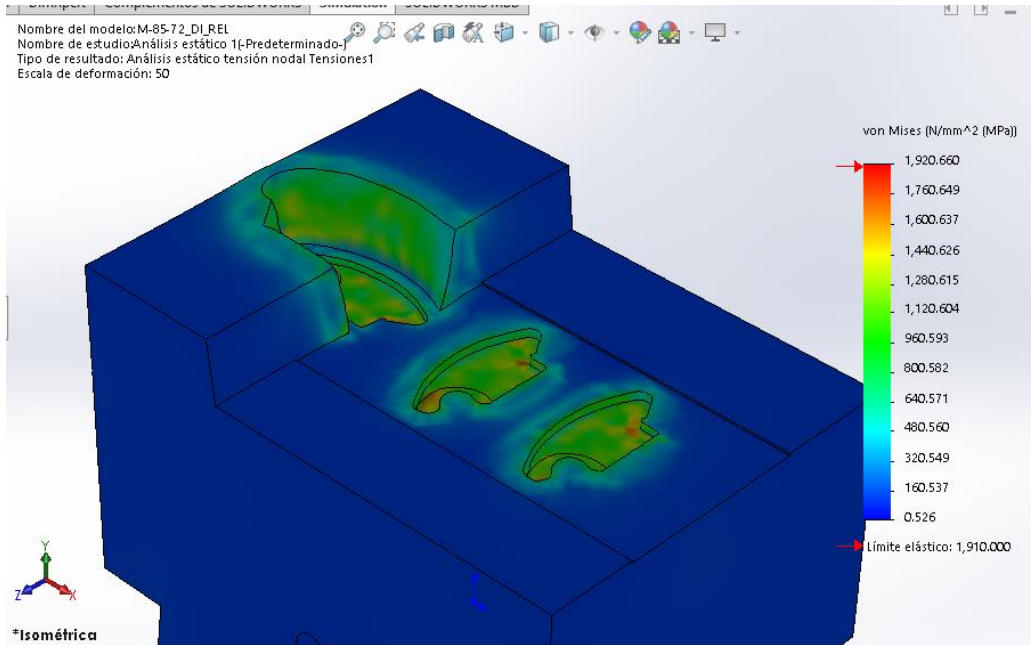


Fig 47: Vista Isométrica del modelo deformado.

Análisis de fatiga

Se realiza un análisis en un solo suceso para determinar el tiempo de vida y daño. Se ensaya el dado a vida finita por lo que se ingresa el valor de 100000 de ciclos, y se selecciona el estudio previamente realizado.

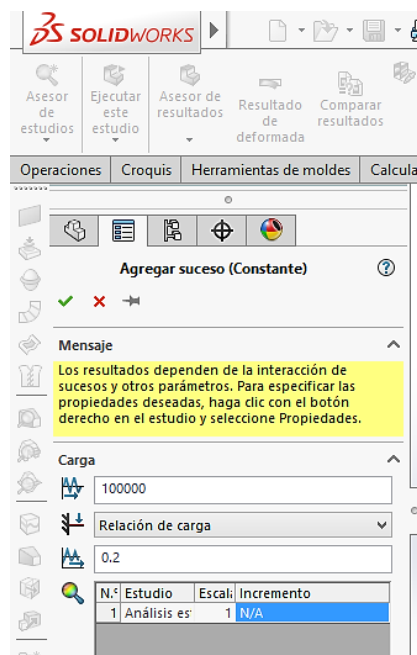


Fig 48: Suceso para el análisis de fatiga

Se utiliza el criterio de Soderberg para determinar la vida total, donde se obtiene el valor máximo de tensión de todos los tipos de acciones.

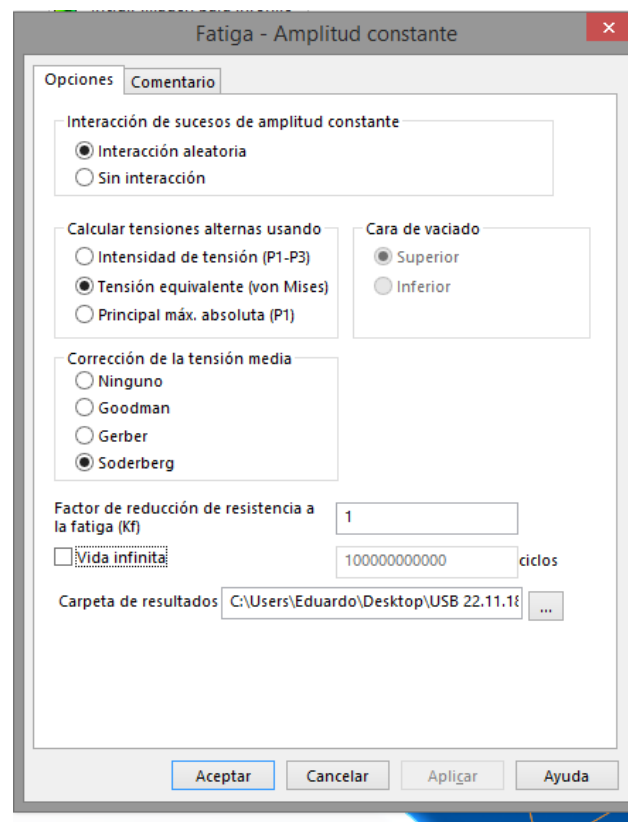


Fig 49: Propiedades del análisis de fatiga.

En la Fig 50 se muestran la vida total y porcentaje de daño obtenidos

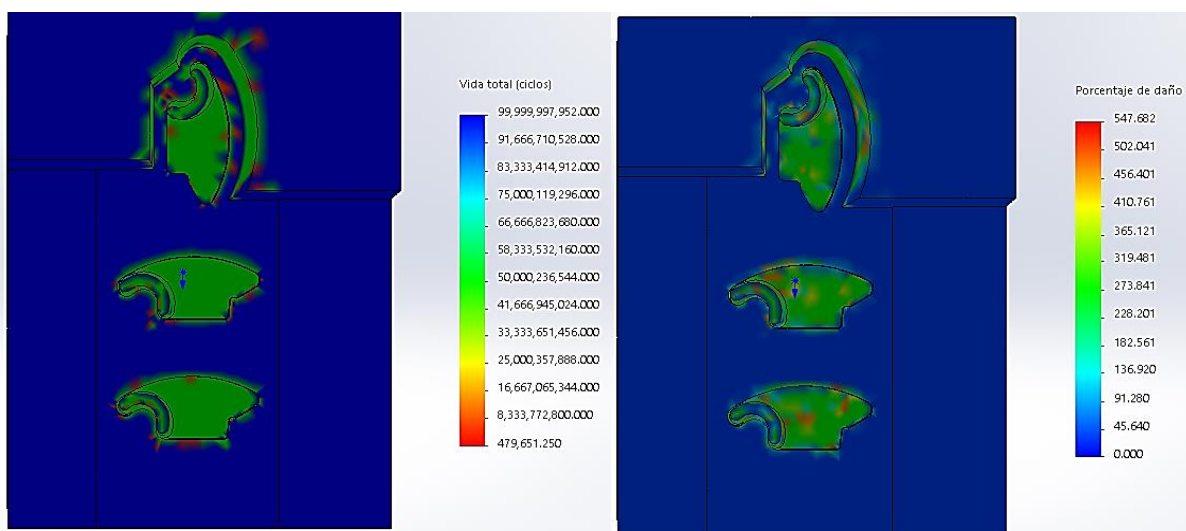


Fig 50: Vida total y porcentaje de daño para los 100000 ciclos mediante el criterio de Soderberg

El mínimo número de ciclos es de 479,651.25 que se obtiene en los bordes de la pieza.

La vida consumida por el suceso es de un 547%. La vida del dado es superior a la cantidad de piezas requeridas, por lo que es viable usar el dado para la producción, dado que no es necesaria una vida infinita.

Análisis del dado superior

Se analiza al dado superior para los mismos efectos, como en el caso anterior las condiciones de trabajo son las mismas. Al igual que en el dado inferior se comienza con un análisis estático que simula los esfuerzos reales.

Son sujetas las mismas caras en el dado anterior.

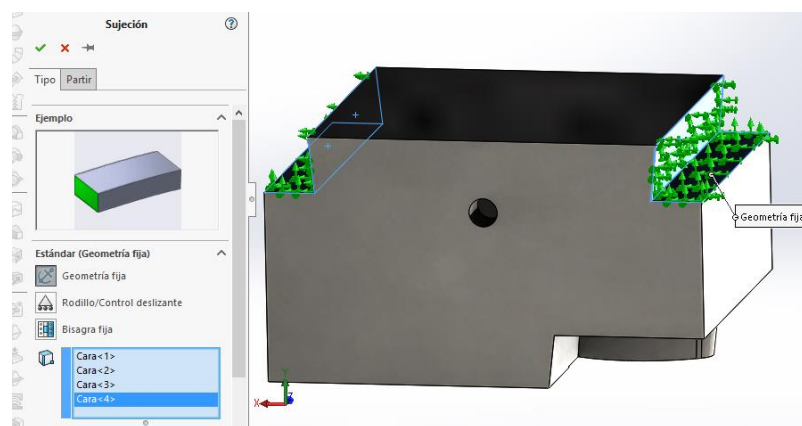


Fig 51: Caras con geometrías fijas.

La gravedad se coloca en sentido contrario al dado inferior, saliendo de las preformas.

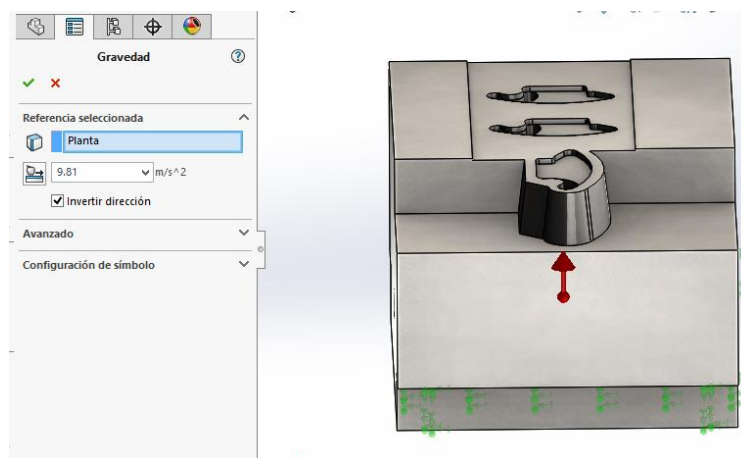


Fig 52: Sentido de la gravedad.

La carga de gravedad en cada dirección se calcula multiplicando la aceleración de gravedad especificada por la masa. La masa se calcula a partir del valor de densidad

del material.

Así mismo se colocan los datos de la presión ejercida por la máquina de trabajo.

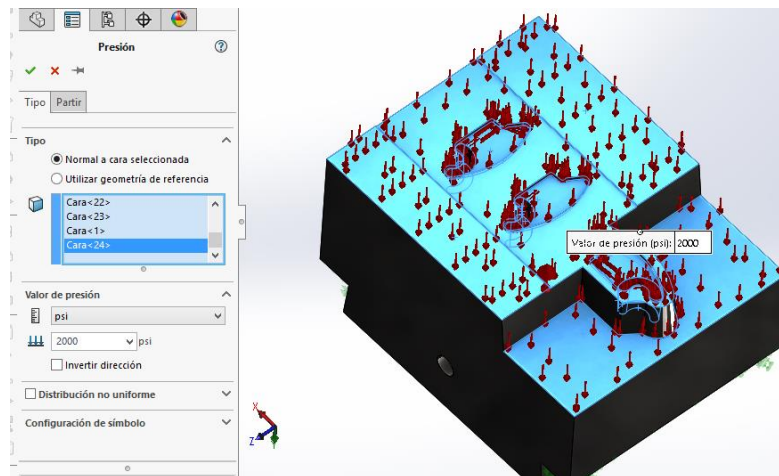


Fig 53: Puntos en donde se distribuye la presión del martillo de forja.

Se hace lo mismo para la masa distribuida y para la temperatura de las partes expuestas a los lingotes.

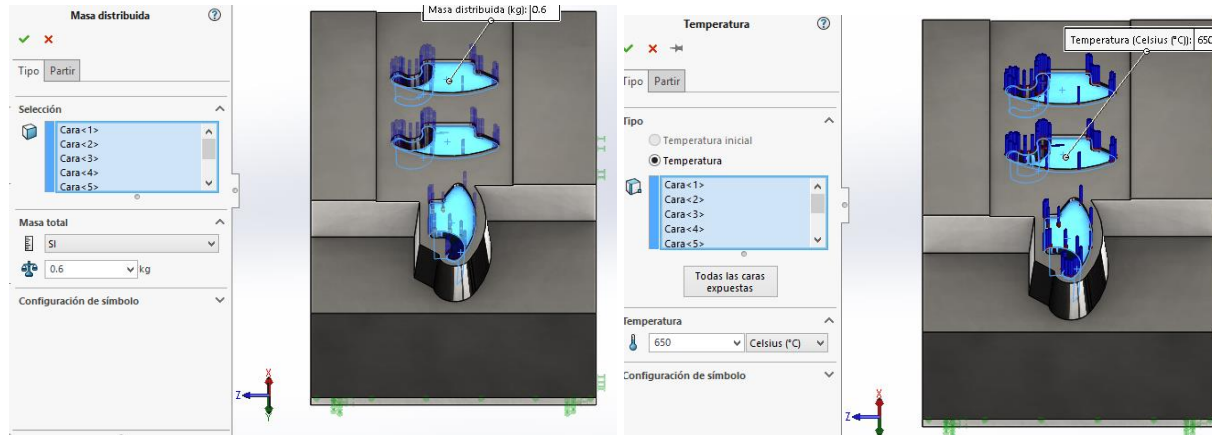


Fig 54: Caras expuestas a la masa distribuida y a la temperatura.

Así queda el modelo después de aplicarle el mallado, las cargas y las sujeciones.

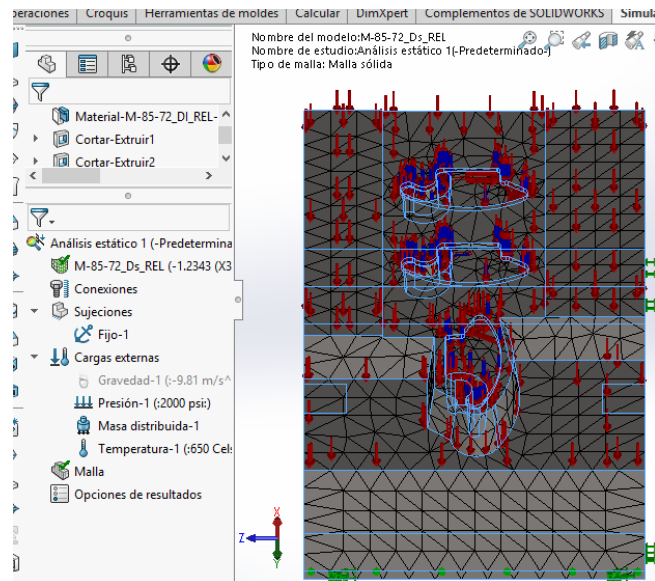


Fig 55: Modelo con malla sólida.

Resultados

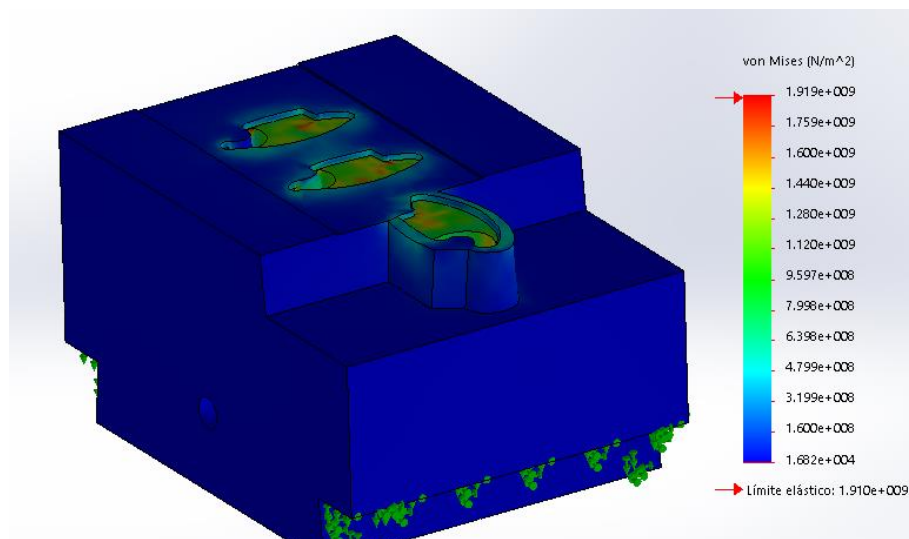


Fig 56: Esfuerzos de Von Mises en MPA.

El análisis de elementos finitos de SW, al agregar datos muy similares a los que se analizaron en el modelo anterior, arroja datos similares e igual que en el caso anterior, este dado tiene una vida finita.

El valor máximo de tensión alcanza un valor de 1919 MPA como se muestra.

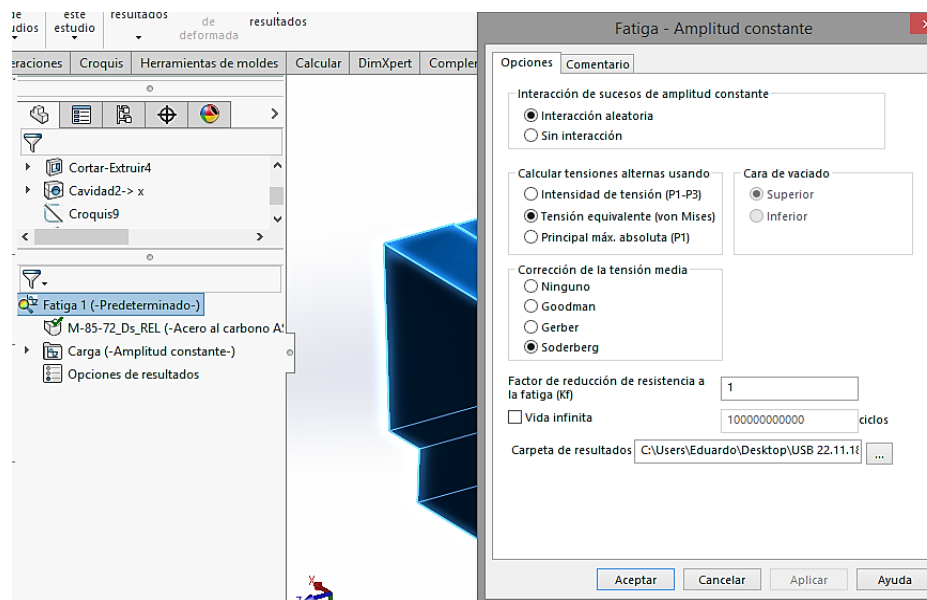


Fig 57: Selección de criterio para la corrección de tensión.

En la Fig 58 y 59 se muestran la vida total y porcentaje de daño obtenidos respectivamente.

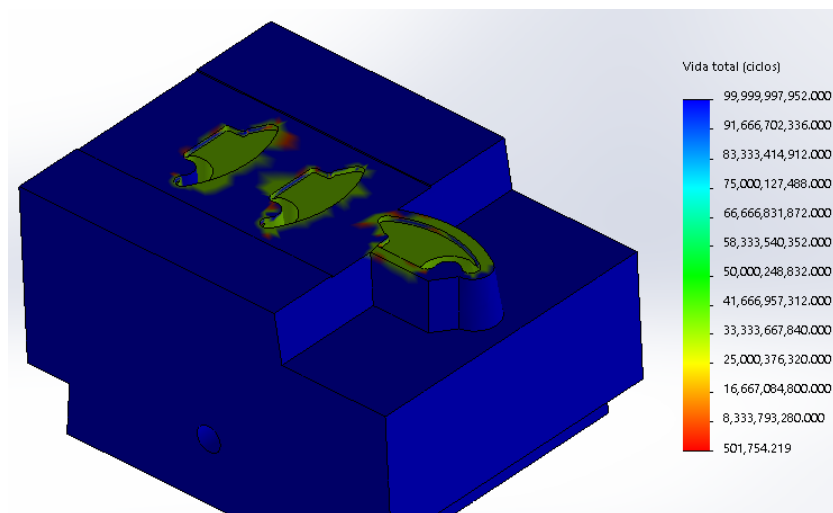


Fig 58: Vida total del dado superior.

La vida total es de 500,000 ciclos aproximadamente, valor de los números de ciclos correspondiente al último punto de la curva S-N, por lo que la tensión alterna corregida es menor que el límite a fatiga del material.

En cuanto al porcentaje de daño, cada suceso consume un 498% de la vida del dado, esto corrobora que ambos dados tienen una vida finita, pues no resisten los esfuerzos.

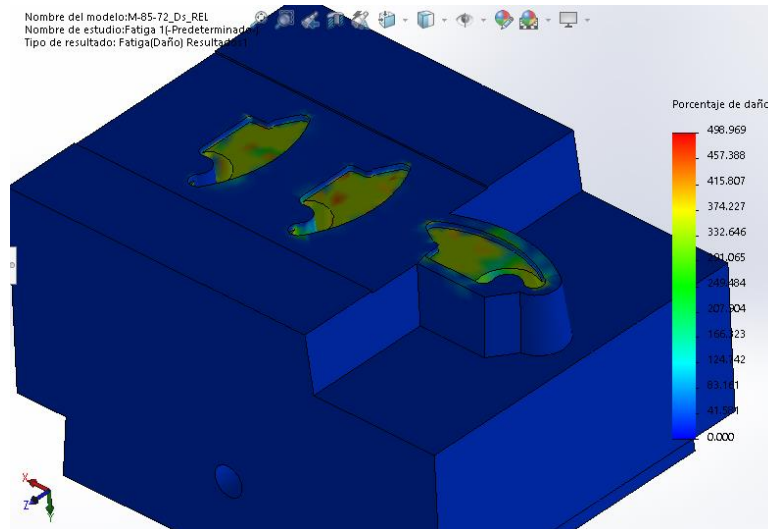


Fig 59: Porcentaje de daño al dado superior

Una vez que se han hecho análisis simulando los esfuerzos a los que se somete el herramental se procede a fabricar mediante tornos CNC para ello se realizan planos y se pide autorización por parte del jefe de ingeniería del producto y con autorización por parte del cliente, los herramentales se fabrican en una planta específica para esto y posteriormente se reciben los herramentales listos para utilizarse.

Por motivos de confidencialidad no se ha permitido documentar el proceso de fabricación de los dados ni de los planos.

También es necesaria una placa de corte y un punzón, estos cumplen con la función de retirar el material sobrante de la pieza recién forjada, la placa de corte soporta el sobrante, mientras que el punzón empuja a la pieza para que atraviese a la placa de corte, entonces se hace un efecto de tijera, donde la placa de corte y punzón separan el material sobrante.

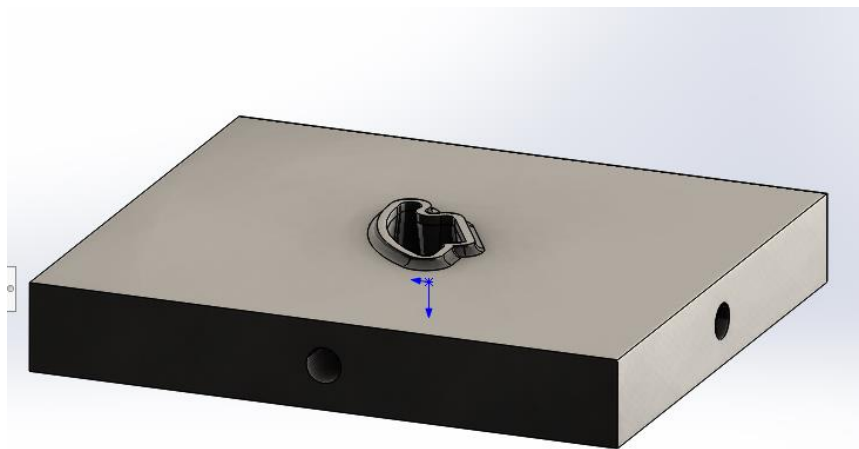


Fig 60: Placa de corte

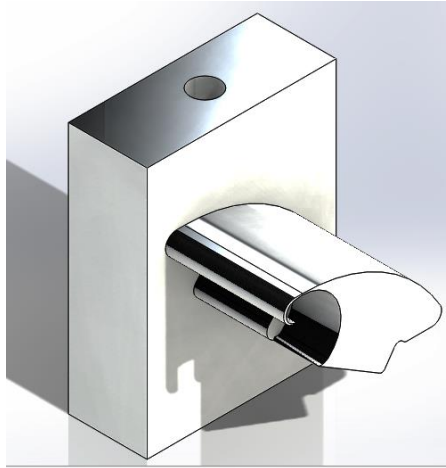


Fig 61: Punzón de corte

La placa de corte se instala en una prensa, por lo que se le deben fabricar roscas de sujeción.

Realización de pruebas y resultados finales



Fig 62: Dado superior real.

Una vez que los dados se reciben en la planta de forja son montados en el martillo de forja.



Fig 63: Dado inferior real.

Se realizaron las primeras pruebas de forja con las preformas y se midieron algunos parámetros para comprobar que cumpla con las especificaciones.

- El primer parámetro es el espesor de pico, la medida nominal es de 0.500 pulgadas.



Fig 64: Parámetro: Grosor de pico

- Un segundo parámetro es el diámetro externo del arco , la medida nominal es de 1.75 pulgadas.



Fig 65: Diámetro externo de arco

Dureza

Se le hizo una prueba de dureza a algunas de las piezas, puesto que es el factor más importante, pues la pieza requiere de cierta dureza para funcionar, o en su defecto se debe dar un tratamiento térmico para incrementarla.

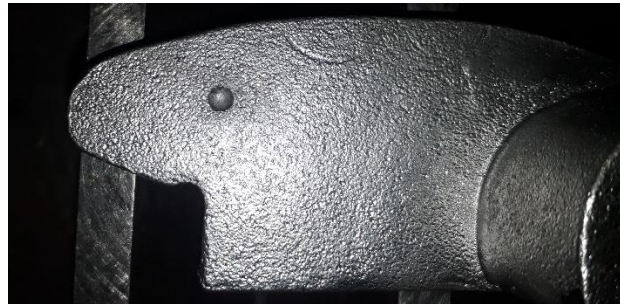


Fig 66: Indentación a una de las piezas

En la Tabla 13 con distintos resultados de dureza arrojados al probar 10 piezas.

Tabla 13: Dureza Brinell

N° de pieza	Diámetro de la marca (mm)	Dureza Brinell
Pieza 1	4,24	202
Pieza 2	4,14	213
Pieza 3	4,18	209
Pieza 4	4,10	217
Pieza 5	4.16	211
Pieza 6	4,22	204
Pieza 7	4,26	200
Pieza 8	4,14	213
Pieza 9	4,20	207
Pieza 10	4,10	217

Conclusión

Los productos forjados tienen unas características concretas. La forja posibilita la producción de un gran número de productos iguales. Presentan unas buenas propiedades mecánicas, como son la resistencia a la corrosión y la fatiga, y una gran tenacidad y ductilidad. Por los costes y medios de producción necesarios, la forja es una opción adecuada para la fabricación de un número elevado de piezas.

Las piezas que tienen mayor cantidad de detalles siempre van a requerir una mayor complejidad en el herramental, se debe elegir una posición en donde la pieza pueda ser desmoldada con mayor facilidad, además de elegir un ángulo de salida ideal que con ayuda del grafito que se usa como lubricante para evitar que el acero forjado se adhiera a los moldes.

Existe una gran cantidad de aceros en el mercado, cada uno con características diferentes, y se debe tener un buen criterio para seleccionar el apropiado, para la fabricación de herramientas se debe tomar en cuenta aspectos como la cantidad de piezas a producir, el material de éstas, la temperatura de recristalización del acero a forjar, el tipo de forja a aplicar, y si necesita una herramienta de corte que quite el exceso de material, entre otras cosas.

En este trabajo se han mostrado las opciones que ofrece SW Simulation a la hora de realizar un análisis de fatiga. Aunque este software es de gran ayuda para analizar distintos tipos de esfuerzos, se requiere de un software adicional que simule la deformación que sufre el acero al calentarse.

Un análisis es muy importante, y el diseño es parte fundamental, pues se debe reducir al mínimo los desperdicios, los retrabajos o errores en diseño, cualquier error o desperdicio se traduce fácilmente en pérdidas de dinero que a la larga pueden hacer que la producción de piezas llegue a no ser rentable.

Al estudiar el comportamiento que presenta un producto o máquina, es necesario realizarlo con cautela y mediante los métodos de análisis y ensayos necesarios. Los métodos analíticos y basados en el método de elementos finitos, son métodos que presentan aproximaciones de los resultados reales. Es por eso que no son suficientes para verificar con seguridad el buen comportamiento a fatiga del sistema. Por lo tanto, es necesario llevar a cabo también ensayos sobre prototipos, con el fin de simular el comportamiento del sistema en condiciones de servicio.

Referencias

- Altan, T. N. (2005). *Cold and Hot Forging Fundamentals and Applications*, ASM. Estados Unidos.
- CALLISTER, W. D. (2002). *Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales*. Reverté.
- Davis, J. R. (1996). *ASM Handbook Vol. 14*. EE.UU: Intl Publications.
- Dieter, G. (1961). *Mechanical Metallurgy*. Estados Unidos: Mc. Graw Hill.
- Douglas, R. D. (2000). *Guidelines for precision hot forging with applications*, *Journal of Materials*. Estados Unidos.
- FIA Global. (s.f.). *FIA Global Reach. Regional Expertise*. Obtenido de FIA.org
- Fundación Wikimedia, Inc. (2018). https://es.wikipedia.org/wiki/Dureza_Brinell. Obtenido de 2017.
- GDD METALS. (2017). *GDD METALS*. Obtenido de <http://www.ggdmembers.com.br/es/produto/aisi-d2/>
- Paul DeGarmo, J. T. (2015). *Materiales y procesos de fabricación, Volumen 1*. En J. T. Paul DeGarmo. Reverté.
- Solidworks. (2017). *Nucleo/Cavidad*. Obtenido de Ayuda SolidWorks: <http://help.solidworks.com>