



Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riit.com.mx

Análisis para validación de parámetros del proceso de conformación del retén candelero para embrague (Formulación matemática, Simulación y Evaluación Experimental)

Analysis for validation of parameter of the conformation process of sleeve retainer assembly for clutch (Mathematical Formulation, Simulation and Experimental Evaluation)

Rodríguez-Sánchez de la Barquera, I.^a, Pérez-Herrera, E.^b, Mendoza-Razo, J.A.^a

^a CIATEQ, Eje 126 No. 225, Zona Industrial, San Luis Potosí, S.L.P., México.

^b Facultad de Ingeniería UASLP, Manuel Nava no.8, Zona Universitaria, San Luis Potosí, S.L.P., México.
ivanrodriguez@eaton.com; edu_perez@outlook.com; amrazo1@yahoo.com.mx

Innovación tecnológica. Modelación para optimización de parámetros de proceso de fabricación, para mejora de tolerancias de ensamble.

Área de aplicación industrial. Análisis de proceso de modelado de metales de la industria automotriz, y con ello aumento de C_{pk} , reducción de costos y número de prioridad de riesgo.

Recibido: 25 agosto 2020

Aceptado: 18 abril 2022

Abstract

This paper summarizes the results on the mathematical model and simulation the manufacturing process of the retainer (candelero) used to fasten the parts in clutch's assembly. The model includes the variation of the penetration of the tool that generates the expansion of the diameter for its subsequent assembly. The finite element method was applied to validate the fitting performance of the level of penetration of the tool that will form the expansion to perform the assembly was evaluated using the parameters of: force, friction coefficients and geometries involved in the flaring process. The advantages of using the new displacement found with the mathematical model validated with FEM simulations and experimental tests are shorter manufacturing times and costs. Experimental analysis of the variations of the displacement of tool we carried out in order to validate that the control parameters of manufacturing process are improved. The results of the mathematical model, simulations and tests are presented and discussed in this work, finally the performance of the displacement ranges of the forming tool found are validated by means of experimental tests and with this, they corroborate that the design change is feasible.

Keywords: Finite element method, clutch's, mathematical model, forming, optimization.

Resumen

En este trabajo se propone un modelo matemático para simular el proceso de fabricación del retén candelero utilizado para la sujeción de piezas en el ensamble de un embrague. El modelo incluye la variación de la penetración de la herramienta de modelado que genera la expansión del diámetro para su posterior ensamble. Se aplicó el método del elemento finito para validar el desempeño del ajuste en el nivel de penetración de la herramienta que conformará la expansión para poder realizar el ensamble usando los parámetros de: fuerza, coeficientes de fricción y geometrías involucrados en el proceso de abocardado. Los beneficios del nuevo ajuste encontrado con el modelo matemático validado con las simulaciones FEM y pruebas experimentales son: menor tiempo de producción y disminución en el costo de fabricación. Los resultados del desempeño de los rangos del desplazamiento de la herramienta conformadora encontrados son validados por medio de pruebas experimentales, con este cambio mejoran los parámetros de control del proceso de fabricación y se corrobora que el cambio de diseño es factible.

Palabras clave: Método del elemento finito, embrague, modelo matemático, modelado, optimización.

1. Introducción

El término de formado de extremo de tubo es comúnmente usado para describir la producción de una forma simple o compleja en el extremo del tubo, es decir una amplia variedad de procesos como son expansión, reducción, inversión, abocardado y doblado.

El formato de extremo de tubos de pared delgada mediante expansión y la reducción se logra presionando con punzón cónico en el extremo del tubo, y luego se retrae el punzón, este retrocede después de lograr la forma deseada, ver Figura 1 [1].

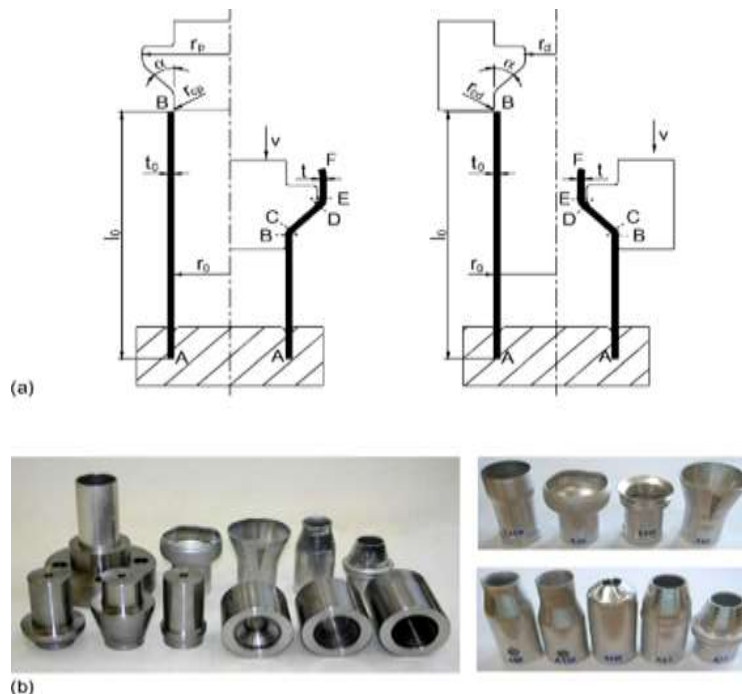


Figura 1. Expansión y reducción de espesor de pared de tubo usando un punzón (a) representación esquemática de ambos procesos, (b) ejemplos de partes buenas y malas resultado del proceso de formado de tubo [13].

Tradicionalmente los procesos de manufactura han sido evaluados por medio de ensayos de prueba y error. Las desventajas de este método tradicional son los altos costos y los grandes tiempos de evaluación que este requiere, además de la incertidumbre respecto al fenómeno físico que este implica. Actualmente, el rápido crecimiento de los sistemas de computación ha conducido al uso de métodos matemáticos poderosos capaces de simular fenómenos físicos tales como el comportamiento de una pieza sometida a cargas para su conformación. El propósito de la creación de un modelo matemático es para entender la física del proceso de abocardado y con ello encontrar los parámetros que influyen para asegurar el ensamble de la pieza candelero, además se hará uso del método del elemento finito (FEM) ya que es una de las técnicas numéricas más comunes para simular el comportamiento de fenómenos físicos. Debido a que el FEM está basado en dividir el campo de análisis en un número finito de elementos muy pequeños, se pueden realizar análisis muy complicados. Hoy en día hay una gran variedad de software de FEM (por ejemplo: Ansys®, Comsol®, Abaqus®, etc.) conocidos como software de ingeniería asistida por computadora (CAE). La metodología general para simular o analizar un componente en este tipo de software es crear un modelo 3D de la pieza, subdividir el modelo en pequeños elementos finitos, aplicar cargas y condiciones de frontera y finalmente resolver el problema. Algunos trabajos de investigación que se han reportado y que utilizaron el FEM para realizar validaciones de los procesos de manufactura existentes y nuevas propuestas, muestran que el FEM es un método efectivo y de gran importancia en la ingeniería, [2]-[5].

En este artículo se presenta un estudio para realizar la evaluación de factibilidad de un ajuste del herramental que permite la deformación en el retén utilizado para la

sujeción de componentes en el ensamble de embrague. El objetivo del ajuste en el proceso de manufactura del componente retén candelero, con el fin de poder reducir los tiempos de ensamble y reducción de costos. Esta investigación está enfocada en evaluar el incremento o decremento de la expansión ocasionada en la pieza, ya que esto es vital para asegurar el ensamble final. Se consideran los diversos parámetros: fuerza empleada, coeficientes de fricción y la distancia que recorre el herramental la cual es el que más influencia tiene en la deformación necesaria para asegurar el ensamble del retén candelero. Para el análisis de los retenes bajo estas condiciones se realiza un modelo matemático que permita definir el comportamiento de la deformación obtenida mediante los parámetros del proceso el cual será validado utilizando simulaciones FEM con la ayuda del software Ansys® y comprobando los resultados de manera experimental ajustando el parámetro encontrado en la máquina que genera el abocardado de los tubos.

2. Materiales y equipos

Debido a que se requiere de un ajuste constante en el herramental y la máquina para poder controlar los parámetros y conseguir que la tolerancia del diámetro del retén candelero se mantenga dentro del rango de 50.800 mm hasta 51.562 mm para un correcto ensamble de las piezas finales. Para el estudio realizado es necesario conocer los componentes que forman parte del proceso de abocardado, como son: el retén candelero (1), los rodillos conformadores (2) y soporte inferior (3), los cuales se muestran en la Figura 2.

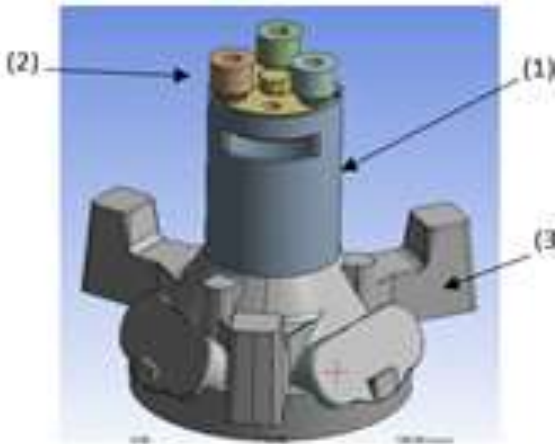


Figura 2. Modelo del ensamble Retén Candelero para embrague analizado.

La metodología por usar consiste en el planteamiento de una formulación matemática basada en los parámetros del proceso de abocardado, posteriormente haciendo uso del modelo CAD mostrado en la

Figura 2, se analizará el comportamiento de la pieza a conformar aplicando diversos desplazamientos en cada simulación y comparar los resultados de cada modelo analizando su comportamiento. Para ello se simularán las condiciones mencionadas usando como herramienta principal el software de elemento finito ANSYS®. En la Tabla 1 se muestran las propiedades mecánicas de los materiales utilizados en las simulaciones, siendo para el retén candelero usado el aluminio ANSI A380, para los rodillos conformadores se usa un acero para herramienta SAE A2, y para el soporte inferior número de parte 110c255 se utiliza el acero SAE 1020, se considera realizar corridas en planta para validar las simulaciones realizadas y obtener así las deformaciones deseadas en este caso de estudio.

Tabla 1. Propiedades mecánicas de los materiales usados en las simulaciones FEM.

Material	Módulo de elasticidad (1×10^9 N/m ²)	Resistencia a la fluencia (1×10^6 N/m ²)	Resistencia a la tensión (1×10^6 N/m ²)	Módulo de Poisson
Aluminio A380	71	159	324	0.33
Acero A2	207	400	800	0.29
Acero 1020	205	350	420	0.29

Para la etapa de evaluación experimental se usa la prensa UNITIZED, la cual fue diseñada para ensamblar la carcasa estampada con seis resortes de compresión, ensamble retén-candelero, ensamble de collarín y los bloques de embarque. En la Figura 3 se muestran: sistema de rodillos conformadores (1), placa inferior de la bancada (2), placa soporte de nido con movimiento vertical (3).

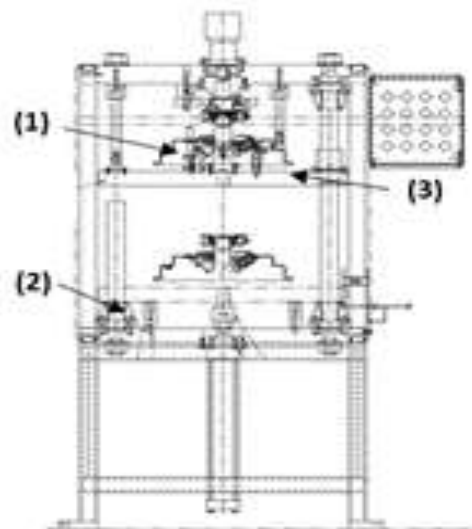


Figura 3. Ensamble prensa UNITIZED.

Finalmente se verificarán las medidas de las piezas deformadas por medio de un vernier Mitutoyo serie 500, ver Figura 4.



Figura 4. Vernier Mitutoyo serie 500.

3. Métodos analíticos y experimentales

3.1 Formulación Matemática

Diferentes enfoques resumidos y discutidos por Marré (2009) son propuestos para calcular la presión de interfaz residual entre el tubo y el espesor del tubo. Jawad et al. (1987) propusieron un enfoque para uniones de placa de tubo a tubo que relaciona la extracción fuerza a la presión residual de la interfaz como: [6]-[7].

$$P_o = \frac{F_{expansión}}{2\mu\pi R_o L_e} \quad (\text{Ec. 1.1})$$

Donde:

P_o es la presión residual entre tubo y espesor del tubo a deformar, $F_{expansión}$ fuerza requerida para la expansión del diámetro del tubo, L_e longitud en la interacción de la zona de deformación y R_o radio exterior del tubo.

Debido a que el proceso usado en el conformado de la pieza retén candelero incluye a tres rodillos formadores que tienen la conformación que se observa en la Figura 5, se plantea una formulación que ayude a determinar la apertura del diámetro a partir del desplazamiento vertical de los rodillos y que permitan ir generando el diámetro nominal dentro de la tolerancia deseada.

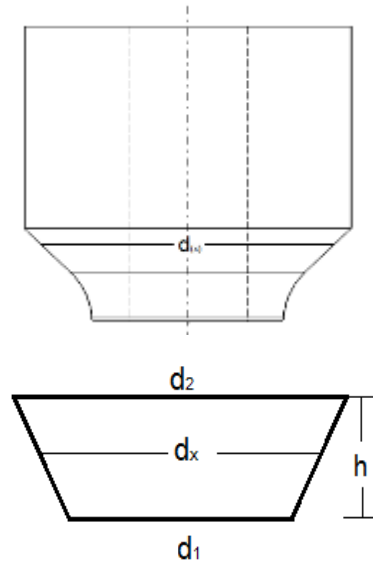


Figura 5. Representación de la variación de diámetro del candelero deformado.

En este trabajo a diferencia del de [6] y de [7] se desarrolla el modelo, tomando en cuenta que el rodillo formador tiene una variación de diámetro en la zona que entra en contacto con el diámetro interno de la pieza retén candelero que se debe deformar, la Figura 5 muestra las variables usadas para determinar esta variación y la expresión utilizada para el cambio de diámetro del rodillo conformador es:

$$d_{(x)} = d_1 + \frac{d_2 - d_1}{h} x \quad (\text{Ec. 1.2})$$

Las suposiciones tomadas en este análisis son:

Tomando como base la formulación de la ecuación 1.1, donde usando el valor p_o como la presión generada entre el tubo y la herramienta, F_a es la fuerza generada por la máquina de conformado, d es el diámetro del rodillo conformador, y se realiza solo un cambio de parámetro de L a h , siendo este último parámetro el valor del desplazamiento de la herramienta. Sabiendo que el diámetro es variable con respecto a su altura, la ecuación anterior se modifica a:

$$p_o = \frac{F_a}{\mu\pi} \int_0^h \frac{1}{\left(d_1 + \frac{d_2 - d_1}{h} x\right)} dx \quad (\text{Ec. 1.3})$$

Igualando esta presión al valor S_y de resistencia a la fluencia del material, el valor usado de la formulación se usará como un 80% del límite de resistencia a la fluencia como se ha usado en bibliografías usadas en el tema (Yokell, 1992) [8], con lo cual se despeja la fuerza para igualarla en la fuerza que deformará a la pieza:

$$S_y(0.8) = \frac{F_a}{\mu\pi} \left[\frac{1}{d_1 h + \frac{d_2 - d_1}{2} (h)} \right] \quad (\text{Ec. 1.4})$$

Sabiendo que podemos igualar la presión al aplastamiento generado en la pieza a deformar retén candelero, siendo L_2 la longitud del cilindro deformado, el aplastamiento quedara en función de la siguiente expresión:

$$p_k = \frac{F_a}{\mu\pi d L_2} \quad (\text{Ec. 1.5})$$

Despejando la fuerza e igualándola a la fuerza en los rodillos se obtiene el aplastamiento en función de los parámetros geométricos del rodillo formador y de su material, así como de la geometría a deformar:

$$p_k = \frac{S_y(0.8) \left[d_1 h + \frac{d_2 - d_1}{2} (h) \right]}{d L_2} \quad (\text{Ec. 1.6})$$

El incremento de diámetro se puede obtener a partir de conocimiento de este aplastamiento conocido y del módulo de elasticidad del material E:

$$\Delta d = \frac{p_k d}{E} \quad (\text{Ec. 1.7})$$

En términos de los parámetros conocidos y sabiendo que son tres los rodillos formadores el modelo matemático obtenido quedarán la siguiente expresión:

$$\Delta d = \frac{S_y(0.8) \left[d_1 h_1 + \frac{d_2 - d_1}{2} (h_1) \right]}{E L_2} \quad (\text{Ec. 1.8})$$

La ecuación 1.8 nos permite definir el incremento del diámetro de la pieza candelero a partir de las dimensiones de los rodillos conformadores y del desplazamiento de estos definidos por la distancia h , con ello se realizaron las evaluaciones en los diferentes desplazamientos obteniendo los resultados mostrados en la tabla 2.

Tabla 2. Tabla de valores de incremento de diámetro en las posiciones del herramental en la formulación matemática.

Desplazamiento (mm)	Deformación (mm)	Aumento de diámetro (mm)
2	0.747	50.785
3	0.957	50.995
3.5	1.236	51.274
3.6	1.246	51.284
3.7	1.255	51.293
3.8	1.302	51.340
3.85	1.312	51.350
3.9	1.283	51.321
4	1.417	51.455
5	1.547	52.585

3.2 Análisis FEM

El método de elementos finitos es un método numérico cuya aplicación sirve para calcular comportamientos de estructuras de ingeniería. Puede emplearse para obtener deformaciones, esfuerzos, comportamientos procesos de manufactura, entre otros fenómenos; en los cuales la geometría de la

estructura o la complejidad de las cargas aplicadas, hacen imposible obtener una solución analítica del problema. En este método, una estructura compleja se divide en muchos y pequeños bloques simples, llamados elementos finitos, de los cuales puede describirse su conducta (de un elemento individual) con un set simple de ecuaciones, así como también un set de elementos puede unirse para construir una estructura compleja, de esta forma se describe la conducta de los elementos individuales en un set relativamente grande de ecuaciones, que representan la conducta de la estructura completa. Existen libros que describen el Método de Elementos Finitos en cuanto ejemplos específicos de ANSYS, el software utilizado en esta investigación [8]-[9].

$$[K]\{q\} = \{f\} \quad (\text{Ec. 1.8})$$

$$[C]\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = \{f\} \quad (\text{Ec. 1.9})$$

$$[M]\{\ddot{q}\} + [C]\{\dot{q}\} + [K]\{q\} = \{f\} \quad (\text{Ec. 2.0})$$

Donde:

$[K]$: Matriz de rigidez,

$[M]$: Matriz de masa,

$[C]$: Matriz de amortiguamiento,

$\{q\}$: vector de desplazamientos nodales,

$\{\dot{q}\}$: vector de velocidades nodales,

$\{\ddot{q}\}$: vector de aceleraciones nodales,

$\{f\}$: vector de fuerzas externas.

En general el Método de Elementos Finitos el cual utiliza la formulación anterior, deberá resolver el sistema de ecuaciones resultante $Kq = f$ para calcular las variables incógnitas (desplazamientos de todos los nodos de la malla) q utilizando uno cualquiera de los métodos conocidos para la solución de ecuaciones algebraicas simultaneas lineales. Establecimiento de las condiciones de frontera para el desarrollo del estudio numérico será necesario un modelado de la deformación del retén candelero debido a la aplicación de la fuerza por medio del proceso de abocardado, el cual permite ensamblar la carcasa del embrague, entre las principales consideraciones que se tomaron en cuenta son los grados de libertad y la modelación de las condiciones de frontera a las cuales está sujeta la pieza.

En el caso del análisis de la expansión del tubo las consideraciones tomadas fueron:

- El soporte y los rodillos de abocardado están considerados como un ensamble el cual fue fijado en todas direcciones (x, y, z) y las rotaciones en (x, z) para impedir cualquier desplazamiento en la base y solo permitir el giro en la dirección de y del soporte con el fin de obtener una simulación más real. En la Figura 6 se muestra esta restricción.
- La carga es un desplazamiento que se propone para determinar el porcentaje de deformación y es el dato que se verá modificado, esta carga se incrementa gradualmente durante la simulación.

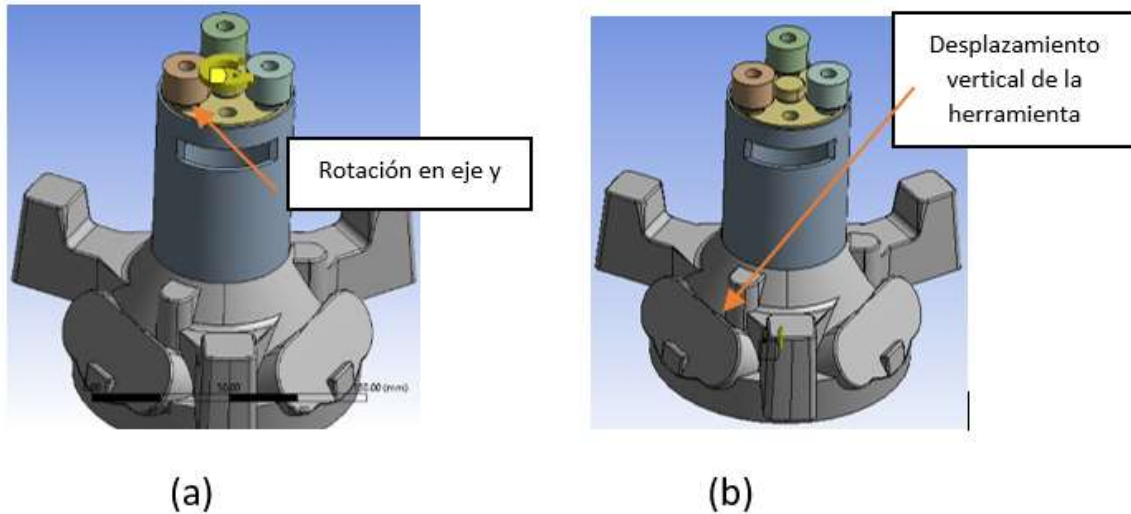


Figura 6. Grados de libertad y cargas aplicadas en el ensamble.

- Además de las restricciones de movimiento mostradas en la Figura 6, se realizaron las siguientes restricciones de contactos entre las piezas, para evitar desplazamientos entre ellas durante la simulación, ver la Tabla 3 y Figura 7.

Tabla 3. Tipos de conexiones usadas en la simulación.

Conexión rígida	Soporte de rodillos-rodillo1
Conexión rígida	Soporte de rodillos-rodillo2
Conexión rígida	Soporte de rodillos-rodillo3
Conexión de revolución	Soporte de rodillos-rodillo1
Conexión de revolución	Soporte de rodillos-rodillo2
Conexión de revolución	Soporte de rodillos-rodillo3
Conexión contacto	110c255-c309c12
Conexión de fricción	110c255- rodillo1
Conexión de fricción	110c255- rodillo2
Conexión de fricción	110c255- rodillo3

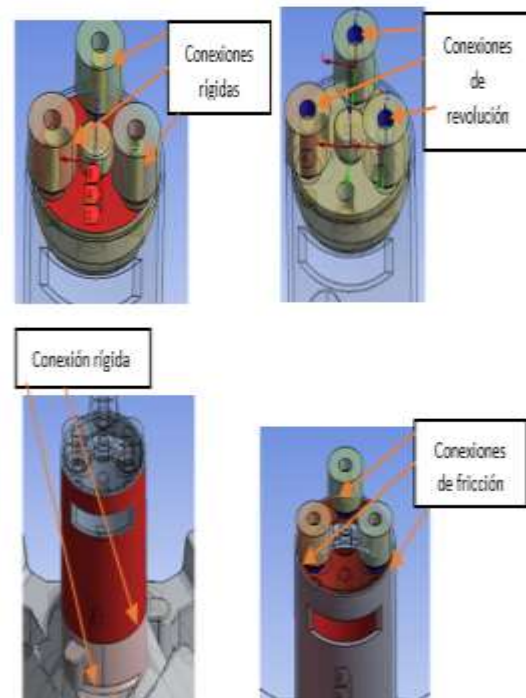


Figura 7. Restricciones de ensamble.

Se trabajó en este modelo con elementos de tipo tetraedro en todas las piezas, con un mallado ligero en el soporte y se realizó un refinamiento en las zonas de contacto de los rodillos conformadores con la pieza principal con un mallado medio. Lo anterior con la finalidad de que los resultados fueran lo más preciso posibles y convergieran lo más posible. Dichos mallados fueron realizados

con el propósito que se cumplan los parámetros de asimetría y ortogonalidad para tener una solución adecuada del modelo. La malla creada para los soportes se muestra en la Figura 8.

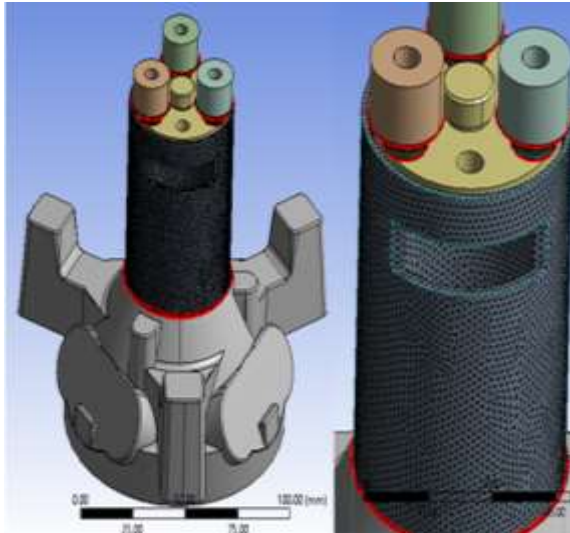


Figura 8. Mallado de los modelos del retén candelero y herramienta de deformados.

Los resultados obtenidos en el análisis al modificar el desplazamiento vertical se presentan en la Tabla 4. En esta tabla se presentan los valores máximos del diámetro generado en la pieza candelero para cada uno de los desplazamientos generados de penetración de la herramienta. La Figura 9 muestra las deformaciones debidas a los desplazamientos en el candelero. En esta figura se señala mediante un círculo la localización de estas deformaciones máximas.

Tabla 4. Tabla de valores de incremento de diámetro en las distintas simulaciones.

Desplazamiento (mm)	Deformación (mm)	Aumento de diámetro (mm)
2	1.596E-08	50.038
3	0.0366	50.111
3.5	0.4017	50.841
3.6	0.4763	50.991
3.7	0.5506	51.139
3.8	0.5974	51.233
3.85	0.6341	51.306
3.9	0.6707	51.379
4	0.7681	51.574
5	1.4589	52.956



Figura 9. Gráfica de deformaciones de la pieza 110c255.

3.3 Análisis experimental

El problema que aborda el presente proyecto es la variación que se presentaba en los valores de los diámetros en el proceso de abocardado dentro de la prensa UNITIZED, por lo cual se planteó el cambiar varios parámetros, uno de los cuales fue el desplazamiento de la pieza que es llevada al sistema de deformado, que se lleva a cabo por un sistema hidráulico, este se realiza por medio de unos rodillos como se observa en la Figura 10.



Figura 10. Sistema de abocardado con rodillos deformadores.

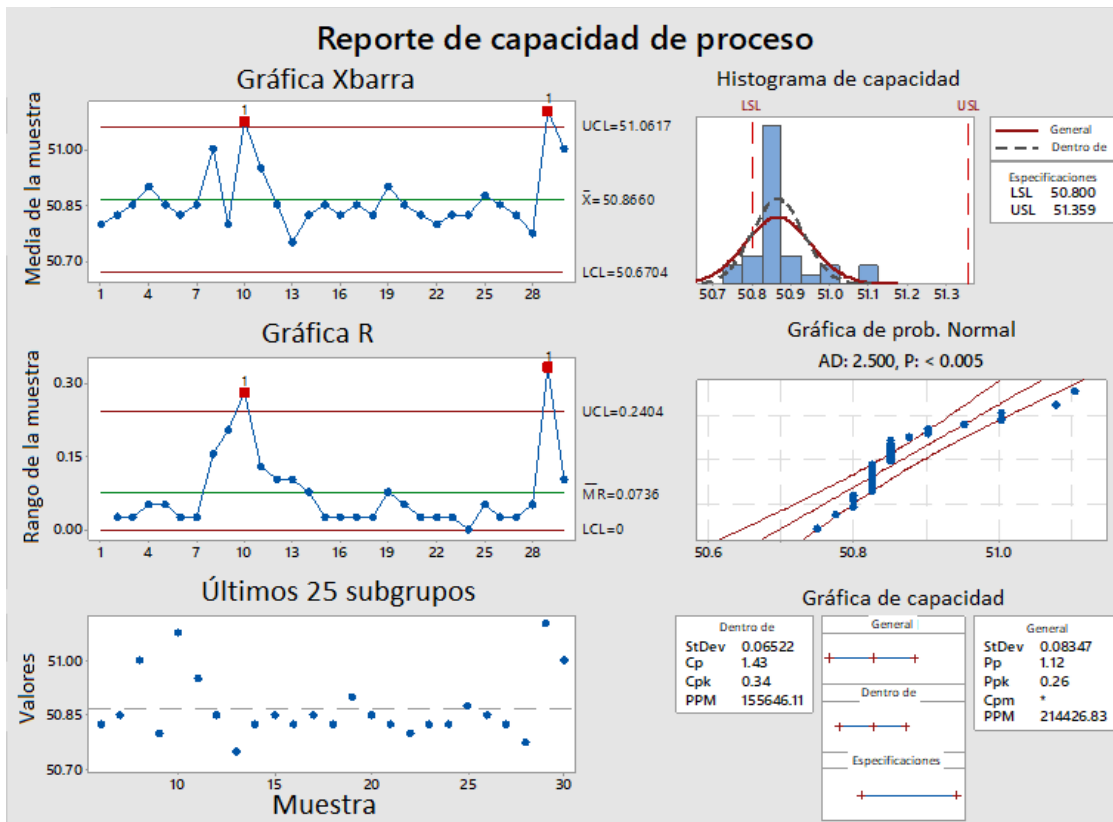


Figura 11. Gráficas de variación del proceso de abocardado del retén.

En la Figura 11 se presenta el resultado de un muestreo de 30 piezas basado en el teorema del límite central donde dice que si de una población infinita se toma una muestra lo suficientemente grande el promedio de la variable de interés en dicha muestra tiende a ser igual al promedio de la población, se considera muestra grande $n \geq 30$ [7], se observa un proceso con mucha variación, con el Cp de 1.43 demuestra que el 0.0027% de

las piezas están fuera de especificación, y el Cpk del 0.34 dice que el proceso requiere especial atención de inmediato, el proceso no es estable, no es preciso, basado en los requerimientos del cliente no cumple con los estándares de la normatividad ISO9001/IAFT16949, por lo cual se tiene que medir cada pieza en un 100% para garantizar que se procesan las piezas dentro de las especificaciones.

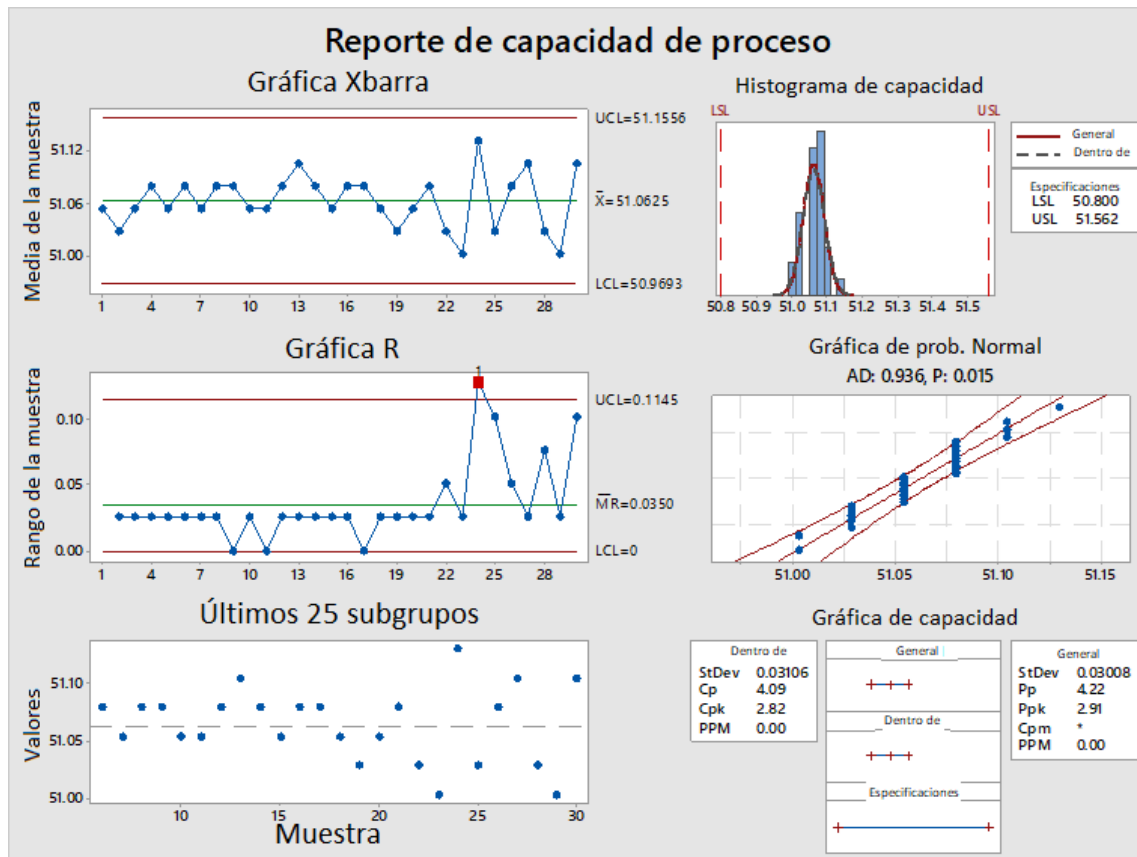


Figura 12. Gráficas de variación del proceso de abocardado del retén candelero después del control de altura.

Una vez implementado los controles de altura en el proceso a través de los topes de rolado, controlando las alturas de estos, se monitorea la producción de los días siguientes, con los datos obtenidos se realiza el reporte de capacidad del proceso que se observa en la Figura 12, dando un resultado radical en el comportamiento del proceso alcanzando un Cpk de 2.82, los datos son normales, ya no hay puntos fuera de control, lo cual nos lleva a un 99% de producto conforme, esto

sobrepasa el requerimiento de cliente de un Cpk de 1.33, y permite que se vuelva un proceso estable, lo cual garantiza y previene un accidente que puede ser causado por el desensamble del producto y se reduce el desperdicio generado por piezas fuera de especificación.

4. Discusión de resultados

4.1 Comparación de modelo matemático y Simulación FEM

Aun cuando el modelo matemático utilizado para predecir el comportamiento no contempla el factor de endurecimiento que se tiene en un proceso de modelado, se observa que los desplazamientos desde 3.6 mm hasta

3.9 mm son los que nos permiten estar dentro de esta zona de tolerancia y así poder asegurar un ensamble dentro de especificaciones, ya que el valor de desplazamiento de 3.6 mm permite alcanzar un diámetro de 50.991 mm y el desplazamiento de 3.9 mm genera un diámetro de 51.379 mm, esto se puede observar claramente en la Figura 13.

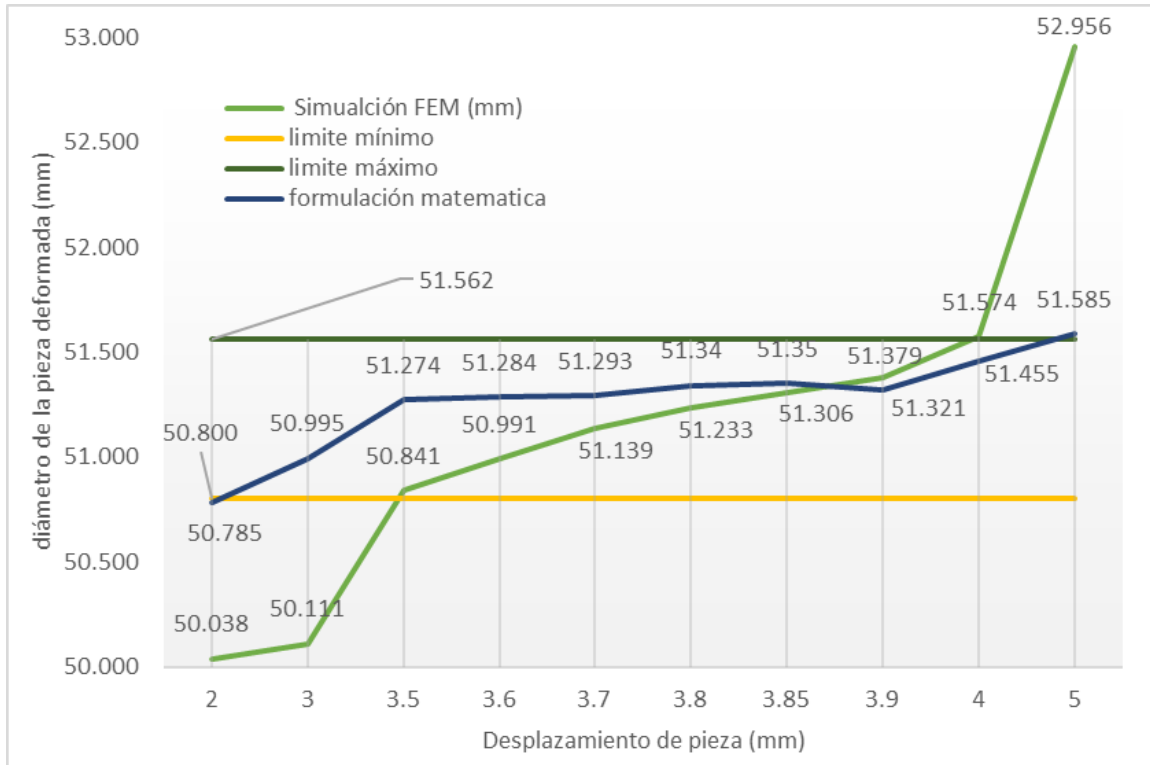


Figura 13. Comportamiento de las deformaciones con respecto a la deformación deseada.

Se observa que en los resultados experimentales ya tomando en cuenta el control de altura de 3.9 mm que es el valor máximo encontrado, se presenta una

variación menor con respecto al tiempo, y por ello todo el producto está dentro de especificación, los valores están cercanos a la media, ver la Figura 14.

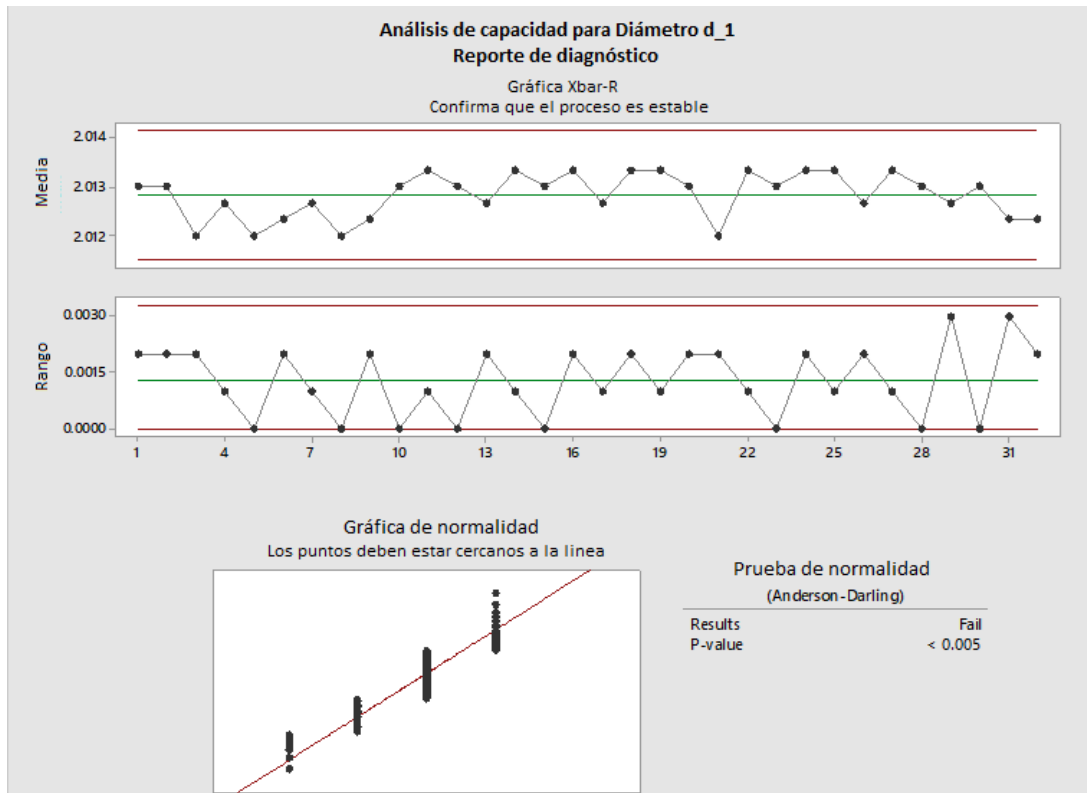


Figura 14. Variación de las piezas dentro de un control de altura.

En la Figura 15 podemos observar las piezas antes de la deformación (a) y la pieza ya después del proceso de abocardado (b), ya con un control de altura lo cual permite que las piezas permanezcan dentro de los parámetros permisibles.

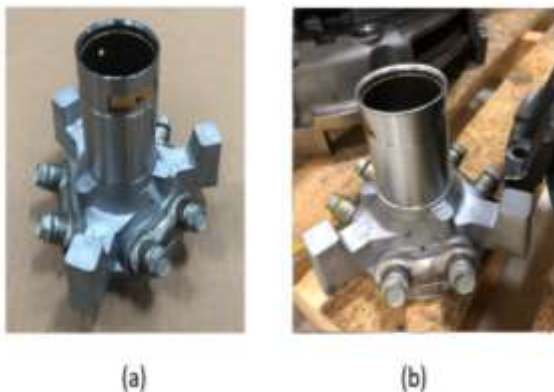


Figura 15. Piezas antes y después de la deformación.

5. Conclusiones

En este trabajo se presenta un caso de validación comparativa para encontrar el rango de altura necesaria para poder deformar

un retén candelero para embrague. Para realizar la validación del modelo matemático fue necesario obtener las propiedades mecánicas de los materiales; los cuales son las reportadas en la literatura especializada y mostradas en la Tabla 1. Se realizaron también las simulaciones tomando en cuenta variación del coeficiente de fricción de 0.4 a 0.6 que son los más comunes entre acero y aluminio, pero se observó que solo habría un cambio de 0.01% en los resultados. Utilizando estos datos de los materiales se realiza una comparativa entre los valores de desplazamientos obtenidos en el modelo matemático y las simulaciones por FEM, además de realizar una comprobación de que este resultado permite el control de los parámetros del proceso en los resultados experimentales. Los resultados obtenidos en modelo matemático con los resultados de las simulaciones por FEM presentan un error de un 1.1%, por lo cual se concluye que representa de manera adecuado el proceso.

Se especifica que las alturas recomendadas para realizar el proceso de deformado deben estar dentro de los límites de los 3.5 mm y 3.9 mm para asegurar una apertura del diámetro en el rango adecuado para el ensamble posterior, con lo cual llevando el control de esta altura en el proceso se pudo incrementar el Cpk hasta un valor de 2.82 que es superior a la propuesta inicial de 1.33 que era el parámetro a alcanzar, además se pudo reducir la prioridad de riesgo a un valor de 90, los cuales son parámetros dentro del proceso que ayudan a su control y mayor confiabilidad del mismo. Al haber contribuido a la mejora de los parámetros del proceso se consigue también una reducción de costos debido a que se tienen menor porcentaje de desperdicio de las piezas.

Como trabajo futuro se contempla la optimización del modelo matemático agregando el coeficiente de endurecimiento y una modificación en un diseño nuevo de los topes tomando en cuenta valores de cargas reales del ciclo de ensamble y de trabajo de los embragues. Para ello se considerarán la obtención de los valores de cargas físicas reales aplicadas al reten, además de verificar si realizando un precalentamiento del material ayuda dentro del proceso de conformación y así poder llevar a cabo una fidedigna optimización del modelo.

Referencias

1. M.L. Alves, B.P.P. Almeida, P.A.R. Rosa, P.A.F. Martins (2006) "End forming of thin-walled tubes". *Journal of Materials Processing Technology* 177 (2006) 183–187.
2. Jeff Thielman, Ping Ge, A Comparative Study of Optimal Design for an Inkjet Printer Tube With and Without Performance Variations, Proceedings of DETC'04 ASME 2004 Conference, Salt Lake City, Utah, USA.
3. Hosford, W., & M., R. (2011). *Metal forming mechanics & metallurgy*. (Cambridge, Ed.) Cambridge: The Edinburgh Building.
4. Daniel A. McAdams, Clive L. Dym, Modeling and Information in the Design Process, Proceedings of DETC'04 ASME 2004 Conference, Salt Lake City, Utah, USA.
5. Jeffrey W. Herrmann, Joyce Cooper, Satyandra K. Gupta, Caroline C. Hayes, Kosuke Ishii, David Kazmer, Peter A. Sandborn, William H. Wood, New Directions in Design for Manufacturing, Proceedings of DETC'04 ASME 2004 Conference, Salt Lake City, Utah, USA.
6. Marré, M., 2009. *Grundlagen der Prozessgestaltung für das Fügen durch Weiten mit Innenhochdruck*, PhD-Thesis.
7. Jawad, M.H., et al., 1987. Evaluation of tube-to-tubesheet junctions. *J. Press. Vessel Technol.* vol. 109, 19–26.
8. Yokell, S., 1992. Expanded, and welded-and-Expanded tube-to-tubesheet joints. *J. Press. Vessel Technol.* 114 (May).
9. O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor. "El Método de los Elementos Finitos". MacGraw-Hill Barcelona, CIMNE 1994.
10. Saeed Moaveni. *Finite Elements Análisis: Theory and application with ANSYS*". Upper Saddle River Prentice-Hall 1999.
11. William F. Hosford, Robert M. Caddell, 2011, "METAL FORMING: Mechanics and Metallurgy". Editorial Cambridge University press 4th Ed.
12. EATON CORPORATION., 2014. Unitizer sleeve roll assembly machine. X-Y Tool & Die Inc. S/O 18571-2004.
13. Kalpakjian & Schmid., 2017, "Manufacturing Processes for

- Engineering Materials; 6 th Edition (Pearson), ISBN 978-0134290550.
14. Chen, Tsung-Chia & Ceng, Wei-Kai. (2014). Experimental and Numerical Analysis of Stainless Steel Microtube in Flaring Process. *Mathematical Problems in Engineering*. 2014. 1-8. 10.1155/2014/856272.
 15. Wujiao Xu, Qiaoli Wang, Xue Zhou, Xiaobing Yang, (2014). Quantitative Design Methodology for Flat Ring Rolling Process. *Procedia Engineering*, Volume 81, Pages 280-285, ISSN 1877-7058.
 16. G. Zhou, L. Hua, D.S. Qian, 2011. 3D coupled thermo-mechanical FE analysis of roll size effects on the radial-axial ring rolling process. *Computational Materials Science*, 50, 911-924.
 17. V. Jenkoug, G. Hirt, M. Franzke, T. Zhang, 2012. Finite element analysis of the ring rolling process with integrated closed-loop control. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 61, 267-270.
 18. Stefan Guenther, Joachim Seitz, Gideon Schwich, Gerhard Hirt, 2017. Investigation of a composite ring rolling process considering bonding behaviour in FEM and experiment, *Procedia Engineering* Volume 207, Pages 1236-1241, ISSN 1877-7058.
 19. Jesus Rodriguez Franco, Alberto Isaac Pierdant Rodríguez, Elva Cristina Rodríguez Jiménez, 2016. *Estadística para la administración*, Pages 292, ISBN 978-607-744-490-9 2da Ed.
 20. David S. Moore 2005, *Estadística aplicada básica* 2ª ed, page 308, ISBN 84-95348-04-7
 21. Ortiz-Rivera, A., Carrera-Escobedo, J., García-Ruiz, M., Cruz- Domínguez, O., Diseño de una nueva herramienta de corte para brocas de perforación en Minería, *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica* Vol. 8, No. 48 Enero - Febrero 2021.
 22. A.H. Kheireddine and A.H. Ammouri and T. Lu and I.S. Jawahir and R.F. Hamade, 2013, An FEM Analysis with Experimental Validation to Study the Hardness of In-Process Cryogenically Cooled Drilled Holes in Mg AZ31b, *Procedia CIRP* volumen 8, Paggés 588-593, ISSN 2212-8271.
 23. López-Aguilar H.A, Gómez J, Morales-Castillo J., Pérez-Hernández A., Modelo CFD para la simulación de la combustión de combustibles alternativos en un horno rotatorio, *Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica* Vol. 9, No. 53 Noviembre – Diciembre 2021.