



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Proceso de diseño de un dado
de forja para prótesis de cadera**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Mecánico

P R E S E N T A N

Samantha Andrea Cortés Rosaslanda

Aldo Vázquez Carmona

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Edgar Isaac Ramírez Díaz



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2024

Agradecimientos.

En el presente trabajo nos gustaría agradecer principalmente a nuestros profesores de la carrera por compartirnos sus conocimientos, por su interés, tiempo y amabilidad, agradecemos profundamente su labor.

A lo largo de la realización de este trabajo aprendimos y aplicamos muchos conceptos gracias al Dr. Edgar Isaac Ramírez Díaz, a quien agradecemos enormemente su apoyo, desde que nos aceptó hasta el momento, sin él no hubiera sido posible la realización de este trabajo. Estamos muy agradecidos por su guía en este camino; De igual forma, no queremos dejar de agradecerle al M.I. Osvaldo Ruiz Cervantes por confiar en nosotros desde las asignaturas en la carrera, hasta el momento.

Este trabajo y nuestra formación académica queremos agradecerla a nuestra familia; a aquellos que siempre nos apoyaron y creyeron en nosotros aún en los momentos más complicados.

De igual forma nos queremos agradecer el uno al otro, ya que desde que nos conocimos en primer semestre, a la fecha nos apoyamos y aconsejamos, lo que nos ha traído en la actualidad el saber cómo trabajar en equipo.

También, queremos agradecer a la UDIATEM y a los profesores por facilitarnos el uso del escáner 3D, sus conocimientos y consejos; así como mostrarnos lo que implica su labor. Eso nos ayudó no solo para este trabajo sino también para el mundo laboral.

Finalmente, muchas gracias al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica PAPIIT y al proyecto IN115021 por dejarnos ser parte y brindarnos su respaldo en nuestra formación académica.

Gracias a la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería, por darnos la oportunidad de ser los profesionistas que aportarán su granito de arena al crecimiento del país.

Prólogo.

El proceso de forja es muy importante en la industria manufacturera, produciéndose día con día diversas piezas empleadas en la vida cotidiana. En este documento se diseñó y simuló el proceso de forja de una prótesis de cadera Austin Moore[®]; El método utilizado fue la ingeniería inversa para elaborar el diseño del dado.

Para el diseño del dado, se consideraron ciertos parámetros para su correcto funcionamiento; algunos de ellos son el espesor de alma, ángulos de salida, redondeos y diseño de la zona de rebaba. Para su implementación se siguieron las recomendaciones y ecuaciones establecidas en la limitada literatura que trata estos tópicos, definiéndose las magnitudes aplicadas al diseño del dado.

Una vez obtenido, fue importante establecer las condiciones del proceso para su simulación. En un principio se pueden seguir las normas, pero posteriormente es deseable variar las condiciones para conocer los límites del proceso y del diseño.

Por otro lado, en la industria es importante realizar pruebas o bien simulaciones que puedan predecir el comportamiento de ciertos materiales bajo diversas situaciones en el proceso de forja con la menor cantidad de recursos posibles para no encarecer la pieza final. Es por lo que la simulación de ingeniería asistida por computadora (Computer Aided Engineering o CAE por sus siglas en inglés), es imprescindible para la manufactura de cualquier pieza, en especial en el área biomédica donde se convierte en una herramienta para el análisis de los procesos, optimización de estos y con esto disminuir el método de prueba y error a nivel experimental.

Es por todo lo anterior que el objetivo de este trabajo es diseñar el dado de forja final para una prótesis de cadera y simular su proceso de deformación mediante paquetería de elemento finito.

En el capítulo uno se hizo una investigación de conceptos básicos y estado del arte del proceso de forjado; se tomaron en cuenta definiciones, características, equipos, herramientas y demás particularidades que se involucran en el proceso. De igual forma, se investigó acerca de los lubricantes y la fricción que se genera. Por otro lado, en este capítulo se introduce el tema de las prótesis de cadera, sus partes y procesos de manufactura.

En el capítulo dos se planteó el proceso de diseño de dados para forja comenzado por su definición, las tolerancias y finalmente las fallas más comunes que se presentan.

En el capítulo tres, se describe el proceso de simulación mediante elemento finito (Finite Element Method o FEM por sus siglas en inglés) de forja, en donde se presentan varios artículos de análisis de prótesis forjadas; de igual forma se presentan parámetros geométricos aplicados al forjado de prótesis de cadera, siempre buscando optimizar el proceso y los recursos.

En el capítulo cuatro se desarrolló el análisis FEM aplicado a la prótesis de cadera seleccionada previamente, el cuál va desde su escaneo en 3D, limpieza de CAD, parámetros geométricos, selección de material y su posterior simulación en una paquetería comercial (Abaqus[®]) con el método de acoplamiento euleriano-lagrangiano (Coupled Eulerian-Lagrangian o CEL por sus siglas en inglés).

Finalmente se presentan los análisis de resultados y las conclusiones a las que se llegaron.

Índice

Capítulo 1 - Conceptos básicos.	1
1.1 Definición de forja.	1
1.2 Clasificación de los procesos de forja.	2
1.2.1 Por temperatura.	2
1.2.2 Por características de las herramientas.	5
1.3 Equipos para forjar.	6
1.3.1 Prensas hidráulicas.	7
1.3.2 Prensas mecánicas.	7
1.3.3 Prensas de tornillo.	8
1.3.4 Martinetes.	8
1.3.5 Capacidades de los equipos.	9
1.4 Operaciones de forja.	10
1.5 Lubricación.	12
1.5.2 Lubricantes comunes.	13
1.5.3 Ventajas y desventajas.	14
1.6 Secuencias de piezas forjadas.	15
1.7 Defectos de forja.	17
1.8. Prótesis de cadera.	18
1.8.1. Partes de una prótesis de cadera.	19
1.8.2. Procesos de manufactura en prótesis de cadera.	20
Capítulo 2 - Diseño de dados y procesos de forja.	22
2.1 Dados de forja.	22
2.2 Tolerancias en el diseño de dados de forja.	25
2.3 Proceso de diseño.	27
2.4 Fallas comunes en dados de forja.	36
Capítulo 3 – Modelado por elemento finito de la forja de una prótesis de cadera.	38
3.1 Introducción.	38
3.2 Proceso moderno de diseño de prótesis de cadera.	38
3.3 Parámetros geométricos.	40
3.4 Análisis de estampas mediante el análisis de elementos finitos.	42
3.5 Análisis FEM del proceso de forja de una prótesis de cadera.	43
3.6 Optimización del lingote para el forjado de prótesis.	45
Capítulo 4 - Modelado FEM para la forja de una prótesis Austin-Moore.	48
4.1 Escaneo y limpieza del modelo 3D de una prótesis de cadera.	48

4.2 Metodología para el modelado del proceso de forjado.	53
4.3 Diseño de la zona de rebaba.	60
4.4 Simulación en Abaqus® con método CEL.	61
4.5 Análisis de resultados.	64
4.5.1 Esfuerzo equivalente de Von Mises.	64
4.5.2 Llenado de dado.	65
4.5.3 Fuerza resultante.	66
4.5.3 Campo de velocidades.	68
5. Conclusiones.	69
6. Bibliografía.	71

Capítulo 1 - Conceptos básicos.

1.1 Definición de forja.

El proceso de forja se define como el método de conformado mecánico de piezas metálicas que consiste en deformar plásticamente un metal de geometría simple denominado como “*tocho*” mediante cargas de compresión continuas que serán aplicadas en su superficie a través de dados o estampas con ayuda de diversas herramientas y maquinaria.

La finalidad del proceso es darle al elemento metálico inicial una forma específica deseada, para la fabricación de productos de uso común tanto domésticos, como del área automotriz e industrial, siendo algunos ejemplos: bielas automotrices, cubiertos, barandales, herrajes, entre otros.

Además, las piezas obtenidas mediante forja tendrán un gran desempeño en cuanto a sus propiedades mecánicas del material debido a que el tamaño de grano es refinado, por lo que las piezas producto de la forja presentan una mayor resistencia.

Este método es la opción ideal para producciones en serie debido a como se manufactura el dado de forja y la productividad del proceso. Así mismo, permite la fabricación de piezas de materiales ferrosos y no ferrosos como acero al carbono, acero inoxidable, aleaciones de aluminio, cobre o titanio con geometrías, volúmenes y pesos diversos. La ventaja principal de este proceso es que la forma final es muy similar a la deseada, facilitando y minimizando el trabajo de maquinado o arranque de viruta.

Algunas otras ventajas son: uniformidad en la pieza final, menor peso de la pieza debido a una correcta distribución del material, ahorro económico y de material, si se toma en cuenta el ciclo de vida del producto,

En la figura 1.1 se observa el proceso de forjado en caliente, en donde se tienen un dado superior, un dado inferior, el metal precalentado y a la persona operaria que coloca el tocho entre las prensas.



Fig. 1.1 Forja en caliente. (Etal, 2021)

En el proceso de forja se requieren diversos elementos, los esenciales son: dado, matriz o estampa tanto superior (upper die) como inferior (lower die), tocho (lingote o preforma del material a deformar), maza o ariete (ram), yunque (anvil) y el espacio para la rebaba que se encuentra dentro de la matriz, este compartimiento es diseñado para que el excedente de material fluya por esa zona y se garantice el llenado del molde. En la figura 1.2 se observan las partes antes mencionadas.

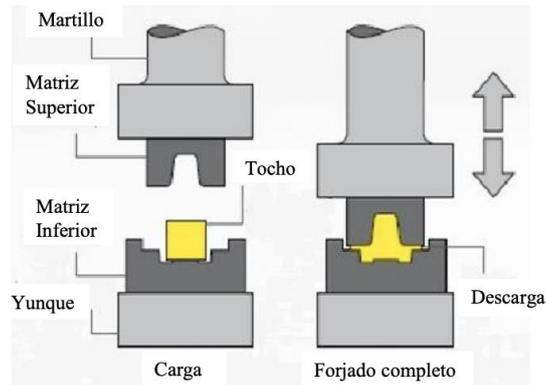


Fig. 1.2. Configuración para forja. (Gestión de compras s.f)

1.2 Clasificación de los procesos de forja.

1.2.1 Por temperatura.

Por condiciones del proceso, la forja puede ser en caliente o en frío.

- En frío: Es un proceso en el que el material se deforma a temperatura ambiente, o bien por debajo de la temperatura homóloga (misma que se expresa como una fracción del punto de fusión de cada material). De manera general, cuando se forja en frío, puede tratarse de un proceso calibrado o acuñado.
- En caliente: Es el tipo de forja más usado, alrededor del 90% (Ortiz, 2013) de las piezas forjadas son fabricadas mediante este método. En el procedimiento, el tocho es calentado a una temperatura óptima que mejore su ductilidad (temperatura de recristalización).

En la tabla 1.1, se observan los valores del rango de temperatura considerados para cada proceso, así como el coeficiente de fricción.

Tabla 1.1 Valores de temperatura para procesos de forja. (Universidad de San Simón, sf)

Proceso	Rango de temperatura	Coefficiente de fricción
En frío	$\leq 0.3 T_m$	0.1
En tibio	$0.3 T_m < T \leq 0.5 T_m$	0.2
En caliente	$0.5 T_m < T \leq 0.75 T_m$	0.2 - 0.5

Donde:

T_m - Temperatura de fusión es escala absoluta.

Proceso de forjado en frío.

El proceso comienza con el tocho a una temperatura menor a la homóloga (misma que debe encontrarse dentro del rango en el que sea posible desprestigiar los efectos difusivos) y con dimensiones cercanas a las requeridas en el modelo final para posteriormente ser colocado en prensas verticales, o bien en máquinas automáticas de conformado en frío con múltiples estaciones, en las cuales se va formando la pieza con cada operación realizada por una prensa, de manera que el tocho mediante cargas de compresión se va introduciendo en la matriz tomando la forma que se encuentra plasmada en ella.

Para lograr el objetivo de deformación, son necesarias cargas mayores que dan como resultado esfuerzos más grandes en la pieza, lo que se traduce en mayor resistencia mecánica en piezas forjadas en frío, en comparación con piezas forjadas en caliente.

El forjado en frío es un procedimiento fiable y económico que suele ser eficiente para la fabricación en serie. Algunas otras ventajas son que, al no alcanzar a una temperatura de recristalización, no hay oxidación ni contracción, por lo que se evitarán defectos en el metal; otra ventaja es la gran productividad, la mejora en las propiedades mecánicas del metal, el ahorro de material y de energía, así como un buen acabado superficial.

Algunas piezas fabricadas a nivel industrial bajo este método incluyen: pistones, ejes de transmisión, piñones, bastidores, entre otros.

Por otro lado, algunas desventajas incluyen la generación de esfuerzos residuales no deseados, menor maleabilidad en la pieza, además del uso de maquinaria y herramientas especializadas y de mayor potencia para deformar el tocho. Asimismo, la lista de metales que se pueden usar para la forja en frío es limitada. Algunos de estos metales incluyen aceros al carbono, aluminio y otros que tienen alta ductilidad con ciertas excepciones como el plomo por sus implicaciones al medio ambiente y a la salud.

En la figura 1.3 se observa un proceso muy común de forjado en frío en una herradura.



Fig. 1.3. Proceso artesanal de forja en frío. (Anz, 2007)

Proceso de forjado en caliente.

El primer paso de este proceso, consiste en aumentar la temperatura de la pieza metálica hasta llegar a su punto de recristalización.

Posterior a ello, el tocho es colocado en las prensas para que los martillos o martinets, si es el caso, mediante impactos generen presión y el metal llene los relieves de la matriz para tomar la forma final deseada; es destacable que al final no se tienen esfuerzos internos que promuevan el endurecimiento por deformación, por lo que la resistencia no aumentará en el material debido al proceso de recristalización dinámica que se lleva a cabo.

Algunas ventajas de la forja en caliente son: eliminación de impurezas químicas, mejor maleabilidad en comparación con las piezas forjadas en frío, estructura de grano homogeneizado, posibilidad de fabricación de geometrías complejas, piezas de mayor peso y volumen.

En cuanto a la variedad de metales que pueden ser forjados en un proceso caliente, se encuentra mayor diversidad, lo que permite la elaboración de piezas tales como cigüeñales, juntas, piezas de chasis (brazo de control, nudillo de dirección, etc.), válvulas, bridas, entre otras.

Por otro lado, este proceso también presenta desventajas tales como: mayor costo, necesidad de maquinado para el acabado, menor control dimensional, debido a la contracción térmica que presenta.

En la figura 1.4, se ilustra el proceso de forja en caliente.



Fig. 1.4. Forja en caliente. (Forjadoind, 2016)

En la tabla 1.2 se muestran intervalos de temperaturas en los cuales trabaja cada material, esto es importante para realizar un proceso de forjado.

Tabla 1.2 Intervalos de temperaturas para forja. (Ortiz, 2013)

Metal o aleación	Intervalo de temperaturas para forjado [°C]
Aleación de aluminio	400 - 550
Aleación de magnesio	250 - 350
Aleación de cobre	600 - 900
Aceros al carbono y de baja aleación	850 - 1150
Aceros inoxidable martensíticos	1100 - 1250
Aceros inoxidable austeníticos	1100 - 1250
Aleaciones de titanio	700 - 950
Superalaciones de base hierro	1050 - 1180
Superalaciones de base cobalto	1180 - 1250
Aleaciones de tantalio	1050 - 1350
Aleaciones de molibdeno	1150 - 1350
Superalaciones de base níquel	1050 - 1200
Aleaciones de tungsteno	1200 - 1300

1.2.2 Por características de las herramientas.

Por características de las herramientas o matrices, el método de forja se puede clasificar por forja abierta, cerrada y forja con rodillos.

- **Matriz abierta:** Este método consiste en deformar el tocho entre múltiples matrices que no cierran completamente, por lo que el flujo del material hacia los lados es libre y la exactitud de las piezas es menor. Este procedimiento se emplea principalmente para la fabricación de preformas. En la figura 1.5 se muestra un ejemplo de forja en matriz abierta.

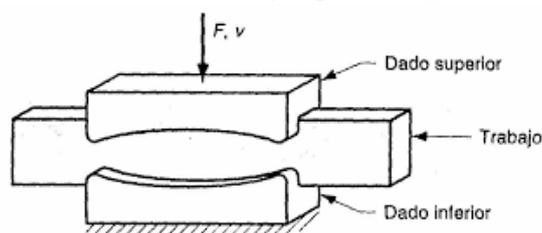


Fig. 1.5. Forja de matriz abierta. (s.f., 2013)

- **Matriz cerrada:** También llamada forja por estampa, en este procedimiento, el tocho es prensado por las matrices, dados o estampas; donde ambas tienen una impresión de la geometría final deseada. El impacto de la maza sobre el tocho obliga al material a moverse a través de todas las cavidades de la matriz, llenando completamente la figura de la misma. Las deformaciones realizadas pueden constar de varias etapas dependiendo de la complejidad del diseño de la pieza. El forjado en matriz cerrada puede realizarse tanto en caliente como en calibrado. En la figura de 1.6 se muestra una forja de matriz cerrada.

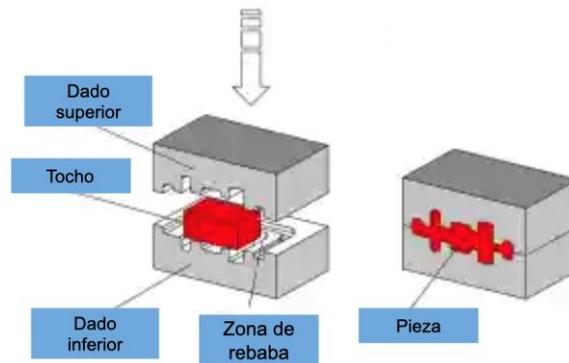


Fig. 1.6. Forja en matriz cerrada. (Mesa, s.f)

- **Forja con rodillos:** Método utilizado para disminuir el tamaño de la sección transversal de barras. Se aplica en operaciones de preforma, para posteriormente forjarse nuevamente, pero mediante estampa. Se requiere calentar el tocho, previo al inicio del proceso ya que presenta altas deformaciones, en la figura 1.7 se muestra un ejemplo de forja con rodillos.

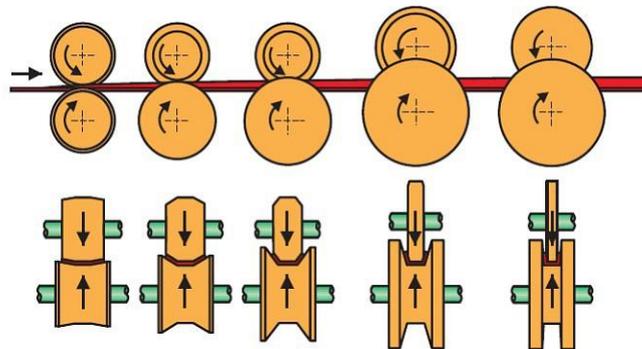


Fig. 1.7. Forja con rodillos. El material pasa a través de rodillos para disminuir su volumen (Webmaster, 2019)

1.3 Equipos para forjar.

Existe una gran variedad de máquinas para forja, algunas características principales son:

- La capacidad (fuerza en toneladas).
- Las velocidades.
- La velocidad-carrera.

A continuación, se mencionan los principales equipos para el proceso de forja.

1.3.1 Prensas hidráulicas.

Las prensas hidráulicas mostradas en la figura 1.8, son máquinas que trabajan a velocidades constantes que pueden ser de carga limitada o restringida. La única forma en la que una prensa puede detenerse es que la carga necesaria para deformar el material exceda su capacidad.

Con estas máquinas es posible transmitir una gran cantidad de energía a una pieza de trabajo mediante una carga constante a través de un recorrido, al realizarlo se puede controlar la velocidad.

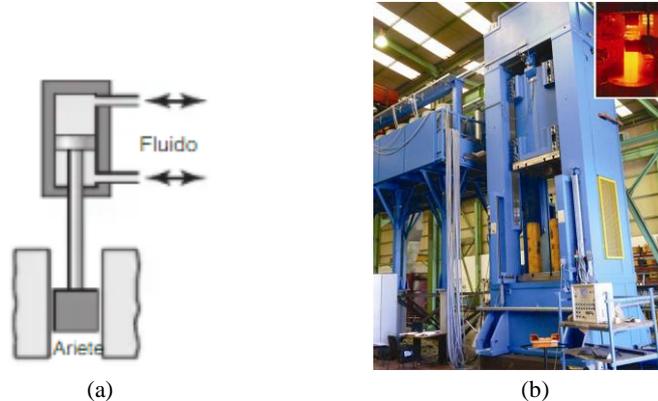


Figura 1.8 (a) Prensa hidráulica esquema. (Kalpakjian, 2008) y **(b) Prensa hidráulica.** (AFM, s.f)

El forjado resulta ser más tardado a diferencia de otro tipo de proceso de deformación, porque la pieza puede enfriarse con rapidez. Otra desventaja que tienen respecto a las prensas mecánicas es que son más lentas, lo que se traduce en mayores costos iniciales. Su principal ventaja es que requieren poco mantenimiento y se tiene un mejor control de la carga aplicada.

1.3.2 Prensas mecánicas.

Las prensas mecánicas se dividen en dos tipos: manivela o excéntrica. La figura 1.9 es ejemplo de una prensa mecánica.

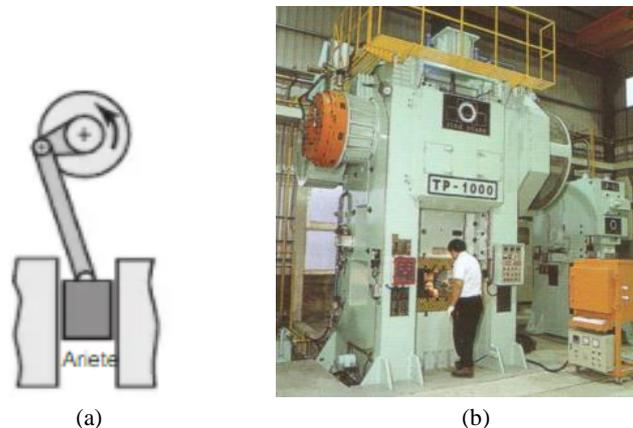


Figura 1.9 (a) Prensa mecánica esquema (Kalpakjian, 2008) y **(b) Prensa mecánica real** (UPV, s.f)

Estas pueden ser de recorrido o de carrera limitada, esto es porque la velocidad es variable a partir de un máximo en el centro del recorrido hasta un cero en su parte inferior. En una prensa mecánica la energía se puede generar con un gran volantín accionado mediante un motor eléctrico. El volantín se puede acoplar a un eje excéntrico mediante un embrague. Y mediante una biela, el movimiento giratorio se traduce en lineal alternativo.

La fuerza que se aplicará depende de la posición del recorrido y su magnitud es máxima en la parte inferior del centro muerto. Una ventaja es que tienen una alta velocidad de producción, son fáciles de automatizar y requieren menos exigencias para el equipo.

1.3.3 Prensas de tornillo.

Las prensas de tornillo que se observan en la figura 1.10 son de energía limitada, ya que obtienen su energía de un volante. La carga se transmite mediante un tornillo vertical grande y el ariete se para cuando la energía del volante se disipa. Cuando las matrices no pueden cerrarse al final del ciclo, la operación vuelve a repetirse hasta que el forjado quede completo.



Figura 1.10 (a) Prensa de tornillo esquema (Kalpakjian, S. 2008) y **(b) prensa de tornillo real** (MECOLPRESS, s.f)

Estas máquinas son adecuadas para cantidades pequeñas de producción y para partes delgadas con alta precisión.

1.3.4 Martinetes.

Un martinete (figura 1.11) está formado de un accionamiento, el yunque que soporta la pieza y la maza que la golpea. A la maza y al yunque se les sujetan los porta troqueles y a estos la estampa inferior y superior.

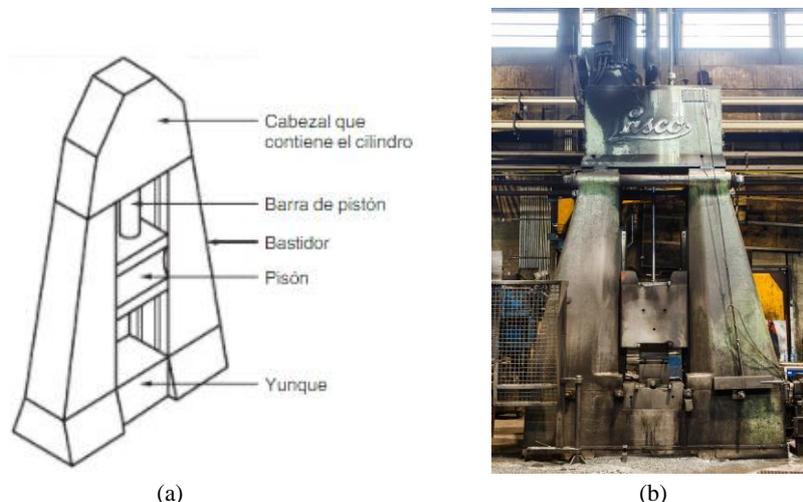


Figura 1.11 (a) Martinete esquema (Groover, 2007) y **(b) martinete real** (DABROX, s.f)

Existen 3 tipos de martinetes

- De caída libre: se eleva la maza, y luego cae por su propio peso, de manera que la energía potencial se transforma en energía cinética.
- De doble efecto: se eleva la maza, y en su caída, es impulsada o ayudada por un sistema cilindro-pistón accionado neumática o hidráulicamente.
- De contragolpe: la maza es impulsada por un sistema cilindro-pistón mientras ésta baja, la mesa sube, de manera que ambas se encuentran en su recorrido.

Para los martinetes mecánicos, el recorrido del ariete hacia abajo adquiere su aceleración por una presión de vapor, aire o hidráulica aproximadamente de 750 [KPa]. (Birtlh, s.f.)

1.3.5 Capacidades de los equipos.

En la tabla 1.3 se definen los rangos de carga de las diferentes máquinas para forja.

Tabla 1.3 Capacidades de los equipos (Kalpakjian, 2008)

Tipo de equipo	Capacidades
Prensa hidráulica	125 [MN] (14,000 Toneladas cortas) 450 [MN] (50,000 toneladas cortas) América del Norte
	730 [MN] (82,000 toneladas cortas) en Rusia
Prensa mecánica	2.7 a 107 [MN] (300 a 12,000 toneladas cortas)
Prensa de tornillo	1.4 a 280[MN] (160 a 31,500 toneladas cortas)
Martillos	454 kg produce piezas >1.36 kg 1361 kg produce piezas >11.4 kg
Martinetes	225 a 22,500 kg tienen una capacidad de energía de 1150 [KJ]
	180 a 4500 kg tienen una capacidad de energía de 120 [KJ]

En la tabla 1.4, está definido el intervalo de velocidades para cada equipo de forja.

Tabla 1.4 Velocidades de los equipos de forja. (Kalpakjian, 2008)

Equipo	m/s
Prensa hidráulica	0.06 - 0.30
Prensa mecánica	0.06 - 1.5
Prensa de tornillo	0.6 - 1.2
Martinete de caída por gravedad	3.6 - 4.8
Martinete de caída mecánica	3.0 - 9.0
Contramartillo	4.5 - 9.0

1.4 Operaciones de forja.

Durante el proceso de forja se pueden realizar algunas operaciones necesarias para diversos acabados o geometrías de las piezas requeridas, dichos procesos forman parte de las secuencias de forjado.

- **Recalcado:** El objetivo de esta operación es que, al comprimir el material, el diámetro se incrementa a costa de la disminución de su altura o espesor. Este método se utiliza principalmente en la fabricación de las cabezas de clavos, pernos y tornillos; puede realizarse en frío o en caliente. En la figura 1.12, se observan las diferentes formas de recalcado: a) plano, b) redondeado, c) cónico, d) octagonal, e) hexagonal.

Como límite de este método se encuentra que la cantidad de deformación máxima es cuantificada mediante la longitud límite que se puede recalcar en una sola maniobra (golpe), misma que no debe superar tres veces el diámetro inicial de la barra.

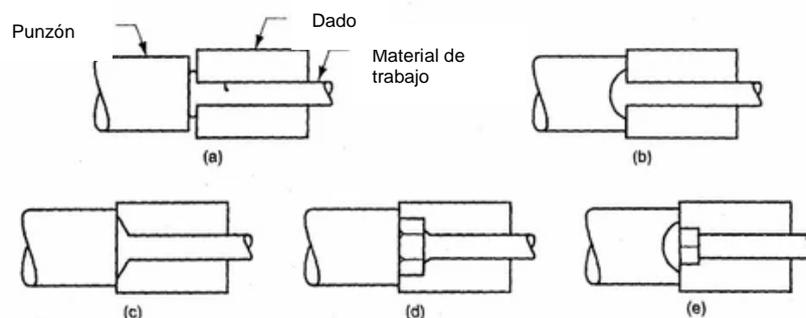


Fig. 1.12 Recalcado. (a) Perno con cabeza plana, (b) Perno con cabeza convexa, (c) Perno con cabeza cónica, (d) Perno con cabeza octagonal, (e) Perno con cabeza hexagonal convexa.

(Berumén, s.f.)

- **Rebordeado:** Se realiza mediante dados con la finalidad de dar forma a los extremos de las barras y así acumular material formando geometrías curvas convexas (Figura 1.13 a).

- Bateado: Bien podría ser el proceso “inverso” al rebordeado, ya que el producto final será una pieza con una geometría curva cóncava (Figura 1.13 b).

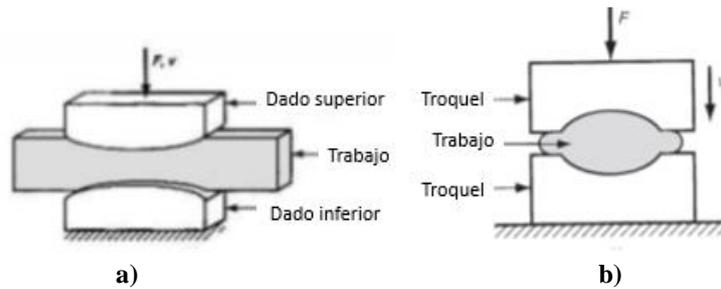


Fig. 1.13 (a) Rebordeado (Cárdenas, 2014) **(b) Bateado.** (Godoy, 2013)

- Estrangulación o degüello: En este método se generan geometrías de menor diámetro, tal como en un tubo Venturi entre tramos de mayor diámetro. El flujo del metal comenzará por el centro de dicha reducción hasta los extremos. Al observar la figura 1.14, se puede identificar que, al colocar el material entre los rodillos, el diámetro de la pieza de trabajo disminuye de manera localizada.

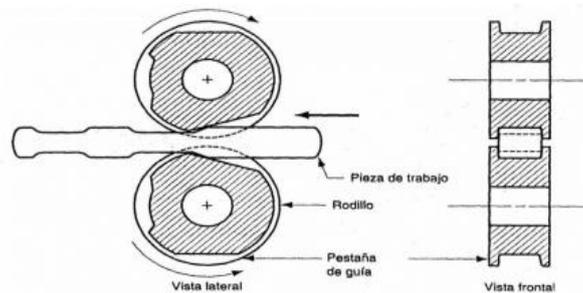


Fig. 1.14 Forja con rodillos. (Esquivel, 2018)

- Punzonado: Método en el que no se genera rebaba, sin embargo, es mucho más que eso, este procedimiento imprime una geometría haciendo que el flujo del material sea contrario al sentido de empuje del punzón. Figura 1.15.

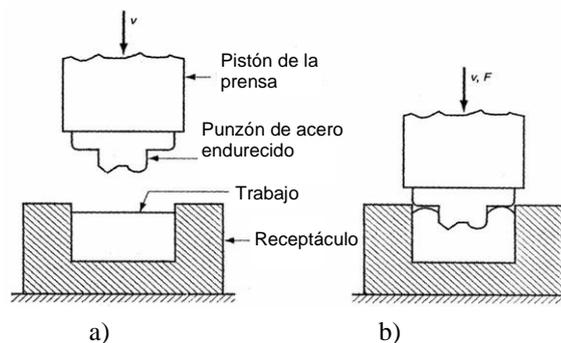


Fig. 1.15 Punzonado. a) Posición inicial y b) Impresión (Anónimo, 2016)

1.5 Lubricación.

En el proceso de forja se trabaja con metales- Tanto el material de trabajo como las herramientas suelen ser de metal, por lo que al impactarse de manera continua se produce fricción. Dado lo anterior el uso de lubricantes es esencial ya que su principal función es ayudar a que la pieza forjada no presente defectos por fricción. El uso de lubricantes suele presentarse en el forjado en frío.

Existen 4 regímenes de lubricación:

- Lubricación de película gruesa: Las superficies se separan por completo mediante una película de lubricante; la viscosidad es un factor importante que considerar. Las películas pueden desarrollarse en algunas partes de las piezas de trabajo, en operaciones de alta velocidad, y en lubricantes de alta viscosidad. En operaciones como el acuñado y forjado de precisión, son indeseables los lubricantes atrapados porque evitan la generación precisa de las formas. (Figura 1.16 c).
- Lubricación de película delgada: Al aumentar la carga entre la matriz y la pieza de trabajo, o al disminuir la velocidad y viscosidad del fluido para trabajo de los metales, la capa del lubricante se vuelve más delgada. Esta condición incrementa la fricción en las intercaras de deslizamiento y produce un leve desgaste. (Figura 1.16 d).
- Lubricación mixta: Gran parte de la carga se soporta por el contacto físico (asperezas) de las dos superficies. El resto lo efectúa la película de fluido atrapada en bolsas, como los valles entre las asperezas. (Figura 1.16 a)
- Lubricación marginal: La carga es soportada por las superficies en contacto cubiertas con una película marginal de lubricante. Esta es una capa delgada de lubricante que es atraída físicamente hacia las superficies metálicas, evitando el contacto directo metal con metal de los dos cuerpos y reduciendo el desgaste. Los lubricantes marginales más comunes son: aceites naturales, grasas, ácidos grasos, ésteres o jabones. (Figura 1.16 b).

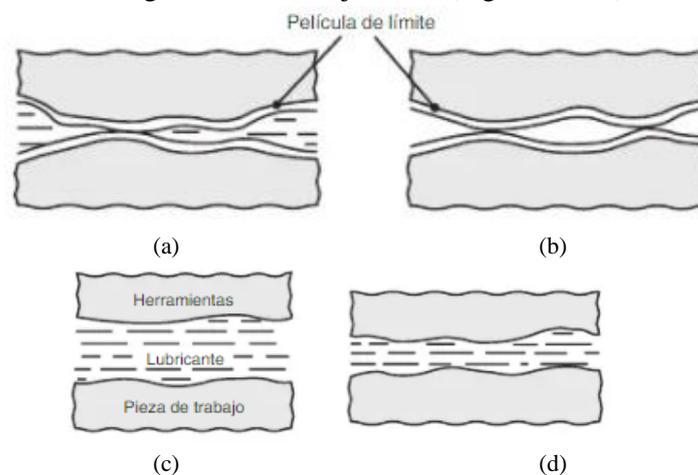


Fig 1.16 (a) lubricación mixta, (b) lubricación marginal, (c) lubricación de película delgada y (d) lubricación de película delgada. (Kalpakjian, 2008)

La pieza de trabajo debe tener la superficie más rugosa, para evitar que la superficie más rugosa y dura de la matriz dañe la superficie de la pieza. La rugosidad superficial recomendada en la mayoría de las matrices es de casi $0.4 \mu m$ ($1.5 \mu pulg$) (Kalpakjian, 2008).

1.5.1 Cálculo de la fricción.

Una forma de expresar la fricción mecánica de la intercara es mediante el coeficiente de fricción μ o un factor de fricción por corte m , por lo que el esfuerzo cortante por fricción se expresa de la siguiente manera:

$$\tau = \mu\sigma_n \text{ ó } \tau = f\bar{\sigma} = \frac{m}{\sqrt{3}}\bar{\sigma} \dots (1.1)$$

Donde

σ_n - Esfuerzo normal en la intercara o esfuerzo de cedencia del material deformante.

f - Factor de fricción

1.5.2 Lubricantes comunes.

En la tabla 1.5 se mencionan lubricantes utilizados en la forja

Tabla 1.5 Lubricantes. (Kalpakjian, 2008)

Lubricante	Características
Aceite	Mantienen las películas de alta resistencia en la superficie de los metales. Reducen la fricción y el desgaste, tienen baja conductividad térmica y bajo calor específico.
Emulsiones	Son una mezcla de dos líquidos inmiscibles (agua y algunos aceites) junto con aditivos. Evitan que se unan las gotas dispersas en una mezcla. Existen dos tipos: los directos, que dispersan el aceite en agua y los indirectos que dispersan las gotas de agua en el aceite.
Jabones	Son una reacción de sales de sodio o potasio con ácidos grasos, son lubricantes marginales eficaces que tienen la capacidad de formar capas gruesas de película en las caras internas de la matriz y la pieza de trabajo.
Grasas	Son lubricantes sólidos o semisólidos, su composición está hecha de jabones, aceite mineral y diversos aditivos. Tienen una viscosidad considerable y se adhieren a las superficies metálicas. Se utilizan para piezas de bajo volumen y a una temperatura baja.
Ceras	Son menos aceitosas y más frágiles en comparación con las grasas. Tienen un uso limitado en las operaciones de trabajo de los metales, excepto como lubricantes para cobre, aceros inoxidable y aleaciones de alta temperatura.
Grafito	Lubricante sólido para el trabajo en frío/caliente, tiene un coeficiente de fricción bajo, solo en presencia de aire o humedad. En una atmósfera de vacío o gas inerte la fricción es muy alta, por lo que se convierte en un abrasivo.
Vidrio	Se vuelve viscoso a temperaturas elevadas por lo que sirve como un lubricante líquido. La viscosidad está en función de la temperatura y depende del tipo de vidrio. Debido a su conductividad térmica, actúa como barrera térmica entre las piezas de trabajo calientes y las matrices frías. Se utiliza para el trabajo en frío / caliente.

1.5.3 Ventajas y desventajas.

Ventajas del uso de lubricantes en el forjado.

- Influyen en gran medida en la disminución de la fricción entre matrices y la pieza de trabajo, al igual que en el desgaste.
- Actúan como barrera térmica entre la pieza de trabajo caliente y las matrices relativamente frías.
- Actúan como agente separador de la matriz y la pieza de trabajo.
- Mejora el flujo del metal.
- Disminuyen las fuerzas en las cavidades de las matrices.

Desventajas de los lubricantes del forjado.

- Costo adicional.
- Tiempo que se requiere para lubricar.
- Implica un proceso adicional para retirar el lubricante.
- Compatibilidad del fluido con los materiales del herramental, la matriz y la pieza de trabajo.
- Preparación requerida de la superficie.
- Contaminación del fluido por otros lubricantes, como los usados para maquinaria.
- Consideraciones biológicas y ambientales.

En la tabla 1.6 se muestran algunos valores para el coeficiente de fricción para los diferentes materiales sin lubricante.

Tabla 1.6 Condiciones sin lubricación (Ortiz, 2013)

Material	Temperatura [°C]	μ
Acero	900	0.23
	1000	0.20
	1100	0.19
Cobre	850	0.16
	900	0.15
	950	0.14
Aluminio	450	0.15
	500	0.14
	550	0.13
Latón	650	0.18
	700	0.17
	750	0.16

Para un caso específico en el que el material a forjar sea acero y de igual forma los dados con un lubricante de grafito en agua, se tienen los siguientes valores (Ortiz, 2013): Para $T < 900^{\circ}\text{C}$ se tendrá un coeficiente de fricción $\mu = 0.15$. para $T = 1000^{\circ}\text{C}$ se tendrá un coeficiente de fricción $\mu = 0.16$ y para $T = 1100^{\circ}\text{C}$ se tendrá un coeficiente de fricción $\mu = 0.17$.

Al comparar los valores con y sin lubricación para el acero, se observa que en el coeficiente de fricción disminuye considerablemente para el primer caso, lo que se traduce en un menor desgaste para la herramienta involucrada.

1.6 Secuencias de piezas forjadas.

Para llevar a cabo de manera correcta el proceso de forja, es necesario hacerlo por etapas para no someter al material a fuerzas excesivas que puedan generar defectos.

Cada fase está en función de las necesidades y características del material. Se distinguen cinco etapas principales:

- Calentamiento (Heating): En este primer paso, los lingotes de metal también conocidos como “tochos” son calentados hasta el punto en el que mantienen su forma, pero bajo la acción de cualquier fuerza se deforman con facilidad.

La forma de dichos lingotes puede ser variada y dependerá de la geometría final de la pieza; idealmente y para evitar el desperdicio de material el lingote debe tener dimensiones cercanas a las de la pieza forjada. En la figura 1.17 se muestra un ejemplo del calentamiento.



Fig. 1.17 Calentamiento inductivo de un lingote de acero. (Ajmal, 2018)

- Preformado: Esta etapa puede conformarse de uno o más pasos cuya finalidad es que el lingote pueda ser presionado entre los dados, éste debe ser bordeado y estampado una primera vez; la primera operación es realizada con el objetivo de disminuir la sección transversal de trabajo, mientras que el estampado o “blocking” es implementado para comenzar a darle forma al lingote.

El objetivo de este paso es que el material se distribuya de manera uniforme acercándose a la distribución de volumen adecuada para el estampado final, para lograr esta meta se realizan operaciones de forja libre, como el rebordeado y el recalado (Fig. 1.18).



Fig. 1.18 Preforma en proceso de forja. (MES, s.f)

Es importante señalar que en la preforma no se llega a la geometría final deseada, sin embargo, asegura la distribución correcta del material.

- Forjado final (Finish forging): Una vez realizada la preforma, el metal es introducido en medio de los dados de forja (figura 1.19); los dados al comprimir el lingote dan la forma final de la pieza. En el caso de las piezas simples, el proceso únicamente toma un paso de compresión; sin embargo, si la pieza final tiene una geometría más compleja puede requerir varias compresiones con diferentes valores de presión entre los dados. Para conocer si la pieza es sencilla o compleja, se deben tomar en cuenta las proporciones relativas de las proyecciones verticales y horizontales.



Fig. 1.19 Forja en caliente. (IANS, 2021)

- Enfriamiento (Cooling): En esta penúltima etapa mientras el metal aún se encuentra en los dados, la zona de rebaba o bien el excedente de metal que se encuentra fuera de los dados se enfría y endurece más rápido que el metal en la estampa, generando fuerzas que empujan el metal dentro del dado para poder llenar todas las cavidades (Figura 1.20).

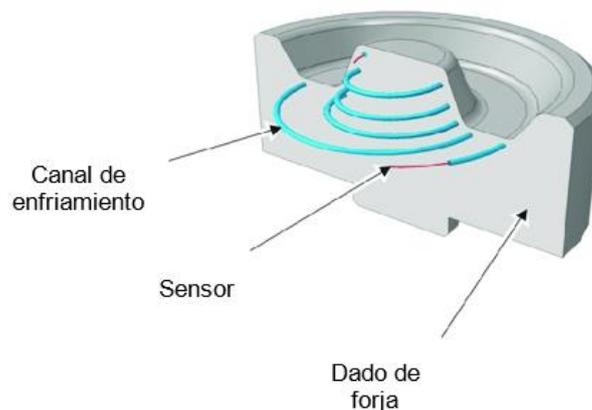


Fig. 1.20 Sistema de enfriamiento en un dado de forja. (Behrens, 2014)

- Terminado (Finishing): Una vez que se realizaron las operaciones de compresión, se procede a tratar la superficie de la pieza con el objetivo de verificar la exactitud de las medidas, eliminar la viruta, así como de evitar la corrosión y mejorar la resistencia y apariencia de la pieza forjada. En la figura 1.21 se observa el pulido de una pieza forjada, lo que le dará un mejor acabado superficial.



Fig. 1.21 Pulido de una pieza previamente forjada. (FORCAN, s.f)

1.7 Defectos de forja.

El proceso de forja es uno de los procesos de manufactura más utilizado por la industria por lo que es muy importante tener un control y cuidado adecuado durante las etapas del proceso con las temperaturas y reducciones, en la siguiente tabla se mencionan los principales defectos que pueden presentarse en las piezas (tabla 1.7).

Tabla 1.7 Defectos de forja. (Kalpakjian, 2008)

Defecto	Características	Causas
Secciones sin llenar	Alguna sección no fue llenada por el material en el dado.	Mal diseño de los dados o mala técnica de forja.
Cierre por enfriamiento (Cold shut)	Formación de grietas en las esquinas.	Mal diseño de los dados e incluso de la pieza si esta contiene geometrías muy agudas que concentren los esfuerzos.
Picaduras (Scale pits)	Deposiciones irregulares de material en la superficie de la pieza.	No limpiar el dado ni el material antes del proceso de forja. Usualmente este defecto ocurre en forja abierta.
Desalineación (Die shift)	No se genera la geometría deseada.	Incorrecta alineación de los dados superior e inferior.
Grietas	Grietas internas en la pieza que le generan baja resistencia.	Enfriamiento no controlado y rápido.
Crecimiento de grano inadecuado	Superficies irregulares y con defectos.	El mal diseño del dado genera mal flujo de material y la estructura de grano se ve afectada.
Esfuerzos residuales	Altos esfuerzos superficiales en la pieza alteran las propiedades mecánicas del material.	Mal control de la velocidad de enfriamiento de la pieza. El enfriamiento debe ser lento.

Los defectos en la forja pueden generar fatiga, lo que puede llevar a la fractura por lo que los análisis en las piezas forjadas son imprescindibles.

1.8. Prótesis de cadera.

La cadera es la articulación esférica que conecta el fémur con la pelvis mediante una esfera del extremo del fémur que encaja con la cavidad de la pelvis. La función principal de la cadera es la conexión, movilidad y estabilidad entre el tren superior e inferior del cuerpo humano.

Algunas enfermedades que se pueden generar en la cadera son: artrosis, artritis, fractura, displasia, dislocación, distensión, entre otras; estos problemas pueden ser tratados mediante fisioterapia o bien, en casos más complejos con cirugía de reemplazo total o parcial de cadera (artroplastia).

De acuerdo con los componentes a implantar, las prótesis de cadera se pueden clasificar en tres grupos:

- **Parcial:** Se aplica mayormente en pacientes de la tercera edad que presentan fractura en el cuello del fémur, estas prótesis únicamente reemplazan la cabeza del fémur. No se recomiendan para personas con una vida muy activa, ya que la fricción que se produce con la cavidad acetabular provoca un desgaste acelerado perjudicando su funcionamiento en un lapso corto de tiempo.
- **Total:** Tal como su nombre lo indica, supone el reemplazo de todas las piezas, comúnmente cuenta con cabeza femoral, componente acetabular o cotilo, inserto acetabular y vástago; el cotilo se fija con cemento óseo (en el caso de la fijación cementada) o bien, su superficie se recubre con material poroso que permite el ajuste natural entre los huesos (fijación no cementada), a la pelvis. En la figura 1.22 se muestran la prótesis parcial (izquierda) y total (derecha) de cadera. Se observa que el primer caso es menos invasivo y conserva mayor parte del hueso.



Fig. 1.22. Prótesis parcial y total de cadera. (Orthoinfo, s.f)

- **De recubrimiento:** Sustituye la superficie de la articulación artrítica sin eliminar gran parte del hueso en comparación con una prótesis tradicional, es por ello que se recomienda para pacientes jóvenes menores de 60 años. Su mayor desventaja es que requiere supervisión médica continua debido a la fricción entre el hueso y el metal que puede generar desgaste y aflojamiento terminando eventualmente en otra operación. (figura 1.23).



Fig. 1.23. Prótesis de recubrimiento de cadera. (Ríos, s.f)

Por otro lado, si se clasifica por la cementación a aplicar, se tienen tres grupos:

- **Cementada:** Se utiliza un cemento quirúrgico especial de polimetilmetacrilato (PMMA) para fijar adecuadamente la prótesis al hueso, su uso es especial para personas con mala calidad ósea.
- **No cementada:** Al no usar cemento, se recurre a un ajuste con tolerancias mínimas, además de que se requiere que la superficie de la prótesis sea porosa para favorecer la integración entre el metal y el hueso.
- **Híbrida:** Para la pieza femoral se utiliza cemento, mientras que para la pieza acetabular se utiliza el método de no cementación.

Uno de los problemas más comunes de las prótesis de cadera es el desgaste y aflojamiento del vástago, por lo que es importante un ajuste estrecho, siendo esto un criterio de diseño importante.

1.8.1. Partes de una prótesis de cadera.

El vástago va anclado al fémur y su función es fijar la prótesis mediante su introducción a un barreno realizado por el médico cirujano en el interior del hueso; se utiliza cemento o tolerancias estrechas para fijarlo.

La cabeza femoral es la unión entre el fémur y la pelvis, comúnmente es metálica y funge como una superficie articular que puede formar un monobloque con el vástago o bien ser una prótesis modular.

El cotilo también llamado componente acetabular, es una pieza que suple al cartílago de la articulación y soporta la cabeza femoral.

El inserto es un componente similar a un domo que se coloca entre la cabeza femoral y el cotilo con la finalidad de reducir la fricción entre ambas piezas.

El vástago y el cotilo son elementos de sujeción, ya que brindan soporte al hueso, mientras que la cabeza femoral y el inserto acetabular permiten la movilidad por lo que deben fabricarse con materiales con bajo coeficiente de fricción entre sí, algunas de las combinaciones más comunes son: metal-polietileno, cerámico-cerámico, cerámico-polietileno y metal-PCU cuyo nombre comercial es TriboFit®.

Las partes antes descritas, se observan en la figura 1.24.

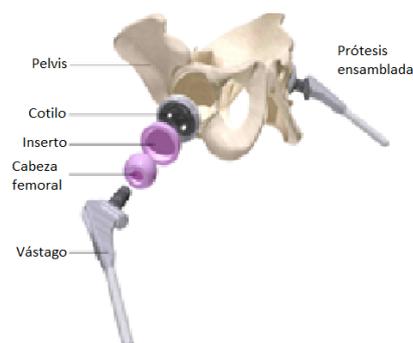


Fig. 1.24. Partes de una prótesis de cadera. (MBA, 2019)

1.8.2. Procesos de manufactura en prótesis de cadera.

La forja es el mejor proceso de conformado para la manufactura de prótesis médicas debido a las propiedades mecánicas que otorga a la pieza. Durante el proceso se genera un flujo de grano en la estructura interna del metal, lo que proporciona gran resistencia a la fatiga.

Las prótesis de cadera son sometidas a altas cargas debido a la localización que tienen en el cuerpo humano, por lo que deben tener tanto un buen diseño como manufactura. La carga que soporta la cadera en una persona erguida y sostenida por igual con las dos piernas apoyadas es de aproximadamente un tercio del peso del individuo (Berger, 1986); mientras que, al caminar, la cadera soporta una carga mucho mayor.

Las prótesis de cadera deben permitirle al paciente hacer actividades básicas como caminar, subir y bajar escaleras, lo que supone cargas de cuatro veces el peso de la persona (Hernández, 2020).

Los metales más usados para la manufactura de las prótesis son el titanio y sus aleaciones debido a su bajo módulo de Young y a su biocompatibilidad, además de su resistencia a la corrosión.

La cabeza femoral, al ser hueca tiene una mayor complejidad para fabricarse por forja, por lo que puede manufacturarse por impresión 3D.

Dado que el presente trabajo está enfocado al proceso de forja de una prótesis de cadera Austin Moore[®], se profundizará en dicha pieza.

La prótesis de cadera Austin Moore[®] fue diseñada en 1950, es una prótesis parcial que consta de vástago y cabeza pulida; Se emplea para pacientes con fractura de cadera, respeta el cartílago articular del acetábulo; su geometría es rectangular, lo que permite una mejor fijación aún bajo esfuerzos de torsión. No requiere cementado.

Este tipo de prótesis es manufacturada en una aleación de cobalto-cromo-molibdeno (CoCrMo), que se caracteriza por tener buenos parámetros mecánicos y características tribológicas, alta resistencia a la corrosión y a la fatiga.

La aleación forjada de cobalto-cromo-molibdeno (CoCrMo), que está estandarizada bajo la norma ASTM F75 actualmente es muy utilizada para prótesis de articulaciones que soportan grandes cargas, las rodillas y la cadera son dos ejemplos.

Existen tres métodos para producir la aleación: dos bajo la norma ASTM F75, uno por colada y otro por técnicas de pulvimetalurgia, éste último consiste en utilizar el cobalto, cromo y molibdeno en un polvo muy fino para prensarlo isostáticamente en caliente, compactarlo y sinterizarlo a una temperatura de 1100[°C] y a una presión de 100[MPa] (García, 2001); Por otro lado, el tercer método de producción es el forjado bajo la norma ASTM F799 que consiste en que después del proceso de colada, la aleación es forjada en caliente a 800[°C] (García, 2001) .

Las propiedades de las aleaciones cobalto- cromo son descritas en la tabla 1.8.

Tabla 1.8. Propiedades mecánicas de la aleación CoCrMo. (Mendoza, 2011)

ASTM	Condición	Módulo de Young [GPa]	Límite de fatiga [MPa]	Límite elástico [MPa]	Resistencia a la tracción [MPa]
F75	Fundido/recocido	210	207-310	448-517	655-889
	P/M HIP (pulvimetalurgia)	253	725-950	841	1277
F799	Forjado en caliente	210	600-896	896-1200	1399-1586

El proceso más común para la manufactura de una prótesis de aleación de cobalto-cromo-molibdeno es la fundición bajo la técnica de fundición de alta precisión, en la cual se vierte el metal en un molde que posteriormente se rompe para sacar una primera versión de la pieza final, la cual pasará por procesos de maquinado.

La fundición por el método de cera pérdida consta de los siguientes subprocesos: inyección de cera, formación del árbol de colada, recubrimiento cerámico y secado, extracción de la cera mediante autoclave, sinterización, fusión y vaciado, para finalmente realizar subprocesos finales como acabados de la pieza.

Sin embargo, también se usan diversos procesos como: forja, maquinado, diseño asistido por computadora CAD por sus siglas en inglés (computer-aided design), manufactura asistida por computadora CAM por sus siglas en inglés (computer-aided manufacturing), conformado y pulido, dependiendo del material del que se desea la prótesis.

Para el caso de una prótesis forjada, los subprocesos a seguir son: diseño en CAD a partir de una prótesis final, diseño del dado de forja, selección de los materiales tanto para el dado como para la pieza, posteriormente se realiza la manufactura con forja. En un caso específico, en el que se emplee una aleación F799 se deberá forjar a 800[°C] (García, 2001). Para finalizar la pieza se maquina, obteniendo las debidas tolerancias y acabados.

Como un paso posterior aplicable a cualquier proceso de manufactura, está el recubrimiento macro o micro poroso, que es un tratamiento superficial cuyo objetivo es facilitar la fijación e integración de la prótesis con el hueso, consta en elevar la temperatura de la pieza a un valor menor al de punto de fusión del material, en conjunto con partículas metálicas, generando un sinterizado.

Al finalizar, las prótesis pueden ser sometidas a limpieza química y pasivación con ácidos o electrolitos controlados para mejorar el rendimiento biológico de la pieza; así mismo es de suma importancia esterilizar la prótesis en una autoclave, para evitar cualquier infección postoperatoria.

Capítulo 2 - Diseño de dados y procesos de forja.

2.1 Dados de forja.

Los dados son herramientas fundamentales en el proceso de forja, se encuentran en juego: un dado superior y otro inferior que usualmente son simétricos, su función es comprimir el material para dar la forma deseada a la pieza; cada uno tiene una geometría, material y tiempo de vida útil distinto dependiendo del costo, el tipo de pieza y método de forja a realizar.

Los dados se clasifican por su tamaño en grandes y pequeños. Los dados grandes tienen una superficie mayor a 10^5 [mm²], mientras que los pequeños rondan entre los 10^3 y 10^4 [mm²]. (Contreras, 2013)

En el caso de que se requiera un forjado sin rebaba, las herramientas necesarias serán un dado con la forma exacta de la geometría final requerida de la pieza y un punzón que comprima el material en el dado, de esta manera no habrá sobrantes del material. Para el diseño de este tipo de dados, la zona de rebaba se excluye. Esta forma de diseñar los dados es vigente en la industria.

La geometría final de la pieza forjada depende de la calidad del dado; un diseño funcional y correcto definirá las fases y maquinado final a emplearse para la obtención de piezas forjadas de acabado fino. Es por ello que el paso más importante en el proceso de forja es el diseño de los dados.

Algunos dados básicos y herramientas necesarias son:

- Para forja en dados abiertos:

La forja en dados abiertos es un proceso sencillo, ya que la pieza de trabajo se comprime entre estos dados. Las piezas forjadas son entre 15 y 500 [kg]. A este proceso se conoce como recalado.

Con este tipo de dados se pueden realizar muchas formas como las barras redondas, cuadradas, rectangulares, hexagonales y otras formas básicas, así como ejes escalonados, ejes macizos (husillos o rotores), huecos de forma cilíndrica, carcasas de metal y piezas en forma de anillo. En la figura 2.1 se muestran ejemplos de estas formas.

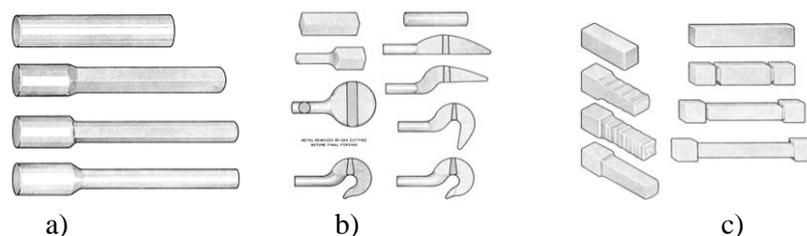


Fig. 2.1 Piezas forjadas. a) Pieza forjada mediante dados convexos, b) Piezas forjadas mediante dados convexos o planos y c) Piezas forjadas mediante dados planos. (ASM Handbook Vol 14, 1996).

Las ventajas que tienen estos dados es que son poco costosos y cuentan con una cantidad grande de tamaños y tienen buena resistencia. La mayor desventaja es que su aplicación es en geometrías simples, además de que no mantienen las tolerancias justas, también la velocidad de producción es baja.

Dentro de los dados abiertos se encuentra una variedad como los siguientes:

- Dado plano (Fig 2.2 a): La superficie es paralela para evitar el adelgazamiento en algunas zonas de la pieza. Tienen un ancho que va de 305 a 510 mm, aunque casi la mayoría está en un rango de 405 a 455 mm de ancho. Los vértices son redondeados para evitar pellizcos o rasgaduras en la pieza de trabajo. Son usados para forjar barras, formas planas y redondas.
- Dados convexos o cóncavos (fig 2.2 b): Son utilizados para realizar barras con una curvatura.
- Dados en V (fig 2.2 c): Son usados para producir partes redondas, generalmente se utilizan para forjar cilindros huecos, de tochos huecos. Un mandril es usado con los dados en V para formar el centro del cilindro. El ángulo usado está entre 90° y 120° .

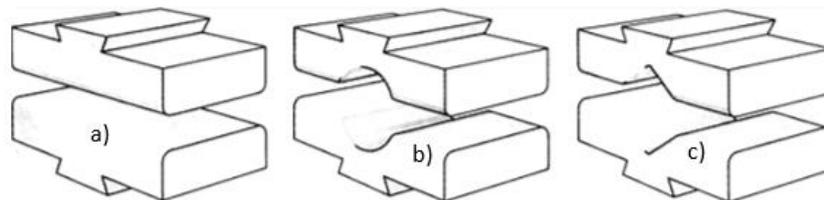


Fig. 2.2 Tipos de dados abiertos. a) Plano, b) convexo y c) en V (ASM Handbook Vol 14, 1996)

- Para forja con dados cerrados y sin rebaba
 Para el proceso de forja con dados cerrados (fig 2.3), la pieza se forja entre dos dados con forma determinada y toma la forma de la cavidad de la matriz. Esto se realiza a elevadas temperaturas lo que reduce las fuerzas necesarias para el conformado y mejora la ductilidad del material. Durante la deformación, el material fluye hacia el exterior de las matrices lo que forma una rebaba que representa una restricción al flujo del material en la matriz debido a la elevada temperatura y alta resistencia a la fricción.

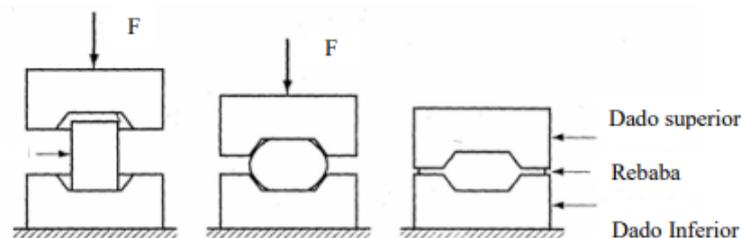


Fig. 2.3 Dado cerrado (Hernandez, 2018).

Este tipo de dados se fabrican de varias piezas segmentadas y no solo de una pieza, y en el caso de formas complejas pueden incluir insertos de matrices, lo cuales deben ser reemplazados con facilidad ya sea por desgaste o falla.

Las piezas iniciales de trabajo o tochos (fig 2.4) pasan por varios procesos antes de ser forjadas. Estas pueden ser extruidas, coladas o piezas preformadas por una operación de forjado.

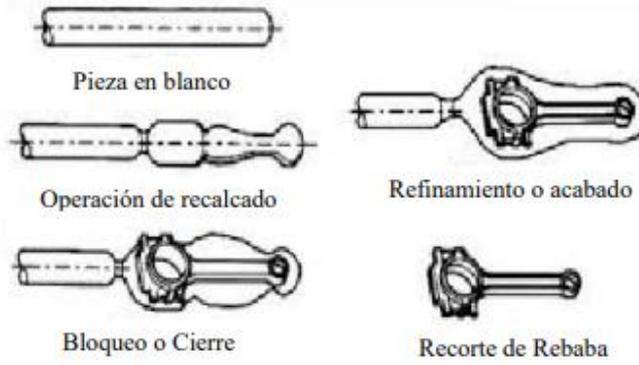


Fig. 2.4 Pieza forjada en dados cerrados (Hernandez, 2018).

A continuación, se presentan las partes que conforman un dado cerrado (fig 2.5).

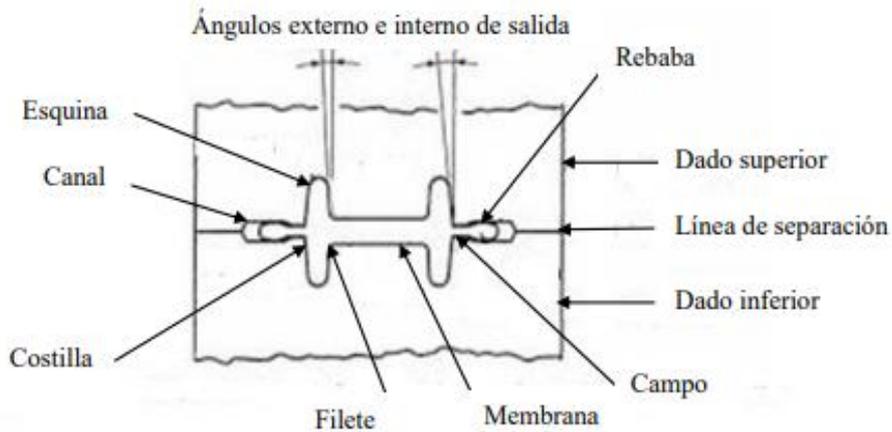


Fig. 2.5 Partes importantes de un dado cerrado (Hernandez, 2018).

En la figura 2.6 se muestran las etapas de una biela a través del proceso de forja: el dado (2.6 a), la pieza forjada (2.6b), la biela forjada (2.6c) y la biela ya ensamblada (2.6d).



Fig. 2.6 a) Dado de biela. b) Preforma de biela. c) Biela forjada d) Ensamble de forja. (Uddeholm, 2017)

2.2 Tolerancias en el diseño de dados de forja.

Las dimensiones de piezas forjadas varían de acuerdo con el producto y del equipo. Tomando en cuenta lo anterior, la precisión es un factor necesario, ya que de esto depende el correcto funcionamiento del equipo al cual pertenezca la pieza, de esta forma se plantea una relación estrecha entre las características propias de la pieza y su grado de precisión factible para manufacturar.

Las tolerancias nacen de la necesidad de obtener una exactitud teórica considerando un margen para las desviaciones, esto es resultado de mediciones de muestras forjadas en condiciones normales de operación.

Las tolerancias están expresadas en el sistema métrico decimal, para piezas forjadas en acero sobre martillos o prensas verticales con pesos inferiores a los 250 [kg] y dimensiones menores a 2.5 [m], se distinguen dos clases de tolerancias: clase E y clase F (tolerancia normal).

La clase E se refiere a tolerancias más justas, para obtenerlas es necesario calcular: el peso de la pieza estampada, las juntas de matrices (planas, simétricas o asimétricas), la dificultad de forja de los aceros; mismos que se clasifican en dos categorías: M1 (aceros con contenido de carbono no mayor a 0.65%), M2 (aceros con contenido de carbono mayor a 0.65%). El coeficiente de dificultad de forma (S) que se define como la división del peso de la pieza entre el peso sólido envolvente (cilindro o prisma) y se distinguen cuatro categorías: S_1 con $S > 0.63$, S_2 en un intervalo de 0.32 a 0.63, S_3 de 0.16 a 0.32 y S_4 para valores igual o menores de 0.16.

A partir de lo anterior, se deben aplicar las siguientes tablas para calcular las tolerancias correctas.

Para la primera tabla (tabla 2.1) se presentan las tolerancias en la deformación de extremos cizallados.

Tabla 2.1 Tolerancias en la deformación de extremos cizallados. (Cortés, 1986)

Diámetro nominal de la barra d	X máx.	Y máx.
≤ 36 [mm]	0.07 d	d
> 36 [mm]	0.05 d	0.7 d

Donde d es el diámetro nominal de la barra

Para la segunda tabla (tabla 2.2), se encuentran las tolerancias en longitud, ancho y altura, se refieren a cotas paralelas al plano de partición de las matrices, se debe seleccionar la tolerancia correspondiente a la cota mayor.

Tabla 2.2 Tolerancias en longitud, anchura, altura, diámetro y espesor. (Cortes, 1986)

Longitud en [mm]								
0 32	32 100	100 160	160 250	250 400	400 630	630 1000	1000 1600	1600
0.6 ± 0.4 0.2	0.7 ± 0.5 0.2	0.8 ± 0.5 0.3	0.9 ± 0.6 0.3	1 ± 0.7 0.3	1.1 ± 0.7 0.4	1.2 ± 0.8 0.4		
0.7 ± 0.5 0.2	0.8 ± 0.5 0.3	0.9 ± 0.6 0.3	1 ± 0.7 0.3	1.1 ± 0.7 0.4	1.2 ± 0.8 0.4	1.4 ± 0. 0.5		
0.8 ± 0.5 0.3	0.9 ± 0.6 0.3	1 ± 0.7 0.3	1.1 ± 0.7 0.4	1.2 ± 0.8 0.4	1.4 ± 0. 0.5	1.6 ± 1.1 0.5		
0.9 ± 0.6 0.3	1 ± 0.7 0.3	1.1 ± 0.7 0.4	1.2 ± 0.8 0.4	1.4 ± 0. 0.5	1.6 ± 1.1 0.5	1.8 ± 1.2 0.6		
1 ± 0.7 0.3	1.1 ± 0.7 0.4	1.2 ± 0.8 0.4	1.4 ± 0. 0.5	1.6 ± 1.1 0.5	1.8 ± 1.2 0.6	2 ± 1.3 0.7	2.2 ± 1.5 0.7	
1.1 ± 0.7 0.4	1.2 ± 0.8 0.4	1.4 ± 0. 0.5	1.6 ± 1.1 0.5	1.8 ± 1.2 0.6	2 ± 1.3 0.7	2.2 ± 1.5 0.7	2.5 ± 1.7 0.8	2.8 ± 1.9 0.9
1.2 ± 0.8 0.4	1.4 ± 0. 0.5	1.6 ± 1.1 0.5	1.8 ± 1.2 0.6	2 ± 1.3 0.7	2.2 ± 1.5 0.7	2.5 ± 1.7 0.8	2.8 ± 1.9 0.9	3.2 ± 2.1 1.1
1.4 ± 0. 0.5	1.6 ± 1.1 0.5	1.8 ± 1.2 0.6	2 ± 1.3 0.7	2.2 ± 1.5 0.7	2.5 ± 1.7 0.8	2.8 ± 1.9 0.9	3.2 ± 2.1 1.1	3.6 ± 2.4 1.2
1.6 ± 1.1 0.5	1.8 ± 1.2 0.6	2 ± 1.3 0.7	2.2 ± 1.5 0.7	2.5 ± 1.7 0.8	2.8 ± 1.9 0.9	3.2 ± 2.1 1.1	3.6 ± 2.4 1.2	4 ± 2.7 1.3
1.8 ± 1.2 0.6	2 ± 1.3 0.7	2.2 ± 1.5 0.7	2.5 ± 1.7 0.8	2.8 ± 1.9 0.9	3.2 ± 2.1 1.1	3.6 ± 2.4 1.2	4 ± 2.7 1.3	4.5 ± 3 1.5
2 ± 1.3 0.7	2.2 ± 1.5 0.7	2.5 ± 1.7 0.8	2.8 ± 1.9 0.9	3.2 ± 2.1 1.1	3.6 ± 2.4 1.2	4 ± 2.7 1.3	4.5 ± 3 1.5	5 ± 3.3 1.7
2.2 ± 1.5 0.7	2.5 ± 1.7 0.8	2.8 ± 1.9 0.9	3.2 ± 2.1 1.1	3.6 ± 2.4 1.2	4 ± 2.7 1.3	4.5 ± 3 1.5	5 ± 3.3 1.7	5.6 ± 3.7 1.9
2.5 ± 1.7 0.8	2.8 ± 1.9 0.9	3.2 ± 2.1 1.1	3.6 ± 2.4 1.2	4 ± 2.7 1.3	4.5 ± 3 1.5	5 ± 3.3 1.7	5.6 ± 3.7 1.9	6.3 ± 4.2 2.1
2.8 ± 1.9 0.9	3.2 ± 2.1 1.1	3.6 ± 2.4 1.2	4 ± 2.7 1.3	4.5 ± 3 1.5	5 ± 3.3 1.7	5.6 ± 3.7 1.9	6.3 ± 4.2 2.1	7 ± 4.7 2.3
3.2 ± 2.1 1.1	3.6 ± 2.4 1.2	4 ± 2.7 1.3	4.5 ± 3 1.5	5 ± 3.3 1.7	5.6 ± 3.7 1.9	6.3 ± 4.2 2.1	7 ± 4.7 2.3	8 ± 5.3 2.7
3.6 ± 2.4 1.2	4 ± 2.7 1.3	4.5 ± 3 1.5	5 ± 3.3 1.7	5.6 ± 3.7 1.9	6.3 ± 4.2 2.1	7 ± 4.7 2.3	8 ± 5.3 2.7	9 ± 6 3
4 ± 2.7 1.3	4.5 ± 3 1.5	5 ± 3.3 1.7	5.6 ± 3.7 1.9	6.3 ± 4.2 2.1	7 ± 4.7 2.3	8 ± 5.3 2.7	9 ± 6 3	10 ± 6.7 3.3

4.5 ± 3 1.5	5 ± 3.3 1.7	5.6 ± 3.7 1.9	6.3 ± 4.2 2.1	7 ± 4.7 2.3	8 ± 5.3 2.7	9 ± 6 3	10 ± 6.7 3.3	11 ± 7.3 3.7
5 ± 3.3 1.7	5.6 ± 3.7 1.9	6.3 ± 4.2 2.1	7 ± 4.7 2.3	8 ± 5.3 2.7	9 ± 6 3	10 ± 6.7 3.3	11 ± 7.3 3.7	12 ± 8 4
5.6 ± 3.7 1.9	6.3 ± 4.2 2.1	7 ± 4.7 2.3	8 ± 5.3 2.7	9 ± 6 3	10 ± 6.7 3.3	11 ± 7.3 3.7	12 ± 8 4	14 ± 9.3 4.7
6.3 ± 4.2 2.1	7 ± 4.7 2.3	8 ± 5.3 2.7	9 ± 6 3	10 ± 6.7 3.3	11 ± 7.3 3.7	12 ± 8 4		
0 16	16 40	40 63	63 100	100 160	160 250	250	Superior a Hasta	
Espesor en mm								

La tabla 2.3 indica las tolerancias a aplicar a las cotas que indican la distancia entre dos ejes paralelos, si ésta es menor a 1250 mm, de lo contrario se deben aplicar las mostradas en la tabla 2.9 y tomarse como si fuera una longitud.

Tabla 2.3. Tolerancias de las distancias entre ejes paralelos. (Cortés, 1986)

Superior a [mm]	0	100	160	200	250	315	400	500	630	800	1000
Hasta [mm]	100	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250
Nivel F [mm]	0.6± 0.3	0.8± 0.4	1± 0.5	1.2± 0.6	1.6± 0.8	2±1	2.4± 1.2	3.2± 1.6	4±2	5± 2.5	6.4± 3.2
Nivel E [mm]	0.5± 0.25	0.6± 0.3	0.8 ± 0.4	1.2± 0.6	1.2± 0.6	1.6± 0.8	2±1	2.4± 1.2	3.2± 1.6	4±2	5± 2.5

2.3 Proceso de diseño.

En la industria, la selección del método de fabricación de los dados depende en gran medida de la operación a realizar, así como de geometría y tamaño de la pieza a generar; a su vez el factor que decide dicho método es el costo, debido a que usualmente llegan a ser elevados. Los métodos más comunes para su fabricación son el fresado y el torneado. Actualmente el método más utilizado es el de electroerosión.

Es importante destacar que para el diseño de un dado para forja se puede comenzar con la pieza final, por lo que es indispensable generarla previamente en cualquier software de dibujo y de ahí trabajar en proceso inverso para obtener los moldes o dados con los cuales se obtenga la geometría deseada. Este método es conocido como ingeniería inversa.

El éxito en la manufactura de dados está en el diseño basado en los límites del proceso, esto es contemplar e identificar el tipo de forja, la fuerza a la que estarán sometidos, el material a forjar, la vida útil deseada, entre otros.

Para diseñar correctamente el dado, es importante el diseño previo del proceso, definir las fases (preformas) y las herramientas a emplear con la finalidad de que exista un plan económico y técnico; aspectos relacionados ya que, al plantear acertadamente el problema y la solución, el costo no aumentará debido a eventualidades.

Como primer paso, es necesario establecer la cantidad de piezas a fabricar, si dicha cantidad es baja o limitada bastará con un sólo dado de acero que inclusive puede ser de baja calidad para disminuir costos por unidad; si por el contrario se requieren múltiples piezas es necesario tener más de un dado para que las máquinas trabajen de forma secuencial.

Posteriormente, se selecciona la clasificación geométrica de la pieza final:

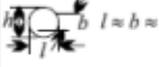
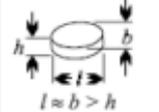
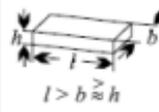
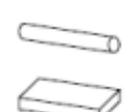
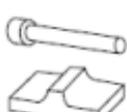
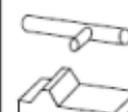
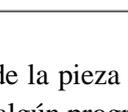
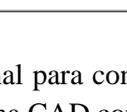
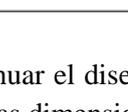
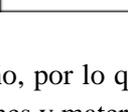
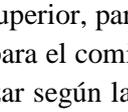
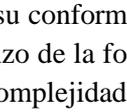
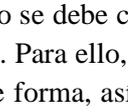
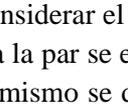
Geometría tipo 1: Piezas con forma de esferas, cubos o cilindros.

Geometría tipo 2: Discos con pequeñas proyecciones y/o regiones recaladas

Geometría tipo 3: Piezas alargadas en el eje longitudinal, esto es que su longitud sea mayor que su sección transversal, esto a su vez se divide en cuatro categorías (partes cortas, de media longitud, alargadas y muy alargadas). También se puede tratar de geometrías con secciones contenidas en distintos planos.

Los tipos de geometrías son descritas a continuación, en la tabla 2.4, la clasificación está dada por la ASM.

Tabla 2.4. Clasificación de formas de forja. (ASM International, 1988)

Geometría tipo 1: Esferas, cubos y cilindros 	Sub-grupo	Sin proyecciones	Con proyecciones unilaterales	Con proyección periférica	Con proyección unilateral y periférica	
	Forma					
Geometría tipo 2: Discos, pueden presentar pequeñas proyecciones y regiones recalçadas 	Sub-grupo	Sin proyección	Con proyección (tetón)	Con proyección y cavidad	Con proyección central y periférica	
	Forma de disco con proyección unilateral					
	Forma de disco con proyección bilateral					
Geometría tipo 3: Formas alargadas, partes cuyo eje longitudinal es dominante 	Sub-grupo	Sin proyección	Con proyecciones paralelas al eje principal	Con elementos en forma de horquilla	Con proyecciones asimétricas al eje principal	
	Forma					
	1. Partes cortas $l < 3b$	Eje principal recto				
	2. Partes de media longitud $l = 3...8b$	Eje principal curvado				
3. Partes alargadas $l = 8...16b$	Eje principal curvado en varias direcciones					
4. Partes muy alargadas $l > 16b$						

Es importante conocer el peso de la pieza final para continuar el diseño, por lo que es recomendable realizar el dibujo de la pieza en algún programa CAD con las dimensiones y material deseado.

Teniendo el dibujo de la parte superior, para su conformado se debe considerar el equipo disponible y funcional con el que se cuenta para el comienzo de la forja. Para ello, a la par se establece la cantidad de pasos de preformado a realizar según la complejidad de forma, así mismo se deben considerar las tolerancias y el sobredimensionamiento óptimo.

Posterior a ello, para el diseño de los dados (incluyendo la zona de rebaba) se deben calcular las cargas y energía necesarias para el proceso.

Finalmente, es importante que en la etapa del acabado se respeten las tolerancias de la pieza, dejando la geometría lo más cercano a estas tolerancias, ya que de eso depende el correcto funcionamiento de esta.

Existen una serie de parámetros que complementan los pasos anteriores y resultan imprescindibles para el diseño de dados de forja; A continuación, se describen cada uno de ellos.

- Dimensionamiento de la pieza: Para este parámetro se toman en consideración tres aspectos:
 - Ángulos de salida: Depende de la precisión del proceso de forja, así como del tipo de superficie (interior o exterior) y de la longitud de la pieza. El rango de valores que puede tener va de 1° a 7°, siendo mayores en el caso de superficies interiores. (Ortiz, 2013)
 - Sobre-espesor para el maquinado: Depende de la calidad de la operación de forja y del acabado superficial requerido. En la tabla 2.5 se enlistan los valores sugeridos para el sobre espesor en función de las dimensiones de la pieza.

Tabla 2.5 Sobre espesores para maquinado. (Ortiz, 2013)

Espesor, anchura o diámetro de la pieza [mm]	Sobre espesor en cada cara [mm]
30	1
10 a 60	1.5
61 a 120	2
121 a 250	2.5
251 a 500	3 a 6
500	5 a 8

- Tolerancias por contracción: Durante el proceso de forja existen cambios de temperatura, por lo que el material al calentarse se expande y al enfriarse se contrae, dicha contracción depende del material en el que se está trabajando. Para realizar el cálculo del sobre espesor necesario para la contracción se puede emplear la siguiente ecuación:

$$\Delta l_c = \alpha l_0 (T_{ff} - T_\alpha) \dots (2.1)$$

Donde:

Δl_c -Sobre espesor requerido en la pieza [m]

α -Coeficiente de dilatación lineal [m/°C]

l_0 -Longitud inicial [m]

T_{ff} -Temperatura de fin de forja [°C]

T_α -Temperatura ambiente o de servicio [°C]

Los coeficientes de dilatación térmica para algunos materiales comúnmente forjados, son descritos en la tabla 2.6.

Tabla 2.6 Coeficiente de dilatación lineal. (Ortiz, 2013)

Material	Coeficiente de dilatación lineal [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]
Acero	11.0×10^{-6}
Aluminio	23.8×10^{-6}
Bronce	17.5×10^{-6}
Cobre	16.5×10^{-6}
Latón	18.5×10^{-6}

- Línea de partición (selección, tipo y posición del cordón de rebaba): Este paso es esencial para generar un molde funcional que pueda ser llenado por el material, generalmente la línea de partición corta transversalmente la pieza, intentando que los moldes sean lo más simétricos posibles para asegurar el llenado del molde.
- Definir las líneas de flujo del material: Se realiza un análisis para asegurar que todas las cavidades sean llenadas, especialmente aquellas de difícil acceso.
- Corregir los elementos característicos por enfriamiento, radios críticos (medidas que cambian a partir del enfriamiento del material); en la tabla 2.7 se muestran los radios a utilizar en los cálculos posteriores en función del radio real y del tipo de máquina herramienta a utilizar.

Tabla 2.7. Radios críticos. (Ortiz, 2013)

Radio real [mm]	Radio r a utilizar para los cálculos posteriores		
	Martillo [mm]	Prensa mecánica [mm]	Prensa hidráulica [mm]
5	5	5	
4.5	4.5	4.45	4.45
4	4	3.95	3.95
3.50	3.30	3.45	3.4
3	3	2.95	2.5
2.50	2.50	2.40	2.35
2	2	1.90	1.85
1.75	1.75	1.65	1.60
1.50	1.50	1.35	1.30
1.25	1.25	1.10	1.05
1	1	0.75	0.80

- Calcular la presión p_1 , esta presión debe ser suficiente para llenar las cavidades características del dado, para ello es necesario calcular la constante K , con la ecuación 2.2.

$$K = \frac{2r_1^*}{D} \text{ ó } K = \frac{2r_1^*}{L} \dots (2.2)$$

Donde:

D - Diámetro de la pieza [m]

L - Ancho de la pieza [m]

r_1 - Radio del elemento característico corregido por enfriamiento [m]

La presión p_1 puede calcularse como:

$$p_1 = \frac{\sigma_0}{Q} [e^Q - 1] \dots (2.3)$$

Donde:

σ_0 - Esfuerzo de cedencia [MPa]

Q - Calor [J]

- Cálculo de la presión p_2 , necesaria para el llenado uniforme de todas las cavidades: Este cálculo se realiza a través de gráficas de la figura 2.7. Para cada material y temperatura de forja, existe una curva que estará en función de la presión p_1 calculada con la ecuación 2.3 y la constante K (ecuación 2.2), a partir de ello con la gráfica superior de la misma figura se obtiene la constante K_0 .

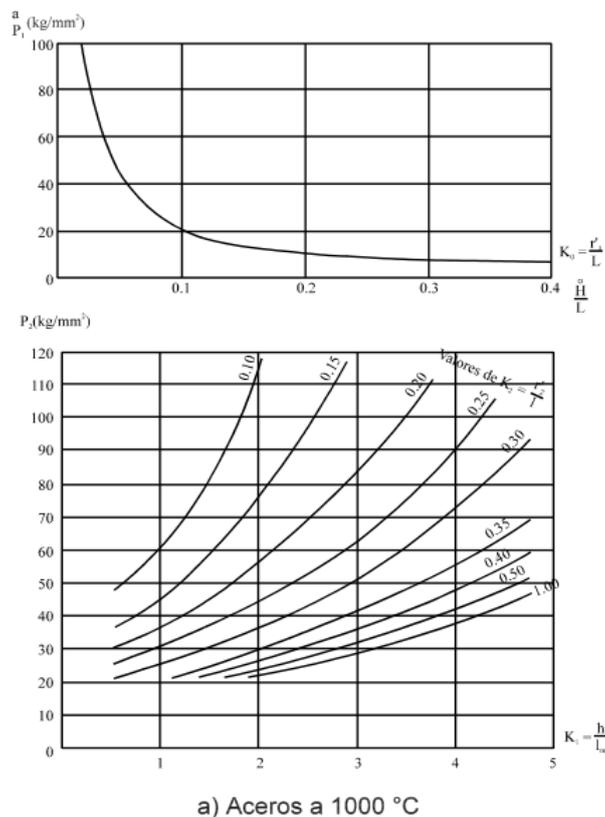


Fig. 2.7 Cálculo gráfico de presiones para aceros a 1000[°C] (Ortiz, 2013)

l - Fondo de la cavidad [m]
 l_0 - Fondo promedio de la cavidad [m]
 p_{am} - Umbral de plasticidad a la compresión
 p_{rm} - Umbral de plasticidad a la retención
 h - Altura del canal [m]
 Δp - Exceso de presión requerida en una cavidad asimétrica [Pa]
 r_2 - Radio en el fondo [m]
 A_f - Sección de fondo [m²]
 A_e - Sección de entrada [m²]
 μ - Coeficiente de fricción del material con las paredes laterales de la estampa

De esta forma, con ayuda de las gráficas de la figura 2.7, se obtiene que la suma de los esfuerzos superficiales para los aceros a una temperatura de 1000[°C] es de:

$$P_{am} + P_{rm} + P_{\alpha} = 21 \left[\frac{kg}{mm^2} \right] \text{ Para aceros a una temperatura de } 1000[^\circ C]$$

Lo anterior se obtiene de las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned}
 P_{\alpha} \text{ con } K_{\alpha} &= \frac{h}{l} \text{ o } \frac{h}{d} \\
 P_{am} \text{ con } K_{am} &= \frac{l}{h} \text{ o } \frac{d}{h} \\
 P_{rm} \text{ con } K_{rm} &= \frac{h}{l} \text{ o } \frac{h}{d}
 \end{aligned}$$

donde:

\underline{l} - Ancho promedio de la cavidad
 \underline{d} - Diámetro promedio de la cavidad

Ahora bien, lo anterior forma parte del cálculo necesario para obtener la presión P_2 .

$$P_2 = P_m - P_{\alpha} \left[1 + \ln \frac{A_e}{A_f} \right] \exp a\mu K_1 + P_{am} + P_{rm} + P_{\alpha} + \Delta p \dots (2.4)$$

- Determinar las dimensiones de la zona (cordón) de rebaba. Esto permite el óptimo llenado de la pieza sin que se incremente de manera importante la presión y no se tengan regresiones del flujo del material.

Se selecciona el ancho del cordón de rebaba λ de acuerdo con el valor del alojamiento que se determina en la tabla 2.8.

Tabla 2.8. Dimensiones recomendadas para el alojamiento de rebaba en función del ancho de cordón. (Ortiz, 2013)

Valores de alojamiento[mm]	λ Ancho del cordón de la matriz [mm]
40	4
50	1.5
60	5
70	5.5
80	6
90	6.5
100	7
120	7.5
140	8
160	8.5
180	9
200	9.5
220	10
240	11
260	12
280	13
300	14
350	15
400	17
450	18

En el caso en el que el cordón de rebaba se diseñe plano se deben tomar en consideración: la altura del alojamiento (h), el radio de fondo del alojamiento (R) y el ancho del alojamiento (b); estos parámetros deben medirse en milímetros.

En la tabla 2.9 se muestran los valores del ancho de cordón de rebaba en función de los parámetros anteriores.

Tabla 2.9. Dimensiones típicas de un cordón de rebaba plano. (Ortiz, 2013)

λ [mm]	h y R [mm]	b [mm]
4 a 6	3	20
7	3	22
8	3	24
9	3.5	26
10	4	28
12	5	32
14	6	36
15	8	42

Una vez establecido el ancho del cordón, se debe calcular el espesor, para ello se utiliza la siguiente ecuación:

$$\frac{\lambda}{\varepsilon} = \sqrt{\frac{(p_f - p_a - p_b)}{4\mu'Q_r}} \dots (2.5)$$

Donde:

ε : de 1 a 6 [mm]

$$8 < \frac{2\lambda}{\varepsilon}$$

Las condiciones anteriores deben cumplirse, de lo contrario será necesario proponer otro valor para el ancho λ ; Se realizan dos iteraciones, de no funcionar dicho método, es necesario cambiar el tipo de cordón.

Finalmente, el último paso es calcular la carga requerida para la forja; este paso es importante, ya que de esto depende la deformación del material. Así como la selección de la maquinaria para el proceso.

Para esto, es necesario el uso de la siguiente ecuación:

$$P = P_f A_p + P_r A_r \dots (2.6)$$

donde

P - Carga de forja (ton)

A_p - Sección transversal de la pieza

P_f - Presión necesaria para el correcto llenado de la cavidad

A_r - Sección transversal de la rebaba: perímetro por ancho del cordón

P_r - Presión ejercida sobre el cordón de la rebaba, ésta se calcula con la constante

$$K_r = \frac{\varepsilon}{2\lambda} \text{ o } P_r = \frac{\sigma_0}{Q_r} [e^{Q_r} - 1] \text{ y } Q_r = \frac{2\mu\lambda}{\varepsilon}$$

De manera complementaria, el siguiente paso después del diseño de los dados superior e inferior, es la manufactura de estos. Por ello es importante seguir teniendo en cuenta los pasos del proceso de forja, el material y sus propiedades mecánicas, el flujo del material y la temperatura de trabajo.

Los materiales más utilizados para la fabricación de dados son: aceros grado herramienta, aceros con alto contenido de carbono y aceros con alto contenido de cromo. Es importante destacar que el costo del material del que se fabriquen los dados repercute de forma directa en el costo del proceso de forja y por tanto de las piezas que se fabriquen.

La máquina más recomendada para el maquinado de los dados es el CNC, sin embargo, esto también repercute en el costo final de la operación. De hecho, se estima que un par de dados para forja tiene un precio de entre 1500 y 3000 dólares (Dropforging, s.f).

2.4 Fallas comunes en dados de forja.

Los dados, usualmente están elaborados de aceros resistentes a altos impactos, oxidación y termofluencia. Para su elaboración existen diversos métodos de manufactura, mismos que pueden combinarse o usarse de forma independiente, entre ellos se encuentran: fundición, forjado, maquinado, esmerilado, punzonado para las cavidades, entre otros.

Los dados pueden presentar varias fallas, como abrasión, desgaste, fatiga térmica y mecánica, deformación plástica y la formación de grietas (Figura 2.8). La falla más común es el desgaste prematuro (Grobasky, 2004), por lo que un buen diseño busca incrementar la vida útil, así como disminuir la presencia de estas fallas.

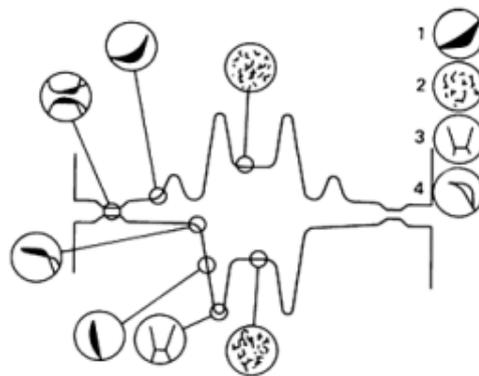


Fig. 2.8 Fallas comunes en los dados. 1) Abrasión, 2) Fatiga térmica, 3) Fatiga mecánica y 4) Deformación plástica (ASM, 1988)

Un dado fabricado en un material idóneo y con un tratamiento térmico correcto, así como con alta dureza, podrá soportar las solicitaciones causadas por una alta presión y una carga de impacto elevada, así como resistir el desgaste por abrasión, la aparición de grietas y fatiga térmica. A pesar de ello, la vida útil de los dados es fluctuante, ya que depende del tipo de forja (en frío o en caliente), la cantidad de trabajo, por mencionar los más relevantes.

Tabla 2.10 Descripción de las fallas (Leonardo, 2010)

Falla	Descripción
Desgaste	Cambio en las dimensiones o forma de los dados causadas por la corrosión, abrasión, remoción y transporte de productos. La abrasión que se genera debido a la fricción es la parte más importante del desgaste. La temperatura, rugosidad superficial, material y dureza superficial del dado, presión de contacto y lubricación son factores importantes que considerar en el desgaste por abrasión.
Fatiga térmica	Se relaciona con los esfuerzos o deformaciones cíclicos generadas por fluctuaciones no uniformes de temperaturas. Se genera por la expansión no uniforme del dado debido a los gradientes de temperatura de la superficie. Un material con un coeficiente de difusividad térmica alto hace que los dados no presenten este tipo de falla.
Fatiga mecánica	Se generan en áreas pequeñas las cuales están sometidas a grandes presiones y es afectada por las cargas que se aplican, por la temperatura que se genera en el dado y por las condiciones en las que se encuentra su superficie.
Deformación plástica	El material pasa de un comportamiento elástico (en el cual puede recuperar su forma original) a un comportamiento plástico en el que al exceder la carga permitida se llega a deformaciones permanentes y la pérdida de geometría del dado.

Capítulo 3 – Modelado por elemento finito de la forja de una prótesis de cadera.

3.1 Introducción.

La simulación del proceso de forja mediante elemento finito surgió a finales de la década de 1970; el remallado automático (Automesh) aún no estaba desarrollado y para realizar una simulación se requería de mucho tiempo y paciencia. Conforme se desarrollaron métodos de remallado y avances tecnológicos, el proceso se volvió más práctico.

El realizar simulaciones de elemento finito en la industria de la forja se está volviendo algo aceptable y se considera una parte integral del proceso de diseño.

Algunos objetivos que se plantean este tipo de simulaciones son:

- Desarrollo de un diseño de dado adecuado y establecimiento de parámetros de proceso mediante: simulación de procesos para asegurar el llenado, prevención de defectos inducidos por el flujo (vueltas y cierres fríos), plantear límites de procesamiento, mismos que no deben excederse para evitar defectos internos y superficiales; predicción de las temperaturas para el control de las propiedades de las piezas, condiciones de fricción y desgaste de la matriz.
- Aumentar la calidad y complejidad de las piezas reduciendo los costos de manufactura. Esto a través de predecir y mejorar el flujo de grano y la microestructura, reduciendo las pruebas de matrices y los rechazos, así como mejorando el rendimiento del material.
- Predecir la carga y la energía de forja, así como los esfuerzos y temperaturas de la herramienta: Se busca evitar fallas prematuras y seleccionar las máquinas herramienta adecuadas para una aplicación determinada.

3.2 Proceso moderno de diseño de prótesis de cadera.

Las decisiones tomadas en la fase de diseño determinan los costos globales de manufactura, mantenimiento y soporte asociados al producto específico. Una vez diseñada la pieza, se sugieren los siguientes pasos que describen un diseño racional del proceso de manufactura:

- Establecer un diseño preliminar de la matriz y seleccionar los parámetros del proceso.
- Verificar el diseño inicial y las condiciones del proceso mediante su modelado.
- Modificar el diseño de la matriz y la selección inicial de variables del proceso.
- Completar la fase de diseño de las matrices y fabricarlas.
- Llevar a cabo las pruebas de las matrices en el equipo de producción.
- Modificar el diseño de la matriz y las condiciones del proceso para producir piezas de calidad.

En el trabajo de Losa (2018), se toman los tres primeros puntos anteriores para su desarrollo. En el trabajo, primero se plantean las piezas que conforman la prótesis completa de cadera, así como los problemas más comunes y sus posibles soluciones, mientras que para el diseño propusieron un barreno en la cabeza femoral a través del cual saldrá un fármaco. Para la manufactura, el vástago y el cotilo se moldearon y forjaron a 950 [°C] , mientras que la cabeza femoral y el inserto se fabricaron por manufactura aditiva (impresión 3D).

Losa considera a una persona de 80 [kg], por lo que menciona que la carga máxima que recibe la cabeza femoral es 9 veces el peso del paciente (Losa, 2018). Dicha carga se aplicó sobre la superficie de la cabeza en contacto con el cotilo, mientras que se aplicaron restricciones de movimiento para el vástago y se obtuvo un esfuerzo medio de 1.43 [MPa].

Por otro lado, en el trabajo de Mahiques en 2015 se sigue una metodología similar, dónde se comienza por el diseño CAD y el establecimiento del proceso de manufactura, que es la impresión 3D. En este trabajo se consideraron tres opciones de materiales: Ti6Al4V, Acero Inoxidable 316L y Aleación Co-Cr-Mo mismos que pueden ser utilizados en forja.

Para el desarrollo del diseño, se dibujó cada componente (vástago y cabeza femoral) para posteriormente realizar el ensamble y el análisis FEM de cada material bajo una carga estática de compresión de 5.5 [N] con el objetivo de conocer la distribución de esfuerzos y deformaciones. Se utiliza una carga ligera con la finalidad únicamente de ejemplificar.

Por otro lado, para el caso particular de las prótesis de cadera, en el artículo de Colic en 2016 se considera que el proceso moderno de diseño de las prótesis de cadera es como el mostrado en la figura 3.1.

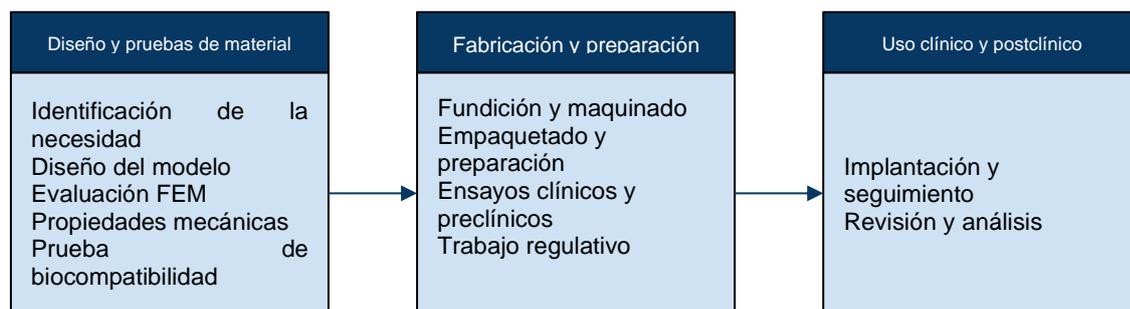


Fig. 3.1 Proceso moderno de diseño para prótesis de cadera. (Colic, 2016).

Para 1996, Maldonado hace uso del análisis FEM de una prótesis Charnely, primero bajo un análisis bidimensional de un modelo simplificado con la finalidad de obtener los niveles de esfuerzo en la parte superior de la prótesis; considerando que el cuerpo de la prótesis estén contacto y por lo tanto produciendo fricción con el fémur.

En el trabajo se tomaron tres casos de condiciones de carga, en los que se involucran los movimientos básicos de una persona, el peso corporal y el efecto que producen los músculos abductores. Al realizar el análisis, los resultados indican mayor concentración de esfuerzos en el cuello de la prótesis, por lo que se asume que la pieza fallará en poco tiempo.

Además, aunque el análisis FEM considera las cargas, esfuerzos y deformaciones, no puede medir el impacto de factores biológicos tales como el género, la edad, nivel de actividad, alergias y complicaciones del paciente, por lo que este análisis es sólo una aproximación a una situación real.

3.3 Parámetros geométricos.

La geometría de la pieza inicial y de la matriz deben ser definidas para el modelado de forja con matriz cerrada. En función de su complejidad geométrica, un proceso puede simularse como un problema bidimensional, axisimétrico o como un problema tridimensional.

Si el proceso implica múltiples estaciones, es necesario proporcionar la geometría de la matriz de cada estación. Una geometría típica de la pieza inicial para una forja con matriz cerrada es un cilindro con o sin chaflanes. El diámetro y la altura del cilindro se definen en la fase de preprocesamiento. La mayoría de las piezas de forja en matriz cerrada son axisimétricas.

Hernández, et. al en 2020 realizaron el modelo tridimensional de una prótesis en la paquetería de acceso comercial 3DSlicer®, para crear las geometrías del modelo de la prótesis. La geometría la desarrollaron con curvas SPLINE mediante una plataforma llamada Onshape® (Figura 3.2).

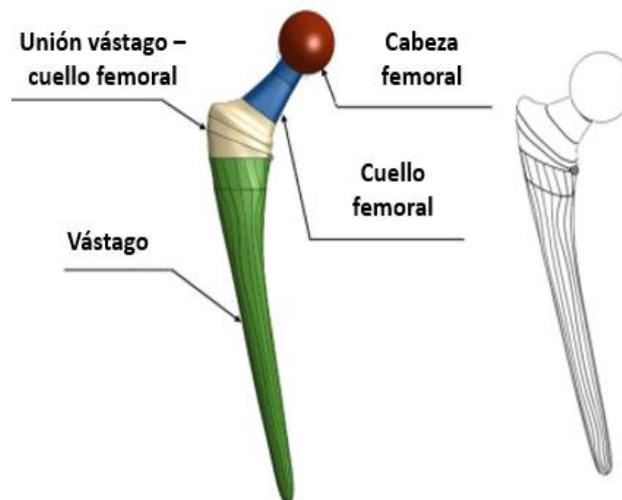
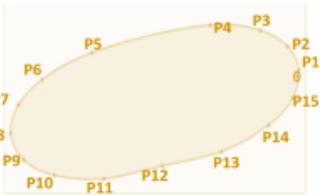
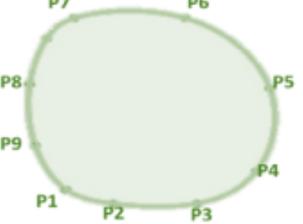
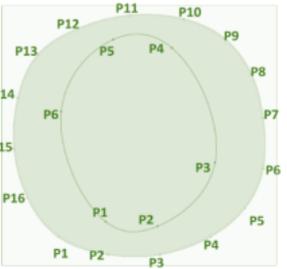
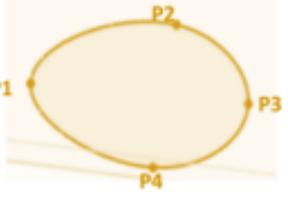
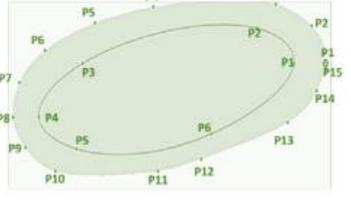


Fig. 3.2 Partes de la prótesis y modelo isométrico (Hernandez, 2020)

En la tabla 3.1 se presentan secciones transversales del vástago y del cuello femoral, las cuales son importantes para la generación de la geometría completa. Para ambas partes se propone una estructura en las cuales se ponen puntos que se van conectando entre sí para generar las secciones transversales.

Tabla 3.1 Geometría del vástago y cuello femoral (Hernandez, 2020).

Perfil	Geometría	Perfil	Geometría
PCF1		PV1	
PCF2		PV2	
PCF4		PV5	

En la figura 3.3 a se muestra la geometría final del vástago y en la 3.3 b la geometría del cuello femoral.

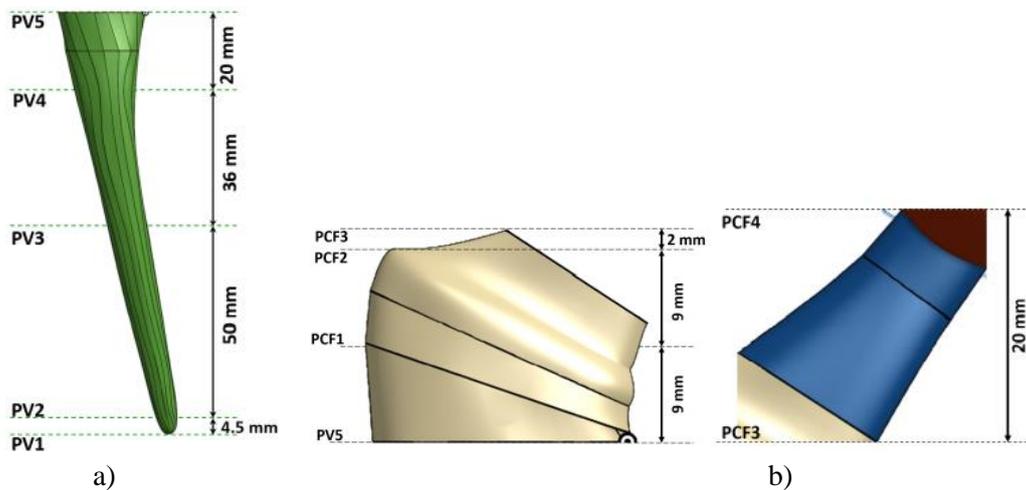


Fig. 3.3 Dimensiones de la prótesis, a) Dimensiones vástago y b) Dimensiones cuello femoral (Hernández, 2020)

3.4 Análisis de estampas mediante el análisis de elementos finitos.

En el artículo de forja en frío mediante FEM de Dalbosco en 2021 presenta como primer paso la simulación de recalado. Para reducir los tiempos de cálculo, se eligió un análisis axisimétrico. El proceso de formado se simuló manteniendo fija la matriz y aplicando un desplazamiento vertical del punzón a 17.3 [mm], con una velocidad baja de 50 [mm/s]. El herramental se consideró rígido y para la pieza, se eligió un modelo elastoplástico patentado para acero DIN QSt - 36-3 (equivalente a SAE 1010). El contacto entre las herramientas y el material se modeló con una combinación de Coulomb y fricción de corte, con coeficientes de 0.05 y 0.1. Algunas estampas de este modelo se observan en la figura 3.4.

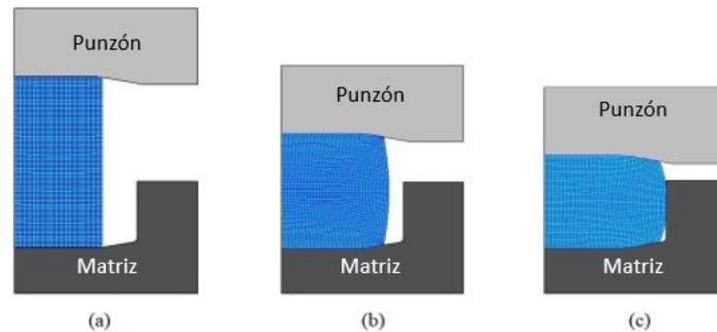


Fig. 3.4 Simulación de forja , a)Inicio, b) etapa media y c) forja terminada (Dalbosco, 2021)

La geometría generada se usó como entrada para simular la extrusión inversa. Debido a que la preforma es sometida a un proceso de recocido antes de ser extruida, los esfuerzos residuales se establecieron en cero. Para esta simulación solo cambió el desplazamiento vertical del punzón que se fijó en 14.5 [mm]. En la figura 3.5 se observa que el material debe llenar primero la cavidad de la matriz para posteriormente realizar la extrusión.

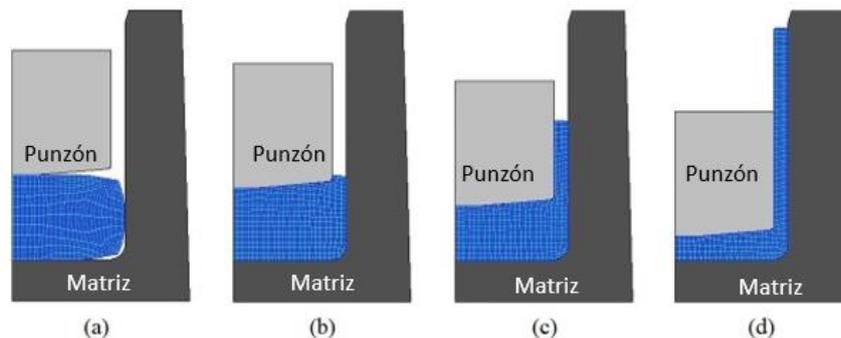


Fig. 3.5 Simulación de extrusión , a) Inicio b)20 %, c) 50% y d) final (Dalbosco, 2021)

Al obtener resultados se presentó una grieta la cual para evitarla se modificó el diseño del troquel para promover un cambio en la precarga.

Por otro lado, Soranansri en 2019 presentó una simulación donde utilizó una paquetería FEM comercial, DEFORM® 3D v10, como herramienta para simular el proceso y examinar la distribución de esfuerzos en el dado de forja (figura 3.6). Este proceso se dividió en 4 pasos, el primero y tercer paso son para la transferencia de calor entre la pieza de trabajo y el entorno, mientras que el segundo y el cuarto son para generar la forma de un engranaje cónico, incluyendo preformas y pasos de acabado. La pieza de trabajo se definió como un modelo de material viscoplastico (80.000 elementos) y los dados de forja se definieron como cuerpos rígidos.

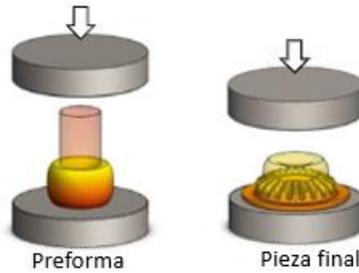


Fig. 3.6 Proceso en forja caliente (Soransri, 2019).

Para estimar el esfuerzo en el dado, se cambió de cuerpo rígido a un modelo de material elástico (150.000 elementos). Se definió el modelo FEM como un problema no isotérmico y se utilizó un modelo sin despreciar que no desprecie el coeficiente de fricción, para definir el contacto entre la pieza de trabajo y los dados de forja.

Se definieron los coeficientes, en la intercara para la preforma de 0.7 y para el paso final de 0.3, de igual forma se definió el coeficiente de calor por conducción de $11 \text{ [J/(s m } ^\circ\text{C)]}$ y para el coeficiente de transferencia de calor h de $0.02 \text{ [N/s/mm/}^\circ\text{C]}$.

Al obtener los resultados, uno de los dados presentó una fractura por lo que se rediseñó. Tanto la relación de ajuste por contracción como el diámetro de un anillo de contracción se diseñaron con base en tres criterios. El primero fue minimizar el esfuerzo máximo principal en el área de la fractura. El segundo fue el área de espacio del portamatriz en la prensa, cuyo diámetro más grande debe ser de 170 mm. El tercero fue que el anillo de contracción debe recibir una carga con un factor de seguridad de 2 veces el límite elástico.

En la figura 3.7 a) se observan las formas reales tanto de la preforma como de la geometría final; mismas que son distintas a las generadas por FEM (fig. 3.7 b), esto se debe a errores dimensionales resultado de diferencias en las cargas teórica y real, así como de la temperatura de la pieza.



Fig. 3.7 Pieza de trabajo. a) proceso existente y b) FEM (Soransri, 2019)

3.5 Análisis FEM del proceso de forja de una prótesis de cadera.

El diseño de estampas de forja requiere la reducción del tiempo y costo de producción, por lo que el empleo de herramientas FEM resulta útil para cumplir este objetivo. Özkor en 2011 mostró que usar FEM podría reducir gastos de diseño en un 50 % , los materiales de desecho en un 15% y la pérdida de material entre un 10% y 30%.

Los factores importantes en la forja son la temperatura, el coeficiente de fricción y la velocidad. Por lo que antes de iniciar la producción, la simulación por computadora del proceso de diseño y fabricación es una gran ventaja.

Para lo anterior crearon el modelo de la prótesis de cadera en solidworks ® (figura 3.8), el análisis FEM lo desarrollaron en el software MSC SIMUFACT 10 ® por lo que se diseñó la matriz de la preforma y de la última deformación.



Fig. 3.8 CAD de la prótesis de cadera(Sezek ,2015)

Para la selección de materiales se utilizaron: aleación de titanio Ti6Al4V para la prótesis y acero para los dados en el análisis FEM.

Posteriormente, determinaron las secuencias de operaciones de preformado y último conformado para su producción. Para los análisis del proceso de preformado se utilizó el método de volumen finito (FV) y para el último formado el método de elementos finitos. En la tabla 3.2 se muestran los parámetros del proceso de producción.

Tabla 3.2 Parámetros de producción (Sezek, 2015).

Etapa de producción	Velocidad de perforación del punzón [mm/s]			Temperatura [°C]		Coeficiente de fricción	
	2	6	10	300	500	0.05	0.07
Preformado	2			300		0.05	
Última formación	2	6	10	300	500	0.05	0.07

Para el proceso de preformado, se seleccionó el tipo de prensa hidráulica para forjar y la carga se aplicó desde el troquel superior. En la figura 3.9 se observa el proceso que simularon.

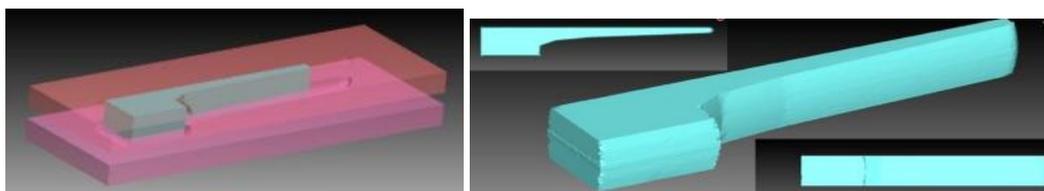


Fig. 3.9 Proceso de prensado. a) troquel de preformado y b) pieza de trabajo (Sezek, 2015)

Se utilizó un mallado TETRA, ya que este tipo de malla tiene una estructura triangular, por lo que en cada proceso de remallado, los ángulos de los bordes cambiarían. En la figura 3.10 se observa la malla de la pieza de trabajo y la matriz en la última formación.

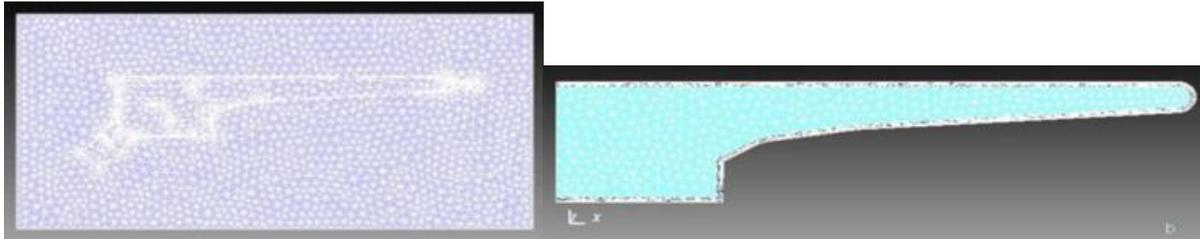


Fig. 3.10 Mallado de las partes modeladas. a) troquel de preformado y b) pieza de trabajo (Sezek, 2015)

El análisis FEM se realizó en 65 pasos en los cuales se realizaron cambios. Al finalizar el estudio, se realizó un análisis de regresión paso a paso sobre los resultados.

La pieza de trabajo obtenida durante el preformado se transfirió al último paso de conformado con todos los parámetros resultantes, por lo que demostró que el análisis de estampas y piezas de trabajo conduce a un alto rendimiento de flujo de material (Fig. 3.11)

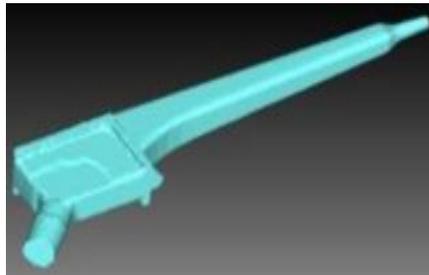


Fig. 3.11 Flujo de material de la prótesis (Sezek, 2015)

En un proceso de forja con un diseño de matriz inadecuado el flujo del material no es estable; esto genera disminución en la formabilidad de la pieza. Esta propiedad, en las piezas finales dependen en gran medida del diseño del dado final y de preformado.

De acuerdo con Sezek en 2015 dado que la fuerza necesaria en el punzón disminuye al aumentar la temperatura del metal, para una velocidad de carga de 10 [mm/s], con una temperatura de la pieza de trabajo de 300°C y 500°C se requieren fuerzas respectivas de 6651 [kN] y 6511[kN].

En la investigación, se tomó en cuenta que la fuerza de forjado incrementa la energía de deformación plástica, por lo que al haber seleccionado una aleación Ti6A14V cuya estructura cambia a los 980[°C] se eligió una temperatura inicial de 500[°C], obteniendo así un esfuerzo máximo de 740[MPa].

Por otro lado, reportó que la mejor temperatura para forjar la aleación Ti6A14V es 300[°C] con una velocidad de carga de 2[mm/s] y coeficientes de fricción de entre 0.05 y 0.07.

3.6 Optimización del lingote para el forjado de prótesis.

Para el estudio presentado por Soranansri se realizó como primer paso un escaneo 3D de la pieza a forjar, para posteriormente generar el archivo CAD (figura 3.12).



Fig. 3.12 Pieza a escanear. (Soranansri, 2022)

Con la prótesis 3D en archivo .STL, se generó el diseño de los dados de forja, reduciendo costos de producción y desperdicio de material, los dados se diseñaron para tener dos cavidades. Debido a la complejidad de la geometría, se dividió el proceso en tres forjados, los cuales son de preforma, desbaste y acabado.

El autor eligió un proceso de forja en caliente y optó por un software comercial de CAE: DEFORM® 3D, para el análisis de elemento finito mismo que se realizó en 3 pasos de transferencia de calor con el medio ambiente y 3 pasos de formado. Para la pieza de trabajo se definió el material como viscoplástico, un acero AISI 316L. Se aplicó el elemento sólido tetraédrico para modelar la pieza de trabajo con 100.000 elementos. Los dados se definieron como un cuerpo rígido con propiedades térmicas para la transferencia de calor. Se definió como un problema no isotérmico.

Se usó una prensa de una capacidad de 1 500 [Ton] con la característica principal de soportar 70 golpes por minuto y un material AISI 316L, mismo que se cortó a un tamaño óptimo de diámetro de 36 [mm] por 99 [mm] de largo con un peso de 0.8[kg]. Una vez finalizado el proceso de forja, la temperatura de los dados corresponde a un valor de 20 [°C] con una variación de 1.05. En la figura 3.13 se muestra el proceso.

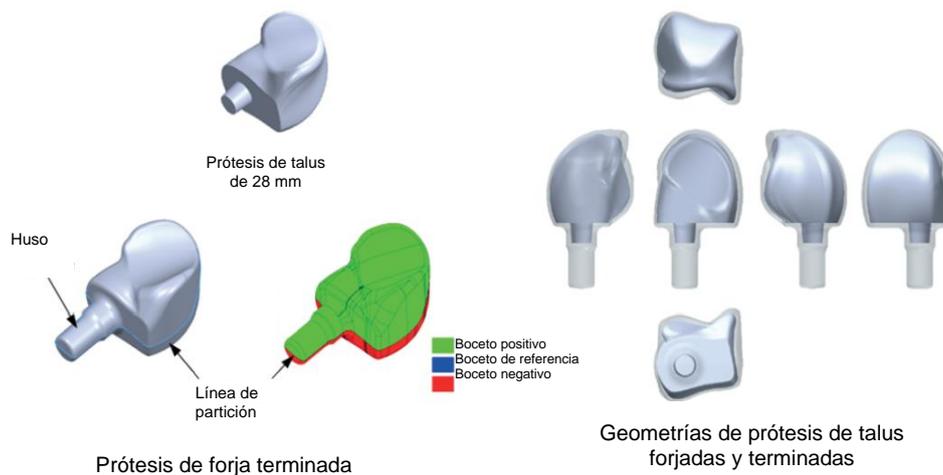


Fig. 3.13 Pieza final. Izquierda: Prótesis finalizada con señalización de líneas de partición y diseño. Derecha: Geometrías de diferentes prótesis de talus. (Soranansri, 2022)

Lo anterior se comprobó mediante la práctica real y la simulación de FEM, donde los resultados fueron satisfactorios con una fuerza para la preforma de 64 [Ton], 756 [Ton] para el desbaste y 726 [Ton] para el paso final, siendo estos valores fueron muy cercanos a los encontrados en el análisis FEM, por lo que se concluye con que el análisis en el software fue exitoso. En la figura 3.14 se muestran los resultados.

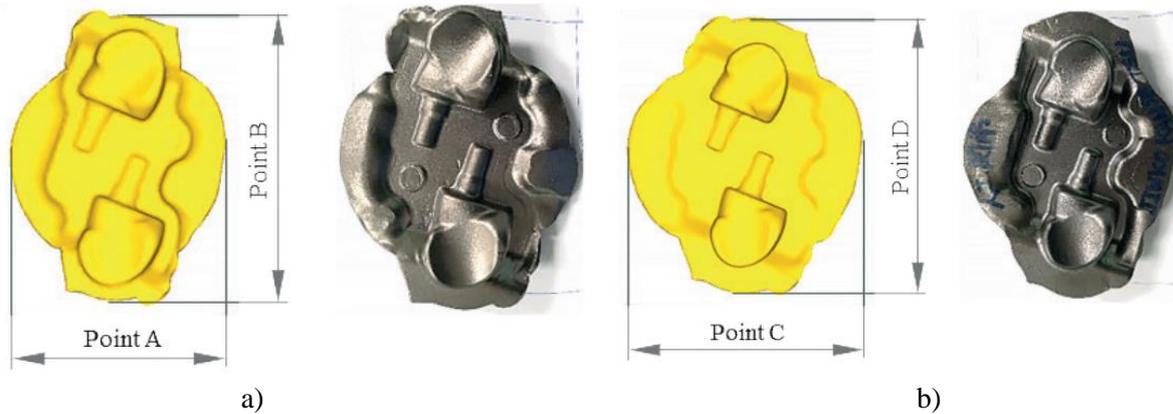


Fig. 3.14 Comparación geométrica de la pieza, a) paso de desbaste y b) paso de acabado (Soransri, 2022)

En el trabajo de Lopes, et. al. en 2014 se expone que se empleó un lingote de 100[g] de la aleación de Titanio Ti-30Nb-2Sn que fue preparada bajo una atmósfera inerte de argón por arco voltaico, homogeneizada a 1000[°C] por 12 horas, para posteriormente estampar el lingote a una temperatura de 900[°C]; La geometría final del lingote fueron barras cilíndricas de 12 [mm] de diámetro. Éstas barras fueron maquinadas y forjadas en frío bajo una carga de 80 [ton] en una prensa hidráulica en dos pasos para formar el vástago de la prótesis. En la figura 3.15, se puede observar el proceso de evolución de la geometría del vástago.

En la primera figura (3.15 a) se observa que la pieza inicial ha sido maquinada y se acumula mayor material en la parte superior, lo que acerca la geometría a la forma final; para el siguiente paso se percibe una curvatura final (fig. 3.15 b). Finalmente, en la figura 3.15 d, se observa la pieza.

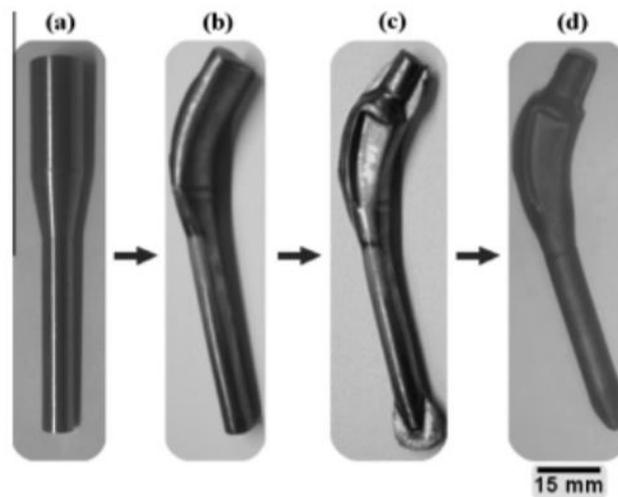


Fig. 3.15 Proceso de manufactura del vástago, a) pieza maquinada b) preforma c) estampado de la pieza y d) pieza desbarbada. (Lopes, 2015).

Capítulo 4 - Modelado FEM para la forja de una prótesis Austin-Moore.

4.1 Escaneo y limpieza del modelo 3D de una prótesis de cadera.

Como se mencionó al principio de este trabajo, se pretende simular la forja de una prótesis de cadera. La prótesis seleccionada es una Austin Moore de la marca Klinik[®] cuya función está dirigida a la restauración de la articulación y cuyo uso es sugerido en personas de la tercera edad. Consta de una sola pieza en la que se distinguen el vástago y la cabeza pulida de 48 [mm] de diámetro.

Esta pieza es el modelo final para el cual se diseña su proceso de fabricación mediante ingeniería inversa.

El primer paso para la obtención del modelo fue una medición manual realizada con el calibrador para una primera aproximación. Posteriormente, con el equipo FaroArm[®], se escaneó la prótesis Austin Moore[®], el brazo de escáner láser fue usado a lo largo de la superficie de la pieza, generando una nube de puntos. Por ello fue importante que la pieza estuviera suspendida sin añadir otro sólido debido a que la sensibilidad del equipo puede detectarlo, haciendo más difícil la digitalización. En la figura 4.1 se observa el acomodo de la prótesis en un soporte metálico con hilo de nylon para el escaneo.

Es importante para el escaneo que la superficie sea opaca, esto para evitar la refracción del láser y así tener un mejor modelo.



Fig. 4.1 Escaneo 3D de la prótesis Austin Moore[®].

Al finalizar el recorrido con el láser por la pieza se generaron dos archivos .STL con una distancia entre puntos de 0.5 mm y de 0.01 mm, siendo este último el más exacto debido a que la malla es más cerrada, aunque el procesamiento es más tardado (aproximadamente una hora). En la figura 4.2 se observan los archivos .STL de la prótesis abiertos en el programa de MeshLab[®], que es un software libre para el procesamiento y edición de mallas 3D.

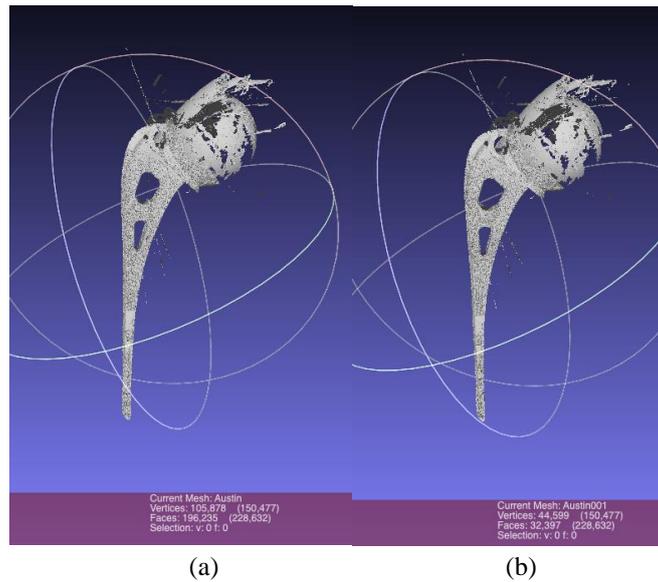


Fig. 4.2 Archivos .STL de la prótesis Austin Moore®. a) Distancia entre puntos de 0.5mm, b) Distancia entre puntos de 0.01mm.

En MeshLab® se limpió el escaneo de la prótesis con la herramienta Select faces in a rectangular region, seleccionando los puntos sobrantes. En la figura 4.3 se observa la prótesis posterior a la limpieza.

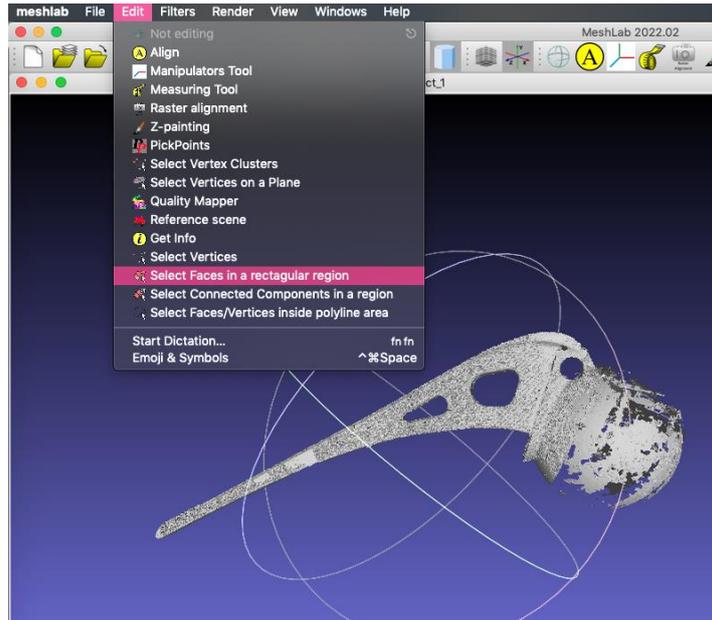


Fig. 4.3 Prótesis posterior a la herramienta de limpieza.

Posteriormente se seleccionó la pieza y con la herramienta Simplification: Quadric Edge Collapse Decimation, se reparó y recalculó la malla, para hacerla más compacta. Para reducir los vértices triangulares se usó la herramienta de limpieza y remallado Merge Close Vertices, obteniendo así la siguiente forma en la pieza (figura 4.4).

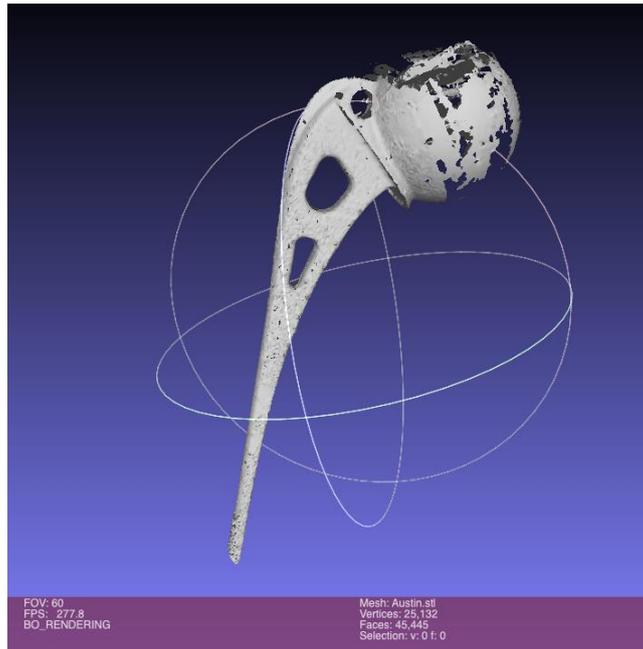


Fig. 4.4 Prótesis con superficie unida.

Debido a que la esfera no estaba completa, se optó por generar una esfera de 24[mm] de radio en el mismo programa con el comando Create New Mesh Layer, se alinearon ambas capas con la herramienta Align y se acoplaron, obteniendo la figura 4.5.

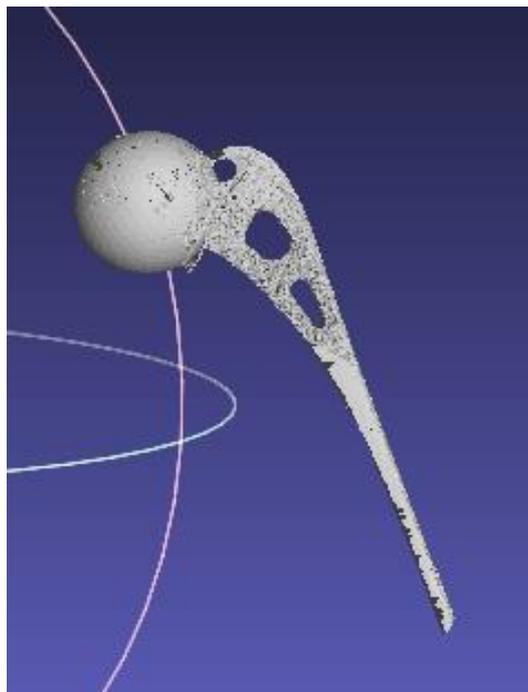


Fig. 4.5 Prótesis con esfera.

Una vez unidas las mallas, el archivo fue reparado en Meshmixer[®], software libre de edición de mallas; en este programa se suavizó y mejoró la superficie. (Figura 4.6)

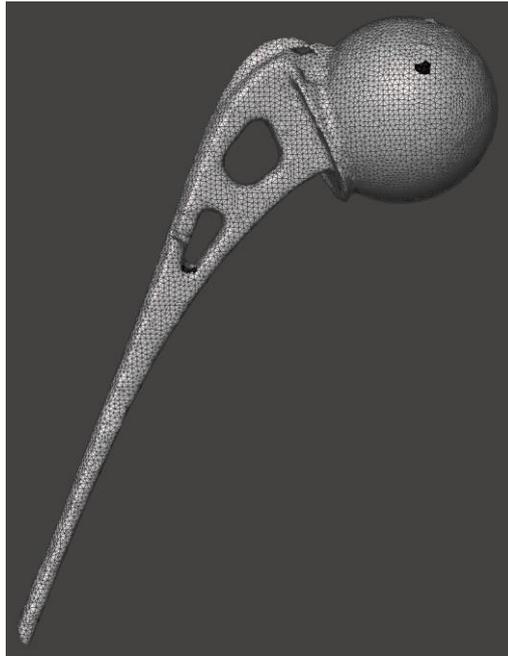


Fig. 4.6 Malla mejorada.

Una vez que la pieza se reparó, fue necesario disminuir la densidad de malla, como se muestra al pasar de lo mostrado en la figura 4.7 a al inciso b de la misma figura.

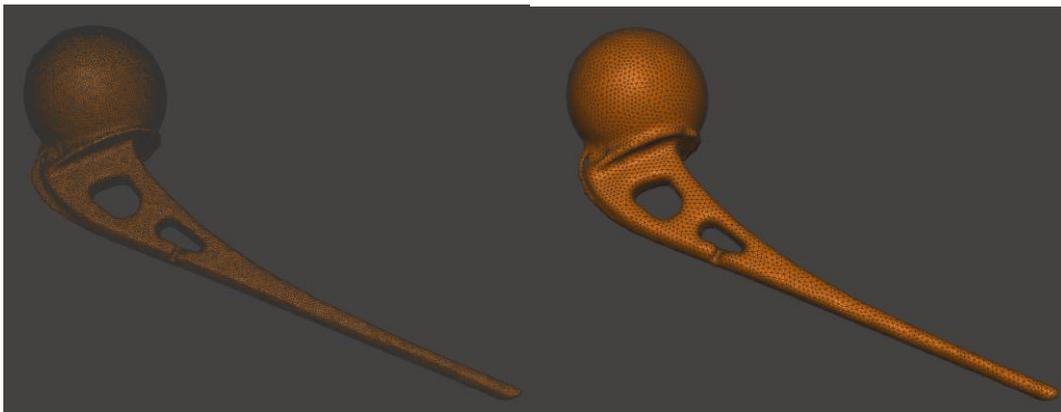


Fig. 4.7 Modelo de la prótesis Austin Moore
a) Malla con mayor densidad. b) Malla con baja densidad.

Se continuó con modificaciones para que la pieza tuviera una superficie más uniforme tal y como se observa en la figura 4.8.

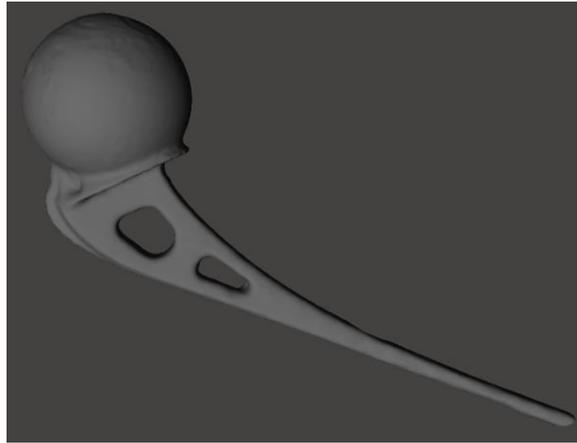


Fig. 4.8 Pieza mejorada con el programa Meshmixer®.

Finalmente, para exportar la pieza a SolidWorks® y generar el CAD, se tomaron puntos de referencia y se remalló en Meshlab®. Una vez realizado lo anterior, se dibujó el contorno de la prótesis (fig. 4.9 a) y se acotó el CAD (fig. 4.9 b).

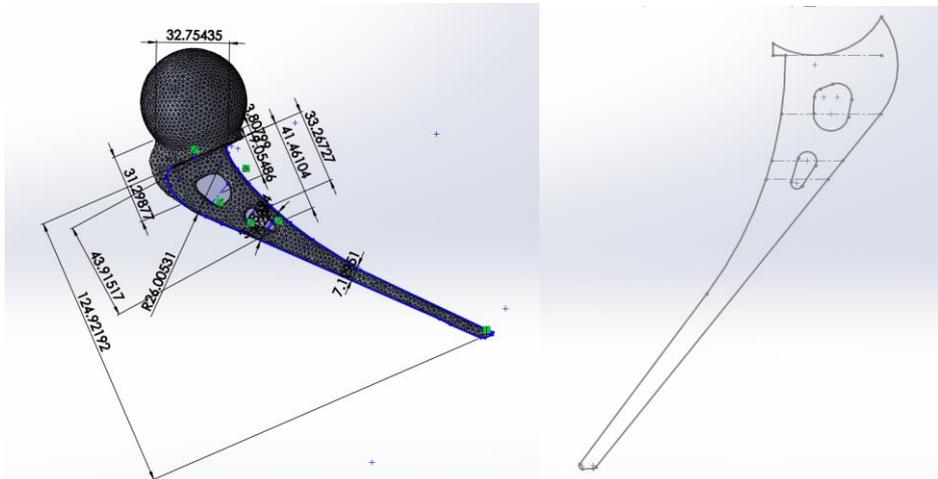


Fig. 4.9 a) Medidas de la prótesis en modelo 3D b) Dibujo del contorno del vástago de la prótesis.

En la figura 4.10 se presenta el modelo final en CAD.

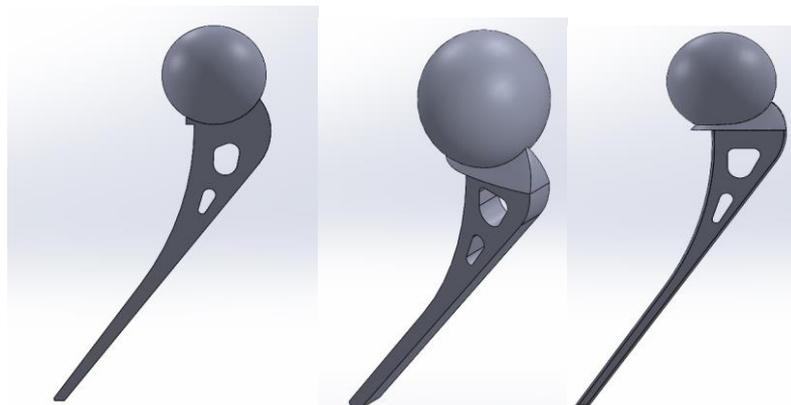


Fig. 4.10 Modelo CAD final en diferentes vistas.

Una vez con el modelo CAD se procedió al diseño del dado.

4.2 Metodología para el modelado del proceso de forjado.

A partir de la prótesis muestra, se reconoció que existe mayor concentración de material en la parte superior del modelo, además de una curvatura en la parte media del vástago. (figura 4.11).



Fig. 4.11 Prótesis Austin Moore, modelo base.

Como primer paso se modificó el CAD con medidas de tolerancia de acuerdo con lo establecido por la Asociación de la Industria de la Forja (por sus siglas en inglés, FIA) (2021).

En la figura 4.12 se encuentran las medidas de la pieza original sin tolerancias. En la figura a) se observa la longitud mayor de la prótesis, cuyo valor es de 184.25[mm]. Esto fue de utilidad para los cálculos de las tolerancias.

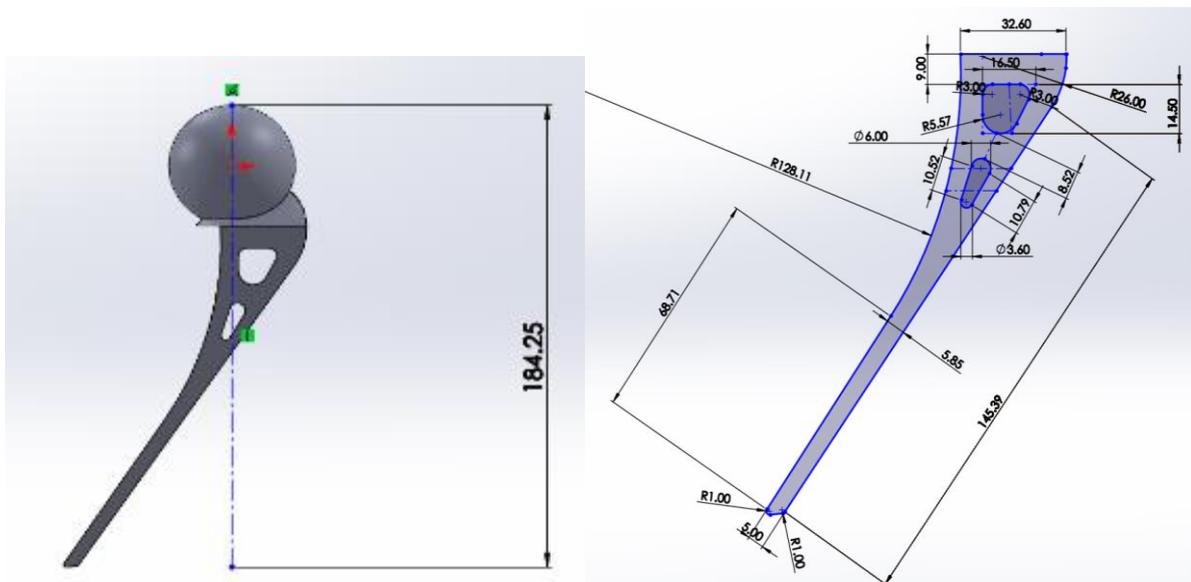


Fig. 4.12 Prótesis con cotas. a) Longitud mayor. b) Medidas del vástago.

Tomando como ejemplo la medida de 145.39 [mm] de la longitud del vástago, se realizó una tabla en excel para calcular las tolerancias donde se tomaron como factores el desgaste del titanio, y la relación largo/ancho de la pieza. Los valores para dichos factores fueron 0.009 y 0.003 respectivamente (García, 2019).

En la tabla 4.1 se muestra en la primera columna la longitud original de la pieza en negritas y debajo, se encuentra la longitud de mayor medida de la pieza, en la siguiente columna está el factor; este factor es el resultado de multiplicar la relación largo/ancho por la longitud, mientras que el factor para la mayor longitud es la multiplicación de ésta última por el factor asociado al desgaste del titanio.

Para calcular los máximos y mínimos únicamente se cambió el signo del factor: positivo para máximo y negativo para mínimo en el caso de la longitud a la cual se le agregan las tolerancias, para la longitud mayor el máximo corresponde al signo positivo del factor, pero a cero en el mínimo.

Finalmente, los valores máximos y mínimos se suman para dar un valor que se adiciona a la longitud original y dependiendo de si esta longitud es externa o interna se usará la suma de máximos o de mínimos respectivamente. Para el caso de medidas externas se adiciona la suma de los máximos, mientras que para las medidas internas se utiliza la suma de los mínimos.

En este caso, la medida como se ve en la figura 4.12, es externa y se le suman 2.1[mm] que es la suma de los máximos, dando así un total de 147.49[mm].

Tabla 4.1 Cálculo para tolerancia de una medida ejemplo.

Vástago				
LONGITUD		FACTOR	MAX (+)	MIN (-)
145.39		0.43617	0.43617	-0.43617
184.25		1.65825	1.65825	0
SUMA			2.09	-0.44
LONGITUD TOTAL			2.1	-0.5
			147.49	

El proceso descrito anteriormente se realizó de manera repetitiva para cada medida de la pieza, obteniendo así la tabla 4.2 que contiene las medidas con tolerancias, mismas que fueron aplicadas en el modelo CAD para tener un resultado efectivo.

Tabla 4.2. Medidas con tolerancias.

Medida original mm	Tolerancia mm	Medida final mm
145.39	+2.2	147.59
26	+1.8	27.8
32.6	+1.8	34.4
128.11	+1.8	129.91
1	+1.7	2.7
5	+1.7	6.7
5.85	+1.8	7.65
3.6	-1.7	1.9
10.52	-1.8	8.72
6	-1.8	4.2
10.79	-1.8	8.99
8.52	-1.8	6.72
5.57	-1.8	3.77
3	-1.8	1.2
16.5	-1.8	14.7
9	-1.8	7.2
14.5	-1.8	12.7
24.1	+1.8	25.9
90	+2	92
27.3	+1.8	29.1
10	+1.8	11.8
19.77	+1.8	21.57
16.27	+1.8	18.07
68.71	+1.9	70.61
14.3	-1.7	12.6

Finalmente se obtuvo el CAD con tolerancias que se presenta en la figura 4.13.

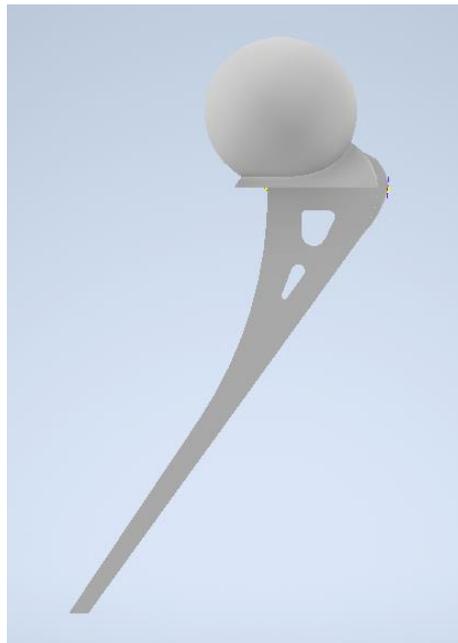


Fig. 4.13 CAD con medidas de tolerancia.

Como siguiente paso, se calcularon las almas de las regiones huecas, los radios y ángulos de salida.

Para determinar el espesor de alma para cada cavidad pasada se aplicó el criterio empleado por Del Río y la gráfica de la figura 4.14 (Del Río), para la cual se usaron los valores de $l=12.27[\text{mm}]$ y $13[\text{mm}]$ para las cavidades inferior y superior respectivamente; donde l es el diámetro equivalente interior de las regiones huecas; el cual se obtuvo mediante la fórmula del perímetro de una circunferencia al despejar el diámetro usando el perímetro de las regiones huecas. También se utilizó la relación $\frac{h}{l}$ donde h la altura medida desde la línea de partición hasta la superficie, cuyo valor fue de $4.6[\text{mm}]$, entre el diámetro l ; ambas medidas en la zona de las geometrías pasadas.

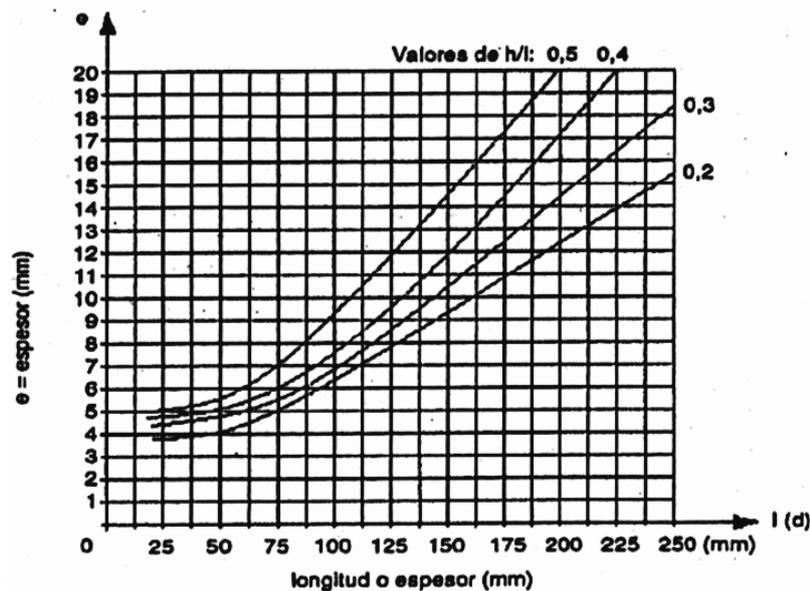


Fig. 4.14 Espesor mínimo del alma. (Del Río, 1980)

Al hacer la relación de ambas cavidades se obtuvo que la superior tenía un valor de 0.368, mientras que la de abajo 0.373. Para obtener el espesor mínimo se realizó una interpolación con los valores de las curvas de 0.3 y 0.4. Finalmente se obtuvieron espesores de alma de 4.57 [mm] para la cavidad superior y 4.59 [mm] para la inferior.

De esta forma, se obtuvo la geometría presentada en la figura 4.15, que cuenta con dos almas.

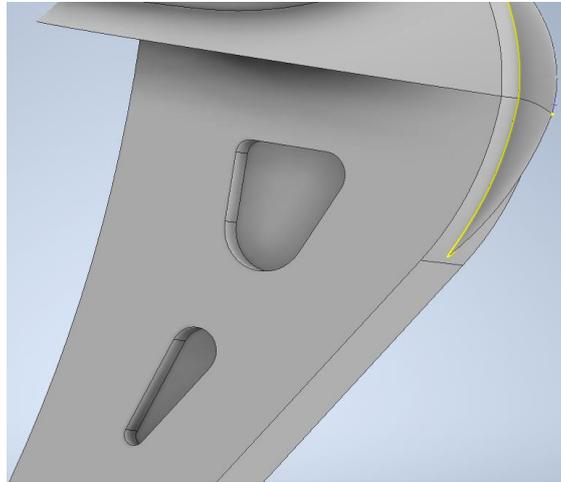


Fig. 4.15 Modelo CAD con almas.

Con el cálculo del espesor de alma, se generó el molde con la línea de partición a la mitad de la prótesis. Figura 4.16.

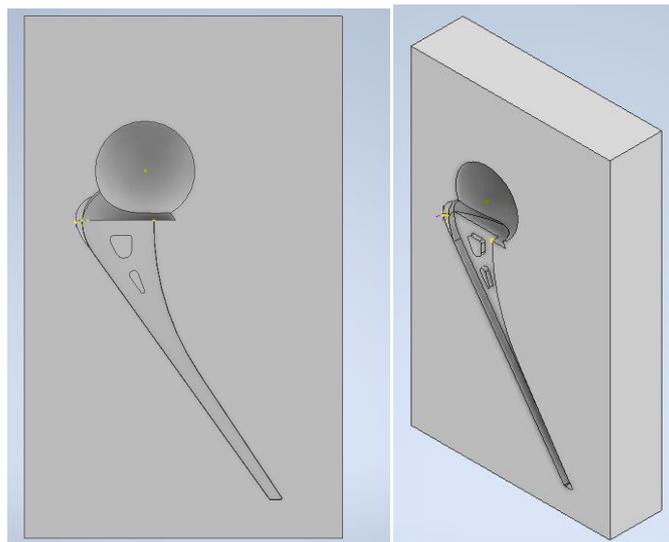


Fig. 4.16 Molde para la prótesis.

Posteriormente se realizaron los cálculos de los ángulos de salida tomando en cuenta los criterios de Mario Rossi para externas (Mario Rossi) y el de Del Río para las internas (Del Río), mismo en el que se deben agregar 2 grados.

Para el cálculo de los ángulos de salida se usó la tabla 4.3 con la altura interior del alma H , el ancho en la región $b<$ y el perímetro L .

Para entrar a la tabla, se establecieron las relaciones de $\frac{H}{b}$ y $\frac{L}{b}$.

Tabla 4.3 Ángulos de salida. (Del Río, 1980)

L/b	H/b						
		1	1-3	3-4.5	4.5-6.5	6.5-8	8
<1.5	-	-	2°	2°	2°	2°	2°
>1.5	3°	5°	7°	10°	12°	15°	15°

Comenzando desde la esfera, el cuerpo y finalmente en la base se obtuvieron los siguientes datos (tabla 4.4):

Tabla 4.4 Ángulos de salida para el molde de la prótesis.

Geometría	Longitud / perímetro (L) [mm]	Ancho (b) [mm]	Altura / profundidad (H) [mm]	Ángulo
Cuerpo de la prótesis	355.97	34.6	10	3°
Esfera	150.79	48	24	3°
Curva 1	54	13.95	14.55	5°
Curva 2	17.02	1.41	3.98	5°
Curva 3	12.65	1.41	3.98	5°
Curva 4	4.13	3.32	14.55	2°
Recta	10.47	3.32	14.55	2°
Cavidad interior superior	36.86	2.72	10.62	5°
Cavidad interior inferior	28.23	2.71	7.8	5°

Con los datos anteriores, se decidió tomar un ángulo representativo de 3° para ángulos de salida exteriores y de 5° para interiores. Esto debido a que la medida de tendencia se situó entre 2° y 3° para los ángulos exteriores, por lo que se seleccionó el mayor lo cual da menos exactitud en la pieza pero favorece su extracción del dado. Mientras que en el caso de los ángulos interiores, todos los resultados fueron de 5°.

Al aplicar la función de ángulo de salida en el CAD, se obtuvo la figura 4.17, donde se observa una mayor concavidad en la figura.

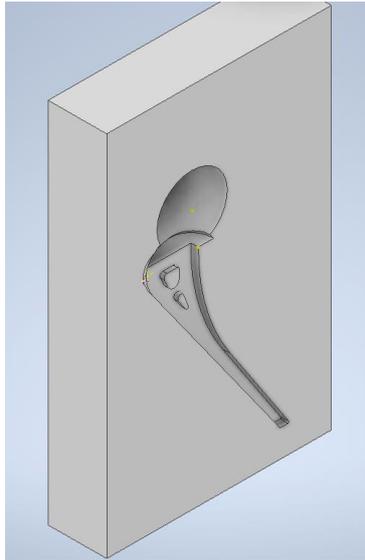


Fig. 4.17 Sección del molde con espesor mínimo de alma y ángulos de salida.

Una vez determinados los ángulos de salida, se calcularon los radios de redondeo en las cavidades de la pieza. Para ello se utilizó la ecuación $k=h/d_{\text{medio}}$, donde k es el valor con el cual se entra en la gráfica de la figura 4.18.

$$h=12.9 \quad d_{\text{medio}}=10.45 \quad r=1$$

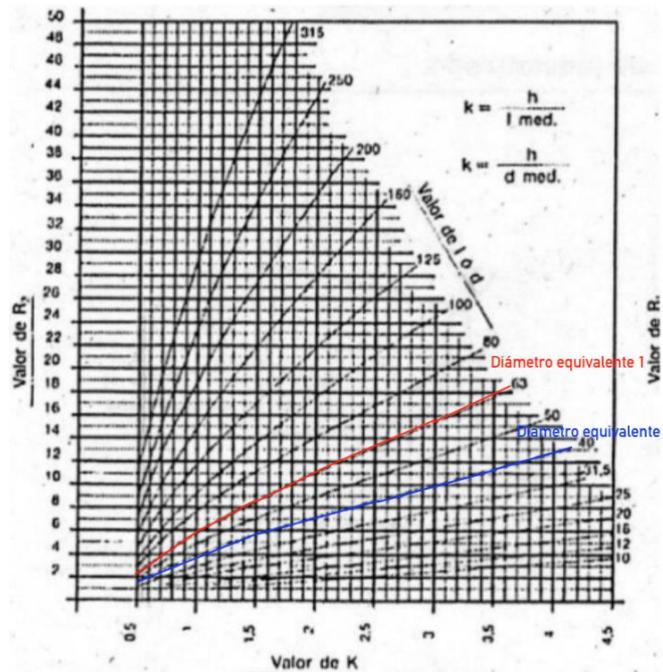


Fig. 4.18 Cálculo de R_2 . (García, 2019)

Para la cavidad superior se tiene un diámetro equivalente medio de 57.89 [mm] y una altura de 10.62 [mm], por lo que el valor de k es igual a 0.183. Para entrar a la gráfica de la figura 4.18 se tomó el valor mínimo de k , que es 0.5 y la curva de 63 dado el diámetro medio de 57.89; de esta forma se obtuvo un radio de redondeo de 2[mm] para la cavidad superior.

Por otro lado, para la cavidad inferior se tienen las siguientes medidas: diámetro equivalente medio de 44.34 [mm], altura de 7.8 [mm], teniendo así un valor de k de 0.176, por lo que nuevamente se entró a la gráfica con el valor mínimo de 0.5, pero con la curva 40 dado del diámetro medio. Por lo tanto, se obtuvo un radio de redondeo de 1.5 [mm].

Posterior a los procesos previos, se continúa con el diseño de la zona de rebaba.

4.3 Diseño de la zona de rebaba.

La zona de rebaba tiene la función de alojar material sobrante del proceso de forja, consta de dos partes: el canal o cordón de rebaba y el alojamiento de rebaba. Se deben tomar en cuenta los siguientes parámetros: ancho del cordón de rebaba λ , espesor del cordón de rebaba ε , coeficiente de fricción μ y presión necesaria para la forja de la pieza.

Para obtener el valor del espesor del cordón se utilizó la ecuación $\varepsilon = 0.015\sqrt{a}$ donde a es la sección transversal de la prótesis, misma que tuvo un valor de 15 167.68 [mm²], por lo tanto $\varepsilon = 1.847$ [mm].

En cuanto al ancho del cordón de rebaba, se obtuvo mediante la expresión $\frac{\lambda}{\varepsilon} = 10$, cuyo valor de 10 se refiere a la forma de forja (en estampa de piezas complejas con rebaba), al despejar, se obtuvo un valor de λ de 18.47[mm].

Finalmente, para el alojamiento de rebaba, el valor se seleccionó entre un rango de dos a tres veces ε ; por lo que se decidió un valor promedio e de 4.62[mm], por lo que la longitud de ocho veces el alojamiento de rebaba fue de $l = 36.94$ [mm]. De igual forma, el ángulo de la zona de rebaba $\alpha = 30^\circ$ bajo medidas estándar.

Al realizar el seguimiento de la zona de rebaba en el molde se obtuvo la figura 4.19.

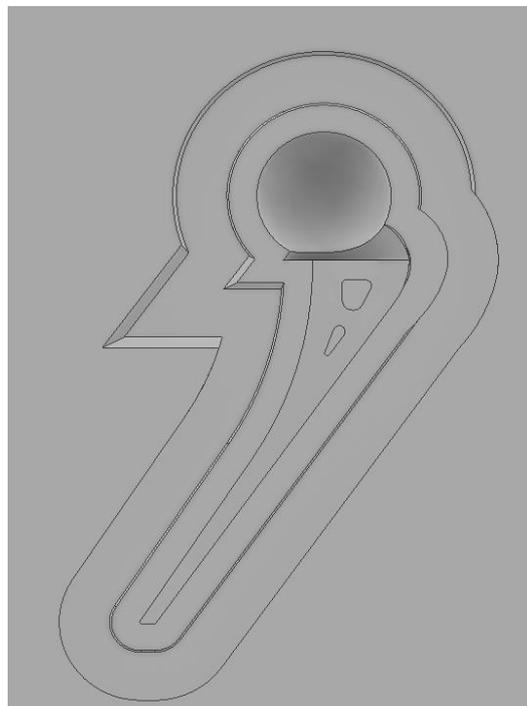


Fig. 4.19 Zona de rebaba en el molde.

Una vez realizado el dado en Inventor®, se guardó en extensión IGES y se importó en Abaqus®, donde en el módulo de part se convirtió en una pieza tipo cascarón (Shell) donde únicamente se conservó la zona de rebaba y la pieza cóncava.

A partir del uso del programa Abaqus® para la simulación de llenado del molde se utilizó el método CEL (Coupled Eulerian Lagrangian) que consiste en simular materiales sólidos, líquidos o una mezcla de ambos, por cada iteración hay una deformación lagrangiana que describe el desplazamiento en una malla estática que sirve como referencia para medir el cambio en la posición del material.

4.4 Simulación en Abaqus® con método CEL.

Para comenzar con la simulación, se generó previamente una preforma en Inventor® con base en la forma de la prótesis, pero con dimensiones distintas ya que la preforma debe tener mayor volumen, pero ser más estrecha para favorecer un flujo compresivo. Se importó el dado y el tocho en formato IGES para usarlos en Abaqus®.

A continuación, se despliega una explicación por cada módulo.

4.4.1 Módulo part.

Para este módulo se diseñó un tocho con una geometría similar al diseño de la prótesis con la finalidad de que el proceso fuera más sencillo; Las medidas de dicho modelo se observan en la figura 4.20. El volumen propuesto del tocho se definió conforme se fue diseñando el tocho, este fue de 93098.51 [mm³] comparándolo con el volumen real de la pieza que es de 78509.839 [mm³] se tuvo un 18.58% más de volumen.

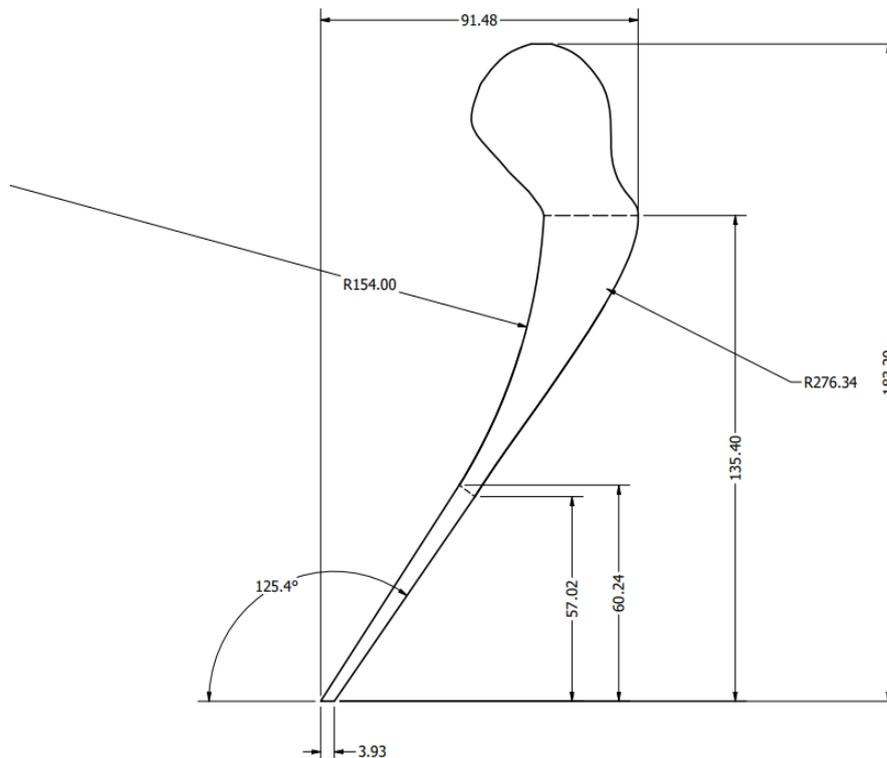


Fig. 4.20. Tocho con cotas.

En este módulo se importaron el tocho, el dado y el dominio desde Inventor®. La geometría de estos dos últimos se disminuyó con la finalidad de reducir los tiempos de cómputo en Abaqus®. Cada parte se definió de diferente manera; para el tocho fue de tipo deformable, para el dominio fue de tipo Euleriano y para el dado fue de tipo discretamente rígido. Por lo que al final se obtuvieron tres partes para un modelo tal como se observa en la figura 4.21.

En la figura 4.21 a) se muestra el tocho, que al entrar en contacto con el dado (figura 4.21 b)) se deforma durante la forja, creando la geometría de la prótesis plasmada en este último. El dominio, que es la figura 4.21 c) contiene la región de simulación y dominio euleriano.

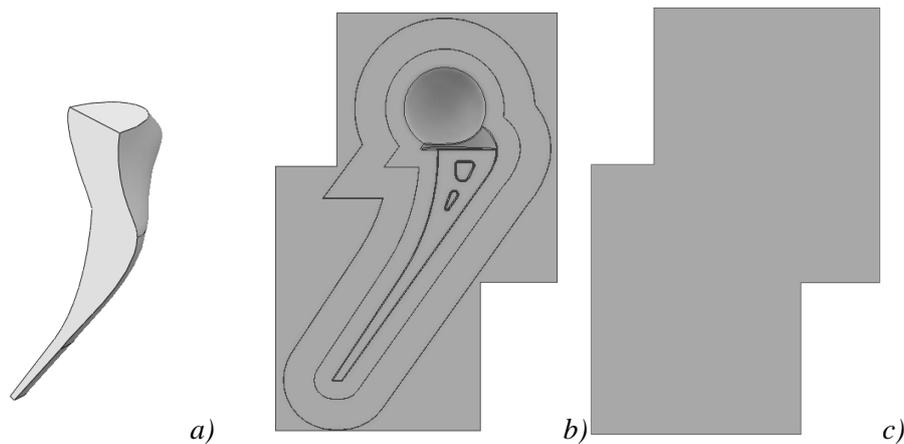


Fig. 4.21. a) Tocho, b) Dado y c) Dominio.

4.4.2 Módulo de propiedades (Property).

En este módulo se ingresan los valores de las propiedades del material del tocho. Dada la investigación previa, se decidió emplear la aleación de titanio Ti-6Al-4V a 400[°C] utilizando la gráfica de la figura 4.22 para obtener los valores de la tabla 4.5.

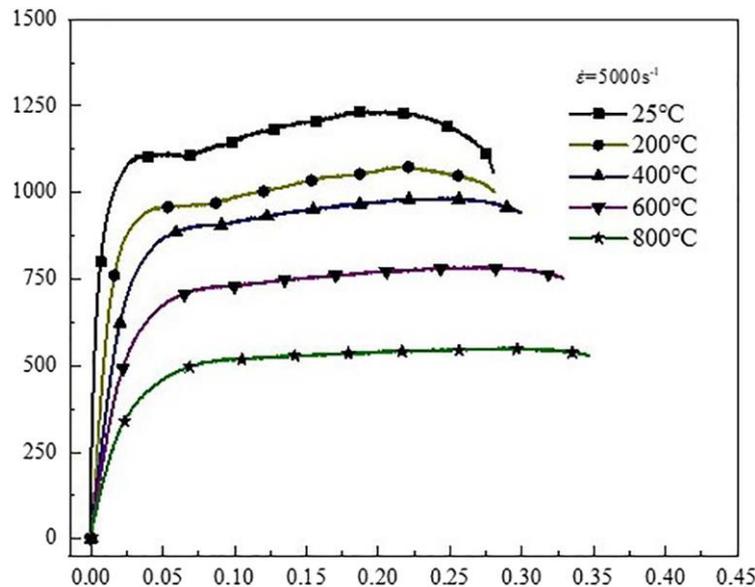


Fig. 4.22 Curva esfuerzo-deformación de aleación Ti-6Al-4V. (Yan, 2022)

Tabla 4.5 Valores de esfuerzo y deformación del Ti-6Al-4V a 400[°C].

Deformación [mm/mm]	Esfuerzo [Mpa]
0	750
0.05	875
0.1	880
0.125	890
0.15	900
0.2	910
0.25	915
0.3	913
0.33	911

Por otro lado, en la tabla 4.6 se muestran algunos valores relevantes obtenidos de Matweb.

Tabla 4.6 Propiedades de material Ti-6Al-4V. (Matweb, 2022)

Propiedad	Valor
Densidad [g/cm ³]	4.43
Módulo de elasticidad [GPa]	113.8
Coefficiente de poisson	0.342

4.4.3 Módulo Step.

En este módulo se creó un paso con el nombre “compresión” de tipo dinámico explícito con un periodo de tiempo de 0.0022[s] dado que la velocidad recomendada para forja por martinete es de 4500 [mm/s] y que la distancia establecida entre el tocho y el dado es de 10 [mm]. (Kalpakjian, 2008)

4.4.4 Módulo de interacción.

En este módulo se crearon las interacciones entre las piezas. Se asignó un nodo de referencia el cual está relacionado con el dado. Posteriormente, se generó una interacción general a la que se le asignó un coeficiente de fricción de cero debido a que se modeló un caso ideal.

4.4.5 Módulo carga (Load).

Las restricciones que se crearon fueron las siguientes:

- En el punto de referencia, la velocidad de forja fue de 4.5[m/s].
- Restricción de desplazamiento/rotación al punto de referencia, esta restricción fue para evitar desplazamientos y rotaciones en el dado. Su valor fue de cero para los ejes X y Y, así como las rotaciones en las tres direcciones.
- Restricción de velocidad/velocidad angular en cada cara del dominio en las tres direcciones. Esta restricción fue para evitar que el material sobrepase el dominio; es decir establece los límites del dominio del material.

4.4.6 Módulo de malla (Mesh).

En el mallado de las piezas se utilizó el tipo de malla hexa; Para todas las piezas se utilizó un tamaño de malla de 1.5 [mm], lo que resultó en 22436 elementos para el dado (figura 4.23 b)), 42584 elementos para el tocho (figura 4.23 a)) y 493560 elementos para el dominio (figura 4.23 c)).

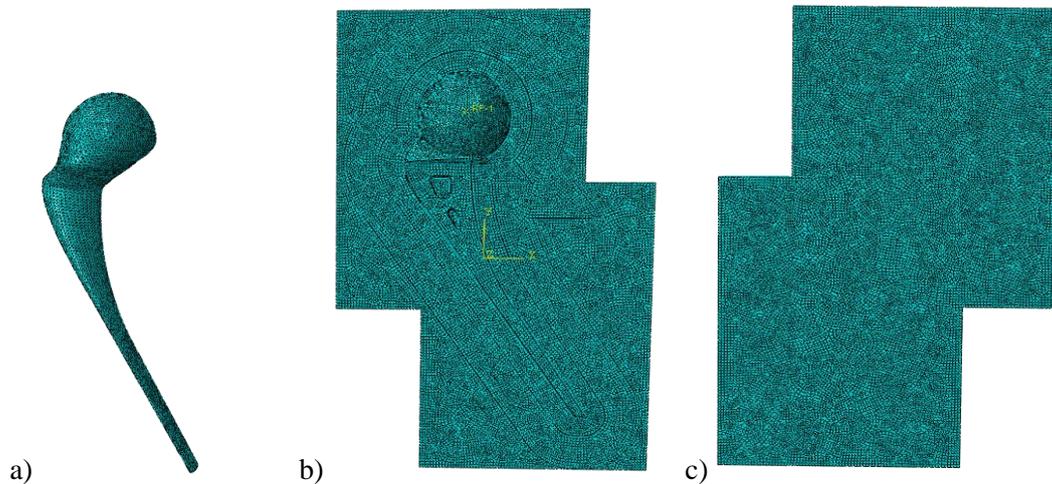


Fig. 4.23 a) Tocho mallado, b) Dado mallado, c) Dominio mallado.

El tamaño de la malla se seleccionó de acuerdo con el espesor del cordón de rebaba ϵ , que es igual a 1.847[mm] siendo esta medida la más pequeña, por lo que el tamaño de los elementos de la malla debió ser menor a este valor y se estableció un mallado de 1.5[mm].

4.5 Análisis de resultados.

4.5.1 Esfuerzo equivalente de Von Mises.

Durante la simulación, se observa el cambio en la geometría del tocho, el cual se asemeja a la forma de la prótesis cumpliendo con el objetivo de modelar el proceso de forja.

En la figura 4.24 se observa el resultado final del proceso de forja. Es importante mencionar que la zona de rebaba cumplió con su función y la geometría del dado fue completada por el material del tocho en su totalidad.

Se presenta un esfuerzo que tiende a ser homogéneo en toda la pieza de 914.9 [MPa].

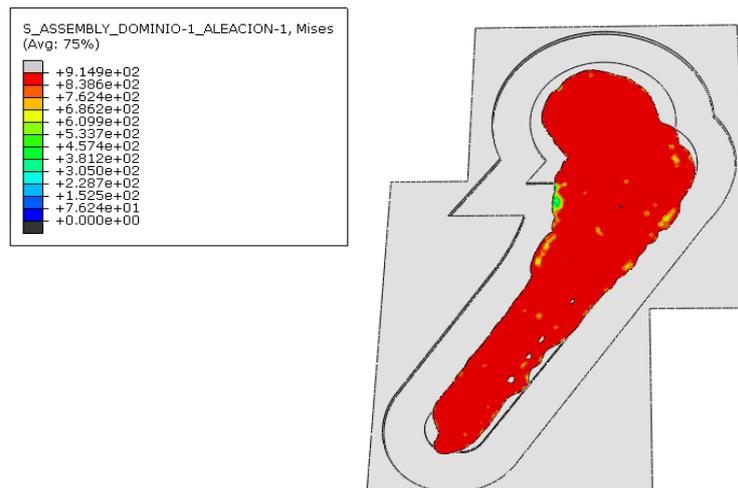


Fig. 4.24. Llenado de molde.

Al inicio del proceso (Figura 4.25 a) se presenta el tocho completamente azul debido a que aún no hay contacto con el dado, por lo que la pieza está libre de esfuerzos. Mientras que en la figura 4.25 b, se presentan esfuerzos en la parte central y superior del tocho, dado a que es la parte de la pieza con mayor volumen y por tanto recibe primero el contacto. En la figura 4.25 c, se presentan esfuerzos en toda la pieza, concentrándose aún más en la parte de la esfera. Finalmente, en la figura 4.25 d el dado fue llenado completamente por el material, se observan algunas cavidades que se deben a que el tamaño del elemento debe disminuirse aún más para que la región se defina de manera adecuada.

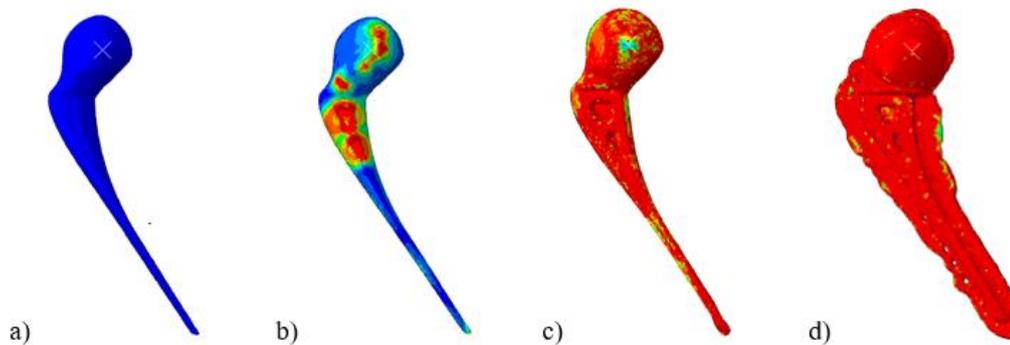


Fig. 4.25. Simulación de esfuerzos del tocho. a) $t=0$ MPa , b) $t=0.00033$ MPa , c) $t=0.00154$ MPa y d) $t=0.0022$ MPa.

4.5.2 Llenado de dado.

Para asegurar el llenado del molde, se analizó la presión de contacto entre el dado y el tocho. Como se observa en la figura 4.26 a aún no hay contacto entre las dos partes, por lo que ambas piezas permanecen en color azul fuerte. En la figura 4.26 b hay mayor contacto localizado en el medio de la superficie. En la figura 4.26 c se observa mayor contacto en la zona media; esto se incrementa en el avance como se muestra en la figura 4.26 d donde la geometría se llenó de manera satisfactoria por el color verde que presentó e incluso en la iluminación en la zona de rebaba.

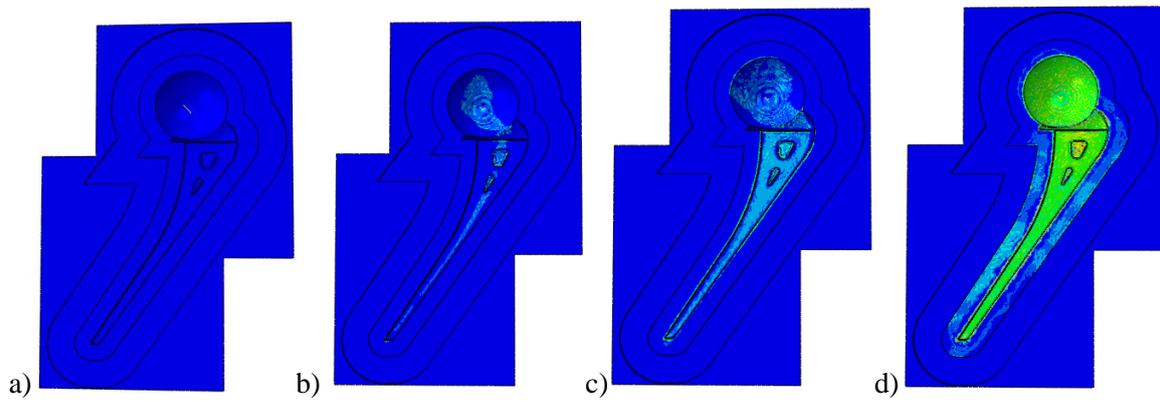


Fig. 4.26. Avance de contacto entre el tocho y el dado. a) $t=0$ mm , b) $t=0.00077$ mm, c) $t=0.00176$ mm d) $t=0.0022$ mm.

4.5.3 Fuerza resultante.

Se obtuvo la gráfica de la fuerza resultante figura 4.27, cuya representación es prácticamente lineal a excepción del final donde se vuelve exponencial debido a que el material se movió hacia la zona de rebaba.

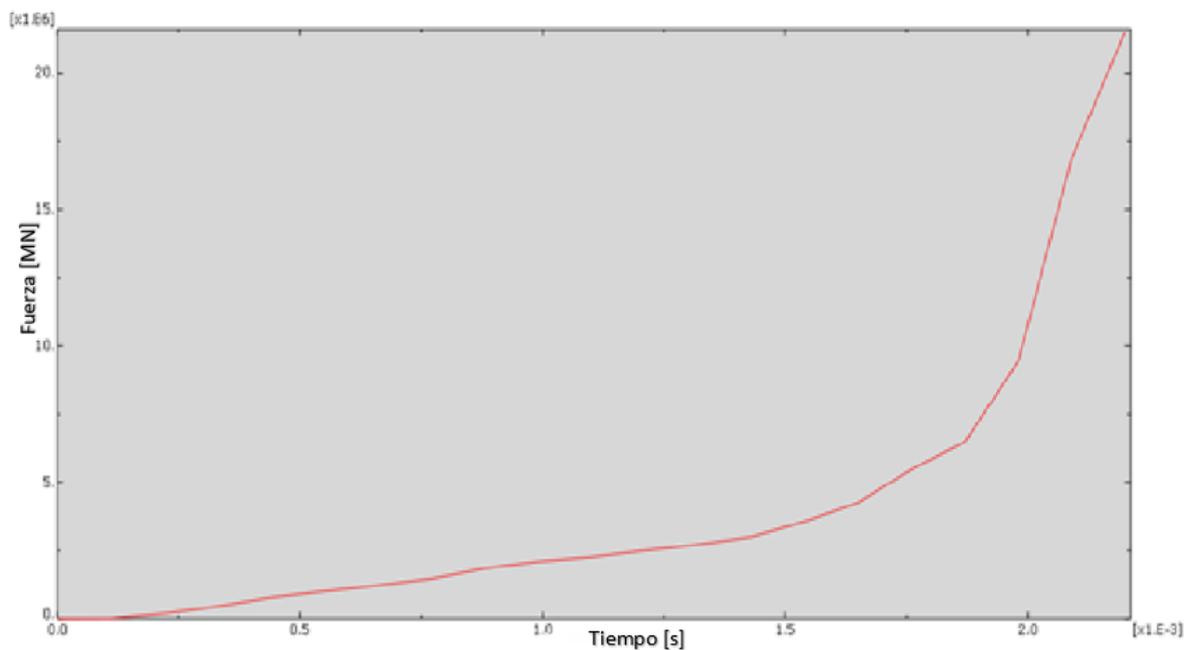


Fig. 4.27 Gráfica de fuerza de forja.

El último valor de fuerza de forja es de 21.509[MN], lo que corresponde a la fuerza final de forja.

Para compararlo con la fuerza resultante teórica, se utilizó la fórmula de fuerza de forja:

$$F = K_f * Y_f * A$$

Donde

$$A = \text{Área proyectada de la pieza (mm}^2\text{)}$$

$$Y_f = \text{Esfuerzo de flujo del material (MPa)}$$

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

El área proyectada se calculó de manera aproximada, en la figura 4.28, donde se observa la sección transversal del dado y la superficie del material en color rojo. Fue precisamente esa superficie la que se calculó con ayuda del CAD de la prótesis (9405.05[mm²]) tomando en cuenta la zona de rebaba y restándole un 20% (1881.01[mm²]) por el área no llenada de la zona de rebaba y así finalmente obtener el valor del área proyectada, el cual fue de 7524.04[mm²].

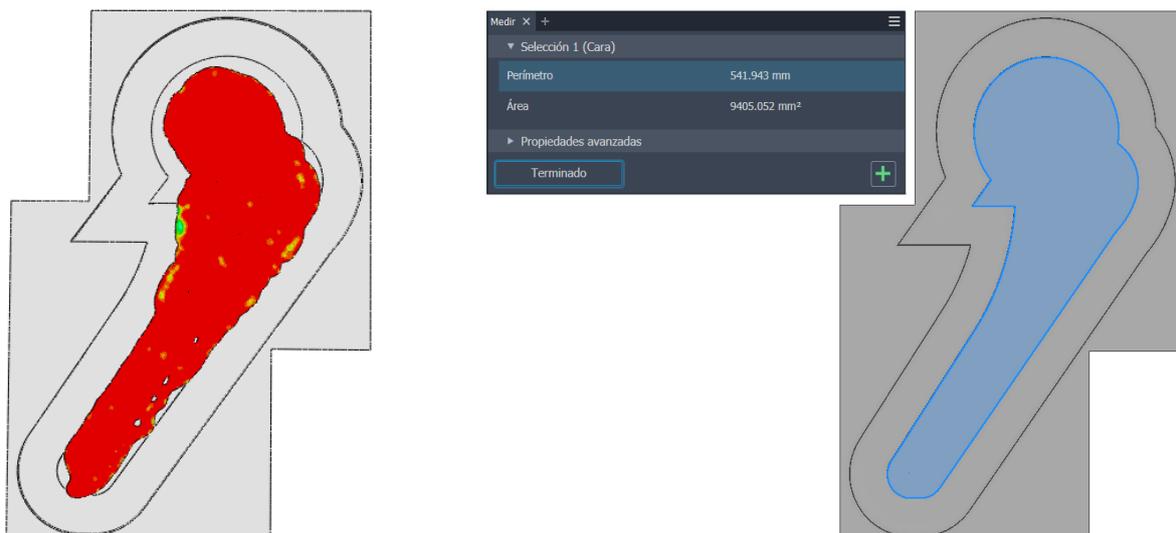


Fig. 4.28 Área proyectada de la pieza.

El esfuerzo de fluencia del material es de 750[MPa], mientras que el factor K_f se obtuvo de la tabla 4.7 donde se seleccionó como forma compleja con rebaba, por lo que el valor del factor fue de 8.

Tabla 4.7 Valor de factor de forma de forjado. (Groover, 2007)

Forma de la pieza	K_f
Formas simples con rebaba	6.0
Formas complejas con rebaba	8.0
Formas muy complejas con rebaba	10.0

Con lo anterior, se realizó el cálculo de la fuerza de forjado, obteniendo así un valor de 45.144 [MN], lo que es comparable con el resultado obtenido en la gráfica de fuerza resultante de 43.019[MN].

4.5.3 Campo de velocidades.

En la figura 4.29 se observa la distribución del campo de velocidades, donde las flechas representan los vectores del flujo de material que presentó el metal Ti-6Al-4Va durante el proceso de forja. Es destacable que la zona de llenado tiene los vectores hacia el interior, lo que indica la presión entre el dado y el tocho; mientras que la zona de rebaba presenta mayor densidad de vectores y que además su dirección es externa, esto debido a que es el material que más se desplaza.

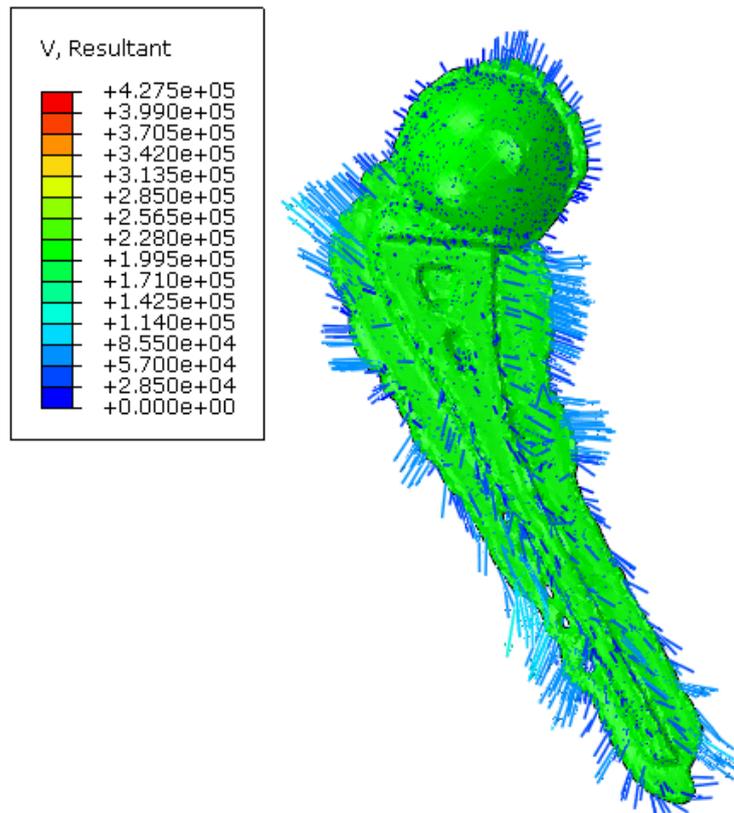


Fig. 4.29 Campo de velocidades.

5. Conclusiones.

Al finalizar el diseño y posterior simulación del dado, tocho y dominio que conformaron este trabajo, concluimos de manera general que el proceso de forja en la producción de piezas mecánicas es de suma importancia, en él se realizan piezas con geometrías muy complejas de diversas industrias que impactan en nuestra vida cotidiana.

El proceso de diseño representó la suma del conjunto de los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera; desde la mecánica de sólidos hasta el campo biomecánico, donde el diseño de una prótesis debe ser seguro, confiable y ergonómico, ya que actualmente es posible sustituir partes muy importantes del cuerpo humano, las cuales a su vez requieren de ciertas propiedades mecánicas, una de ellas es la resistencia ante las cargas que suponen las actividades cotidianas como caminar, correr o simplemente moverse.

Durante el proceso de diseño, la selección del material tuvo gran relevancia, ya que este debe ser biocompatible debido a que estará inmerso en el cuerpo humano y este no debe afectar la salud del paciente. Por ello, se seleccionó la aleación de Ti-6Al-4V.

Una vez realizada la simulación, se observó que los esfuerzos presentados en la pieza tuvieron 914.9[MPa] con una distribución homogénea.

En la zona de rebaba se observó la presencia de material, mismo que se desplazó como excedente, pero ayudó al llenado correcto del molde; Cabe destacar que en el modelo de la simulación se presentaron algunas cavidades propias del mallado de las piezas, esto es que el tamaño de malla debió reducirse para poder representar mejor el flujo del material, sin embargo, esto hubiera aumentado las horas de procesamiento en el software.

El llenado del molde cumplió con lo esperado, el material llegó a la zona de rebaba, observándose así un llenado adecuado de la geometría. Con esto se comprobó que el diseño del dado es fundamental para el proceso, puesto que, aunque el modelo contenía geometrías estrechas y ángulos agudos, con la implementación del espesor de alma, ángulos de salida, radios y diseño de la zona de rebaba el dado se llenó perfectamente.

En cuanto a la fuerza resultante del modelo, corresponde tanto el valor numérico como el teórico, siendo 43.019 [MPa] para el primero y 45.144[MPa] para el segundo, la variación tiene que ver más con las ambigüedades del modelo empírico.

Relacionar lo teórico con los modelos numéricos resulta eficiente dada la naturaleza del proceso, mismo que requiere de recursos energéticos y económicos; Durante la etapa del diseño CAD y la posterior simulación de elementos finitos, es necesario identificar mejoras en la geometría tanto del dado como del tocho e incluso del modelo final. Aplicar ángulos de salida favorece el flujo de material y con ello un desmoldeo óptimo; Por otro lado, aplicar radios en los ángulos agudos de la geometría disminuyó la presencia de concentradores de esfuerzos.

Aunque el diseño del dado de forja es imperativo, también se debe considerar el diseño de la preforma, ya que también representa un factor decisivo para el correcto llenado del molde. La preforma no debe tener la geometría exacta del modelo deseado, por lo que para este modelo resultó adecuado considerar un volumen adicional de 18.5% que garantizara el llenado.

La simulación FEM es muy importante antes de llevar a cabo el proceso en físico, debido a que se obtienen resultados que pueden analizarse para asegurar que el proceso propuesto es correcto o si requiere mejoras en su diseño o en su definición. De igual forma resulta más económico realizar pruebas en softwares que realizarlo con maquinaria y materiales físicos.

6. Bibliografía.

1. AFM. (2017, 14 junio). Prensas hidráulicas de forja. Recuperado 24 de enero de 2022, de <https://www.afm.es/es/prensas-hidraulicas-forja-loiresafe20>
2. Ajmal, A. (2018, 31 marzo). Induction Forge Heat Up A Steel Bar. Wonderful Engineering. Recuperado 4 de abril de 2022, de <https://wonderfulengineering.com/using-induction-forge-steel-bar-heated-12-seconds/>
3. Anz, D. (2007, 2 julio). Secuencia de forjado de una herradura en frío. Engormix. <https://www.engormix.com/equinos/articulos/secuencia-forjado-herradura-frio-t27200.htm>
4. Behrens, B., Kammler, M., Klassen, A., Vahed, M., & Bonhage, M. (2014). Development of a powder metallurgical self cooling forging die with inner cavities: Vol. 1o (1 a ed.). Leibniz Universität Hannover. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2014.09.00>
5. Berumén, J. (s. f.). Recalcado y encabezamiento. Forja Wiki. Recuperado 2 de marzo de 2022, de https://forja.fandom.com/es/wiki/Recalcado_y_encabezamiento?file=I.jpg
6. Cárdenas, A. (2014). Conformado de metales (caliente y frío). Héctor estadística. Recuperado 10 de marzo de 2022, de <https://sites.google.com/site/hectorestadistica/procesos-de-manufactura/conformado-de-metales>
7. Castillo, F.(2007) Lecturas de Ingeniería 2, Cuautitlán Izcalli, México: Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán.
8. Contreras, A. E. (2013). Optimización del proceso de forja abierta para evitar defectos internos (1.a ed., Vol. 1). Universidad Autónoma de Nuevo León.
9. Cortes, A. J. (1986). Forja cerrada (1.ª ed., Vol. 1). Universidad Nacional Autónoma de México.
10. Dabrox Machinery. (s. f.). Martillo de forja hidráulico Lasco KH 50 - 5000 kgm (ID:75675). Dabrox Machinery - Máquinas de Forja y Estampación - Dabrox.com. Recuperado 18 de febrero de 2022, de <https://spanish.dabrox.com/hydraulic-forging-hammer-lasco-kh-50-5000-kgm/>
11. Del Río, J. Deformación plástica de los materiales: La forja y la laminación en caliente, Editorial Gustavo Gili, España, 1980.
12. Dieter G.E. Kuhn, H.A. (2003). Diseño de procesos y trabajabilidad. Estados Unidos de América. ASM International.
13. Esquivel, N., & Pineda, L. (2018, 16 marzo). Forja. ESPECIALIDAD DISEÑO 2018. Recuperado 23 de marzo de 2022, de <https://disenoproductos3.wordpress.com/forja/>
14. Estrada, L. (2008). Diseño de estampas para forja (1.a ed., Vol. 1). Universidad Nacional Autónoma de México.
15. ETAL. (s. f.). Forja y fundición. Recuperado 17 de septiembre de 2021, de <https://www.etal.mx/quienes-somos/procesos/forja-y-fundicion/>
16. FORCAN. (s. f.). Pulir piezas de metal como acondicionado o acabado final. Recuperado 5 de mayo de 2022, de <https://electroniquelforcan.com/pulido-de-metales/>
17. FORJADO. (2016). Recuperado 28 de marzo de 2022, de <http://forjadoind.blogspot.com/2016/05/forjado.html>
18. Forjadoind. (2016, 24 mayo). FORJADO. Recuperado 19 de noviembre de 2021, de <http://forjadoind.blogspot.com/2016/05/forjado.html>
19. García A., Diseño de utillaje para la forja de una pieza industrial mediante simulación por elementos finitos, Grado en ingeniería en tecnología industrial, Escuela de ingeniería de Bilbao, 2019.

20. Gestión de compras. (s. f.). Diseña, desarrolla y fabrica un amplio abanico de piezas mediante forja en caliente. Recuperado 20 de septiembre de 2021, de <https://www.gestiondecompras.com/es/productos/forja/forja-en-caliente>
21. Godoy, M. (2013, 20 septiembre). Deformación volumétrica en el trabajo de metales. Ingeniería Industrial y Educación. Recuperado 16 de marzo de 2022, de <https://profmgodoy.wordpress.com/2013/09/20/deformacion-volumetrica-en-el-trabajo-de-metales/>
22. Groover, M. (2007). Fundamentos de manufactura moderna. México, D. F.: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA.
23. G., I. (s. f.). Transformación y selección de materiales II (1.^a ed., Vol. 1). Editorial Digital Tecnológico De Monterrey.
24. Gutiérrez, F. (2018, enero). Forjado [Diapositivas]. UAEH. https://www.uaeh.edu.mx/docencia/P_Presentaciones/Sahagun/industrial/2018/Forjado.pdf
25. Hernandez. A. (2018, Julio). Análisis de esfuerzos de los martillos de forja en frio de una maquina rotativa (Tesis maestría). Instituto Politécnico Nacional ESIME, Ciudad de Mexico.
26. IANS. (2021, 31 julio). AIFI raises concern over high steel prices with PM. ETAuto. Recuperado 17 de abril de 2022, de <https://auto.economictimes.indiatimes.com/news/auto-components/aifi-raises-concern-over-high-steel-prices-with-pm/84912370>
27. Kalpakjian, S. & Schmid, S. (2008). Manufactura, ingeniería y tecnología. México: PEARSON EDUCACIÓN.
28. KEYENCE México. (s. f.). Forja, conformado de plástico, introducción al maquinado. Recuperado 17 de septiembre de 2021, de <https://www.keyence.com.mx/ss/products/measure-sys/machining/plasticity/forging.jsp>.
29. López, J. C. (2013). Procesos de deformación volumétrica [Diapositivas]. Biblio3. <http://biblio3.url.edu.gt/Libros/2013/ing/pim/13.pdf>
30. Márquez, U. E. (2009, 11 abril). Forja [Diapositivas]. SlideShare. <https://es.slideshare.net/guestb68604/forja>.
31. MBA Surgical Empowerment. (1985). Tipos de prótesis de cadera. MBA. Recuperado 30 de mayo de 2022, de <https://www.mba.eu/blog/tipos-de-protesis-de-cadera/>
32. Mecolpress. (2007). Prensa de tornillo. Direct Industry. Recuperado 11 de febrero de 2022, de <https://www.directindustry.es/prod/mecolpress/product-33418-2347466.html>
33. MES. (s. f.). Forging. MES inc. Recuperado 7 de abril de 2022, de <https://www.mesinc.net/forging>
34. Misael Dalbosco, Gabriel da Silva Lopes, Pedro David Schmitt, Luciano Pinotti, Denis Boing, Improving fatigue life of cold forging dies by finite element analysis: A case study, Journal of Manufacturing Processes, Volume 64, 2021.
35. Orthoinfo. (s. f.). Reemplazo total de cadera. Recuperado 11 de mayo de 2022, de <https://orthoinfo.aaos.org/es/treatment/reemplazo-total-de-cadera-total-hip-replacement/>
36. Panuwat Soranansri, Surawut Yanil, Kumpanat Sirivedin, Finite Element Modeling of Shrink-Fit Design for Improvement of Die-Service Life in Hot Forging Process of a Bevel Gear, Materials Today: Proceedings, Volume 17, Part 4, 2019.
37. Proceso de forja. (2013). Biblio. Recuperado 16 de diciembre de 2021, de <http://biblio3.url.edu.gt/Libros/2013/ing/pmr/05.pdf>
38. Rex Forge. (s. f.). Forging Process. Recuperado 11 de noviembre de 2021, de <http://www.rexforge.com/forging-process.html>.
39. Ríos, A. (s. f.). PRÓTESIS DE RECUBRIMIENTO. Clínica Traumatológica Doctor Antonio Ríos. Recuperado 15 de mayo de 2022, de <https://www.doctorantoniorios.com/portfolio-items/protesis-de-recubrimiento/>

40. Asl, H. G., Sezek, S., & Alsaran, A. (2015). ANALYSIS OF HIP PROSTHESIS PRODUCTION WITH FORGING USING THE FINITE ELEMENT METHOD. *Erzincan University Journal of Science and Technology*. <https://doi.org/10.18185/eufbed.31555>
41. Torres, J. (2015). Tesis Digital. TESIUNAM. Recuperado 13 de noviembre de 2022, de <http://132.248.9.195/ptd2015/octubre/0736239/Index.html>
42. Ortiz, A., Ruiz, O., & Ortiz, J. A. (2013). Forja. En *Modelado de procesos de manufactura* (1.a ed., Vol. 1, pp. 101–110). CDMX, México: Universidad Nacional Autónoma de México.
43. PEMIGSA. (s. f.). Forjado de metales. Recuperado 18 de septiembre de 2021, de <https://pemigsa.com.mx/forjado-metales>
44. Uddelholm. (2017). Herramientas para forja. Recuperado 18 de noviembre de 2022, de <https://www.uddeholm.com/app/uploads/sites/41/2017/09/Acero-Uddeholm-de-herramientas-para-forja.pdf>
45. ULMA ADVANCED FORGED SOLUTIONS. (2021, 23 marzo). El desarrollo de la forja en hierro y acero a lo largo de la historia. Recuperado 20 de septiembre de 2021, de <https://www.ulmaforge.com/noticia/desarrollo-forja-en-la-historia/>
46. UPV. (s. f.). El proceso de forja. EHU. Recuperado 5 de febrero de 2022, de https://www.ehu.eus/manufacturing/docencia/713_ca.pdf
47. Yan, L., Jiang, A., Li, Y., Qiu, T., Jiang, F., Xie, H., Wang, F., Wu, X., & Zhang, Y. (2022). Dynamic constitutive models of Ti-6Al-4V based on isothermal true stress–strain curves. *Journal of materials research and technology*, 19, 4733–4744. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.06.164>
48. Webmaster. (2019, 26 octubre). Formado y Doblado con Rodillos. Censa Industrial. Recuperado 19 de enero de 2022, de <https://censaindustrial.com/formado-y-doblado-con-rodillos/>