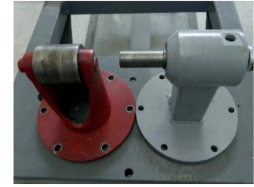


Optimización paramétrica del proceso de engatillado lineal por roldana para chapas metálicas



Parametric optimization of linear roll-hemming process for metal sheets

Pablo Alberto Limon-Leyva¹, Elías Rigoberto Ledesma-Orozco², Eduardo Aguilera-Gómez², Héctor Plascencia-Mora², Antonio de Jesús Balvanti-García², José Angel Diosdado-De la Peña²

¹ Instituto Tecnológico de San Luis Potosí. Departamento de Estudios de Posgrado e Investigación. Av. Tecnológico, s/n – 78437 San Luis Potosí (México).

² Universidad de Guanajuato. Departamento de Ingeniería Mecánica Campus Irapuato-Salamanca. Carretera Salamanca -Valle de Santiago, Km 3.5 – 36885 Comunidad de palo blanco, Salamanca, Guanajuato (México).

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/8225> | Recibido: 28/11/2016 • Evaluado: 29/11/2016 • Aceptado: 30/03/2017

ABSTRACT

- The present work, focus on the parametric optimization of geometric parameters for Roll Hemming process. Here, the parameters of interest are the Roller radius, the angle for pre-hemming stage and the fillet radius. The main objective is to improve the quality parameters of the process: Roll-In, Roll-Out and wrinkling. Furthermore, a comparison between results generated, in numerical and experimental studies, with optimum and non-optimal parameters, is presented. Finite Element Analysis (FEA) Software, ANSYS Workbench 15[®] was implemented for numerical simulation of the process. For the experiments, a 6 degree of freedom (DOF) NACHI SRA210 industrial manipulator was used. From numerical results, 2 Rollers were developed with optimum (10.18 mm of radius) and non-optimal (25 mm of radius) parameters. Multiple tests of roll hemming in straight paths were performed on several 0.9 mm thick Aluminum sheets 6011 (120 x 100 mm²). Similar to simulation, the analysis of the obtained results shows that the Roller with optimum parameters generates the best quality in hemmed samples.
- **Keywords:** Parametric Optimization, Roll Hemming, Industrial Manipulator, Finite Element Analysis.

RESUMEN

El presente trabajo se enfoca en la optimización paramétrica de las variables geométricas del engatillado, tales como: el radio de la roldana, el ángulo de pre-engatillado y el radio del doblado del panel exterior para crear la ceja con el fin de generar una mejora en los parámetros de calidad del proceso: enrollamiento de la pestaña (Roll-in), desenrollamiento de la pestaña (Roll-Out) y arruga.

Adicionalmente, se muestra la comparación de los resultados iniciales (no óptimos) y óptimos, obtenidos tanto en simulación numérica como en pruebas experimentales. Las simulaciones del proceso se llevaron a cabo implementando el software de análisis por elemento finito, ANSYS Workbench 15[®]. Para las pruebas experimentales se utilizó una estación de trabajo consistente en un manipulador industrial de 6 grados de libertad (GDL) NACHI SRA210, sobre el que se montó un herramental de soporte para la roldana. A partir de los parámetros determinados en simulación, se fabricaron dos roldanas, uno con parámetros óptimos (10.18 mm de radio) y el otro con los parámetros iniciales (25 mm de radio). Se realizaron pruebas de engatillado lineal sobre chapas de aluminio 6011, de 0.9 mm de espesor y dimensiones de 120 x 100

mm². El análisis de los resultados experimentales obtenidos muestra que, al igual que en simulación, la roldana con parámetros de engatillado óptimos genera una mejora, en los tres parámetros considerados de calidad de engatillado, en comparación con la calidad obtenida con la roldana de parámetros iniciales.

Palabras clave: Optimización paramétrica, Engatillado por roldana, Manipulador industrial, Análisis por elemento finito.

1. INTRODUCCIÓN

El conformado de metales comprende una amplia variedad de procesos de manufactura que consisten en la deformación plástica de una pieza inicialmente plana (comúnmente una chapa), sobre la cual se genera una geometría deseada por medio de múltiples herramientas [1]. Debido al alto costo de inversión para la realización de investigaciones experimentales, nuevas alternativas como los estudios numéricos, incluyendo el análisis por elemento finito, han sido propuestos para el análisis y optimización de diversos procesos de manufactura [2-6].

En la industria automotriz, una alternativa para los procesos tradicionales de ensamblaje, como la soldadura, es el engatillado de cierres de carrocerías (cofres, puertas, etc.): este proceso de formado sirve para aumentar la rigidez de la parte engargolada, mejorar los bordes de las estructuras y, por último, para unir los paneles interiores y exteriores. El proceso de engatillado puede llevarse a cabo a través de tres métodos: engatillado con dados de movimiento vertical (die hemming), engatillado de mesa con dados de movimiento vertical y horizontal (*table-top hemming*), y engatillado por roldana (*roll-hemming*), [4, 5]. El engatillado con dados de movimiento vertical se lleva a cabo en tres etapas, la etapa de doblado a 90°, pre-engatillado y engatillado final, las cuales se realizan en una prensa con un patrón de movimiento vertical [5]. De manera similar, el engatillado de mesa con dados de movimiento vertical y horizontal se realiza empleando una prensa, sin embargo, el movimiento del herramental puede ser horizontal, vertical o una combinación de ambos. La desventaja de este método es el alto costo de inversión, ya que cada configuración de herramientas genera un solo tipo de producto (los dados no son intercambiables) [5,6]. El engatillado por roldana emplea una roldana conducida a lo largo de una trayectoria dada. El estudio de los diferentes métodos para el engatillado de materiales ha sido ampliamente reportado en la literatura [7-14]. Sin embargo, los procesos típicos del engatillado, como el engatillado con dados de movimiento vertical y el engatillado de mesa con dados de mo-

vimiento vertical y horizontal, tienen un alto costo de inversión al requerir herramientas específicas para cada aplicación.

En comparación con los procesos antes mencionados, las principales ventajas del engatillado por roldana son su bajo costo de inversión y flexibilidad de producción, al requerir únicamente cambios en la trayectoria de la roldana para distintas aplicaciones. Recientemente, diversos autores han reportado estudios numéricos y experimentales para la optimización del proceso de engatillado [15-20]. Sin embargo, la caracterización de la influencia de los parámetros geométricos sobre la calidad del engatillado en distintos materiales es un problema sin resolver y sigue siendo de gran relevancia para la industria del conformado de metales.

Para resolver los problemas que se tienen en torno a la calidad de productos engatillados, los esfuerzos realizados por la industria automotriz en conjunto con múltiples investigadores se han enfocado en estrategias estadísticas. El diseño de experimentos (DOE por sus siglas en inglés) ha sido una de las estrategias más reportadas en la literatura [4, 5, 10, 20]. Los autores de [20] inicialmente presentan una metodología de simulación para comparar su modelo propuesto con los resultados de Hu et al. [21], mostrando una diferencia máxima de 2.14% en los resultados de la fuerza máxima en la roldana. Adicionalmente, utilizaron un DOE completo de dos niveles (2^k) para determinar la influencia de parámetros como la velocidad de avance, diámetro de la roldana, ángulo de pre-engatillado y el radio de doblez sobre parámetros de salida como la fuerza máxima de la roldana y los parámetros de calidad del proceso: enrollamiento de la pestaña, desenrollamiento de la pestaña y arruga. Para estos últimos, las gráficas de interacciones que reportaron muestran fuertes relaciones entre el enrollamiento, desenrollamiento de la pestaña y la arruga respecto al diámetro de la roldana, ángulo de pre-engatillado y el radio de doblez. Por ello, en el presente trabajo se consideran éstos últimos y se descarta el análisis de la velocidad de avance y no se evalúa la fuerza máxima sobre la roldana.

1.1. ENGATILLADO POR ROLDANA

El proceso de engatillado por roldana emplea una o más roldanas, las cuales son guiadas comúnmente por un manipulador a lo largo de una trayectoria dada, ver Figura 1a. El uso de un robot industrial permite el seguimiento de múltiples trayectorias que incluyan diferentes rotaciones y traslaciones. Lo anterior facilita el engatillado de una gran variedad de geometrías, ya sean rectas o curvas, en 2 ó 3 dimensiones. Este proceso ofrece también la ventaja de variar el número de pasos a conveniencia, con el fin de mejorar la calidad del engatillado. El costo por operación en el engatillado por roldana es bajo en comparación con los otros

métodos de engatillado (*Die-Hemming* y engatillado table-top), representando una alternativa factible para la automatización del proceso [22, 23].

Para la industria, predecir la forma final y la calidad de la superficie del producto son retos críticos en el desarrollo e implementación de los procesos de manufactura. La calidad de los productos engatillados, depende de parámetros dimensionales y superficiales. Dichos parámetros incluyen: las deformaciones en el área interior y exterior a lo largo del borde del producto, tales como arruga y grietas (Figura 1a), retroceso (*Recoil*) y comba (*Warp*), ver Figura 1b, así como también el empalme entre el radio exterior del engatillado y la ceja original del panel (enrollamiento de la pestaña), la separación entre el radio exterior del engatillado y la ceja original del panel (desenrollamiento de la pestaña), ver Figura 1c.

En este trabajo, se propone la optimización del proceso de engatillado por roldana en función del diámetro de la misma, el ángulo de entrada de la roldana para el pre-engatillado y el radio del doblez inicial. Para el análisis numérico se utilizó el módulo de LS-DYNA® incluido en la interfaz gráfica de ANSYS Workbench® [24-26]. El esquema de optimización desarrollado para el proceso de engatillado se basa en la minimización de los parámetros de calidad del proceso: enrollamiento de la pestaña, desenrollamiento de la pestaña y la formación de arruga. Finalmente, se propone un estudio comparativo entre pruebas de engatillado lineal, tanto numéricas como experimentales, con parámetros óptimos y no óptimos. Para la simulación del proceso de engatillado se modelaron probetas planas de Aluminio 6011, tanto para el panel exterior como para el interior, como se describe en la siguiente sección.

2. MATERIALES Y METODOS

2.1. MATERIAL

La caracterización del material considerado, aluminio de la serie 6000 (Al-6011) para uso automotriz, se llevó a cabo en base a la norma ASTM E8, por medio de pruebas de tensión uniaxial a 0°, 45° y 90° con respecto a la dirección de rolado. El modelo de material seleccionado para los paneles interior y exterior en la simulación del proceso fue Barlat 3 Parámetros, debido a que es el que mejor representa el comportamiento plástico del material utilizado [27]. Las propiedades mecánicas obtenidas para el aluminio Al-6011 se muestran en la Tabla 1. Excepto por el exponente de Barlat que se determina por la estructura cristalina del material [27], los parámetros de esta tabla se obtienen de las pruebas realizadas en base a la norma ASTM E8 y el procedimiento de ajuste por regresión lineal en base logarítmica detallado en [28]. Estos

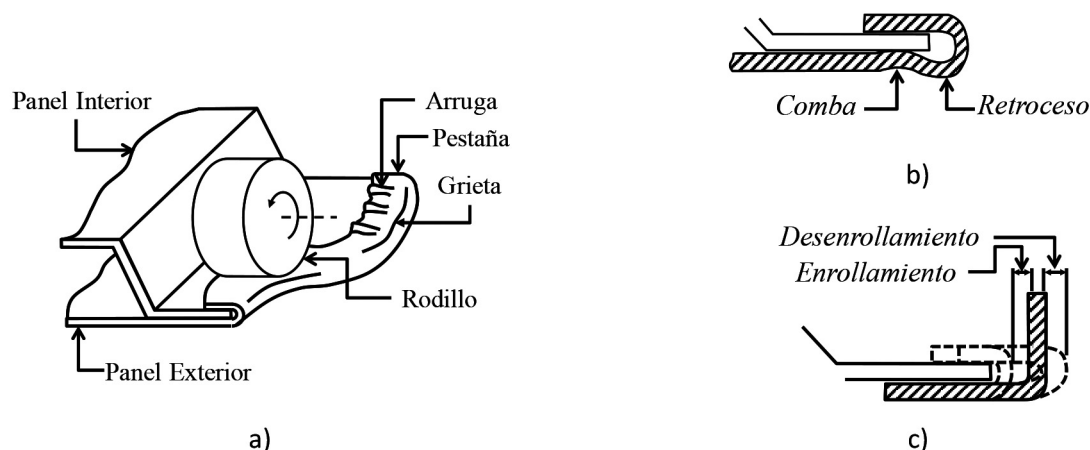


Fig. 1: Proceso de engatillado por roldana (a) y parámetros de calidad: b) comba y retroceso; c) enrollamiento y desenrollamiento de la pestaña

parámetros describen los componentes de la función de formación de plasticidad desarrollado por Barlat y Lian [29], la cual describe la anisotropía plana para un estado general de esfuerzo plano y puede escribirse de la siguiente manera:

$$f = a|K_1 + K_2|^m + a|K_1 - K_2|^m + c|2K_2|^m = 2\bar{\sigma}^m \tag{1}$$

donde:

$$K_1 = \frac{\sigma_{xx} + h\sigma_{yy}}{2}, \quad K_2 = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xx} - h\sigma_{yy}}{2}\right)^2 + p^2\sigma_{xy}^2} \tag{2}$$

donde, c y h pueden determinarse usando los valores r obtenidos de las pruebas de tensión uniaxial en las tres diferentes direcciones, r_{00} , r_{45} y r_{90} , como sigue:

$$a = 2 - c = 2 - 2\sqrt{\frac{r_{00}}{1 + r_{00}} \frac{r_{90}}{1 + r_{90}}} \tag{3}$$

$$h = \sqrt{\frac{r_{00}}{1 + r_{00}} \frac{1 + r_{90}}{r_{90}}} \tag{4}$$

Propiedad	Unidad	Valor
Densidad (ρ)	Kg/m ³	2770
Módulo de Elasticidad (E)	GPa	70
Razón de Poisson (ν)	-	0.3
Constante de endurecimiento (K)	MPa	533
Exponente de endurecimiento (n)	-	0.261
Resistencia a la cedencia (S_y)	MPa	151
Exponente de Barlat (m)	-	8
Coficiente Lankford a 0° (r_{00})	-	0.780
Coficiente Lankford a 45° (r_{45})	-	0.527
Coficiente Lankford a 90° (r_{90})	-	0.599

Tabla 1: Propiedades mecánicas del material

Sin embargo, p no puede calcularse analíticamente, por lo que se ajusta a través del procedimiento descrito por Diosdado De la Peña et al. [28].

2.2. ANÁLISIS POR ELEMENTO FINITO (AEF)

El modelo del panel exterior consiste en una chapa plana de aluminio con una ceja de 10 mm, la cual esta doblada a 90° con un radio constante. El panel interior es una chapa totalmente plana del mismo material y espesor (0.9 mm) que el panel exterior. Las características geométricas del panel exterior fueron de 120 x 100 mm², mientras que el panel interior es un recuadro de 100 x 100 mm² (ver Figura 2). Ambos paneles fueron modelados para la simulación como elementos deformables.

Para la simulación, se consideró un coeficiente de fricción estática de 0.1 para los contactos entre todas las partes involucradas en el proceso [20, 21, 30]. Dicho coeficiente fue definido para generar el giro de la roldana a lo largo de su eje de giro cuando entra en contacto con la chapa. Las simulaciones del proceso se llevaron a cabo con un análisis explícito en el software de Análisis por Elemento Finito, ANSYS 15®. Ambos paneles fueron modelados utilizando elementos tipo cascara (*Shell*) con un tamaño de 1 mm. En la zona del doblé de ceja del panel exterior se refinó la malla con elementos de 0.12 mm, con el fin de mejorar los resultados obtenidos en el proceso (ver Figura 2a). El tamaño de la malla se determinó a partir de un análisis de sensibilidad de malla desde 5 a 0.5 mm, en la sección gruesa, donde la diferencia máxima entre los resultados obtenidos con el elemento más pequeño y el reportado aquí fue de 7.5%, requiriendo sólo 4 horas para su solución que representa aproximadamente el 23% del tiempo requerido con un elemento de 0.5 mm. Estas chapas se modelaron aplicando el modelo de material de Barlat de 3 parámetros que se detalló en la sección previa.

En este trabajo se modelaron los herramientales como partes rígidas: la roldana y el soporte de engatillado, ya que se considera

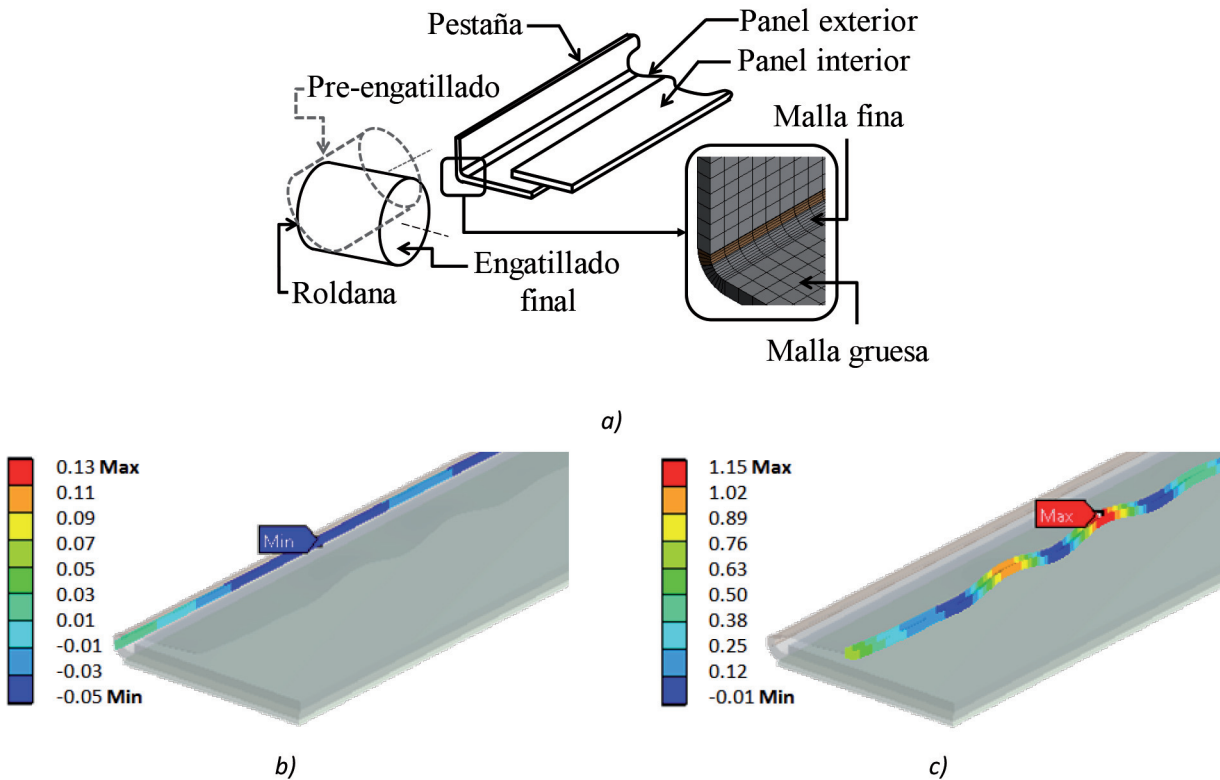


Fig. 2: Modelado inicial: a) elementos del proceso de engatillado por roldana y características de malla; b) resultado de enrollamiento y desenrollamiento en chapa engatillada; y c) resultado de arruga en chapa engatillada

Punto de Diseño	Radio del doblez [mm]	Radio de la roldana [mm]	Ángulo del Pre-Engatillado [°]	Enrollamiento de la pestaña [mm]	Desenrollamiento de la pestaña [mm]	Arruga [mm]
1	2.25	17.5	45.00	0.48	-0.12	0.63
2	1.50	17.5	45.00	0.26	0.00	0.89
3	3.00	17.5	45.00	0.98	-0.09	0.62
4	2.25	10.0	45.00	0.47	-0.18	0.58
5	2.25	25.0	45.00	0.51	-0.04	0.63
6	2.25	17.5	30.00	0.10	-0.48	0.64
7	2.25	17.5	60.00	0.88	0.34	0.84
8	1.64	11.4	32.80	0.08	-0.24	0.58
9	2.85	11.4	32.80	0.11	-0.87	0.68
10	1.64	23.5	32.80	0.15	-0.09	0.93
11	2.85	23.5	32.80	0.35	-0.65	0.61
12	1.64	11.4	57.20	0.45	0.12	1.09
13	2.85	11.4	57.20	1.09	0.40	0.88
14	1.64	23.5	57.20	0.43	0.07	0.84
15	2.85	23.5	57.20	1.11	0.45	0.53

Tabla 2: Puntos y rangos de valores para DOE con punto central

que dichos elementos no se verán afectados por el proceso. Para dichos herramientas se consideró una densidad de 7800 Kg/m³; un módulo de elasticidad de 207 GPa y una razón de Poisson de 0.3.

La trayectoria de la roldana para el engatillado lineal consiste únicamente en 2 puntos a lo largo del mismo eje. En cada uno de los puntos de la trayectoria se especifica tanto la posición como la orientación de la roldana con respecto al plano de engatillado. Como se ilustró en la Figura 2a, se simuló dos roldanas independientes posicionadas y orientadas de manera que uno de ellas realizara el pre-engatillado y la otra el engatillado final.

Para el proceso de optimización se requiere una simulación inicial, con la cual se verifican las trayectorias, la deformación de la ceja y la coherencia en los resultados numéricos. Los parámetros utilizados para la simulación inicial incluyen una altura de ceja de 10.0 mm, un radio de roldana de 25.0 mm, un radio de doblez de 1.5 mm y un ángulo de pre-engatillado de 30.0°.

Los resultados obtenidos en esta primera simulación del proceso se presentan en las Figuras 2b y 2c. Las magnitudes obtenidas para los parámetros de calidad del proceso son arruga máxima de 1.15 mm, enrollamiento máximo de la pestaña de 0.13 y desenrollamiento mínimo de 0.05 mm.

Los parámetros de enrollamiento, desenrollamiento y arruga máxima se obtuvieron directamente de las Figuras 2b y 2c. El enrollamiento, desenrollamiento se mide a partir de la línea de doblado ideal del borde engatillado del panel exterior, mientras que la arruga es el valor máximo medido desde la superficie inferior del panel exterior hasta la superficie superior de la pestaña engatillada menos el espesor ideal de engatillado (2.7 mm). De los resultados presentados en esta sección, es posible determinar que el proceso de simulación propuesto es apropiado para representar el engatillado de chapa por roldana. Sin embargo, las magnitudes de los parámetros de arruga, enrollamiento y desenrollamiento de pestaña con las condiciones iniciales de simulación presentan desviaciones considerables. La magnitud de la arruga para las condiciones iniciales de simulación es de 1.15 mm, tomando en consideración el espesor ideal de engatillado (2.7 mm); mientras que, el enrollamiento y desenrollamiento de pestaña presentan 0.13 y 0.05 mm de desviación, respectivamente, con respecto a la posición ideal del borde de engatillado (ver Figura 1c). Por lo anterior, un proceso de optimización es requerido, en función de mejorar la calidad del engatillado.

2.3. TEORÍA DEL PROCESO DE OPTIMIZACIÓN

El módulo DesignXplorer®, incluido en la interfaz gráfica de ANSYS Workbench®, utiliza la técnica de DOE. En estas técnicas se localizan puntos de muestreo, de tal manera que los parámetros aleatorios de entrada sean explorados de la manera más eficiente, o en su defecto, se pueda obtener la información requerida con el mínimo de puntos de muestreo. De manera predeterminada, este módulo de optimización utiliza un DOE el cual combina un diseño con punto central (con puntos mínimos, máximos y centrales a lo largo del eje de los parámetros de entrada), y puntos determinados por un diseño factorial fraccionado. Para un número de parámetros de entrada menor a 5, el programa utiliza únicamente un diseño con punto central; a partir de 5 parámetros de entrada o más, se combina el diseño con punto central y el diseño factorial fraccionado. Para el presente análisis, los parámetros de entrada utilizados fueron 3 (radio de la roldana, ángulo de pre-engatillado y radio del doblez), por lo que los puntos de diseño resultantes son 15. A partir de los puntos de diseño determinados, el módulo de optimización de ANSYS® utiliza técnicas estadísticas para la optimización del proceso. La Tabla 2 muestra los 15 puntos de diseño realizados a partir del DOE, así también los parámetros de calidad del proceso de engatillado obtenidos numéricamente.

3. RESULTADOS

La Figura 3a muestra los puntos de diseño correspondientes a la arruga generada, en función del radio de la roldana y el radio del doblez. Diferentes puntos de diseño se obtuvieron para los parámetros de calidad del proceso (arruga, enrollamiento y desenrollamiento de pestaña), en función de las combinaciones de los parámetros de entrada (radio del doblez, radio de la roldana y ángulo de pre-engatillado). A partir de la distribución de los puntos de diseño, se aproxima una superficie de respuesta implementando el método de interpolación Kriging [31].

La superficie de respuesta para el parámetro de calidad de arruga (Figura 3b), se generó a partir de los puntos de diseño de la Figura 3a. Múltiples superficies de respuesta, similares a la Figura 3b, se generaron en función de las combinaciones de los parámetros de entrada.

Los resultados de los 15 puntos de diseño generados en el DOE, se ajustan a ecuaciones que describen los parámetros de calidad del proceso (arruga, enrollamiento y desenrollamiento de pestaña)

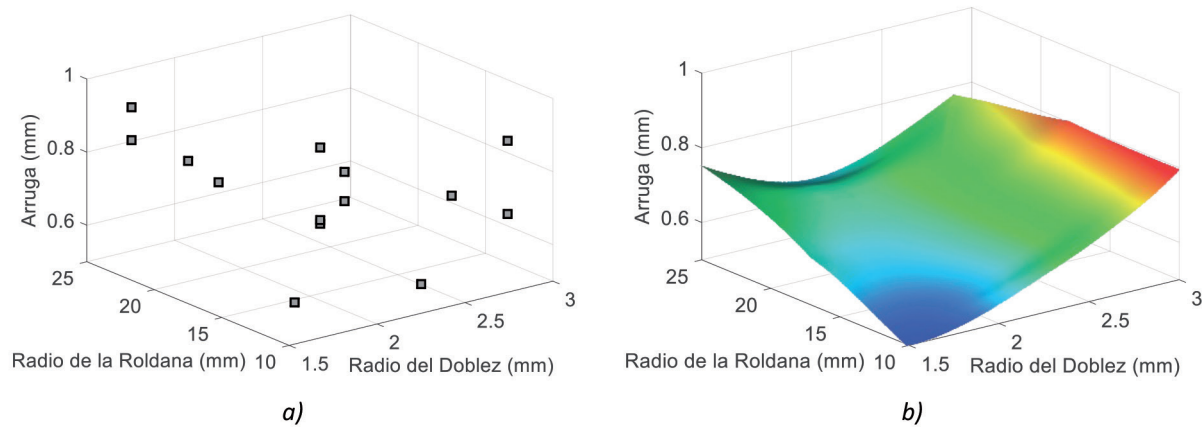


Fig. 3: Resultados del DOE para el parámetro de calidad arruga: a) Puntos de Diseño, b) Superficie de Respuesta

en función de los parámetros de entrada considerados (radio del doblez, ángulo de pre-engatillado y radio de la roldana), ecuaciones (5) a (7). Para ello, se usa el método de mínimos cuadrados para ajustar los puntos de diseño a tres polinomios, que incluyen las interacciones entre los parámetros del proceso. Las ecuaciones obtenidas tienen coeficientes de correlación de 0.97 para la arruga, 0.98 para enrollamiento y 0.99 para desenrollamiento de pestaña.

Las ecuaciones descriptivas de los parámetros de calidad en función de los parámetros de entrada considerados son las siguientes:

$$Z_1 = -0.00001 + 0.50986x - 0.05693(90 + y) - 0.00046x^2 - 0.00340x(90 + y) + 0.00050(90 + y)^2 \quad (5)$$

$$+ 1.85633w + 0.21867w^2 - 0.13192wx - 0.02002w(90 + y) + 0.00085wx(90 + y)$$

$$Z_2 = -0.00013 - 0.31659x + 0.05910(90 + y) + 0.01112x^2 - 0.00062x(90 + y) - 0.00024(90 + y)^2 \quad (6)$$

$$- 2.98743w + 0.12281w^2 - 0.18839wx + 0.00031w^2x - 0.00015w^2(90 + y) - 0.00549wx^2$$

$$+ 0.00007w(90 + y)^2 + 0.00008wx(90 + y)$$

$$Z_3 = 0.00001 - 0.00029x + 0.01919y + 0.00190x^2 - 0.00065x(90 + y) - 0.00008(90 + y)^2 \quad (7)$$

$$- 1.23873w - 0.70480w^2 + 0.06022wx - 0.00353w^2x + 0.00596w^2(90 + y) - 0.00118wx^2$$

$$+ 0.00001w(90 + y)^2 + 0.00002wx(90 + y)$$

donde z_1 representa el parámetro de arruga; z_2 , el parámetro de enrollamiento de pestaña; z_3 , el desenrollamiento de pestaña; w es el radio del doblez; x es el radio de la roldana; y es el ángulo de pre-engatillado.

Una vez que se obtienen las superficies de respuesta y las ecuaciones descriptivas, es necesario establecer los objetivos y restricciones sobre los cuales se realizará el proceso de optimización. En este trabajo, el objetivo fue minimizar las ecuaciones (5) a (7), implementando las restricciones descritas en (8):

$$\begin{aligned} 1.5 \text{ mm} &\leq w \leq 3.0 \text{ mm} \\ 10.0 \text{ mm} &\leq x \leq 25.0 \text{ mm} \\ 30^\circ &\leq y \leq 60^\circ \end{aligned} \quad (8)$$

Con los objetivos y restricciones descritas en las ecuaciones (5) a (8), el optimizador usa el método de Optimización Dirigida por Objetivos (GDO por sus siglas en inglés) para la solución del problema. En la optimización, se evalúan 1000 puntos sobre las superficies de respuesta generadas. A partir de las evaluaciones se eligen 3 candidatos, los cuales cumplen de mejor manera los

objetivos y restricciones de la optimización multiobjetivos implementada. Los candidatos óptimos para el proceso de engatillado se muestran en la Tabla 3, en conjunto con los parámetros del caso inicial.

Para el proceso de optimización implementado, la altura de la ceja se mantuvo constante en 10 mm, al considerar que dicho parámetro tendrá un efecto menos significativo que el resto. Esto debido a que, en engatillado en un plano, las trayectorias recorridas por la roldana serán lineales, por lo que no existirán variaciones en la trayectoria que puedan afectar al proceso en función de la altura de la ceja. Los resultados del proceso de engatillado,

considerando los candidatos óptimos determinados, se presentan en la Figura 4.

La Figura 4 muestra los resultados obtenidos de la simulación del proceso de engatillado utilizando los valores de radio de la roldana, radio del doblez y ángulo de pre-engatillado, generados por el proceso de optimización. El valor de enrollamiento y desenrollamiento de pestaña, obtenidos usando tanto las condiciones iniciales como los candidatos óptimos se presentan en las Figuras 4a y 4b. Por otro lado, los resultados para la arruga son mostrados en la Figura 4c.

De los resultados de la Figura 4a, se puede apreciar que el candidato 1 genera un enrollamiento negativo, el cual causa una deformación en la lámina interna, misma que experimentalmente rompería la lámina y demandaría un gran esfuerzo de los motores del robot. Por lo anterior, aun cuando los valores de desenrollamiento y arruga son aceptables, el candidato 1 es descartado en función de proteger al manipulador. El candidato 2 genera el menor enrollamiento (positivo) y la menor arruga en la chapa, comparándolo con los candidatos 1 y 3, por lo que a pesar de generar el valor más alto de desenrollamiento, fue seleccionado como el candidato óptimo.

En función del análisis de resultados se puede determinar que, utilizando una roldana de aproximadamente 10.18 mm de radio, con un ángulo de pre-engatillado de 33.90°, un radio de doblez de chapa de 1.78 mm y una altura de ceja de 10 mm, generará un engatillado óptimo, dentro del rango de valores establecidos para los parámetros de entrada. En base a los resultados numéricos ob-

tenidos, se plantea un experimento que considere los parámetros del caso inicial y óptimo, mismo que se describe en la siguiente sección.

Condiciones	Radio del doblez [mm]	Ángulo de Pre-Engatillado [°]	Radio de la Roldana [mm]
Iniciales	1.50	30.00	25.00
Candidato 1	1.50	30.01	10.01
Candidato 2	1.78	33.90	10.18
Candidato 3	1.64	37.91	10.35

Tabla 3: Parámetros óptimos para el proceso de engatillado

Aluminio 6011 con un espesor de 0.9 mm. La Figura 5b muestra los dos herramientales de engatillado utilizados en este trabajo, la roldana inicial montada en el herramientaal rojo a la izquierda y la roldana óptima acoplada al herramientaal gris de la derecha.

El sistema experimental tiene una mesa de trabajo de soporte para el engatillado, fabricada en acero estructural, la cual fue rectificadada en la parte superior (Figura 5c). Dicha mesa se utiliza como superficie de engatillado, ya que tiene las mismas dimensiones y forma que el panel exterior. Finalmente, la sujeción de la base del engatillado, así como de los paneles interior y exterior, se lleva a cabo utilizando diferentes tipos de dispositivos mecánicos como prensas, pernos, soleras, etc. Los resultados del proceso de engatillado, implementando los parámetros iniciales y los valores del candidato 2 de la Tabla 3, se presentan en las figuras 5d y 5e.

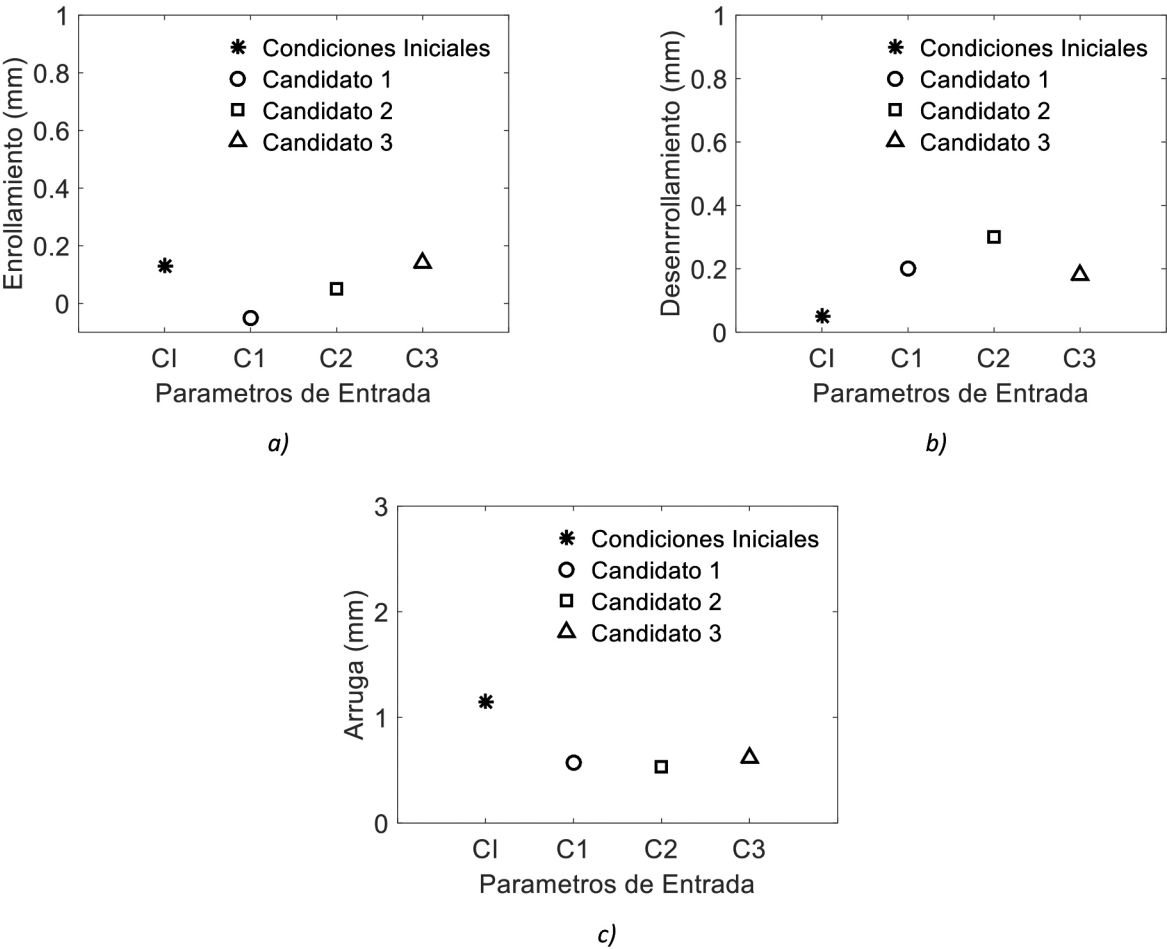


Fig. 4: Resultados de la simulación del proceso de engatillado, a) enrollamiento, b) desenrollamiento y c) arruga, implementando los parámetros de los candidatos óptimos

3.1. VALIDACIÓN CON SISTEMA MECÁNICO

Para la validación de los resultados numéricos, se llevaron a cabo pruebas experimentales de engatillado lineal. Los parámetros de engatillado, se determinaron a partir de los resultados de la simulación, tomando los valores del candidato 2 como óptimos. Posteriormente, se compararon con los resultados del engatillado con las condiciones iniciales, el cual se consideró como un caso no óptimo.

El sistema mecánico utilizado para las pruebas experimentales, consiste en un manipulador Nachi SRA210 de 6 grados de libertad y 210 Kg de capacidad de carga. El manipulador se encarga de posicionar y orientar la roldana a través de múltiples trayectorias (ver Figura 5a) con el fin de deformar plásticamente la ceja para generar el engatillado. Los paneles interior y exterior son de

El engatillado de la Figura 5d se llevó a cabo con los parámetros de entrada iniciales, mientras que para la Figura 5e se utilizaron los parámetros del candidato 2. De los resultados experimentales obtenidos, es evidente la disminución de la arruga al utilizar los parámetros óptimos obtenidos en la simulación. Finalmente, la Figura 5f muestra un comparativo entre los perfiles de engatillado simulados y las mediciones experimentales. Los valores del perfil para el caso óptimo experimental se ajustan adecuadamente al perfil de simulación óptimo, y de manera similar para los perfiles no óptimos. De estos resultados se puede apreciar una buena correspondencia entre los perfiles numéricos y experimentales; sin embargo, los perfiles para los casos no óptimos muestran una desviación considerable con respecto a los perfiles óptimos.

4. CONCLUSIONES

En el presente trabajo se describe la metodología implementada para la optimización paramétrica del proceso de engatillado por roldana. Los parámetros de evaluación propuestos fueron el diámetro de la roldana, el ángulo de entrada de la roldana para el pre-engatillado y el radio del doblé inicial con el fin de minimizar los parámetros de calidad como son el enrollamiento y desenrollamiento de la pestaña y la formación de arrugas.

El efecto de los parámetros de evaluación propuestos sobre los parámetros de calidad del engatillado fue determinado a partir de un DOE con punto central. Para dicho DOE se tomaron en cuenta 15 puntos de diseño, mismos que se evaluaron numéricamente y se ajustaron a una superficie de respuesta usando el método Kriging. A partir de la superficie de respuesta obtenida se obtuvieron las ecuaciones descriptivas, así como las restricciones consideradas para la optimización del engatillado lineal.

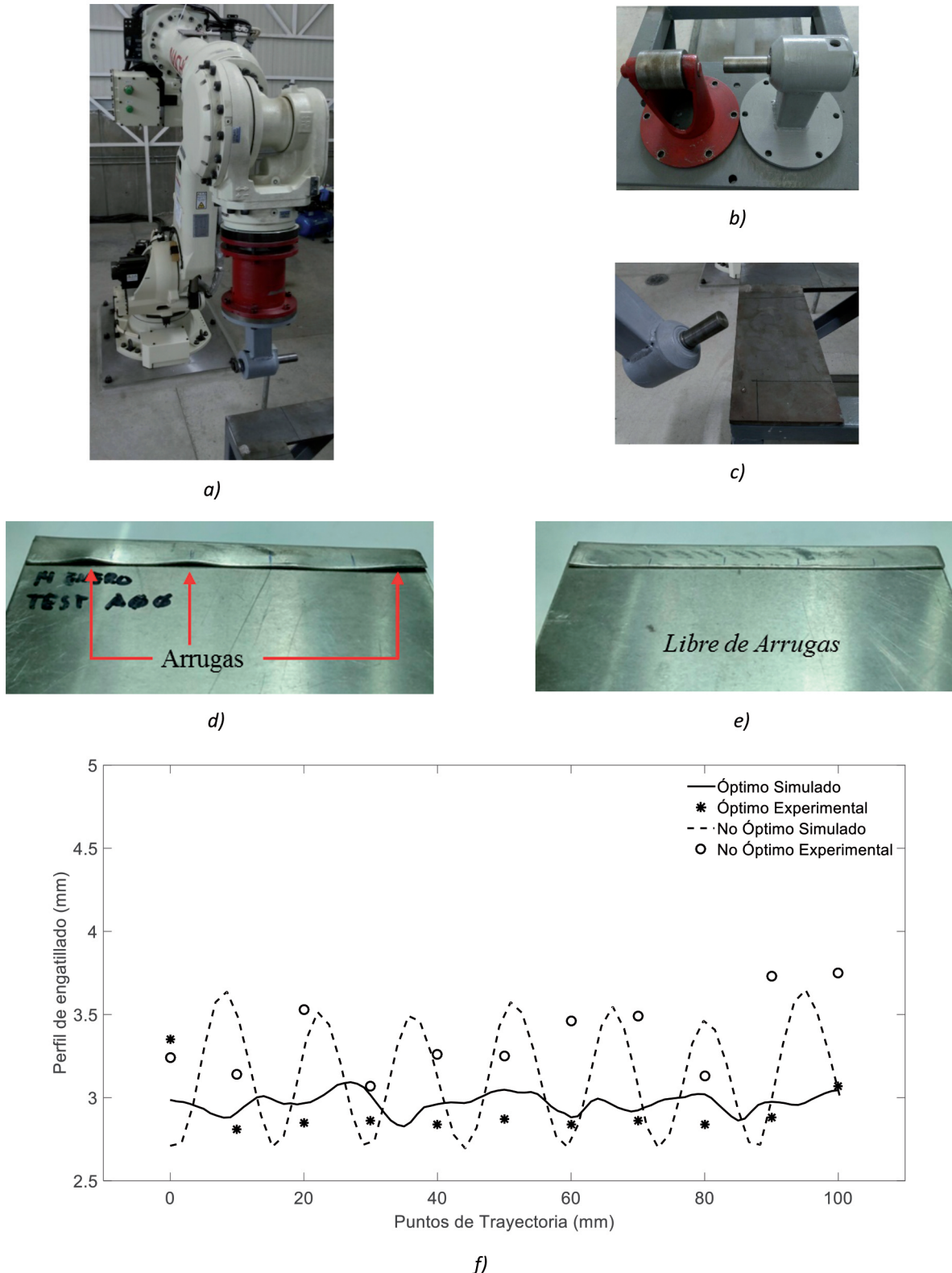


Fig. 5: Sistema y resultados experimentales, a) vista del manipulador; b) herramientas de engatillado (inicial – izquierda / óptimo – derecha); c) superficie de engatillado; engatillado experimental con trayectoria lineal d) roldana de 25.00 mm de radio (no óptimo), e) roldana de 10.18 mm de radio (óptimo); y f) perfiles de engatillado, numéricos y experimentales, obtenidos

Del proceso de optimización usando el método GDO se obtuvieron diversos candidatos óptimos, los mismos que fueron evaluados en función de los parámetros de calidad generados para determinar un caso óptimo para la etapa experimental de engatillado por roldana. En función del análisis de los resultados numéricos se determinó que el proceso de engatillado óptimo, bajo las condiciones analizadas, se puede llevar a cabo utilizando una roldana de aproximadamente 10.18 mm de radio, con un ángulo de pre-engatillado de 33.90°, un radio de doblez de chapa de 1.78 mm y una altura de ceja de 10 mm.

A partir de la optimización numérica y la caracterización del material a utilizar fue posible determinar la factibilidad del proceso de engatillado estudiado. De esta manera, se diseñó y fabricó el banco de pruebas experimental para la implementación práctica del engatillado por roldana. Con el sistema desarrollado, se llevaron a cabo múltiples experimentos para validar los resultados de las simulaciones, usando el caso de referencia (considerado no óptimo), así como los parámetros determinados en el proceso de optimización.

De los resultados experimentales se puede observar una congruencia entre los resultados experimentales del caso óptimo y la predicción de su simulación. Adicionalmente, existe una mejoría considerable, respecto al caso no óptimo, en los parámetros de calidad (enrollamiento y desenrollamiento de la pestaña y arruga) al utilizar los parámetros óptimos determinados en simulación. Finalmente, de los resultados generales obtenidos durante el desarrollo de esta investigación, es posible determinar la factibilidad del análisis numérico implementado para la optimización del proceso de engatillado por roldana, así como de otros procesos de manufactura.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Le Maoût N., Thuillier, S., & Manach, P. Y. (2009). "Aluminum alloy damage evolution for different strain paths—Application to hemming process". *Engineering Fracture Mechanics*, June 2009. Vol. 76-9. p.1202-1214. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfractmech.2009.01.018>
- [2] Firat M. "Computer aided analysis and design of sheet metal forming processes: Part I—The finite element modeling concepts". *Materials & Design*, March 2006. Vol. 28-4. p.1298-1303. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2006.01.026>
- [3] Kubli W, Reissner J. "Optimization of sheet-metal forming processes using the special-purpose program AUTOFORM". *Journal of Materials Processing Technology*, March 1995. Vol. 50-1. p.292-305. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0924-0136\(94\)01390-M](http://dx.doi.org/10.1016/0924-0136(94)01390-M)
- [4] Wifi AS, Abdelmaguid TF, El-Ghandour AI. "A review of the optimization techniques applied to the deep drawing process". *Proceedings 37th International Conference on Computers and Industrial Engineering Alexandria, Egypt*. October 2007.
- [5] Bahloul R. "Optimisation of process parameters in flanging operation in order to minimise stresses and Lemaitre's damage". *Materials & Design*, January 2011. Vol. 32-1. p.108-120. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2010.06.028>
- [6] Gantar G, Pepelnjak T, Kuzman K. "Optimization of sheet metal forming processes by the use of numerical simulations". *Journal of Materials Processing Technology*, December 2002. Vol. 130. p.54-59. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00786-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00786-0)
- [7] Zhang G, Hao H, Wu X, et al. "An experimental investigation of curved surface-straight edge hemming". *Journal of Manufacturing Processes*, 2000. Vol. 2-4. p.241-246. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S1526-6125\(00\)70025-9](http://dx.doi.org/10.1016/S1526-6125(00)70025-9)
- [8] Livatyali H, Mūderrisoğlu A, Ahmetoğlu MA, et al. "Improvement of hem quality by optimizing flanging and pre-hemming operations using computer aided die design". *Journal of Materials Processing Technology*, January 2000. Vol. 98-1. p.41-52. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(99\)00304-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(99)00304-0)
- [9] Sigvant M, Mattiasson K. "FE-simulation of Hemming in the Automotive Industry". Doctoral dissertation, Chalmers University of Technology, 2001.
- [10] Lin G, Iyer K, Hu SJ, et al. "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*, June 2005. Vol. 219-10. p.711-722. DOI: <http://dx.doi.org/10.1243/095440505X32661>
- [11] Burchitz I, Fritsche D, Grundmann G, et al. "Efficient planning and numerical analysis of industrial hemming processes". *Proceedings 8th International Conference and Workshop on numerical simulation of 3D sheet metal forming processes (NUMISHEET 2011)*, August 2011. p.243-250. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.3623617>
- [12] Lin JG, Zhou GR, Wang JQ, et al. "FEA-Simulation of Automobile Sheet Metal Hemming Process". *Applied Mechanics and Materials*, August 2014. Vol. 602-605. p. 86-89. DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.602-605.86>
- [13] Hönlle S, Liewald M. "Experimental investigation of energy savings during table-top hemming of aluminum alloys". *Key Engineering Materials*, May 2014. Vol. 611-612. p. 947-954. DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.611-612.947>
- [14] Lin JG, Wang EW, Zhou GR. "Hemming Process Simulation of Table-Top Hemming Machine". *Applied Mechanics and Materials*, September 2014. Vol. 644-650. p. 2177-2180. DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.644-650.2177>
- [15] Ceretti E, Attanasio A, Fiorentino A, et al. "Sheet Hemming with Rolling Tools: Analysis and Optimization of the Part Quality". *Key Engineering Materials*, July 2007. Vol. 344. p.357-364. DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.344.357>
- [16] Thuillier S, Le Maoût N, Manach PY, et al. "Numerical simulation of the roll hemming process". *Journal of Materials Processing Technology*, March 2008. Vol. 198-1. p.226-233. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.07.004>
- [17] Hu X, Zhao Y, Huang S, et al. "Numerical analysis of the roller hemming process". *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, September 2012. Vol. 62-5. p.543-550. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-011-3822-4>
- [18] Cacique BS, Capilla G, Aguilera NI, et al. "Metodología para el análisis del proceso de engargolado por rodillos en una probeta especializada". *Memorias del XIX Congreso Internacional Anual de la SOMIM*, 2013.
- [19] Neugebauer R, Drossel WG, Rössinger M, et al. "Roller Hemming Simulation: State of the Art and Application Limits". *Key Engineering Materials*, May 2014. Vol. 611. p. 1062-1070. DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.611-612.1062>
- [20] Limón PA, Pérez R, Aguilera E, et al. "Diseño de experimentos en el engargolado por rodillo de un modelo rectilíneo". *Avances de la Ingeniería Mecánica en Manufactura y Materiales*, 2014. ISBN 978-607-96746-4-9.
- [21] Hu X, Zhao Y, Huang S, et al. "Numerical analysis of the roller hemming process". *The Journal of Advanced Manufacturing Technology*, September 2012. Vol.62-5. p.543-5500 DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00170-011-3822-4>
- [22] Muderrisoglu A, Murata M, Ahmetoglu MA, et al. "Bending, flanging, and hemming of aluminum sheet—an experimental study". *Journal of Materials Processing Technology*, May 1996. Vol. 59-1. p.10-17. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0924-0136\(96\)02281-9](http://dx.doi.org/10.1016/0924-0136(96)02281-9)
- [23] Jonkers B. *Simulation of the Robot Roller Hemming process*. Master's Thesis, Universiteit Twente. 2006.
- [24] Hallquist JQ. "LS-DYNA Keyword User's Manual. Volume I, Version 971". Livermore Software Technology Company, Livermore, CA. 2006.
- [25] Hallquist JQ. "LS-DYNA Keyword User's Manual. Volume II, Material Models, Version 971". Livermore Software Technology Company, Livermore, CA. 2006.
- [26] Manual, L.D.K.U.S. Version R7.0. Livermore Software Technology Corporation. Livermore, CA. 2013.
- [27] Banabic D. "Sheet metal forming processes: constitutive modelling and numerical simulation". Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010. DOI: 10.1007/978-3-540-88113-1
- [28] Diosdado de la Peña JA, Prieto Juárez MA, Fuentes Castañeda P, et al. "Optimización del modelo de material Barlat de 3 parámetros con curvas experimentales de aleación de aluminio". *Acta Universitaria*, November 2016, Vol. 26-6. p.35-43. DOI: <http://dx.doi.org/10.15174/au.2016.1134>
- [29] Barlat F, Lian J. "Plastic behavior and stretchability of sheet metals. Part I: A yield function for orthotropic sheets under plane stress conditions". *International Journal of Plasticity*, 1989, Vol. 5. p.51-66. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0749-6419\(89\)90019-3](http://dx.doi.org/10.1016/0749-6419(89)90019-3)
- [30] Davis F, Sackey MN, Andrews A, et al. "Realistic friction coefficient model between a rolling cylindrical element and a deformable flat surface". *Tribology International*, May 2011. Vol. 109. p.252-257. DOI: 10.1016/j.triboint.2016.12.047.
- [31] Simpson TW, Mauery TM, Korte JJ, et al. "Kriging models for global approximation in simulation-based multidisciplinary design optimization". *AIAA Journal*, December 2001. Vol. 39-12. p.2233-2241. DOI: <http://dx.doi.org/10.2514/2.1234>