

Simulación del proceso de doblado de una lámina de acero inoxidable 316L Cold Simulation of the bending process of a 316L Cold stainless steel sheet

José G. Trujillo, José S. Arias, Juan P. Brazales, Mario P. Andrade

"Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE" "Escuela Técnica de la Fuerza Aérea" / Departamento de Seguridad y Defensa, Latacunga, Ecuador.

Correspondencia Autores: jgtrujillo1@espe.edu.ec, jbrazales@fae.mil.ec, mandrade@fae.mil.ec

Recibido: 18 de julio 2024, Publicado: 18 de diciembre 2024

Resumen— Este estudio consiste en establecer ciertos aspectos básicos necesarios para la fabricación de un producto o una parte del producto por medio de procesos de deformación plástica. El objetivo de este artículo será de diseñar y simular las condiciones técnicas de un proceso de doblado de una lámina de acero inoxidable 316L COLD, a partir de ciertas condiciones y datos iniciales básicos como: proceso, producto inicial, producto final y material. Además, se considera una deformación plástica del material a un volumen constante en donde se podrán verificar y detectar las variaciones de las dimensiones planificadas al inicio, su fuerza aplicada en el proceso de deformación, los criterios de estricción, radio mínimo de doblado y los esfuerzos generados en el proceso de doblado y estirado. Finalmente, se utilizará un software para simulación de deformaciones y análisis en 3D del flujo del proceso de manufactura en el material propuesto.

Palabras clave— Deformación plástica, doblado, plasticidad, conformado.

Abstract— This study consists of establishing certain basic aspects necessary for the manufacture of a product or a part of the product through plastic deformation processes. The objective of this paper will be to design and simulate the technical conditions of a bending process for a 316L COLD stainless Steel sheet, based on certain conditions and basic initial data such as: process, initial product, final product and material. In addition, a plastic deformation of the material at a constant volume is considered where variations in the dimensions planned at the beginning, the force applied in the deformation process, the necking criteria, minimum bending radius and the stresses can be verified and detected in the bending and stretching process. Finally, software will be used to simulate deformations and 3D analysis of the manufacturing process flow in the proposed material.

Keywords— Plastic deformation, bending, plasticity, conformed.

I INTRODUCCIÓN

El doblado de metales se define como la deformación de láminas alrededor de un determinado ángulo. Estos ángulos pueden ser clasificados como abiertos (si son mayores a 90 grados), cerrados (menores a 90°) o rectos. Durante la operación de doblado, las fibras externas del material están en tensión, mientras que las interiores se encuentran a compresión. Es importante acotar que el doblado no produce cambios significativos en el espesor de la lámina metálica [1].

Existen diferentes formas de doblado, las más comunes son: doblado entre dos formas y el doblado deslizante.



Figura 1: Dobrado entre formas

[2][3]. En el doblado deslizante, una placa presiona la lámina metálica a la matriz o dado mientras el punzón le ejerce una fuerza que la dobla alrededor del borde del dado. Este tipo de doblado está limitado para ángulos de 90°.

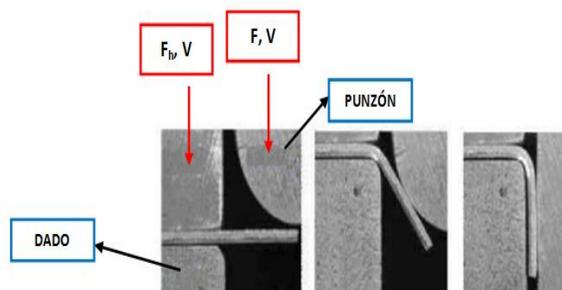


Figura 2: Doblado deslizante

Cuando se remueve la fuerza de doblado, la lámina intenta regenerarse gracias a una propiedad elástica de los metales conocida como memoria, restitución o recuperación. Esta propiedad no sólo se observa en láminas y placas planas, sino también en varillas, alambres y barras con cualquier perfil transversal.

[4].El acero 316L Cold es uno de los más comunes después del acero inoxidable tipo 304. Tiene buena resistencia a la corrosión en general, buena resistencia, dureza, maleabilidad y excelente soldabilidad.

Su composición incluye 2-3% de molibdeno lo que previene la aparición de la corrosión por picadura y mejora su resistencia a la misma. El acero 316L es una variante del 316 que tiene un contenido de carbono inferior, menor límite elástico y menor resistencia a la tracción.

[5].Los bajos contenidos de carbono presentes en el acero 316 L previenen la sensibilización (precipitación de carburos de cromo en los límites de grano) y por consiguiente, la corrosión intergranular. Es por esto, que el grado 316 L es ampliamente utilizado para soldar componentes de grueso espesor.

El acero 316 L es un material no magnético en condiciones de recocido. Sin embargo, puede llegar a adquirir un ligero magnetismo cuando es deformado en frío.

El tipo 316 L puede ser embutido, estampado, doblado y troquelado sin dificultad alguna. Como todos los inoxidables austeníticos, el acero 316 L tiende a endurecerse por el trabajo en frío. Por tal motivo, cuando es severamente deformado, un tratamiento de recocido posterior puede ser necesario en algunas ocasiones. La microestructura austenítica proporciona a este acero una muy buena resistencia, incluso a temperaturas criogénicas.

[6].Para servicio continuo a temperaturas elevadas el acero 316 L exhibe una buena resistencia a la oxidación hasta cerca de los 927 °C (1700 °F). En servicio intermitente, la temperatura máxima de exposición es alrededor de los 870°C (1600 °F).

El acero inoxidable tipo 316 L es fácilmente soldable por todas las técnicas convencionales de soldadura por fusión y resistencia (GTAW, TIG, GMAW, MIG, SAW), excepto con el gas oxiacetilénico. El grado 316 L generalmente es considerado a tener menor soldabilidad que los aceros 304 y 304 L. El elevado contenido de níquel de esta aleación requiere consideraciones especiales durante la soldadura con el fin de evitar el agrietamiento en caliente por la formación de ferrita en el depósito de soldadura.

[7].Este acero, tiene aplicaciones tales como:

- Intercambiadores de calor
- Condensadores
- Recipientes a presión
- Filtros
- Válvulas
- Bridas y conexiones
- Implantes médicos
- Aplicaciones marinas
- Equipos procesadores de alimentos
- Equipos procesadores de medicinas
- Utensilios de cocina

Su composición química, propiedades físicas y mecánicas y microestructura se presenta a continuación:

Tabla 1: Composición Química Acero Inoxidable 316L [9].

COMPOSICIÓN QUÍMICA (% EN PESO)	
ELEMENTO	AISI 316 L UNS S31603 ASTM A240
CARBONO	0,030 max.
MANGANESO	2,0 max.
FÓSFORO	0,045 max.
AZUFRE	0,030 max.
SILICIO	0,75 max.
CROMO	16,0 - 18,0
NÍQUEL	10,0 - 14,0
MOLIBDENO	2,00 - 3,00
NITRÓGENO	0,10 max.
COBRE	----
HIERRO	Balance

Tabla 2: Propiedades Físicas Acero Inoxidable 316L [9].

PROPIEDADES FÍSICAS (CONDICIONES DE RECOCIDO)	
PROPIEDAD	AISI 316 L UNS S31603 ASTM A240
Densidad g/cm3 (lb/in3)	8,0 (0,29)
Módulo elástico GPa (106 psi)	193 (28,0)
Resistencia eléctrica n m	740
Calor específico J/Kg*°K (Btu/lb*°F)	500 (0,12)
Conductividad térmica a 100°C W/m*°K (Btu/ft*h*°F)	16,2 (9,4)
Rango de fusión °C (°F)	1375 - 1400 (2500 - 2550)

Tabla 3: Propiedades Mecánicas Acero Inoxidable 316L [9].

PROPIEDADES MECÁNICAS (CONDICIONES DE RECOCIDO)	
PROPIEDAD	AISI 316 L UNS S31603 ASTM A240
Resistencia Máxima a la tensión ksi (MPa)	70(485) min
Límite Elástico o Esfuerzo de Fluencia al 0.2 %,ksi (MPa)	25 (170) min
Alargamiento, % a 2" (50,8% mm)	40,0 min
Dureza, Rockwell	B95 max
Constante de Hollomon k (MPa)	1200
Coefficiente de endurecimiento n	0,44

[9].El acero tipo 316 L presenta una estructura de grano austenítico uniformemente equiaxiado.

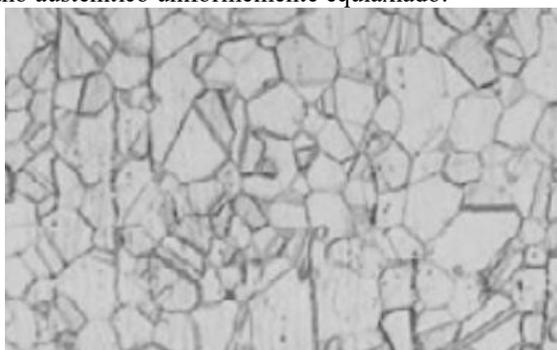


Figura 3: Microestructura austenítica Acero Inoxidable 316L

II MÉTODOS Y MATERIALES

FUERZA DE DOBLADO

[8].La fuerza de doblado está en función de la resistencia del material, la longitud L de la lámina, el espesor t de la lámina, y el tamaño W de la abertura del dado. Para un dado en V, se suele

aproximar la fuerza máxima de doblado, F_D , con la siguiente ecuación:

$$F_D = \frac{L \cdot t^2 \cdot S_{ut}}{W}$$

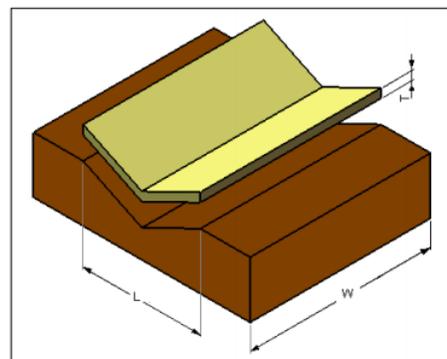


Figura 4: Cálculo de la Fuerza de doblado

Donde:

S_{ut} : Esfuerzo último de tensión (psi o Pa)

L: longitud de la lámina (pulg o mm)

t: espesor (pulg o mm)

W: luz entre apoyos o abertura del dado (pulg ó mm)

$$F_D = \frac{98,99 \cdot 2^2 \cdot 485}{75} = 2560,67067 \text{ N}$$

Tabla 4: Resultados de cálculo de fuerza de doblado

CÁLCULO DE LA FUERZA DE DOBLADO			
L (mm)	T(mm)	W(mm)	F _D (N)
98,995	2	75	2560,671

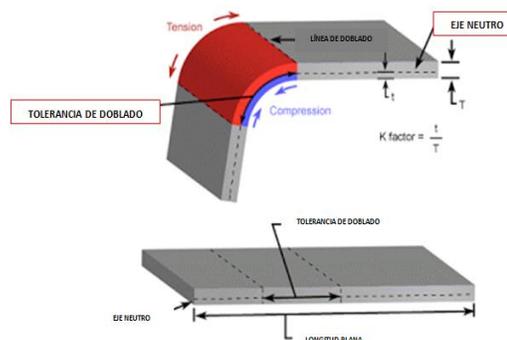


Figura 5: Tolerancia de doblado

TOLERANCIA DE DOBLADO

Si el radio del doblado es pequeño con respecto al espesor del material, el metal tiende a estirarse durante el doblado. Es importante poder estimar la magnitud del estirado que ocurre, de manera que la longitud de la parte final pueda coincidir con la dimensión que se requiere. El problema es determinar la longitud del eje neutro antes del doblado, para tomar en cuenta el estirado de la sección doblada final. Esta longitud se llama tolerancia de doblado y se puede determinar con la siguiente ecuación:

$$BA = 2 \cdot \pi \cdot \frac{A}{360} (R + k_{ba} \cdot t)$$

Donde:

BA: tolerancia de doblado (mm)

A: ángulo de doblado (°)

R: radio de doblado (mm)

t: espesor del material (mm)

K_{ba}: factor para estimar el estirado

Los siguientes valores de diseño que se recomiendan para K_{ba}:

si R < 2t , K_{ba} = 0.33; y

si R > 2t, K_{ba} = 0.50.

Estos valores de K_{ba} predicen que el estiramiento ocurre solamente si el radio de doblado es más pequeño en relación con el espesor de la lámina.

Aplicando la ecuación anterior en los radios de doblado, se tienen los siguientes resultados:

Tabla 5: Resultados de tolerancia de doblado

TOLERANCIA DE DOBLADO				
A (°)	R (mm)	t (mm)	K _{ba}	BA (mm)
45	3	2	0,33	2,880
90	5	2	0,50	9,425

LONGITUD INICIAL DE LA PIEZA.

Para calcular la longitud inicial de la pieza a doblar, se debe considerar las longitudes efectivas y las tolerancias en los puntos de doblado.

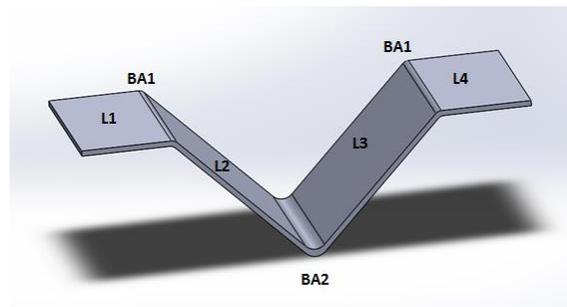


Figura 6: Longitud inicial de la pieza

De la figura anterior, se desprende que la longitud inicial de la pieza se define en este caso como:

$$Li = L1 + L2 + L3 + L4 + 2 \cdot BA1 + BA2$$

Tabla 6: Resultados de longitud inicial de la platina

LONGITUD INICIAL DE LA PIEZA						
L1 (mm)	L2 (mm)	L3 (mm)	L4 (mm)	BA1 (mm)	BA2(mm)	Li(mm)
35	70	70	35	2,880	9,425	225,184

RECUPERACIÓN ELÁSTICA O SPRINGBACK.

Cuando la fuerza de doblado se retira, la energía elástica permanece en la parte doblada haciendo que ésta recobre parcialmente su forma original. Esta recuperación elástica llamada recuperación elástica o springback y se define como el incremento del ángulo comprendido por la parte doblada en relación con el ángulo comprendido por la herramienta formadora después de que ésta se retira. Esto se puede expresar en la siguiente figura 7 y se expresa como:

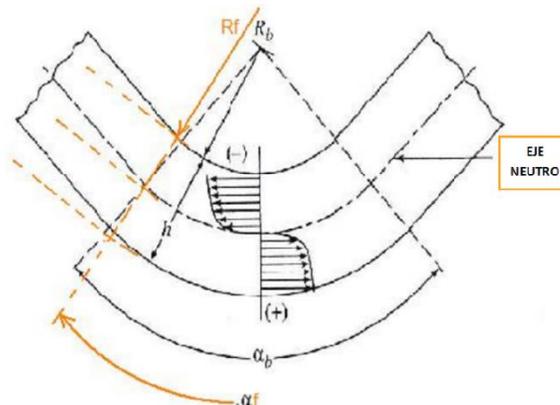


Figura 7: Relaciones de radios y ángulos en recuperación elástica

$$\frac{Rb}{Rf} = 1 - 3 \left(\frac{Rb \cdot Sy}{t \cdot E} \right) + 4 \left(\frac{Rb \cdot Sy}{t \cdot E} \right)^3$$

$$\alpha_f \left(R_f + \frac{t}{2} \right) = \alpha_b \left(R_b + \frac{t}{2} \right)$$

donde:

Rb: radio de doblado (mm)

Rf: radio de recuperación (mm)

t: espesor (mm)

Sy: esfuerzo de fluencia del material (MPa)

E: módulo de Young (MPa)

α_b : ángulo de doblado

α_f : ángulo de recuperación

Para los radios de curvatura de 3 y 5 mm, y los ángulos de 45° y 90° respectivamente, se tienen los siguientes resultados:

Tabla 7: Resultados de Springback

CÁLCULO DE LA RECUPERACIÓN ELÁSTICA O SPRINGBACK							
Rb(mm)	Sy(Mpa)	t (mm)	E (Mpa)	(Rb.Sy)/(t.E)	α_b (°)	Rf (mm)	α_f (°)
3	170	2	193000	0,001321	45	3,012	44,866
5	170	2	193000	0,002202	90	5,033	89,504

CRITERIO DE ESTRICCIÓN

Considerando la estricción, la deformación de la fibra extrema debe ser menor que la que produce estricción, por lo tanto:

$$e_t < e_u$$

Para la ley de potencia $\epsilon_u = n$

e_u y ϵ_u son las deformaciones en la estricción de ingeniería y real

$$\epsilon_u = \ln(e_u + 1)$$

$$e_t = \frac{1}{\frac{2 \cdot R_b}{t} + 1}$$

Tabla 8: Resultados de Cálculo del Criterio de estricción

CÁLCULO DEL CRITERIO DE ESTRICCIÓN						
Rb (mm)	t (mm)	2Rb/t	et	n	eu	CONDICIÓN
3	2	3	0,25	0,4	0,492	SI
5	2	5	0,17	0,4	0,492	SI

Para los dos radios de doblado, el valor de e_t es menos que e_u , por lo tanto si es posible realizar el proceso de doblado.

CÁLCULO DEL RADIO MÍNIMO DE DOBLADO

Considerando la fractura, el radio mínimo de doblado es:

$$R_b = t (1/2q) - 1 \quad \text{si } q < 0,2$$

$$R_b = t ((1-q)^2 / (2q-q^2)) \quad \text{si } q > 0,2$$

donde:

q: es la reducción del área proveniente del ensayo de tensión = 0,45 para aceros, por lo tanto la siguiente tabla muestra el valor del radio mínimo que se puede doblar.

Tabla 9: Resultados de Cálculo del radio mínimo de doblado

CÁLCULO DEL RADIO MÍNIMO DE DOBLADO				
t (mm)	q	(1-q)^2	2q-q^2	Rb min (mm)
2	0,45	0,303	0,7	0,867

CONSTRUCCIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN DEL PROCESO DE DOBLADO

La simulación de este proceso de doblado se realizó en un programa CAE que permite analizar el flujo tridimensional del proceso de doblado en la lámina de acero inoxidable 316 Cold. Este programa basado en el método de elementos finitos es una gran herramienta para predecir el flujo de deformaciones en el material de este trabajo investigativo.

Primero, se construyen las matrices y punzones en un software CAD. En base al siguiente esquema en donde se puede observar los herramientas utilizados para este proceso de doblado:

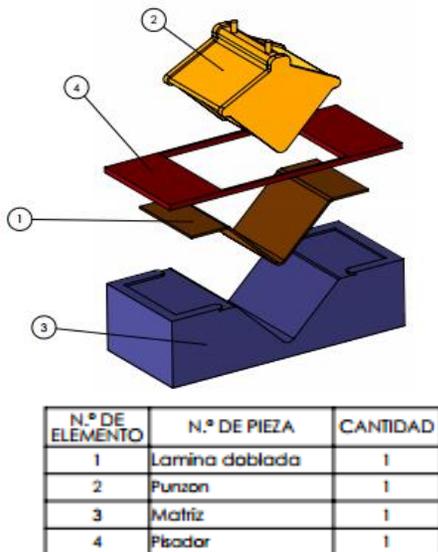


Figura 7: Herramental a utilizar en proceso de simulación

III. PRUEBAS Y RESULTADOS

En la siguiente Figura, se presenta la metodología a seguir para la simulación del proceso de doblado de una lámina de acero inoxidable 313 L Cold y se detalla a continuación:

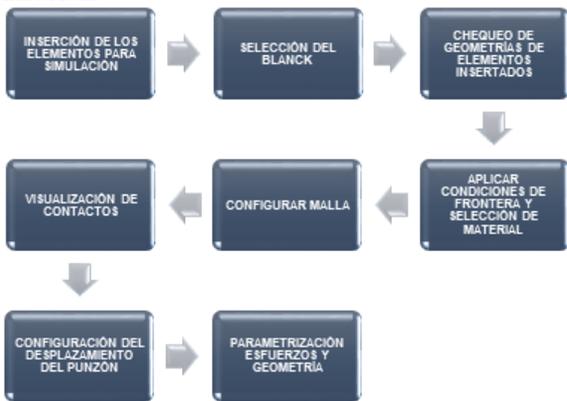


Figura 8 Metodología para simulación numérica

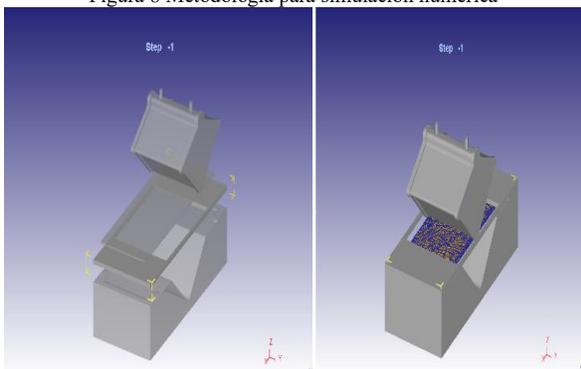


Figura 9 : Inserción de los elementos para simulación

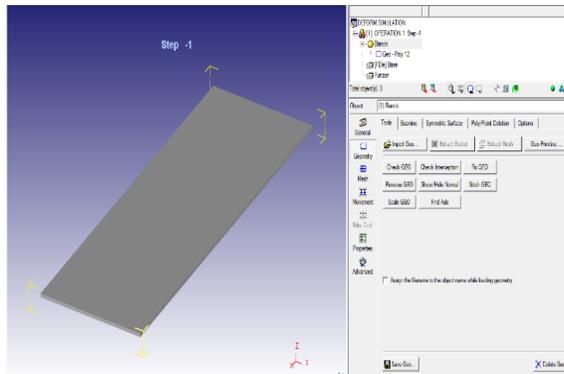


Figura 10 : Selección del Blank

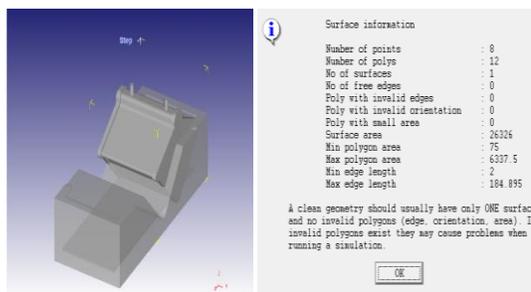


Figura 11 : Checking de los elementos insertados

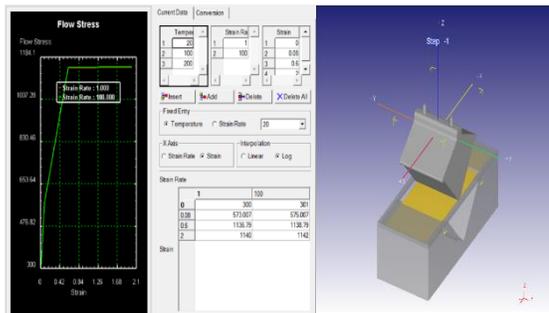


Figura 12 : Aplicación de condiciones de frontera y selección de material

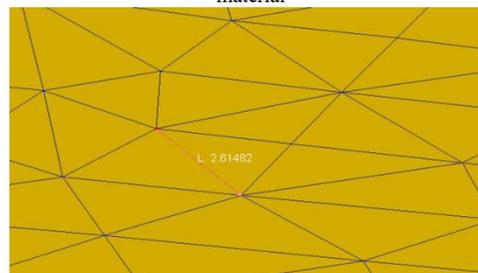


Figura 13 : Configuración de malla

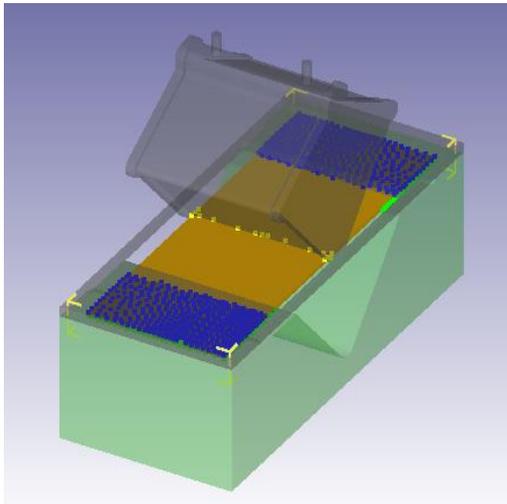


Figura 14 : Vizualización de contactos

Por medio de la simulación gráfica se puede observar cómo se deforma y cuánto descende el punzón con los parámetros configurados en el software, tales como: velocidad del punzón, fricción, interferencias entre sólidos, configuración de mallado, tiempo de simulación etc.

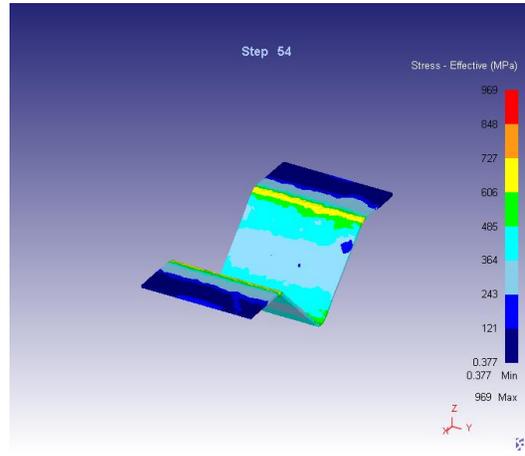


Figura 16 : Simulación de esfuerzos en proceso de doblado

Una vez terminado el procesado de la base de datos, se accede al post procesador para verificar las diferentes cargas que actúan sobre el blank, en donde se escogen cinco puntos en el blank para el respectivo análisis y se exportan los resultados de los esfuerzos máximos y mínimos de los puntos seleccionados.

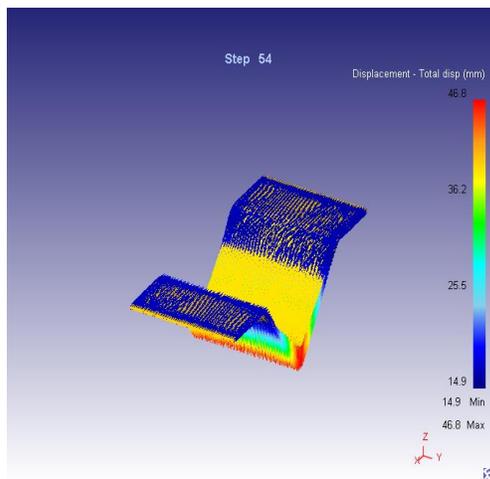


Figura 15 : Simulación de desplazamientos en proceso de doblado

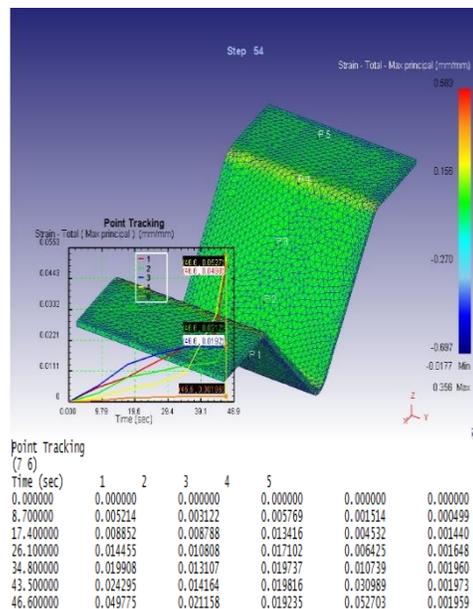


Figura 17 : Esfuerzos máximos

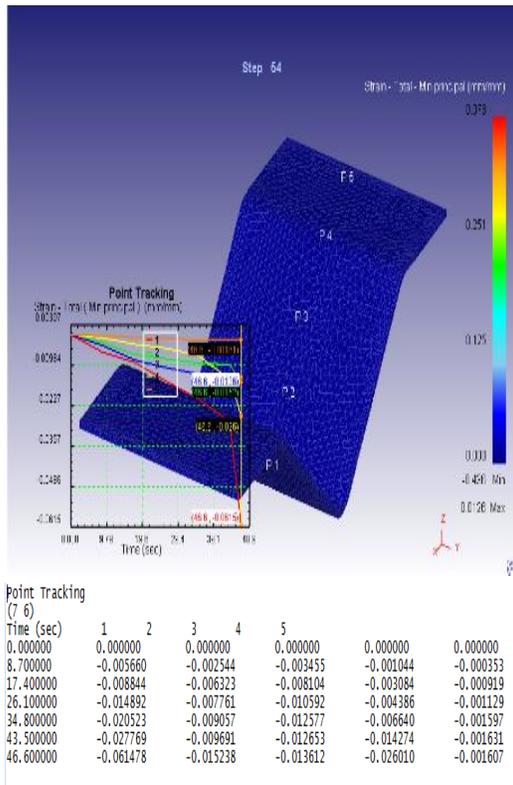


Figura 18 : Esfuerzos mínimos

El producto que se debía realizar se lo consiguió de acuerdo a los parámetros finales de diseño propuesto, además, se debió acondicionar las partes necesarias para poder realizar el proceso conforme a la realidad, tanto para el punzón como para la matriz es decir, para que el producto final sea un producto uniforme se realizó el diseño del proceso que permita cumplir lo requerido en el producto final, permitiendo de esta manera corregir las fallas que se presentaron y que no permitían obtener el producto final uniforme deseado.

Para poder lograr el producto final de acuerdo a las medidas establecidas se debió realizar los cálculos necesarios, principalmente por las 3 dobladuras (2 de 45° y 1 de 90°) las cuales modifican la longitud Inicial (Li) que teóricamente era 210 mm. pero finalmente fue establecido mediante cálculos por un valor de 225,1844 mm.

Por otro lado, el tiempo de simulación es corto, en vista que el proceso para obtener la pieza es simple, como se puede visualizar en la ejecución del programa el tiempo desde el estado inicial de la lámina hasta la obtención de la pieza es máximo 50 segundos. Sin embargo, se debe considerar tiempos como por ejemplo:

acomodar la lámina, accionar el punzón, retirar la pieza ya doblada, etc.

Una vez finalizada la simulación se verifica las medidas y comparara con los planos adjuntos del doblado de la placa.

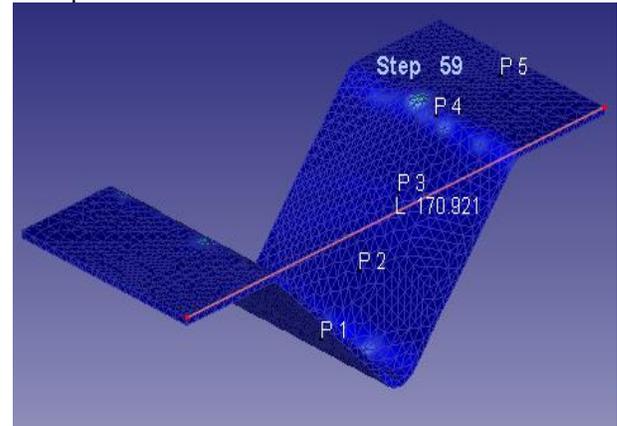


Figura 19: Verificación de las medidas

Posteriormente se procede a calcular la Fuerza aplicada en el eje Z y la variación del espesor

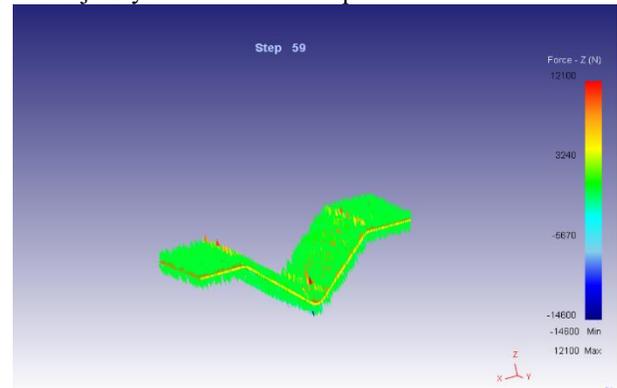


Figura 20: Fuerza en el eje z

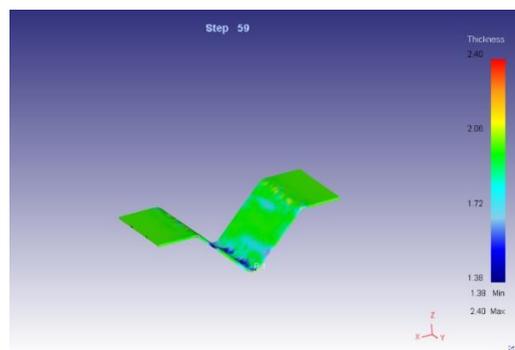


Figura 21: Variación del espesor

Ahora se procede a graficar, la curva carga del punzón (carga para deformar) vs stroke

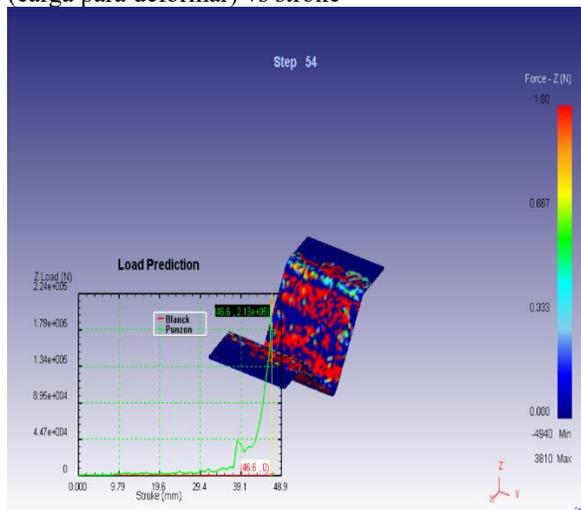


Figura 22: Curva carga del punzón (carga para deformar) vs stroke

También se grafica, la carga del punzón vs. el esfuerzo equivalente en la etapa final del formado.

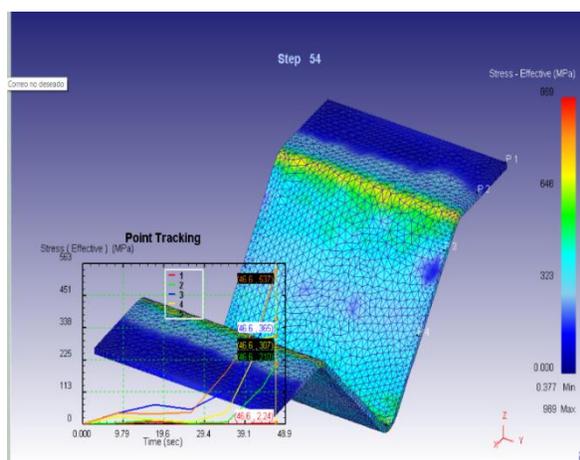


Figura 23: Curva carga del punzón vs. esfuerzo equivalente en la etapa final del formado

Comparación entre los resultados de algún valor de la simulación y el modelo analítico del proceso.

Análiticamente la fuerza requerida para poder obtener la pieza final es de $FD = 2560,67 N$, esta fuerza fue calculada en base a la fórmula para doblado de láminas, mediante la simulación se obtuvo un valor de $FZ =$

2800 N aproximadamente lo que concuerda con un margen de error mínimo.

Con respecto a la variación del espesor, se pudo determinar que existen puntos principalmente en los dobleces en los cuales el material se estira y comprime, por estas variaciones la dimensión inicial para obtener la pieza requerida debe ser mayor. $Li = 225,1844mm$.

Comparación entre los estados de esfuerzo y deformación de los puntos de seguimiento de la malla

Se estableció 5 puntos de seguimiento a lo largo de la lámina para determinar los puntos de máximo esfuerzo mínimo esfuerzo y deformación. Es necesario indicar que mediante la simulación el esfuerzo máximo ocurre en el proceso de doblado de 45° de $Emáx = 736 MPa$ y en el proceso de doblado de 90° el $Emáx = 614 MPa$. De acuerdo a los esfuerzos equivalentes se determina que el punto 4 es en donde se puede localizar el máximo y mínimo esfuerzo y es precisamente ahí donde se desarrolla el proceso de doblado de 45° . Es necesario indicar que en este punto ocurre una tensión y compresión lo que hace a este punto al más crítico y del cual se debe tener las precauciones necesarias para que la pieza final cumpla con los parámetros de fabricación.

IV. CONCLUSIONES

Considerando una deformación plástica y un volumen constante, se puede verificar que la variación de las dimensiones planificadas para la pieza de acero inoxidable 316L COLD, no sobrepasa el 1.12%, valor que se considera muy aceptable dentro del proceso de diseño.

El diseño del herramental permite obtener un proceso de doblado más seguro, es por esto que el pisador permite que la placa que se doblará, no se desplace y permanezca fija durante todo el proceso. La Fuerza aplicada al pisador puede ser la misma que se aplica al punzón.

Dentro del proceso de doblado y estirado, el material no presenta fisuras, deformaciones representativas ni desgarrres.

La zona elástica se puede eliminar al final de la carrera del punzón por uno de los dos medios. Primero, los dos extremos de la lámina, se pueden sujetar antes de que el punzón toque fondo, así que el final de la carrera involucra el estirado de la lámina, causando cedencia por tensión en todo el espesor de la misma. En el segundo método, la nariz del punzón está conformada para penetrar en la lámina, de manera que la compresión plástica ocurra en todo el espesor de la misma

Este proceso de doblado, se podría asemejar al conformado por estiramiento, ya que la hoja metálica se sujeta por sus extremos y después se estira sobre una matriz, bloque o punzón formador.

Este proceso de doblado, debido a las condiciones geométricas y de material requiere muy poca, o ninguna, lubricación.

Los materiales menos dúctiles, pueden doblarse requiriendo una temperatura elevada, ya que la resistencia a la cedencia es menor y con ello la recuperación elástica también lo es.

La fuerza de doblado calculada en forma analítica y la obtenida de forma de simulación, prácticamente coinciden; su variación depende por la consideración del valor de S_{yt} .

El proceso de manufactura, dependerá del tipo de máquina seleccionada, habilidad del operario y velocidad de doblado.

El tiempo utilizado para el proceso de doblado netamente es de 50 segundos aproximadamente, sin embargo, es importante considerar otros tiempos como preparación, colocación y retiro de la pieza desde la máquina.

Para los punzones y matrices se recomienda utilizar una aleación de acero de alta resistencia CrMo, > 1000 N/mm² mínimo para máxima durabilidad o un acero para herramientas de alta calidad

[9] www.mexinox.com / www.sandmeyersteelcompany.com

REFERENCIAS

- [1] Kalpakjian S. Schmid S,(2008), Manufactura, Ingeniería y Tecnología, México, Quinta Edición, Pearson Prentice Hall
- [2] Schey John, (2002), Procesos de Manufactura, México; Tercera Edición, Mc. Graw Hill
- [3] Swift K,Booker J. (2003), Process Selection from Design to Manufacture, Oxford, Second Edition, BH.
- [4] Ashby M, (2011), Materials Selection in Mechanical Design, USA, Fourth Edition, BH
- [5] Budynas-Nisbett, (2006), Shigley's Mechanical Engineering Design, United States of America, Eighth Edition, Mc Graw-Hill
- [6] Norton L. Robert, (1999), Diseño de Máquinas, México, Primera Edición en español, Pearson
- [7] WILA, (2012), Catálogo de Productividad de la Prensa Dobladora
- [8] Riofrío P. (2014), Selección del Proceso de Manufactura; Sangoquí, Presentación Power Point Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE.