

Análisis y simulación numérica del embutido de lámina de un acero inoxidable



Colaboración

Pedro de Jesús García Zugasti; Enrique Alejandro Vázquez Hernández; Juan Gabriel Sandoval Granja; Erick David Ríos Ayala; Gerardo García Liñán, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de San Luis Potosí

Fecha de recepción: 16 de septiembre de 2024

Fecha de aceptación: 11 de octubre de 2024

RESUMEN: En este trabajo se presenta el análisis y simulación numérica del proceso de embutido de lámina metálica, con la finalidad de conocer los parámetros importantes del proceso que influyen en su capacidad para ser formado. Se seleccionó como material de la lámina un acero inoxidable de uso frecuente en la fabricación de componentes industriales.

El análisis y la simulación numérica del proceso de embutido de una parte cilíndrica permitió conocer el grado de concordancia entre los resultados de la simulación virtual y las expresiones y recomendaciones teóricas que se reportan en la literatura especializada. Los parámetros observados fueron la influencia del uso del planchador, y el claro entre punzón y matriz sobre la altura de embutido de la parte. Los resultados mostraron que la menor diferencia, entre la altura teórica de embutido y la calculada por simulación, fue la obtenida sin el uso del planchador mientras que la mayor diferencia fue con el uso de este elemento.

PALABRAS CLAVE: embutido, lámina metálica, simulación numérica, método del elemento finito (MEF).

ABSTRACT: This work presents the analysis and numerical simulation of the sheet metal deep drawing process, with the purpose to know the process parameters influence in the formability of the sheet metal. A stainless steel, frequently used in the manufacture of industrial components, was selected as the sheet metal material.

The analysis and numerical simulation of the deep drawing process of a cylindrical part, allowed to know the degree of agreement between the results of the virtual simulation and those, based on theoretical expressions and recommendations, reported in the specialized literature. The metal forming process parameters observed, were the use of a blankholder, and the clearance between punch and die, in the deep drawing height of the part.

The results showed that the smallest difference, between the theoretical deep drawing height and that calculated by computer simulation, was that obtained without the use of the blankholder, while the greatest difference was with the use of this element.

KEYWORDS: Deep drawing, sheet metal, numerical analysis and simulation, finite element method.

INTRODUCCIÓN

El crecimiento en la demanda de productos industriales mediante los procesos de conformado de lámina metálica se percibe notoriamente en años recientes. Como consecuencia la demanda de Herramientales para la fabrica-

ción de productos metalmeccánicos, en particular de troqueles para el corte y conformado de lámina es una constante en la Industria Automotriz Mexicana [1]. El desarrollo de nuevos aceros con propiedades mejoradas para estas aplicaciones ha permitido solventar las limitaciones y problemas de fabricación. Un problema que se presenta comúnmente, en las áreas de fabricación, es la selección del material de la lámina, que tenga la capacidad para ser formado plásticamente en formas geométricas no regulares o complejas. Para dar respuesta se cuenta con herramientas de análisis y simulación numérica, mediante programas de computadora basados en el Método del Elemento Finito (MEF), que permiten reproducir virtualmente los procesos de conformado de lámina metálica, reduciendo los tiempos de diseño y fabricación de nuevos productos o cambios a los ya existentes.

El proceso de embutido de lámina permite obtener partes o componentes industriales con formas geométricas tipo caja o huecas. Su uso es cada vez más frecuente en la producción de enseres domésticos (por ejemplo, tarjas para cocina, componentes de estufas, etc.), equipos de industria pesada, los equipos médicos, equipos mecánicos, componentes de hardware, los componentes de los motores de combustión interna [2].

El incremento notable de partes o componentes para la industria automotriz en México impacta en una creciente demanda de acero inoxidable para diversas aplicaciones. Los fabricantes de automóviles incorporan en sus vehículos características que redundan en mejorar: la eficiencia de combustible y reducción de emisiones. Los aceros inoxidables poseen una alta relación resistencia-peso por lo cual destaca en las preferencias del sector. Otras propiedades destacadas son: su resistencia a la corrosión lo cual prolonga la vida útil de los vehículos, específicamente para aplicaciones en climas tropicales húmedos o calores extremos y secos como en nuestro país. El acero inoxidable ayuda a reducir los costos por mantenimiento y a prolongar la vida útil de los vehículos. Los datos estadísticos reportan un incremento en los próximos años del mercado de acero inoxidable en México, debido al interés por su uso entre los fabricantes de automóviles en nuestro país [3].

En este trabajo se describe el procedimiento para determinar la capacidad de embutido de un acero inoxidable, mediante el análisis y simulación virtual de la operación de formado de lámina de una parte cilíndrica del acero antes mencionado (ver Figura 1). Los parámetros del proceso observados fueron: la influencia de la fuerza de la placa de sujeción o planchador y el claro entre punzón y matriz del dado, sobre la altura de embutido de la parte.

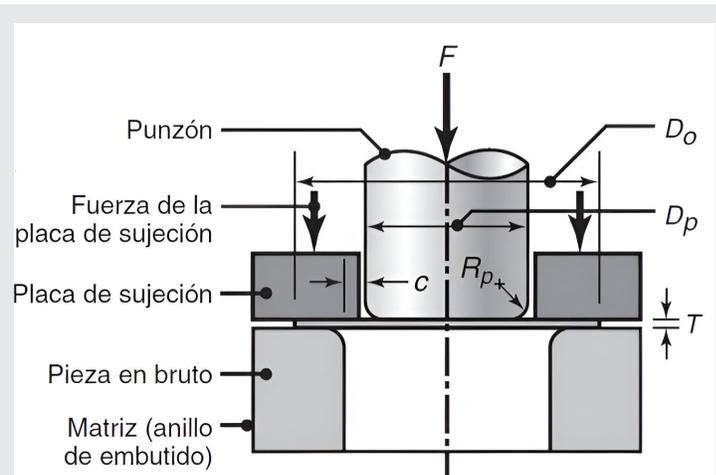


Figura 1. Proceso de embutido y sus parámetros. F =fuerza del punzón, D_o =Diámetro de la silueta a embutir, D_p =Diámetro del punzón, T =espesor de la lámina, R_p =radio del punzón, R_d =radio de la matriz, C =claro entre punzón y matriz. En este trabajo: $D_o=D_b$ y $T=t$.

Fuente: [4].

Los resultados obtenidos se han contrastado con los cálculos analíticos reportados en la literatura especializada y los cuales deben complementarse con los resultados de pruebas en campo para verificar su exactitud.

Marco teórico

Aunque existen trabajos desarrollados acerca del uso de la simulación numérica aplicada a los procesos de conformado de lámina, específicamente el embutido de lámina de partes cilíndricas y no cilíndricas, con aceros de bajo carbono, en estos se analiza la altura permisible de una parte rectangular doblemente embutida [5], la altura permisible de embutido de partes rectangulares de acero al carbono [6] o la determinación de la fuerza permisible de embutido mediante expresiones analíticas de partes cilíndricas y rectangulares de acero de bajo carbono [7], existe poca información relativa al análisis del embutido de partes con material de la lámina de acero inoxidable.

MATERIAL Y MÉTODOS

Material

El material de la lámina utilizado para la parte cilíndrica a embutir es acero inoxidable cuyas propiedades mecánicas se encuentran en la Tabla 1.

Metodología

Primeramente, se seleccionó un tamaño estándar de la parte cilíndrica a embutir, para posteriormente calcular los parámetros del proceso, para llevar a cabo la operación de embutido, a partir de diámetro de la parte. Como paso siguiente se determinó la altura permisible de embutido de la parte cilíndrica considerando tres casos específicos de interés para este estudio:

- Operación de embutido con el uso de planchador.
- Sin el uso de planchador,
- Reducción del claro entre punzón y matriz.

El último paso consistió en la preparación del programa de simulación numérica para realizar virtualmente la operación de embutido, obtener resultados para los casos de estudios mencionados antes y compararlos con los resultados teóricos.

Tabla 1. Propiedades mecánicas del Acero Inoxidable.

Módulo Elástico	193 GPa
Relación de Poisson	0.31
Resistencia última a la tensión (TS)	515MPa
Resistencia a la Cedencia	210MPa
Módulo Tangente	1800MPa

Fuente: Elaboración propia.

El método empleado para llevar a cabo la simulación del proceso de formado plástico de la lámina por embutido cilíndrico, con el uso del programa comercial de computadora ANSYS, es dinámico explícito, debido a la dependencia del tiempo de las operaciones de formado.

Para realizar la simulación es necesario contar con la geometría de los componentes del herramental de embutido: el punzón, el planchador y la lámina metálica, estos elementos se presentan virtualmente en la Figura 2.

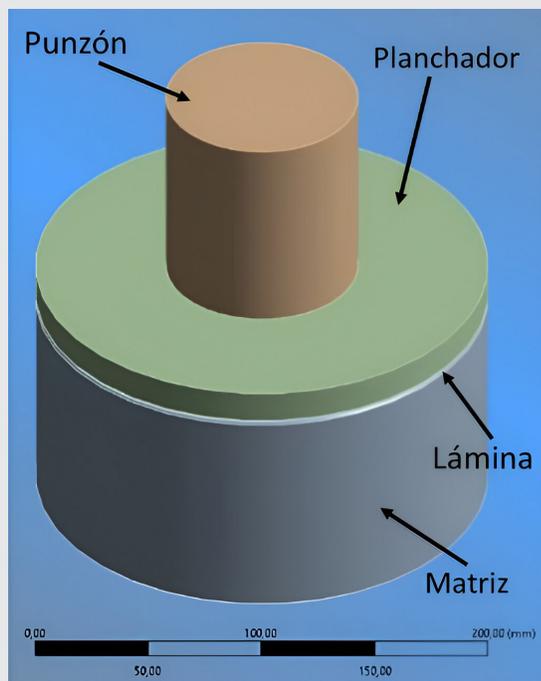


Figura 2. Herramental y lámina a embutir.

Fuente: Elaboración propia.

El diámetro de la lámina o silueta a embutir se establece en $Db=200\text{mm}$, a partir de este se obtienen los parámetros de la parte cilíndrica a embutir: h =altura, d =diámetro, t =espesor y R =radio de la parte, los cuales se muestran en la Figura 3.

Cálculo de parámetros para la operación de embutido

La severidad del embutido se mide mediante la reducción r , que involucra el diámetro de la silueta a embutir " Db " y el diámetro del punzón " Dp ", se expresa como:

$$r = \frac{Db - Dp}{Db} \quad \text{Ec. (1)}$$

Se emplea un valor de la reducción $r=0.45$ para asegurar un embutido libre de defectos [8]. Resolviendo la ec. 1 para obtener el diámetro del punzón este es $Dp=110\text{mm}$.

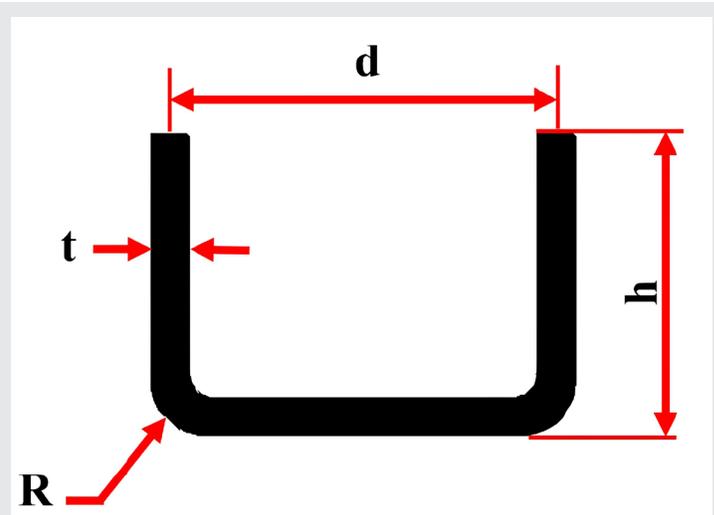


Figura 3. Geometría de la parte cilíndrica a embutir: d =diámetro, t =espesor, h =altura y R =radio de la parte.

Fuente: Elaboración propia.

Debe cumplirse también, para un embutido eficiente, que el cociente entre el espesor de la lámina y el diámetro de la silueta a embutir sea mayor al 1%, por lo tanto, el espesor comercial correspondiente de la lámina es de 2.65 mm (calibre 12).

La altura teórica de la parte a embutir se obtiene mediante la expresión:

$$h = \frac{Db^2 - d^2}{4 \cdot d} \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde $d=112.65\text{ mm}$ es el diámetro medio de la parte a embutir y se calcula sumando el espesor de la lámina al diámetro del punzón Dp . Por lo tanto, la altura teórica resultante de la ec. 2 es de $h=60.61\text{mm}$. Esta altura se emplea ahora en el cálculo del radio de la parte embutida $R=15.15\text{ mm}$, la cual se obtuvo mediante la expresión:

$$R = \frac{1}{4} h \quad \text{ec. (3)}$$

La altura teórica de la parte a embutir considerando el radio R es de $h_{real}=75.6\text{mm}$ usando la expresión:

$$h_{real} = \frac{Db^2 - d^2}{4d} + Rp \quad \text{ec. (4)}$$

Para verificar la altura teórica obtenida, se empleó la Tabla 2, la cual muestra el rango de valores recomen-

dables para las relaciones d/Db y h/d , específicas para una lámina de acero inoxidable, para este estudio $h/d=0.67$ valor dentro del rango establecido.

Tabla 2. Rango de valores para las relaciones geométricas de una parte cilíndrica embutida de acero inoxidable.

Material	Primera pasada	
	$\frac{d}{D} = u$	$\frac{h}{d}$
Acero Inoxidable	0.50 ÷ 0.55	0.57 ÷ 0.75

Fuente: [9]

Los radios de las aristas del punzón $R_p=6$ mm y la matriz $R_m=12.17$ mm de embutido (ver Figura 4) fueron obtenidos de manera siguiente:

Radio de la matriz:

$$R_d = 0.8\sqrt{(D_b - d)t} \quad \text{ec. (5)}$$

Radio del Punzón mediante la condición:

$$t \leq R_p \leq 3t$$

El claro entre el punzón y la matriz o separación entre el punzón y la cavidad de embutición (matriz) debe tener un valor entre 1.1 y 1.4 veces el espesor de la lámina, para este caso se tomó el valor de 1.1 y un valor del claro de $C=3$ mm.

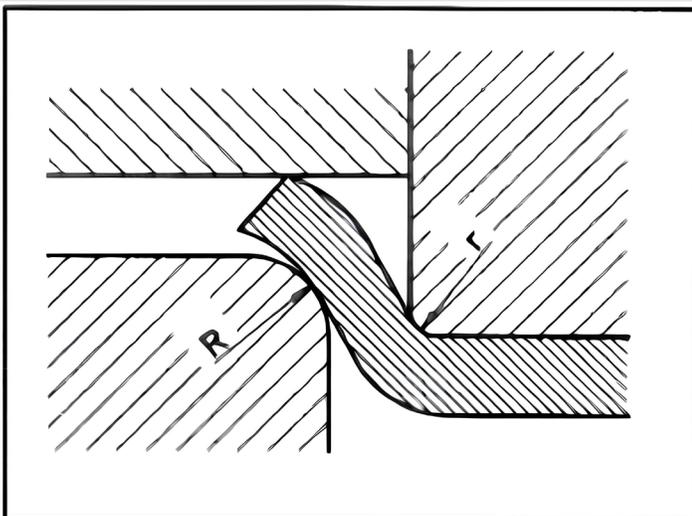


Figura 4. Radio del punzón $R_p=r$ y radio de la matriz $R_d=R$ del herramental de embutir.

Fuente: Elaboración propia.

La velocidad de embutición óptima depende del material de la lámina, esta velocidad permite el tiempo necesario para pasar al estado plástico sin que se produzcan roturas o adelgazamientos sensibles en su espesor. La velocidad para el acero inoxidable recomendable [10] se establece en este trabajo en 200 mm/s.

El coeficiente de fricción entre el herramental de embutido y la lámina de acero inoxidable recomendable para este último material debe estar entre el rango de valores de 0.213 y 0.891, en este trabajo se tomó un valor de 0.47. Considerando una lubricación con aceite mineral [10].

La fuerza de punzonado o embutido se calcula usando la expresión:

$$F_{m\acute{a}x} = \pi D_p t (TS) \left(\frac{D_b}{D_p} - 0.7 \right) \quad \text{Ec. (6)}$$

El valor de esta fuerza empleando los parámetros involucrados establecidos antes, es de: $F_{m\acute{a}x}=527$ kN. La fuerza de sujeción o del planchador es, aproximadamente, una tercera parte de la fuerza de embutido, lo cual resulta $F_s=175.7$ kN.

Haciendo uso del método del elemento finito, se realiza una simulación del proceso de embutición mediante el software ANSYS Workbench con el subprograma LS DYNA (Análisis dinámico explícito) [11-13]. Lo anterior debido a que el proceso de embutición es un problema altamente no lineal en el que se produce un impacto entre el punzón y la lámina metálica debido a que el punzón se desplaza hacia abajo con determinada velocidad ejerciendo una fuerza sobre dicha lámina.

RESULTADOS

La simulación fué realizada con la fuerza calculada para el planchador de $F_s=175.7$ kN, esta fuerza asegura un embutido libre de arrugas en el reborde de la lámina, posteriormente se lleva a cabo la simulación sin el uso de un planchador, para observar la formación arrugas. Finalmente se modificó el claro entre punzón y matriz.

Los cambios en las condiciones y parámetros de la operación de embutido de la lámina metálica tienen la finalidad de verificar las expresiones y recomendaciones obtenidas de la literatura especializada y/o determinar el porcentaje de error que existe entre la teoría y los resultados del análisis y simulación numérica.

Preparación del Modelo de Elemento Finito

La geometría del herramental para realizar la operación de embutido cilíndrico que consta de un punzón, un planchador y la matriz se modelan como cuerpos sólidos de acero estructural.

Las propiedades mecánicas del material de la lámina a embutir corresponden al acero inoxidable con comportamiento no lineal.

Las condiciones de frontera que se establecieron fueron las siguientes:

- La matriz se considera rígida y como un soporte fijo.
- El desplazamiento del punzón es de 15 mm en el sentido del eje Y negativo y está restringido en las direcciones X y Z.

c. El punzón es rígido y sobre este se aplica una fuerza de $F_{m\acute{a}x}=527\text{kN}$ de forma tabular, es decir, que al tiempo cero esta fuerza es igual a cero, y cuando el recorrido del punzón llega a la tercera parte del recorrido final se aplica dicha fuerza, basado en recomendaciones de la teoría especializada.

d. La velocidad del punzón, durante la operación de embutido, es de $v= -200\text{ m/s}$ está aplicada en la dirección Y negativa.

e. El tiempo fue seleccionado bajo la premisa de la velocidad anterior de 0.0004 segundos.

f. En las superficies de contacto entre la lámina y el planchador se ha establecido un coeficiente de fricción dinámico de 0.05; mientras que en la superficie de contacto entre la lámina y la matriz se estableció un coeficiente de fricción dinámico de 0.08. Tomando en cuenta que estas superficies se encuentran lubricadas como se indican en los apartados anteriores.

Los resultados de la simulación se muestran a continuación tomando en cuenta los cambios en las condiciones de embutición antes mencionados.

Caso 1. La embutición con planchador empleando los parámetros teóricos antes establecidos.

En la Figura 5 se muestra los valores máximos y mínimos resultantes de la deformación en la dirección del eje de simetría de la parte embutida. La deformación total es de 86.0879 mm y corresponde al valor de la altura de embutido.

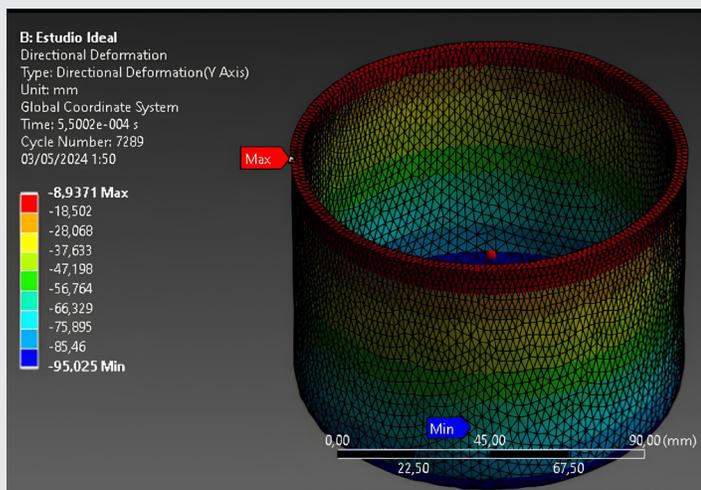


Figura 5. Deformación en la dirección del eje Y (eje de simetría de la parte) resultante de la simulación numérica.

Fuente: Elaboración propia.

Caso 2. La embutición sin planchador manteniendo las mismas condiciones del caso 1

Para este estudio en particular, se realiza el mismo procedimiento junto con las condiciones requeridas para el estudio del caso 1, exceptuando las relacionadas con interacción entre la lámina y el planchador. Parámetros como la fuerza, velocidad, coeficientes de fricción y dimensiones se mantienen iguales.

En la Figura 6 muestra los valores máximos y mínimos resultante de la deformación en la dirección del eje de simetría de la parte embutida. La deformación total es de 85.501 mm y corresponde al valor de la altura de embutido.

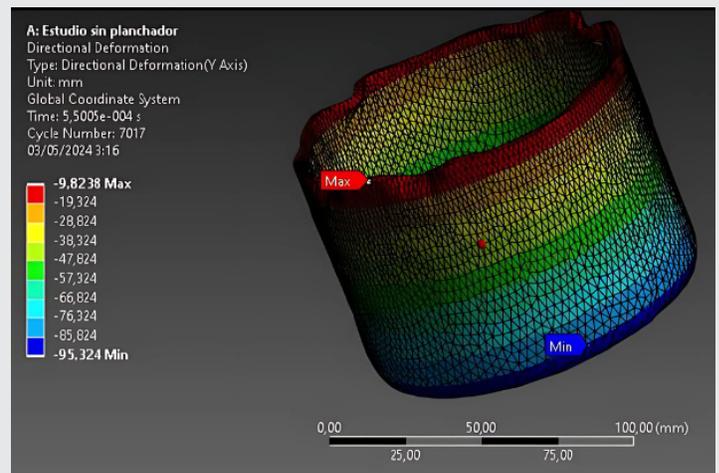


Figura 6. Deformación en la dirección del eje Y (eje de simetría de la parte) resultante de la simulación numérica para el caso 2.

Fuente: Elaboración propia.

Caso 3. La embutición con reducción del claro entre punzón y matriz

En este modelado se consideró reducir el claro que establece los métodos teóricos. Lo que se pretende con esta reducción es ver qué tan crítico es el comportamiento de la lámina con este cambio. En este caso se redujo el claro a la misma dimensión que el espesor de la lámina, es decir, 2.65 mm. Los parámetros como la fuerza, velocidad, coeficientes de fricción y dimensiones se mantienen iguales.

En la Figura 7 muestra los valores máximos y mínimos resultante de la deformación en la dirección del eje de simetría de la parte embutida. La deformación total es de 88.82 mm correspondiente al valor de la altura de embutido.

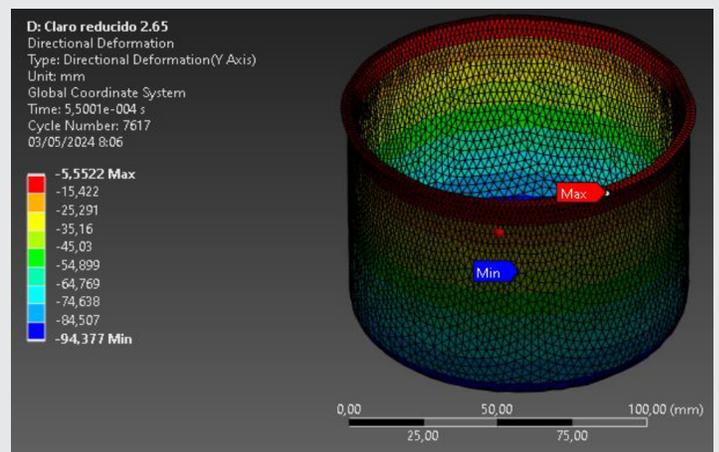


Figura 7. Deformación en la dirección del eje Y (eje de simetría de la parte) resultante de la simulación numérica para el caso 3.

Fuente: Elaboración propia.

La tabla 3 contiene una comparativa entre los valores resultantes de los distintos casos de simulación.

Tabla 3. Resultados de la simulación para la altura de embutido.

Caso :	1	2	3
Altura de embutido mm	86.0879	85.501	88.82
Diferencia valor teórico	10.4879	9.901	13.22
Porcentaje de diferencia.	12.2%	11.6%	14.9%

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

El análisis y la simulación numérica permite conocer el comportamiento del proceso de embutido de lámina metálica en etapas tempranas de diseño y la fabricación de componentes industriales.

En este trabajo ha sido posible comparar, los parámetros del proceso de embutido de una parte cilíndrica obtenidos de cálculos analíticos, empleando las expresiones y recomendaciones de la literatura especializada, con los resultados empleando el análisis y simulación numérica, con el programa ANSYS y el subprograma LS-DYNA, basado en el Método de los Elementos Finitos (MEF).

La diferencia 12.2% entre la altura de embutido calculada analítica y numéricamente para el caso 1, se encuentra dentro de un rango tolerable, relacionado con el cálculo de los parámetros del proceso involucrados, mediante expresiones analíticas generales, que difieren en sus resultados, dependiendo del material de la lámina y los parámetros seleccionados para un caso particular, por lo que se espera una diferencia respecto al de la simulación o al valor real.

Respecto al caso 2, la diferencia de 11.6% es debido a que la ausencia de la fuerza del planchador, permite el fácil ingreso de la lámina hacia la cavidad que forma la matriz de embutido. Esta situación causa un menor estimamiento de la lámina que forma la pared del recipiente cilíndrico embutido y por lo tanto un menor valor de la altura de embutido resultante.

Finalmente, en el caso 3 la diferencia obtenida es del 14.9% y se debe a que la lámina no fluye libremente al no tener holgura para su desplazamiento adecuado. La lámina que forma la pared de la parte embutida está sujeta a una mayor fuerza de tensión al ingresar a la cavidad de la matriz, por esta razón la altura de la parte cilíndrica embutida es la mayor de los tres casos considerados.

En general se concluye que el análisis y simulación numérica permite conocer el grado de desviación entre

los resultados analíticos y los de la simulación numérica, lo que permite establecer una confiabilidad aceptable de las herramientas de análisis y simulación numérica para su uso en las etapas de diseño y fabricación de nuevos productos o actualización de los ya existentes.

Como trabajo futuro se propone la comparativa entre los resultados obtenidos en este estudio y los de la experimentación en campo mediante el diseño de un dado de embutir y el uso de una prensa de tipo hidráulico que permita reproducir la operación usando los parámetros del proceso utilizados para los casos de estudio del presente trabajo.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de San Luis Potosí, por el apoyo recibido para la realización del proyecto.

BIBLIOGRAFÍA

[1] *Mex. Industry*, p. 25, junio de 2023.

[2] *Layana Company*. (12 de agosto de 2023). *Embutición profunda del metal*. <https://www.layana.com/es/technology/metal-drawing>.

[3] *EMR a Claight Enterprise*. (10 de febrero de 2024). *Análisis del Mercado de Acero Inoxidable en México*. <https://www.informesindeexpertos.com/informes/mercado-de-acero-inoxidable-en-mexico>.

[4] *S. Kalpakjian y S. R. Schmid, Manufactura, ingeniería y tecnología*, 7a ed. Pearson, 2014.

[5] *Cerino-Zapata, A., García-Zugasti, P. D. J., Medellín-Castillo, H. I., de Lange, D. F.*, "Análisis del Doble Embutido Rectangular Usando MEF", *Memorias del XVI Congreso Internacional Anual de la SOMIM, 22 al 24 de Septiembre 2010, Monterrey, Nuevo León, México*, 2010.

[6] *Medellín-Castillo, H. I., García-Zugasti, P. D. J., de Lange, D. F., & Colorado-Alonso, F. J.* *Analysis of the allowable deep drawing height of rectangular steel parts*. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 66, 2013, pp. 371-380.

[7] *A. Rivas, H. I. Medellín, D. F. de Lange, and P. de J. García-Zugasti*, "Performance evaluation of analytical expressions for cylindrical and rectangular deep drawing force estimation," *J. Manuf. Process.*, vol. 36, no. September 2017, pp. 340-350, 2018.

[8] *P. Groover, M. Fundamentos de manufactura moderna*. 3ª. ed. Vol. 1. McGraw-Hill Interamericana. 2007.

[9] M. Rossi. *Estampado en frío de la chapa: estampas, matrices, punzones, prensas y máquinas*. 9a ed. Vol. 1. Dossat, S.A. 1979.

[10] Pedrosa Astudillo, A. A., & Sánchez Alvarracín, C. M. *Análisis matemático del conformado en el proceso de embutición cilíndrica de una sola fase, para evaluar el comportamiento mecánico de una chapa bimetálica*. Master's thesis. 2018.

[11] Ansys Notas Ingeniería. (19 de junio de 2018). [Vídeo en línea]. Disponible en <https://www.youtube.com/watch?v=KhnWbcTy3i8>

[12] Ansys Inc. *What is Explicit Dynamics?* (27 de julio de 2022,). [Vídeo en línea]. Recuperado 6 de mayo de 2024. Disponible en <https://www.ansys.com/blog/what-is-explicit-dynamics>.

[13] Expertfea. com. *WEBINAR 4: ANSYS Workbench Explicit Dynamics FEA of a high speed stamping* (6 de julio de 2014,). [Vídeo en línea]. Disponible en YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=B-59B5bJAco>.

