

Diseño y Análisis de un prototipo para el embutido de láminas metálicas utilizando el MEF

P. A. Limon Leyva¹, P. J. García Zugasti¹, E. F. Piña García¹, G. C. Rendon Sustaita¹, I. J. Sánchez Arce¹, J. A. Domínguez López¹.

¹División de Estudios de Posgrado e Investigación, Instituto Tecnológico de San Luis Potosí, Av. Tecnológico S/N, Col. UPA., C.P. 78437, Soledad de Graciano Sánchez, S.L.P., México.

Área de participación: Ingeniería Industrial

Resumen

El presente trabajo de investigación muestra la metodología de diseño y análisis por el Método del Elemento Finito (MEF) de un prototipo de dispositivo para embutir láminas metálicas. La metodología utilizada para el desarrollo de dicho prototipo es la presentada por G. Pahl en su obra: "*Engineering Desing: A Systematic Approach*". Los requerimientos de diseño considerados para el prototipo incluyen la necesidad de lograr y mantener la calidad en los productos embutidos, contemplando cada una de las etapas involucradas. Siguiendo la metodología considerada, se propusieron seis diseños preliminares, los cuales fueron evaluados en función de los requerimientos de diseño establecidos, así como en los criterios de desempeño y factibilidad de fabricación. Como resultado se presenta el diseño conceptual y el análisis numérico del prototipo seleccionado.

Palabras clave: Diseño, Procesos de Manufactura, Embutido cilíndrico, Elemento Finito.

Abstract

The present research work shows the methodology of design and analysis by the Finite Element Method (MEF) of a prototype for drawing metal sheets. The methodology used for the development of this prototype is the one presented by G. Pahl in his work: "Engineering Desing: A Systematic Aproach". The design requirements considered for the prototype include the need to achieve and maintain quality in the drawing products, contemplating each of the stages involved. Following the methodology considered, six preliminary designs were proposed, which were evaluated according to the established design requirements, as well as in the criteria of performance and manufacturing feasibility. As a result, the conceptual design and the numerical analysis of the selected prototype are presented.

Key words: Design, Manufacturing Process, Cylindrical Drawing, Finite Element.

Introducción

A nivel mundial, México es considerado un país muy importante en la manufactura y ensamble de vehículos, en consecuencia a que en tiempos recientes la industria automotriz obtuvo un crecimiento en tres ámbitos de gran relevancia: mercado interno, exportaciones y producción [1]. Sin embargo, la industria automotriz es una de las más dinámicas y competitivas, por lo que el reto actual para la industria automotriz es mantenerse en los altos niveles internacionales de competitividad, y para lograrlo debe apoyarse en tres aspectos fundamentales: asegurar la calidad de las partes suministradas, productividad y mejora continua, aunada a un eficiente sistema de control y prevención de riesgos que tenga como meta la reducción de la variación y los desperdicios en toda la cadena de suministro [2].

México también tiene una destaca participación en la manufactura de autopartes y actualmente la industria automotriz mexicana vuelve a ser centro de atención en la escena global, debido a que vive un proceso de transición de un perfil orientado principalmente a la manufactura, a uno en el que la innovación y el diseño juegan un papel preponderante [1]. Proyectos de investigación vinculados entre la industria y las instituciones educativas, pretenden dar solución a las necesidades de la industria, que se proyecten en el desarrollo tecnológico y económico del país.

Uno de los procesos utilizados en la industria automotriz es el embutido, método de procesamiento de materia prima el cual consiste en aplicar presión sobre una lámina metálica o no metálica, a temperatura ambiente o mediante la aplicación de calor en el material en bruto, utilizando herramientas de marcado (*stamping tools*) para producir deformaciones plásticas o desprendimiento del material y así obtener partes con formas específicas, tamaños y rendimientos (Fig. 1) [2, 3, 4]. Según la temperatura a la que se encuentre el material a la hora de aplicarle el proceso de estampado se puede considerar dentro de una de las tres categorías estandarizadas; trabajo en frío (*Cool Stamping*), trabajo en tibio (*Warm stamping*) y trabajo en caliente (*Hot stamping*).

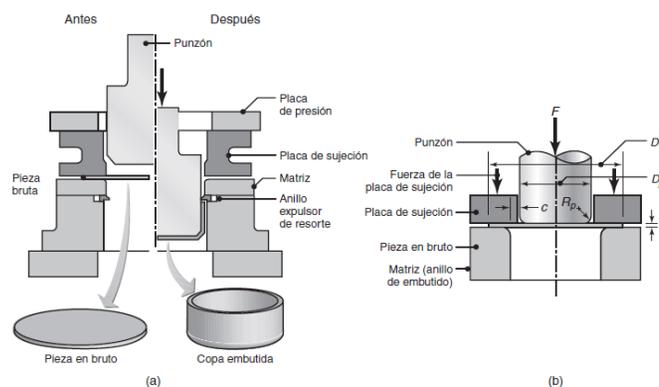


Figura 1. a) Esquema del proceso de embutido. b) Variables del proceso de embutido [6].

La industria automotriz utiliza más estampados de metal por embutido que tal vez cualquier otra industria de producción actualmente. Considerando que para satisfacer las necesidades actuales de la industria automotriz como la disminución de tiempos de análisis, pruebas y desarrollo de nuevos productos, se requiere que los procesos de manufactura como el embutido se mantengan en continuo desarrollo para adaptarse a los nuevos materiales y demandas actuales, y por su parte realizar investigaciones experimentales representa un alto costo de inversión para la industria, recientemente se ha abierto paso al desarrollo y aplicación de nuevas alternativas como los estudios numéricos, incluyendo el Método de Elemento Finito (MEF), los cuales han sido propuestos para el análisis de diversos procesos de manufactura [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14].

Recientemente se han realizado estudios teóricos, numéricos y experimentales analizando la recuperación elástica de materiales (*springback*), las propiedades mecánicas de las láminas de acero, etc.[15] [16] [17] [18] [19] [20] [21]. Sin embargo, aún se requiere de prototipos funcionales que realicen la inspección de los parámetros que intervienen en el proceso de embutido, por ejemplo, la fuerza de sujeción de la lámina metálica, la fuerza máxima de embutido, la velocidad y profundidad del embutido al aplicar las distintas temperaturas en el proceso.

En el presente trabajo, se presenta el diseño y análisis por el Método de Elemento Finito de un prototipo de máquina para embutir, la cual se utilizará como banco de pruebas para la caracterización del proceso de embutido de láminas acero ASTM A36, 1018 y 1020, metales utilizados en la industria automotriz para la elaboración de piezas de cierre de carrocerías.

Metodología

La metodología utilizada en el presente trabajo tiene fundamento en la premisa afirmada por G. Pahl [22]. La cual se anota a continuación:

El diseño conceptual es un proceso en el que, mediante la recolección de la información y definición del problema, la creación del concepto y la evaluación permite generar un criterio objetivo para establecer el principio de solución con la finalidad de satisfacer una necesidad o resolver un problema. El proceso de diseño comienza con la recolección de la información para identificar y entender la necesidad y establecer la especificación del diseño. Mediante la abstracción, se analiza la información individualmente para contemplar los aspectos relevantes y así establecer las funciones estructurales del dispositivo (funciones principales). A través de las funciones

estructurales, se establece los principios de trabajo de cada subfunción, en el cual, el cumplimiento de cada función propicia a la ejecución de la función principal. Las combinaciones de los principios de trabajo pueden generar múltiples variantes las cuales pueden solucionar el problema o cumplir la necesidad. Al obtener una cantidad de variantes generadas por la combinación de los principios de trabajo, estas se someten a una evaluación para seleccionar el mejor diseño (principio de solución).

Propuesta de Diseño

Se requiere un prototipo de un dispositivo el cual transmita la fuerza del actuador de la prensa hidráulica JET HP-A35 para embutir láminas de acero AISI 1018, 1020 y ASTM A36, con una geometría cilíndrica. El dispositivo debe tener la capacidad de expulsar la pieza del herramental.

Para realizar el proceso de embutido se requiere de los siguientes pasos:

1. **Corte:** La lámina de trabajo (*Blank*) se somete a un proceso de corte para determinar su geometría.
2. **Colocación:** La lámina de trabajo es colocada mediante un dispositivo para garantizar la posición y alineación.
3. **Sujeción:** Mediante la aplicación de la fuerza generada por el actuador hidráulico, el dispositivo debe de sujetar la lámina de trabajo antes de comenzar el proceso de embutido.
4. **Embutido:** Mediante la aplicación de la fuerza generada por el actuador hidráulico, el dispositivo debe de generar un tazón de geometría cilíndrica.
5. **Expulsión:** Al liberar la carga generada por el actuador hidráulico, el dispositivo debe de expulsar la pieza del herramental de embutido.

Del proceso mencionado anteriormente cabe resaltar que, para el presente trabajo, solo se consideran los puntos 2, 3, 4 y 5, los cuales se llevarán a cabo en el prototipo.

Metodología Implementada

Actualmente en la industria, lograr y mantener la calidad del producto sigue siendo un proceso empírico de prueba y error; por lo tanto, uno de los retos actuales para el proceso de embutido sigue siendo mejorar la calidad del producto. Para el presente trabajo, se plantea el uso de herramientas de diseño mecánico, metodologías de diseño, herramientas de diseño asistido por computadora, (CAD) y software de simulación por el Método del Elemento Finito (MEF) con el objetivo de contribuir a dar solución al problema mediante el diseño y análisis de un prototipo de troquel de embutido, utilizando el MEF. Dicho prototipo permitirá caracterizar el proceso de embutido en función de cada material (acero AISI A36, 1018 y 1020) y requerimientos específicos del modelo o normativas vigentes.

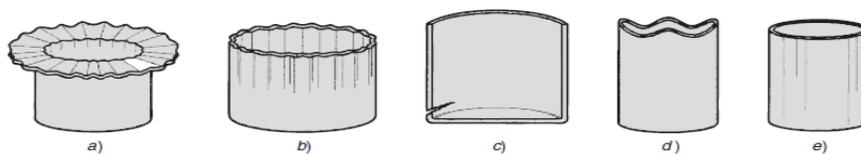


Figura 2. Defectos comunes en las piezas embutidas por: a) arrugamiento en la pestaña o b) en la pared, c) desgarramiento, d) orejeado y e) rayados superficiales [4].

En función de cumplir los parámetros de calidad del proceso de embutido, los requerimientos para el diseño del prototipo se enlistan a continuación:

- Producción: n piezas producidas por día.
- Forma: geometría de la matriz y punzón, zona de trabajo y configuraciones de troqueles permisibles.
- Ensamble: control de paralelismo entre las zapatas, control de concentricidad de la matriz y punzón, restricciones de ensamble de los postes y bujes guías, configuraciones permisibles de postes y bujes guías.
- Manufactura: restricción de maquinados de cajas y ranuras en las placas, selección de componentes estandarizados, implementación de menor cantidad de piezas, costo menor.

- Operación: operación manual, evitar lo mayormente posible esfuerzos de flexión en los postes al ejecutar la operación de embutido, sujetar y alinear la pieza, expulsar la pieza al liberar la carga, flexibilidad de cambio de profundidad de embutido.
- Mantenimiento: Información técnica de cada uno de los componentes, refacciones estandarizadas, fácil montaje y desmontaje de los elementos, lubricación.
- Materia de trabajo: Lámina calibre #22, dimensiones 120mm x 120mm, geometría de la lámina virgen, ángulo de rolado de 0°, 45° y 90°.

Considerando las especificaciones de diseño y la experiencia del equipo de trabajo, se realizó una lluvia de ideas para plantear posibles soluciones al problema abordado. En el entendido de características comunes, se propone realizar una lista simplificada para generar los módulos para conformar el prototipo del troquel de embutido. Los cuales se mencionan en la Tabla 1.

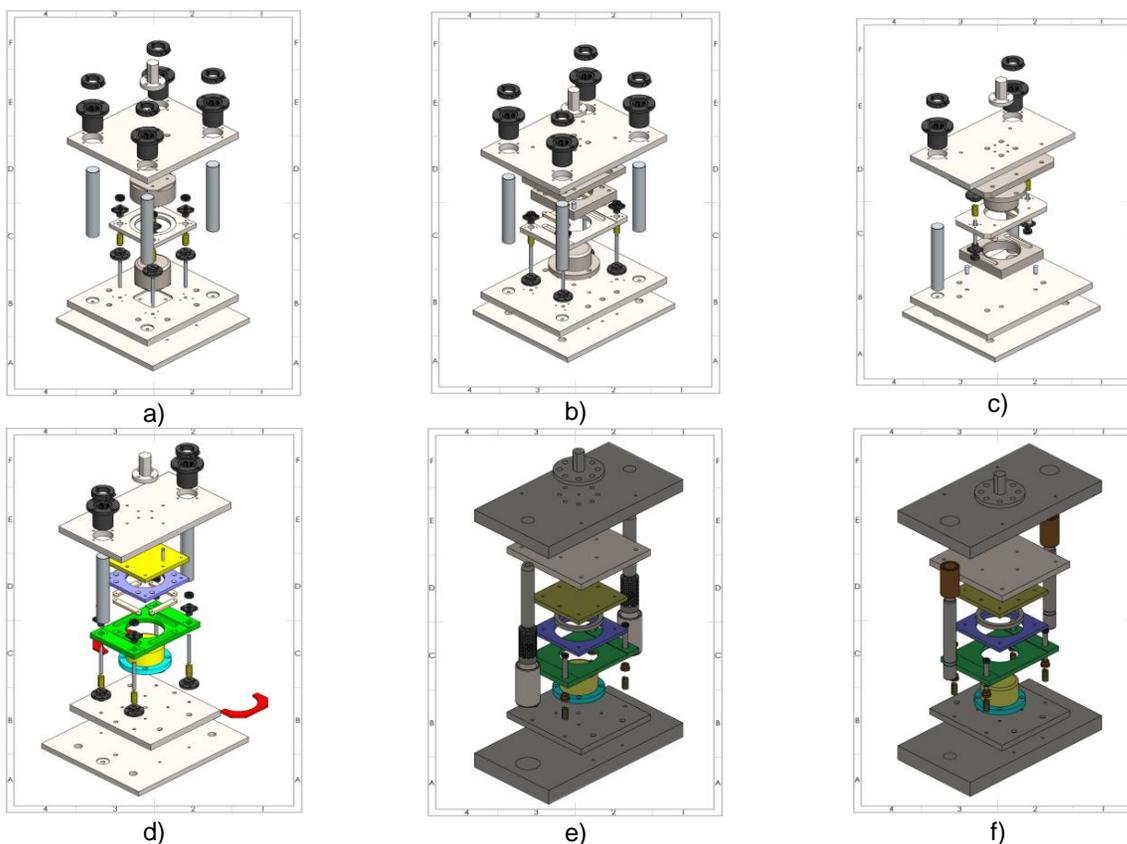


Figura 3. Prototipos, a) Variante PA, b) Variante PB, c) Variante PC, d) Variante PD, e) Variante PE, f) Variante PF.

Tabla 1. Módulos que conforman el prototipo.

Estructural	Sujeción	Movimiento	Mecanismo	Guías
Elementos geométricos que accionan y reaccionan a las cargas, con la finalidad de resistir y transmitir las fuerzas a sus apoyos de tal manera que se garantice su seguridad y funcionalidad.	Elementos que ubican la herramienta en la pieza de trabajo, en este caso prototipo de embutido y prensa.	Elementos que participan en la transmisión de movimiento durante la ejecución del proceso de embutido.	Elementos que recibirán la energía de entrada y a través de un sistema de transformación de movimientos, realizan el embutido.	Mecanismos que permiten el movimiento de una pieza móvil sobre otra fija en el prototipo.

Contemplando cada uno de los módulos, se realizó una matriz de evaluación, tomando como base los siguientes criterios de diseño mostrados en la Tabla 2.

Tabla 2. Criterios de diseño.

Forma	Manufactura	Ensamble	Mantenimiento	Operación	Material de trabajo
C1	C2	C3	C4	C5	C6

Considerando los requerimientos de diseño mencionados anteriormente se presentan seis posibles soluciones que pueden ser observadas en la Figura 3. Las variantes de prototipo mostrados satisfacen los requerimientos de diseño para el prototipo del troquel de embutido. Debido a que cumplen con todos los requerimientos de diseño, así como las especificaciones del embutido y la adaptabilidad de embutir láminas de acero, etc. Adicionalmente, se presentan las múltiples configuraciones generadas por los módulos para comparar los entre cada uno de estos.

Ponderación del criterio

Para definir la ponderación de cada criterio de diseño, se realizó un árbol jerárquico, este orden está establecido por los niveles de los criterios. Después, se asignó un peso ponderado a cada uno de los criterios de diseño. En la figura 4 se pueden observar un ejemplo de la jerarquización de cada uno de los criterios. Cada criterio está especificado por su código (ver Tabla 3) y contiene dos valores numéricos. El valor establecido en el lado izquierdo del criterio corresponde a la aportación designada para el cumplimiento del criterio del nivel superior, el valor establecido del lado derecho corresponde a la contribución relativa del total (peso ponderado W_i). La sumatoria de los pesos ponderados de cada criterio, el cual es localizado al final de cada rama, debe de ser igual a 1. Los criterios localizados al final de cada rama son implementados en la matriz de evaluación en donde cada una de las variantes de diseño serán cotejadas.

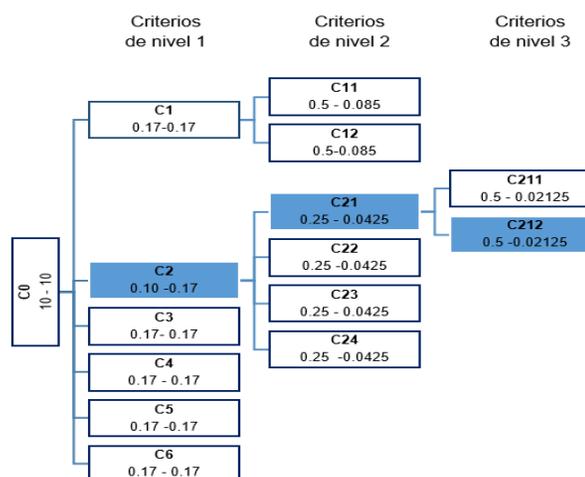


Figura 4. Ejemplo de Árbol criterios con factor de ponderación (W_i).

Tabla 3. Criterios con valores escalares y pesos ponderados.

Código	Criterio	Peso (W_i)	Escalar (V_s)
C11	Dim. Máx. permisible: 50cm x 26.5cm x 30cm.	0.085	Escala del 1 - 5
C12	Lista de cotejo de componentes básicos.	0.085	
C211	Disponibilidad de materia prima en el mercado (manufactura de componentes).	0.02125	
C212	Complejidad en manufactura de componentes.	0.02125	
C22	Partes disponibles en mercado.	0.0425	
C23	Cantidad de componentes básicos.	0.0425	
C24	Costo de manufactura (relativo).	0.0425	
C311	Ajustes (Ensamble de Postes y bujes).	0.02805	
C312	Desalineación por cargas externas (Ensamble de postes y bujes).	0.02805	

C321	Ajustes (Ensamble de matriz y punzón).	0.02805
C322	Desalineación por cargas externas (Ensamble de matriz y punzón).	0.02805
C331	Restricciones de ensamble: Los postes ensamblan sobre la zapata inferior o superior.	0.0289
C332	Restricciones de ensamble: Los bujes ensamblan sobre la zapata inferior o superior.	0.0289
C411	Complejidad de cambio de postes guías.	0.02805
C412	Complejidad de cambio de bujes guías.	0.02805
C413	Complejidad de cambio de componentes: Matriz y punzón.	0.0289
C421	Método óptimo de lubricación (Sistemas embalados).	0.0425
C422	Método óptimo de lubricación (Sistemas con ajuste de precisión).	0.0425
C51	Facilidad de operación.	0.04
C52	Flexibilidad de cambio de profundidad.	0.04
C531	Alineación del material de trabajo.	0.02
C532	Control de posición en operación.	0.02
C54	Complejidad para extracción del producto.	0.04
C61	Geometría de la lámina metálica virgen (blank)	0.08
C62	Disponibilidad de materia prima en el mercado.	0.08

Elección del prototipo a manufacturar

Para realizar una elección adecuada del concepto de prototipo del troquel de embutido, se requiere elaborar una matriz de evaluación en donde se encuentren todos los módulos de los prototipos analizados presentados en las matrices morfológicas. En la matriz de evaluación se comparan todas las variantes de diseño que se contemplaron. Tomando en cuenta los criterios de diseño, se le asigna un valor a cada una de las opciones, esto tiene como objetivo determinar la opción mejor evaluada (la que tiene mejor puntaje) para considerarla como la opción más factible [22].

La evaluación se realizó asignándole un factor de peso a cada uno de los criterios de diseño, de acuerdo con la jerarquización definida anteriormente. Posteriormente, se le asignó a la opción de diseño un valor entre 1 y 5, considerando 1) Inadecuado, 2) Débil, 3) Satisfactorio 4) buena y 5) excelente. De acuerdo a esto el valor asignado fue multiplicado por el factor de peso y se obtuvo la calificación de la opción de diseño. Finalmente, se observaron los resultados y se obtuvo la solución más factible para el prototipo.

Teniendo la variante PF como la opción de diseño mejor evaluada para el caso de estudio, se procedió a realizar los planos de diseño para su manufactura, así como la lista de materiales a utilizar.

Análisis por el Método de Elemento Finito

A continuación, se presenta el análisis por el MEF del prototipo, la simulación fue realizada utilizando las siguientes propiedades mecánicas para los siguientes componentes, mostradas en la Tabla 4.

Tabla 4. Propiedades mecánicas de los componentes.

Componentes	Material	Módulo elástico (Pa)	Relación de poisson	Esfuerzo de fluencia
Zapatas	Acero 4140 T	2.1e+11	0.3	4.15e+8
Bujes	Aleación de cobre	1.1e+11	0.34	2.8e+8
Postes	Acero D2	2.1e+11	0.3	2.19e+9
Placas de respaldo	Acero 1018	2.0e+11	0.3	2.5e+8
Matriz	Acero 4140 T	2.1e+11	0.3	4.15e+8

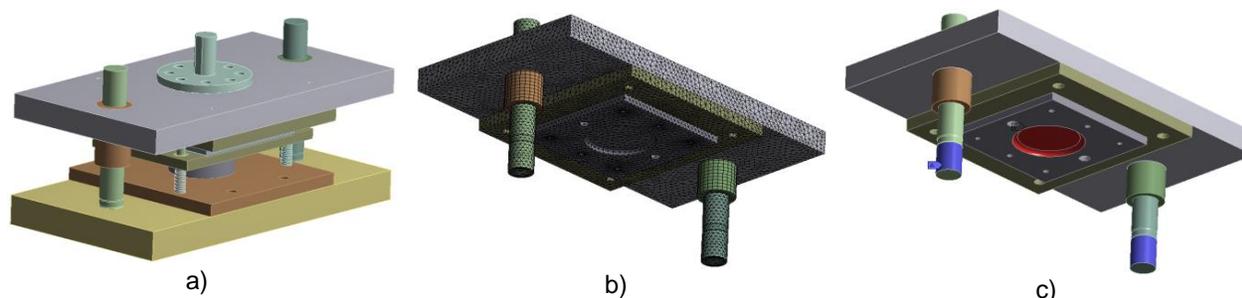


Figura 5. Prototipo variante PF. a) Modelo completo 3D, b) Mallado, c) Condiciones de frontera.

En la simulación se utilizó el elemento Solid 185 para realizar el mallado de las partes críticas del prototipo (modulo mecanismo y modulo movimiento) y un modelo de material elástico isotrópico [8]. Para las condiciones de frontera se restringieron todos los desplazamientos lineales en las áreas donde se colocan los bujes y postes del modulo de guías, se utilizó un carga de 83362 N aplicada en el fondo de la matriz en la dirección vertical como semuestra en la Figura 6c.

Resultados y discusión

Considerando la metodología de diseño planteada y las especificaciones que debe cumplir el prototipo de máquina para embutir se procedió a la evaluación de cada prototipo de acuerdo con los valores correspondientes presentados en la tabla 3, al ser evaluado cada uno de los prototipos se observó la obtención de mayor puntuación por el prototipo variante PF, siendo este el elegido para su análisis en Ansys y su posterior manufactura.

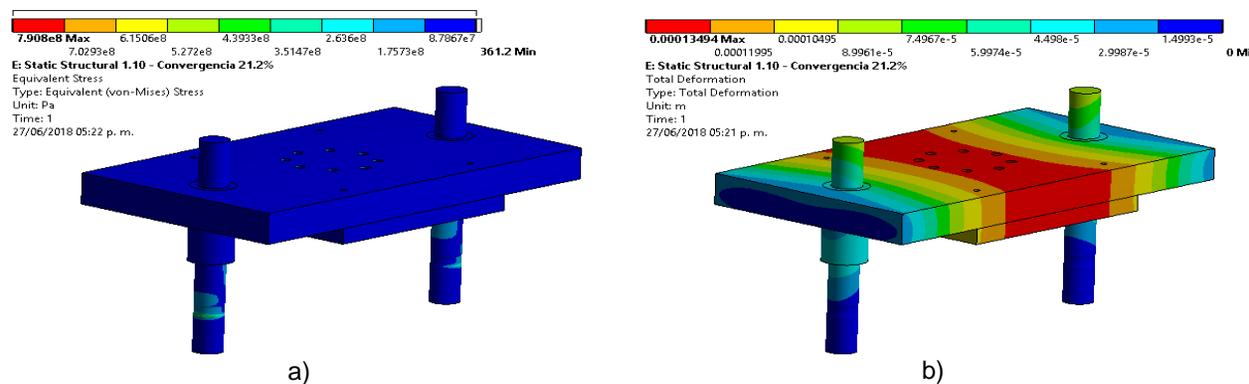


Figura 6. Análisis por MEF, a) Esfuerzos, b) Deformaciones.

Del análisis por el Método de Elemento Finito se obtuvo como resultado que los esfuerzos máximos se generaron en los postes guías por la carga aplicada de 83362 N en la superficie de fondo de la matriz son de 7.908×10^8 Pa, dichos esfuerzos se encuentran dentro del límite elástico del material ver Figura 6a, y de manera similar para la deformación de los módulos mencionados se encontró un valor máximo de 0.13mm ver Figura 6b. Por lo tanto, se corroboró que el diseño elegido del prototipo del troquel de embutido no presentará problemas de deformaciones permanentes al momento de realizar la caracterización del proceso de engargolado utilizando láminas de acero en los espesores planteados.

Trabajo a futuro

Como se ha venido explicando a lo largo del presente trabajo se ha realizado el diseño y análisis de un prototipo de troquel de embutido de láminas de acero, quedando como trabajo futuro la manufactura y ensamble del presente prototipo.

Conclusiones

En el desarrollo del prototipo, se ha observado que para obtener el diseño final requerido es necesario y de suma importancia plantear los requerimientos y criterios de diseño en una forma clara y precisa.

El presente trabajo fue desarrollado en las instalaciones del Instituto Tecnológico de San Luis Potosí, dicho tecnológico, cuenta con registro (PRODEP) de la línea de generación y aplicación del conocimiento, Diseño y manufactura de partes mecánicas SLP- LGAC – 01-17, así mismo se tiene registro para la LGAC – Diseño y manufactura de herramientas, por lo tanto desarrollar y aplicar una metodología que permita evaluar el diseño conceptual de un prototipo para la selección, análisis y posterior manufactura de la propuesta que satisfaga adecuadamente los requerimientos de diseño, permitirá sentar las bases para la estandarización de un proceso comúnmente desarrollado en el instituto.

Mediante la metodología descrita es posible seleccionar el prototipo del dispositivo para embutir láminas metálicas óptimo, que satisfaga los requerimientos de diseño.

El uso de programas de diseño asistido por computadora (CAD) y software de simulación por el Método de Elemento Finito (CAE) en el proceso de diseño, son herramientas beneficiosas que permiten a los diseñadores observar resultados sobre el avance del mismo, facilitando la realización de cambios y toma de decisiones respecto a las iteraciones que existen en el proceso de diseño, antes de enviar a manufacturar cualquier pieza. El contar con un banco de pruebas para la caracterización del proceso de embutido de láminas metálicas, en los laboratorios del Instituto Tecnológico de San Luis Potosí, propiciará la consolidación de una red de colaboración de conformado de metales para satisfacer las necesidades de la industria. Además, los beneficios del prototipo influirán en la formación de recursos humanos de alto nivel en un área de la ingeniería de aplicaciones industriales creciente. Estos recursos podrán asimilar las tecnologías modernas, que surgen para la atención de los problemas planteados, y dar solución a estos de forma inmediata con mayor facilidad.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su reconocimiento al Instituto Tecnológico de San Luis Potosí, así como, al equipo de trabajo conformado por estudiantes y docentes. Por su valiosa participación en la realización del presente trabajo de investigación.

Referencias

- [1] ProMéxico, La Industria Automotriz Mexicana, Secretaria de Economía, 2016.
- [2] P. Hu, L. Ying y B. He, Hot Stamping Advanced Manufacturing Technology of Lightweight Car Body, Beijing, China: Springer, 2017.
- [3] P. M. Dixit y U. S. Dixit, Modeling of Metal Forming and Machining Processes: by Finite Element and Soft Computing Methods, Springer, 2008.
- [4] M. P. Groover, Fundamentos de manufactura moderna, D. F.: MCGraw-Hill, 2007.
- [5] W. D. Callister, Jr., Ciencia e ingeniería de los materiales, Salt Lake City, Utah : Reverté S. A..
- [6] S. Kalpakjian y S. R. Schmid, Manufactura, ingeniería y tecnología, Prentice Hall, 2008.
- [7] J. R. W. Kubli, «Optimization of sheet-metal forming processes using the special-purpose program AUTOFORM,» *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 50, pp. 292 - 305, 1995.
- [8] A. M. M. A. A. N. A. G. L. K. T. A. H. Liyatyalı, «Improvement of hem quality by optimizing flanging and pre-hemming operations using computer aided die design,» *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 98, pp. 41 - 52, 2000.
- [9] M. Firat, «Computer aided analysis and design of sheet metal forming processes: Part I - The finite element modeling concepts,» *Materials an Design*, vol. 28, pp. 1298 - 1303, 2007.
- [10] T. F. A. A. I. E.-G. A. S. Wifi, «A review of the optimization techniques applied to the deep drawing process,» *In Proceedings of the 37th international conference on computers and industrial engineering*, pp. 1111 - 1112, 2007.

- [11] R. Bahloul, «Optimisation of process parameters in flanging operation in order to minimise stresses and Lemaitre's damage,» *Materials and Design*, vol. 32, pp. 108 - 120, 2011.
- [12] G. I. K. H. S. J. C. W. & M. S. P. (. Lin, «A computational design-of-experiments study of hemming processes for automotive aluminium alloys,» *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, vol. 219, nº 10, pp. 711 - 722.
- [13] G. H. H. W. X. H. S. J. H. K. & F. W. (. Zhang, «An experimental investigation of curved surface-straight edge hemming,» *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 2, nº 4, pp. 241 - 246.
- [14] E. A. A. F. A. & G. C. (. A. Ceretti, «Sheet Hemming with Rolling Tools: Analysis and Optimization of the Part Quality,» *InKey Engineering Materials*, vol. 344, pp. 357 - 364.
- [15] Y. Chang, C. Y. Wang, K. M. Zhao, H. Dong y J. W. Yan, «An introduction to medium-Mn steel: Metallurgy, mechanical properties and warm stamping process,» *Materials and Design*, vol. 94, pp. 424 - 432, 2016.
- [16] H. Hagenah, M. Merklein, M. Lechner, A. Schaub y S. Lutz, «Determination of the mechanical properties of hot stamped parts from numerical simulations,» *Procedia CIRP*, vol. 33, pp. 167 - 172, 2015.
- [17] B. L. Ma, M. Wan, X. J. Li, X. D. Wu y K. S. Diao, «Evaluation of limit strain and temperature history in hot stamping of advanced high strength steels (AHSS),» *International Journal of Mechanical Sciences*, Vols. %1 de %2128 - 129, pp. 607 - 613, 2017.
- [18] K. Mori, P. F. Bariani, B. -A. Behrens, A. Brosius, S. Bruschi, T. Maeno, M. Merklein y J. Yanagimoto, «Hot stamping of ultra-high strength steel parts,» *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 66, nº 2, p. 23, 2017.
- [19] M. Abspel, B. M. Neelis y P. v. Liempt, «Constitutive behaviour under hot stamping conditions,» *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 228, pp. 34 - 42, 2016.
- [20] W. Wang, L. Huang, K. Tao, S. Chen y X. Wei, «Formability and numerical simulation of AZ31B magnesium alloy sheet in warm stamping process,» *Materials and Design*, vol. 87, pp. 835 - 844, 2015.
- [21] X. Li, Y. Chang, C. Wang, P. Hu y H. Dong, «Comparison of the hot-stamped boron-alloyed steel and the warm-stamped medium-Mn steel on microstructure and mechanical properties,» *Materials Science & Engineering A*, vol. 679, pp. 240 - 248, 2017.
- [22] G. Pahl y W. Beitz, *Engineering Design: A Systematic Approach.*, Springer, 1996.
- [23] 22 Marzo 2016. [En línea]. Available: http://www.metalmecanica.com/temas/Produccion_automotriz_mexicana-crecera-33-para-2017+7095037.