

Tema A2b Manufactura: Análisis por elementos finitos

“Diseño y análisis del herramental para un paso de forja”.

J. M. Torres, E.I. Ramírez^a, O. Ruiz*^a, A. Ortiz^a

^aUnidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales. Facultad de Ingeniería, UNAM. Laboratorios de Ingeniería Mecánica “Ing. Alberto Camacho Sánchez”. Circuito interior, Anexo de Ingeniería, Ciudad Universitaria, 04510 México D.F.

* Contacto: oruiz@unam.mx

RESUMEN

Con el propósito de reducir el tiempo y recursos empleados en el diseño y validación experimental de un herramental para forja, se presenta una metodología; empleando como herramientas programas de diseño mecánico y de simulación en elemento finito, para analizar esfuerzos y flujo de material. Se seleccionó como pieza de trabajo una biela, dada la importancia y frecuencia con que dichos elementos mecánicos son encontrados. Partiendo de la biela final, se tomaron las dimensiones y fueron llevadas al programa de diseño mecánico NX 7.5[®], seguido de la identificación y eliminación de zonas inalcanzables mediante el proceso de forja; se dio un sobredimensionamiento considerando contracción térmica y desgaste del material; se eliminaron geometrías estrechas (para aminorar esfuerzos); se dieron ángulos de desmoldeo para evitar posibles atascamientos; se adicionaron radios de transición con la finalidad de facilitar el flujo de material. De la geometría resultante se generó un Booleano y así el dado fue obtenido. Se seleccionó el penúltimo paso del proceso, puesto que aquí se presentan deformaciones importantes y la preforma toma la primera geometría definida de una biela.

De manera empírica se desarrolló la preforma anterior del paso seleccionado, para terminar con la simulación en elemento finito mediante Abaqus 6.14[®], centrándose el análisis en la pieza de trabajo.

Se verifica que el diseño del herramental permite el flujo del material en el interior del mismo, sin embargo, es preciso tener en cuenta que al final del proceso la pieza presenta esfuerzos superiores a 448 MPa, mismos que aumentarán al tomar en cuenta la fricción presente entre el material y las paredes del herramental.

Palabras clave: diseño de herramental, dado de forja, simulación en elemento finito, análisis de flujo plástico.

ABSTRACT

The main aim is to reduce time and resources used in the design and experimental validation of a forging die; a methodology is presented, using as main tools mechanical design and finite element simulation software to analyze material flow and stresses. A connecting rod was selected as the work piece, due to their importance and frequent use in mechanical elements. Starting with the final shape, all dimensions were taken and used in the mechanical design software NX 7.5TM to model it, followed by identification and deleting of impossible areas to form by this process; an oversizing was given considering thermal contraction and material wear; confined areas were eliminated too (to reduce stresses); draft angles were added to avoid material obstruction; fillets were given to generate an easier material flow. From the final geometry a Boolean operation was used and die was obtained. From the process, the last but one step was selected, since here important deformations happen and preform become the first definite geometry of a connecting rod.

Using an empirical method, the previous work piece form was developed to the selected step, ending the process with a simulation on finite element through Abaqus 6.14TM; paying special attention in analyzing the work piece.

It is verified that die design allows material's flow inside it, nevertheless it is important to have on mind that at the end of the process, stresses greater than 448 MPa are registered in the work piece and they may increase at the moment of considering friction between material and die faces.

Keywords: die design, forging die, finite element simulation, plastic flow analysis.

1. Introducción

El proceso de forja en dado cerrado es ampliamente usado en la producción masiva de piezas de alta calidad como bielas, cigüeñales, etc. a costos moderados.

Una biela no puede ser formada en un solo impacto; por ello los dados de forja presentan múltiples impresiones, cada paso se acerca más a la forma final. El material inicial es llevado de una impresión a otra en aplicaciones de carga sucesivas. La Fig. 1 muestra los pasos principales en la forja de una biela, describiéndose brevemente estos pasos a continuación:

- Paso 1: En el proceso de llenado, se busca reducir la sección transversal, alargar y distribuir al material. Se convierte a la barra de sección rectangular en una preforma alargada.
- Paso 2: La operación de bloqueo forma a la biela en su primera etapa definida. Esto involucra el trabajo en caliente del metal y la aplicación sucesiva de golpes, haciendo que la pieza de trabajo entre y llene los dados de impresión. Se producen las rebabas en los bordes de la biela, provenientes del exceso de material que garantiza el llenado.
- Paso 3: La forma exacta de la biela es obtenida mediante la aplicación de varios impactos del martillo o la carga ejercida por la prensa, donde la fuerza obliga al material a llenar cada parte de la impresión final.
- Paso 4: La rebaba formada es desbastada o cortada; mediante diferentes procesos: con un dado de corte en la prensa mecánica y en ciertas ocasiones por sierra o molido.

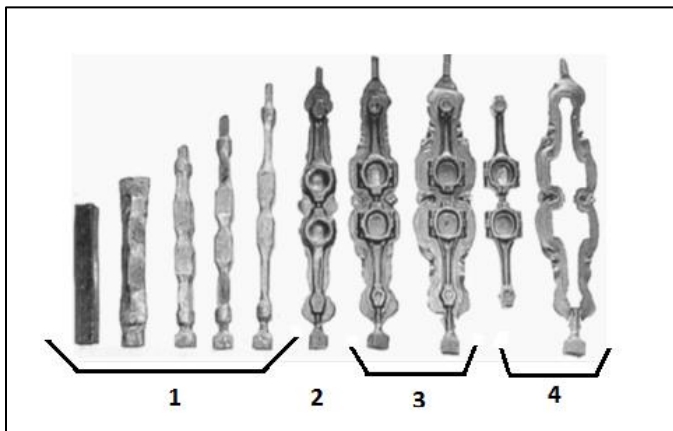


Figura 1 - Secuencia de forja en estampa para una biela [1]

Existen varios estudios en los cuales se ha empleado el análisis en elemento finito para analizar el flujo de material en diferentes diseños propuestos:

En el año 1996 Takemasu lo empleó para determinar la preforma óptima de una biela, realizando algunos modelos experimentales con la finalidad de observar la distribución de material. Para la optimización dividió a la pieza en tres partes: cabeza, cuerpo y pie.

Realizó optimizaciones individuales de cada una de las partes, para finalmente, simular cada una de las propuestas en

elemento finito y con los resultados obtenidos determinó la mejor combinación para una optimización general. [2]

En el año 2004 Tomov, seleccionó varias relaciones de las distintas dimensiones de la zona de rebaba, para posteriormente con ayuda de simulaciones en elemento finito determinar cuáles garantizan un llenado completo del dado. [3]

Las ventajas de implementar este tipo de procesos han sido reportadas por Pepelnjak et al. [14] quienes realizan una comparación entre el perfil experimental y el obtenido mediante elemento finito para un proceso de recalado. Behrens et al. [15] concluyen que el uso de simulaciones mediante elemento finito permite reducir el tiempo de experimentación, ya que un modelo bien calibrado ayuda a estudiar el flujo de material y el comportamiento mecánico de los herramientas [18].

Ngaile et al. [17] describe de manera detallada algunos casos de aplicación para las simulaciones 3D como lo son la forja orbital o rotatoria y el microformado, por mencionar algunas.

En este trabajo, la etapa de conformado que se ha modelado es la número 2 de la Fig. 1, ya que aquí se forma la primera preforma de la biela, el lingote inicial toma una forma burda de la pieza final. Se eligió porque involucra deformaciones grandes y se considera un paso crítico en el proceso completo de manufactura. La metodología seguida para el diseño del dado se basa en lo planteado por J. Kulon en el año 2000. [4]

2. Metodología de diseño y modelado

2.1 Generación de la preforma y dado.

Se partió de la pieza final deseada. En la Fig. 2 se aprecia la geometría obtenida después de realizar el último paso de forja, corte de rebaba y operaciones de maquinado. Dicha pieza fue elaborada mediante un programa CAD.

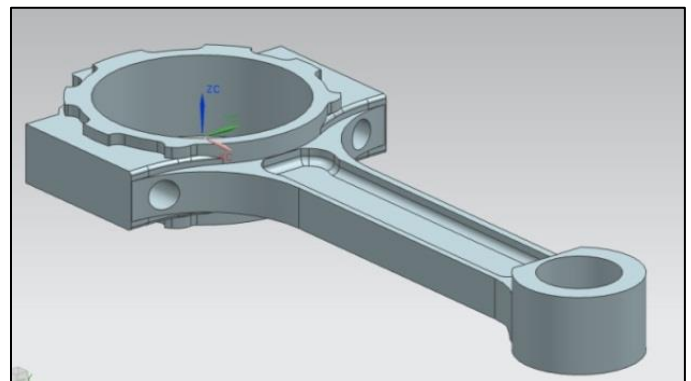


Figura 2 - Biela final deseada.

En el proceso de forja, el dado aplica cargas normales a la pieza; por lo que existen elementos dentro de la biela que sólo pueden ser obtenidos mediante operaciones de maquinado posteriores al último proceso de forjado. En la Fig. 3 se muestran dichas zonas. Estos elementos son eliminados.

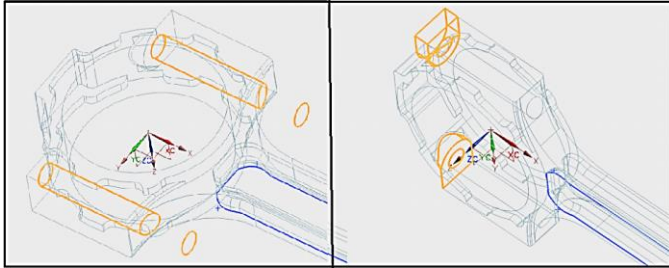


Figura 3 - Geometrías no formadas por carga transversal

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

El factor de tolerancia largo/ ancho es ± 0.003 mm por cada mm y aplica a todas las dimensiones largo/ancho e incluye diámetros. Esta tolerancia incluye contracción, hundimiento del herramental y variaciones de pulido. [5]

Las tolerancias para el desgaste del material son aplicadas junto con las de largo/ancho. Para las dimensiones del largo, ancho y diámetros menores de 750 mm, se calculan multiplicando la longitud o diámetro de la pieza por el factor de 0.005, considerando como material acero al carbono de baja aleación. [5]

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

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

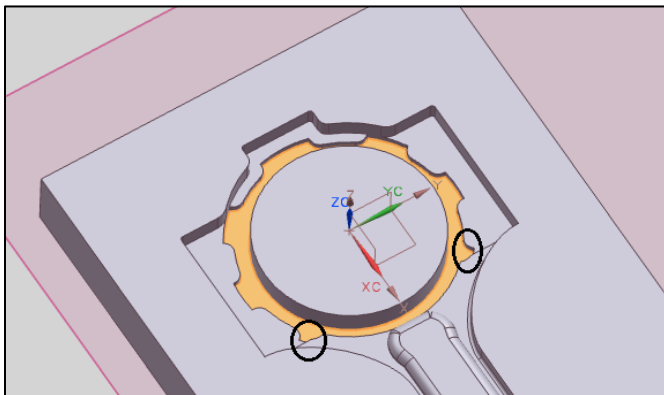


Figura 4 - Geometrías difíciles de obtener mediante la forja de la pieza

En piezas de sección rectangular o cuadrada los ángulos de salida son agregados a las paredes verticales del herramental para permitir una eyección más sencilla de la pieza del dado de impresión. El ángulo, por lo general, varía de 3 a 7° para paredes externas, mientras que paredes rodeadas por barrenos presentan ángulos de 5 a 10°. [5]

Un ángulo mayor se emplea en paredes que rodean huecos para prevenir que la pieza se atranque como resultado normal de la contracción térmica mientras el material se enfría.

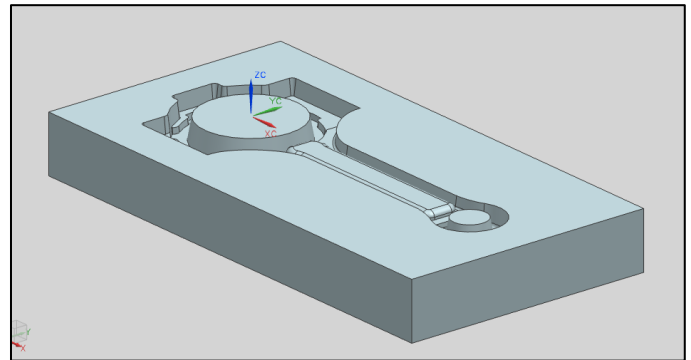
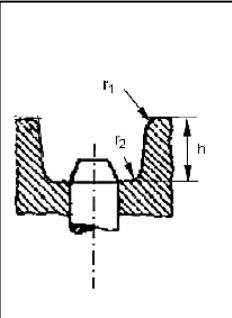


Figura 5 - Dado con ángulos de salida

Para la obtención de los radios de transición se tomó como base la tabla propuesta por Vázquez en el año 2000, en donde la medida depende de la altura de las protuberancias. [6]

Tabla 1 – Cálculo de radio de transición. [6]

h mm	r ₁ mm	r ₂ mm
Piezas forjadas de acero		
<25	2	4
25-40	3	6
40-63	4	10
63-100	6	16
100-160	8	25
160-250	10	40
250-400	16	63



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

Para forjas axisimétricas Neuberger y Mockel en 1980 [7], propusieron las siguientes relaciones entre el peso y la geometría de la rebaba:

$$\frac{W_f}{T_f} = 3 + 12e^{(-1.09W)} \quad (1)$$

$$T_f = 113 + 0.89W^{0.5} - 0.017W \quad (2)$$

Donde W es el peso de la pieza en Kilogramos, W_f es el ancho de la rebaba en milímetros y T_f es el grosor de la rebaba

en milímetros. Las dimensiones del canal de rebaba deben alojar todo el exceso de material que fluye más allá de la zona de alojamiento, previniendo el cierre de los dados.

$$T_g = 1.6T_f \quad (3)$$

$$W_g = 0.4W_f \quad (4)$$

$$r = T_f \quad (5)$$

$$R = T_g \quad (6)$$

Donde T_g es el grosor del canal, W_g el ancho correspondiente, r y R los radios de las esquinas.

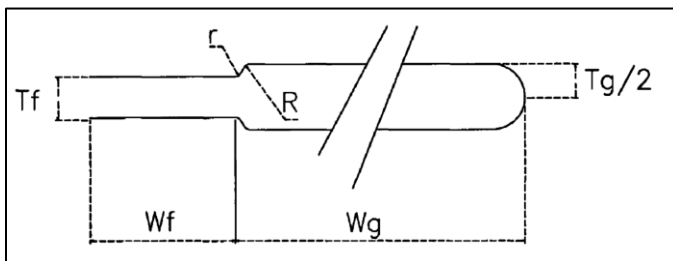


Figura 6 - Principales dimensiones de la zona de alojamiento y canal de rebaba [7]

Una vez realizado el herramental final, se elaboró la preforma anterior a la de terminado; es decir, la preforma obtenida del proceso de forja, en el cual la pieza presenta cambios significativos y pasa de tener una geometría no bien definida a una similar a la final deseada. Dicha preforma se muestra en la Fig. 7.

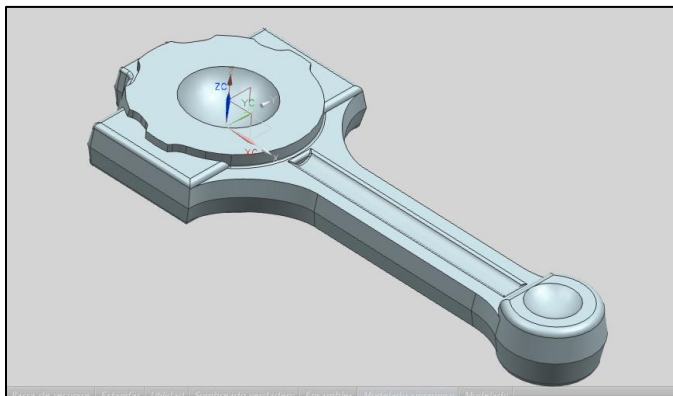


Figura 7 - Preforma anterior a la pieza final

Conociendo el volumen de la pieza y considerando el exceso de material de 8% se diseñó de manera empírica la preforma anterior a la de la Fig. 7, siguiendo la distribución propuesta por Vázquez en el 2000. [6]

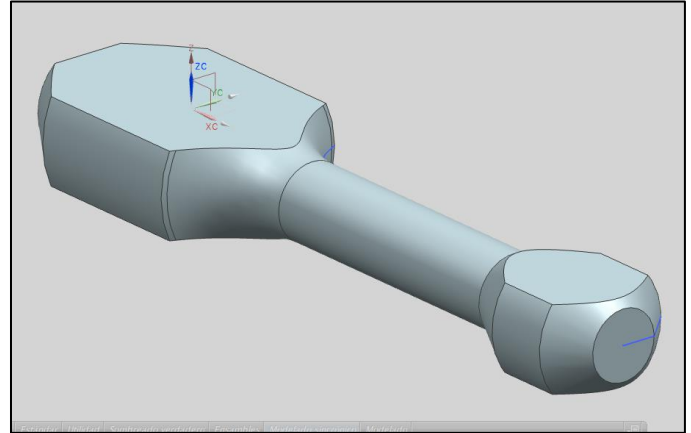


Figura 8 - Preforma anterior a la Fig. 7.

La Fig. 8 es la pieza inicial del modelo.

2.2 Modelado en FEM de un paso de forja

Para el desarrollo del modelado se realizaron las siguientes consideraciones, en el programa Abaqus 6.14™.

Dentro del modelo, se centra la atención sobre la pieza que se quiere obtener, teniendo en cuenta que esta es la que cambia de geometría y los cambios ocurren en varios planos, por lo que se le da la característica de ser 3D deformable.

Es importante conocer qué pasa con el dado, por facilidad y disminución de tiempo de cómputo se consideró una pieza 3D rígida. Las consideraciones mecánicas del material se muestran en la tabla 2.

Tabla 2 - Propiedades mecánicas del material [8]

Propiedad	Valor
Módulo de Young [GPa]	150
Relación de Poisson	0.3
Esfuerzo de cedencia [MPa]	169
Esfuerzo último [MPa]	448

Se consideró un sólo paso de tipo dinámico explícito, con un tiempo de duración de 0.76 segundos. Se asignó un tipo de contacto general (CG) estableciendo como superficie maestra al herramental y esclava a la preforma; considerando las condiciones ideales sin fricción entre los componentes.

Se crearon cinco condiciones de frontera, como se enlista a continuación: la primera asociada al desplazamiento deseado en el herramental, definiendo que el mismo se realice en el eje z. La segunda condición asociada también al herramental fue creada con la finalidad de evitar desplazamientos o rotaciones en direcciones distintas a la deseada. La condición de frontera número tres, cuatro y cinco; fueron creadas con la finalidad de contener al material y evitar que éste último tenga un comportamiento errático al fluir en el dado.

Finalmente, el dado fue mallado con 3900 elementos tipo R3D3, de geometría triangular lineal dado que es discretamente rígido; mientras que el euleriano se realizó con 1796760 elementos hexaédricos lineales de tipo EC3D8R.

Para evitar problemas con la distorsión que pudiera presentarse en la malla por la deformación, se seleccionó la descripción euleriana en lugar de una lagrangiana. En la descripción euleriana no existe una deformación en la malla, pues el material es el que se desplaza y llena cada uno de los elementos. Con esto también se evita el uso de remallados y se disminuye el tiempo de simulación.

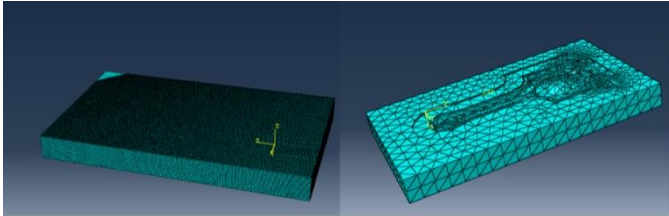


Figura 9 - Mallado de la pieza de trabajo y herramental.

3. Análisis de resultados

a) Análisis de esfuerzo equivalente de Von Mises.

Se obtuvieron diferentes imágenes que muestran cómo va cambiando la geometría de la pieza conforme el herramental va avanzando de posición.

En la Fig. 10(a), se comienza a visualizar en la zona que será la cabeza de la biela, un área de color verde con un punto en el centro de color naranja, esto indica que el esfuerzo en esta zona es de 227 MPa y 325 MPa respectivamente. Al ser esta parte del herramental la que presenta la mayor protuberancia, se explica el inicio de contacto, consecuentemente los esfuerzos mayores.

La Fig. 10(b) permite visualizar la pieza en un tiempo $t=0.39$ s, es decir, a mitad del proceso. Se observan esfuerzos de 149 MPa en la mayoría de la pieza. Los esfuerzos de 448 MPa se presentan donde existe un cambio de sección y la geometría formada es relativamente pequeña

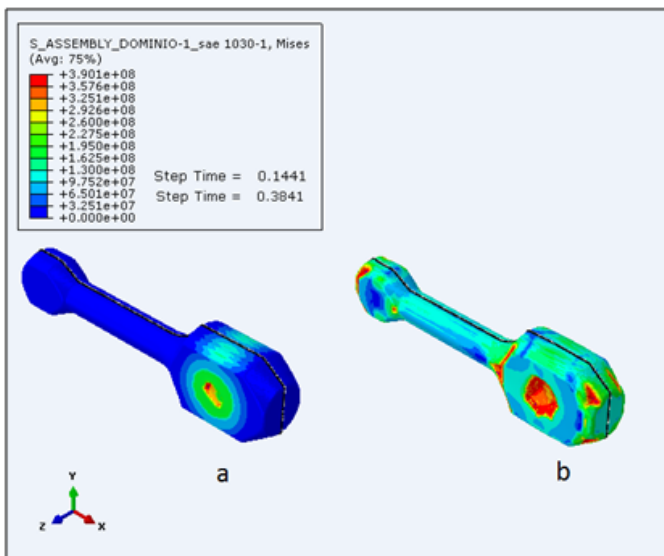


Figura 10 - Esfuerzo equivalente del modelo obtenido a) $t=0.1441$ s & b) $t=0.3841$ s

En la Fig. 11(a) se observa que la pieza se encuentra casi completamente formada a excepción de las esquinas de la cabeza de la biela. Se aprecia que las zonas con esfuerzos de 448 MPa, han aumentado de tamaño de tal forma que en casi la mitad de la pieza presenta esta magnitud. Las caras paralelas a la carga siguen siendo las zonas que presentan los menores esfuerzos. En este punto se aprecia una pequeña salida de rebaba alrededor del pie de biela. En la zona de rebaba se observan esfuerzos de 448 MPa, es importante recordar que el área de salida de material va disminuyendo conforme el herramental continúa avanzando, por lo tanto estas zonas generalmente presentarán esfuerzos mayores en comparación con las demás zonas de la pieza.

Para el final del modelo la Fig. 11(b), muestra que al fin se han formado las esquinas de la cabeza de la biela. En casi toda la pieza se visualizan esfuerzos de 448 MPa; aparecen muy pocos esfuerzos de 150 MPa. Se aprecia que toda la pieza se encuentra rodeada por rebaba.

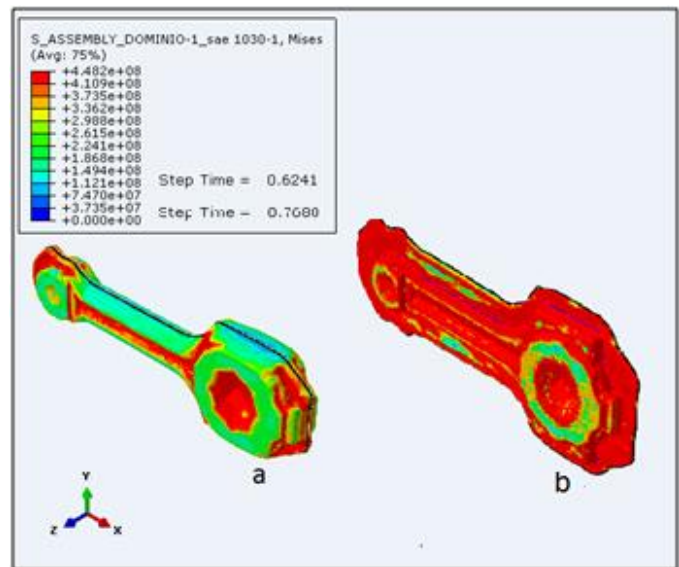


Figura 11 - Esfuerzo equivalente del modelo obtenido a) $t=0.6241$ s & b) $t=0.7680$ s

b) Análisis de Flujo de Material.

Para el tiempo $t=0.1441$ s mostrado en la Fig. 12(a), se observa que existe desplazamiento de material principalmente desde el centro de la cabeza de biela hacia el exterior. El desplazamiento mayor reportado en esta zona es de 0.1 mm. Los desplazamientos más pequeños se presentan en el pie de biela y son de 0.01mm en dirección del eje X negativo.

Se observa que el flujo del material se da principalmente hacia las zonas en las que no existan partes del herramental que se opongan al flujo del material.

En la Fig. 12(b) se observa que el desplazamiento de la cabeza de biela ha comenzado a dirigirse mayormente en dirección del eje X.

En el pie de biela, la mayoría de los desplazamientos presentes son de 0.05 mm. Existen también algunos de 0.07 mm y casi ninguno de 0.1 mm.

En la Fig. 12(b) se aprecia, que el desplazamiento en el pie de biela ha disminuido e incluso ha cambiado de sentido hacia

el eje X positivo. Se observa que parte del material mencionado provoca desplazamientos sobre el cuerpo, en dirección de la cabeza de biela.

En la cabeza de la biela el desplazamiento ha cambiado un poco, ya que en la base de la cabeza ha disminuido, pero se ha intensificado en las partes centrales, continuando desde el centro hacia el exterior. En la parte superior de la cabeza se mantienen los desplazamientos.

Es importante mencionar que en la cabeza de biela se siguen presentando los desplazamientos de mayor magnitud (0.1 mm), en la mayoría de esta zona.

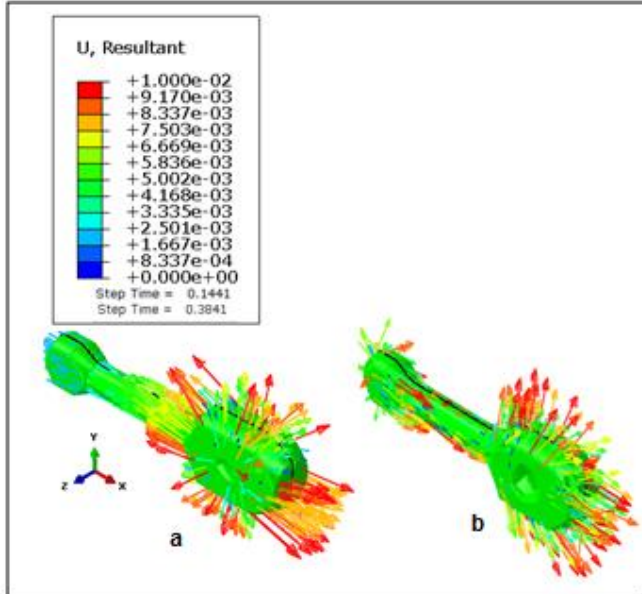


Figura 12 - Flujo de material obtenido del modelo a) $t=0.1441$ s & b) $t=0.3841$ s

En la Fig. 13(a); en el cuerpo de la biela, se comienza a visualizar la aparición de la costilla y con ello, los desplazamientos hacia afuera del cuerpo. Aumenta el desplazamiento en la zona del pie de biela, así como en el cuerpo, donde ahora, se visualiza un desplazamiento más simétrico. En la cabeza de biela se observa una notoria disminución de flujo de material, sin embargo los pocos vectores presentes en la parte media de la misma han aumentado de magnitud, anteriormente presentaban un valor de 0.06 mm y ahora son de 0.1 mm.

Finalmente, la Fig. 13(b) muestra el último paso del modelo. Es importante poner atención en que en las únicas zonas en que aún existe desplazamiento sobre el eje Z, son aquellas que aún no han sido llenadas por completo de material. Esto último se demuestra al observar que los vectores se encuentran dentro de la biela; la mayoría de estos son de magnitud de 0.1 mm. Casi todos los vectores que se encuentran fuera de la biela, existen desplazamientos sobre el eje Z, debido al cambio de sección presente en la zona de la rebaba.

Se observa que los desplazamientos han disminuido en cantidad y magnitud; la mayoría son menores a 0.066 mm. La mayoría de desplazamientos ocurren en la zona de rebaba, puesto que es la parte que no presenta restricción completa por el herramental.

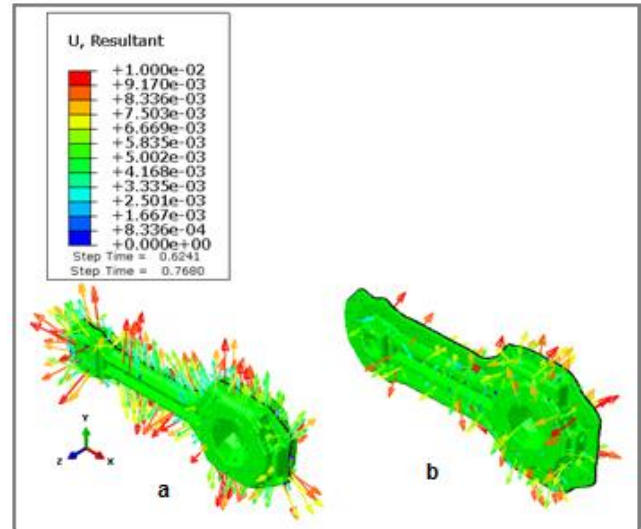


Figura 13 - Flujo de material obtenido del modelo a) $t=0.6241$ s & b) $t=0.768$ s

Conclusiones

La metodología de diseño propuesta para el herramental permite desarrollarlo de manera rápida y con ayuda del modelo en elemento finito se visualizan las probables fallas de diseño. Se verifica que el diseño del herramental permite el flujo del material en su interior, sin embargo, es preciso tener en cuenta que al final del proceso la pieza presenta esfuerzos superiores a 448 MPa, mismos que aumentarán al tomar en cuenta la fricción presente entre el material y las paredes del herramental. Será indispensable, como trabajo futuro, verificar variables tales como la velocidad del herramental y propiedades del material seleccionado.

Al momento de diseñar un dado de forja y éste sea el que provoque la mayor deformación, se debe evitar la presencia de geometrías relativamente pequeñas y permitir que sean obtenidas en los dados de acabado, ya que promueven la formación de zonas de grandes esfuerzos.

Las caras perpendiculares al movimiento de los herramientas, son las zonas que presentan los esfuerzos de menor magnitud, estos disminuyen al aumentar el área ocupada por las mismas.

Los cambios de sección son zonas que desde el inicio presentan esfuerzos de gran magnitud, por lo que es recomendable que dichos cambios sean aminorados empleando radios y filetes de magnitud lo más grande posible.

Para la obtención de una pieza por medio de forja, se debe desarrollar de manera simultánea el diseño de la preforma, ya que, a pesar de poder conocer el volumen final de la pieza a obtener, resulta impreciso dar una correcta distribución del material.

El diseño de la zona de rebaba cumplió con su objetivo, ya que permitió un llenado completo de las cavidades del dado, no permitiendo que el material se desplazara fuera del mismo.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional Autónoma de México, a la Facultad de Ingeniería y a la UDIATEM en especial a los ingenieros Efraín Ramos, Ignacio Cueva, Lázaro Morales, Roberto Cisneros, Jorge Romero y al biólogo Germán Álvarez.

REFERENCIAS

- [1] T. Altan, G. Ngaile, G. Shen, Cold and hot forging: Fundamentals and applications, first ed., ASM International, USA, 2005.
- [2] Takemasu, T., Vázquez, V., Painter, B., Altan, T., Investigation of metal flow and preform optimization in flashless forging of a connecting rod, Journal of Materials Processing Technology, Japón, 1996
- [3] Tomov, B., Radev, R., Gagov, V., Influence of flash design upon process parameters of hot die forging, Journal of Materials Processing Technology, Bulgaria, 2004.
- [4] Kulon, J., Mynors, D., Broomhead, P., Acknowledge-based engineering design tool for metal forging, Journal of Processing Technology, Reino Unido, 2006
- [5] Forging Industry Association, 2015 <https://www.forging.org/>
- [6] V. Vazquez, T. Altan, Die design for flashless forging of complex parts, J. Mater. Process. Technol. 98 (2000) 81-89.
- [7] Sleenckx, E., Review of flash design rules for closed-die forgings, Journal of Materials Processing Technology, Bélgica, 1992.
- [8] Lee, J., Jung, U., Park, G., Shape optimization of the workpiece in the forging process using equivalent static loads, Journal of Finite Elements in Analysis and Design, República de Corea, 2013
- [9] ASM Handbook, Forming and Forging, International Handbook Committee, Estados Unidos, 1996.
- [10] Grass, H., Kremaszky C., Werner, E., 3-D FEM-simulation of hot forging processes for the production of a connecting rod, Journal of Computational Materials Science, Alemania 2006
- [11] Visser, D., A comparison of Manufacturing Technologies in the connecting Rod Industry, Colorado School of Mines, Estados Unidos, 2008
- [12] Kim, H., Yagi, T., Yamanaka, M., FE simulation as a must tool in cold/warm forging process and tool design, Journal of Materials Processing and Technology, Japón, 2000.
- [13] Sala, G., Technology-driven design of MMC squeeze cast connecting-rods, Journal of Science and Technology of Advanced Materials, Italy, 2002
- [14] Pepelnjak, T.; Šašek, P.; Kudlaček, J. Upsetting Analysis of High-Strength Tubular Specimens with the Taguchi Method. Metals 2016, 6, 257.
- [15] B.-A. Behrens, A. Bouguecha, M. Vucetic, M. Bonhage, I.Y. Malik, Numerical Investigation for the Design of a Hot Forging Die with Integrated Cooling Channels, Procedia Technology, Volume 26, 2016, Pages 51-58, ISSN 2212-0173, <http://dx.doi.org/10.1016/j.protcy.2016.08.008>.
- [16] D. Salcedo, C.J. Luis, R. Luri, J. León, I. Puertas, J.P. Fuertes, Design and Optimization of the Dies for the Isothermal Forging of a Cam, Procedia Engineering, Volume 132, 2015, Pages 1069-1076, ISSN 1877-7058, <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2015.12.597>.
- [17] Ngaile, G., and Altan, T. "Computer Aided Engineering in Forging" Proceedings of 3rd JSTP International Seminar on Precision Forging, Nagoya, Japan, March 14-18, 2004
- [18] Altan, T., Shirgaokar, M., Yadav, A., "Simulation and Optimization of Metal Forming Processes- New Applications and Challenges" Proceedings of UHK, Feb. 2008, Hannover, Germany
- [19] Altan, T., et al, "Simulation-based Process Design for Improvement of Profitability in Hot Forging" Proceedings of the Int. Forging Conference, Chicago, Sept. 28-30, 2008