

Calado de chapa de acero inoxidable 316L mediante una prensa troqueladora y herramientas de acero D2 para la manufactura de arandelas planas

Cutting 316L stainless steel sheet using a die-cutting press and D2 steel tooling for the manufacture of flat washers

Carlos E. Borja Soto ^a, Jorge Zuno Silva ^b, Jorge A. Verduzco Martínez ^c, Jesús M. Pérez Damián ^d, José L. Rodríguez Muñoz ^e

Abstract:

This work contains information related to the manufacturing process by die-cutting 316L stainless steel sheet metal to obtain flat washers with an external diameter, $D_{ext.} = 25.4\text{mm}$, inner diameter, $D_{int.} = 12.7\text{ mm}$ and thickness, $l = 0.5\text{ mm}$. Therefore, it was necessary to design and manufacture two simple AISI D2 steel dies. The design and mechanical behaviour of the tooling was carried out using the SolidWorks version 2016 software. The numerical simulation of the mechanical stresses of the tooling, which are generated in the punches by the cutting forces of the sheet, did not exceed its elastic limit. Therefore, the design of the tooling was appropriate. The manufacturing of the dies was carried out through material removal processes and heat treatments of quenching and tempering. The sheet metal cutting was carried out through the use of manufactured tooling and a punching press with a capacity of 4000 kgf (4tnf), which is suitable for successfully obtaining metal parts through cold work.

Keywords:

Openwork in sheet metal, die-cutting, manufacturing, flat washers

Resumen:

El presente trabajo contiene información relativa al proceso de manufactura por troquelado de chapa metálica de acero inoxidable 316L para la obtención de arandelas planas con diámetro exterior, $D_{ext.} = 25.4\text{ mm}$, diámetro interior, $D_{int.} = 12.7\text{ mm}$ y espesor, $l = 0.5\text{ mm}$. Por lo cual, fue necesario realizar el diseño y manufactura de dos troqueles simples de acero AISI D2. El diseño y comportamiento mecánico del herramental fue llevado a cabo mediante el programa informático SolidWorks versión 2016. La simulación numérica de los esfuerzos mecánicos del herramental, mismos que son generados en los punzones por las fuerzas de corte de la chapa, no sobrepasaron su límite elástico; por lo tanto, el diseño de los herramientas fue adecuado. La manufactura de los troqueles fue llevada a cabo mediante procesos de remoción del material y los tratamientos térmicos de temple y revenido. El calado de la chapa fue realizado mediante el uso del herramental manufacturado y una prensa troqueladora con capacidad de 4000 kgf (4tnf), el cual adecuado para la obtención exitosa de las piezas metálicas mediante trabajo en frío.

^a Autor de Correspondencia, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0003-3385-8348>, Email: carlos_borja@uaeh.edu.mx

^b Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Apan | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-1997-5399>, Email: jorge_zuno@uaeh.edu.mx

^c Universidad Michoacana de San Nicolas de hidalgo | Morelia-Michoacán | México, <https://orcid.org/0000-0002-5713-9025>, Email: Jorge.verduzco@umich.com

^d Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0009-0004-1404-2110>, Email: pe440197@uaeh.edu.mx

^e Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0002-4108-9414>, Email: jose_rodrigo@uaeh.edu.mx

Palabras Clave:

Calado en chapa metálica, troquelado, manufactura, rondanas planas

Introducción

Las chapas metálicas han sido producidas mediante el proceso de laminación en una amplia variedad de aleaciones ferrosas y no ferrosas. El proceso de laminación puede ser llevado a cabo mediante procesos en frío y en caliente, en función de las propiedades mecánicas que presentan los materiales a procesar. Los procesos en caliente para la manufactura de materiales metálicos son llevados a cabo cuando la temperatura de trabajo de la materia prima, T_t , la cual debe estar por encima de la temperatura de recristalización del material, T_r ; esto de acuerdo a la ecuación 1. En el caso de los procesos de manufactura llevados a cabo en frío, la temperatura de trabajo de la materia prima debe ser establecida por debajo del rango de temperatura para procesos en caliente (Askeland, 2016).

$$T_t \geq (0.4) (T_r) \quad \text{Ec.1}$$

Donde:

T_t , es la temperatura de trabajo.

0.4, es una constante.

T_r , es la temperatura de fusión del material.

Las operaciones de calado en chapa son frecuentemente realizadas mediante “procesos o trabajo en frío” de acuerdo al criterio descrito anteriormente. Dichas operaciones son llevadas a cabo mediante el uso de prensas troqueladoras y el uso de troqueles; estos últimos, pueden ser clasificados como troqueles simples y troqueles progresivos. Los fundamentos teóricos para el diseño de dichos herramientas, han sido tratados ampliamente en la literatura para la manufactura de piezas (Boljanovic, 2005; Muñoz, 1995). Tales fundamentos, están relacionados a la magnitud de fuerza necesaria para realizar operaciones de calado, la cual, es función del área de corte, resistencia mecánica al corte del material a procesar. El claro entre las superficies de los punzones y matrices ha sido establecido en función del tipo de material que constituye la chapa metálica (Boljanovic, 2005).

Los troqueles de calado para el procesamiento de chapa metálica son herramientas manufacturados a partir de acero grado herramienta, los cuales, son tratados térmicamente mediante temple y revenido; una vez que obtienen sus características geométricas. En este sentido, la funcionalidad de estos aceros requiere que presenten alta resistencia al desgaste, dureza y esfuerzo máximo, ya

que son expuestos a elevados esfuerzos mecánicos durante su uso. Por lo tanto, en el diseño de procesos para el procesamiento de chapa mediante troquelado deben tomarse en cuenta las propiedades mecánicas de los materiales que presentan las materias primas y los herramientas implementados.

Los aceros al carbono para herramientas están clasificados por grupos de acuerdo a las normas establecidas por la Sociedad de Ingenieros Automotrices, SAE y el Instituto Americano del Hierro y el Acero, AISI. Los grupos principales corresponden a las letras W, S, O, A, D, P, H, T y M. Los aceros incluidos en dichas clasificaciones tienen composiciones químicas y métodos de procesamiento, para ser aplicados en procesos en frío y en caliente, según la aplicación a la cual sean destinados (Smith, 2000).

Por otra parte, los procesos de remoción de material por arranque de viruta han sido llevados a cabo para la manufactura de troqueles simples y progresivos, mediante el procesamiento de aceros grado herramienta. Los parámetros de maquinado mediante torneado y barrenado pueden ser calculados de acuerdo a las ecuaciones 2-3 y el uso de insertos cerámico - metal como herramienta de corte. Las ecuaciones 2-4 pueden ser usadas para estimar los valores de los parámetros de maquinado mediante fresado; esto de acuerdo a información técnica proporcionada por el fabricante de herramientas de corte (Sandvik, 2024).

$$n = (3.82) (V_c D^{-1}) \quad \text{Ec. 2}$$

Donde:

n , es la velocidad de rotacional.

V_c , es la velocidad de corte.

D , es el diámetro del material.

$$f_m = (n) (f) \quad \text{Ec. 3}$$

Donde:

f_m , es la velocidad de avance en unidades de distancia por unidad de tiempo.

f , es la velocidad en unidades de distancia por revolución.

$$V_f = (n) (f_z) \quad \text{Ec. 4}$$

Donde:

V_f , es la velocidad de avance en unidades de distancia por unidad de tiempo.

f_z , es la velocidad de avance por diente.

El diseño mecánico por medio de programas informáticos permite obtener modelos tridimensionales de sistemas mecánicos; también la simulación numérica del comportamiento mecánico en determinadas condiciones de esfuerzo aplicado. Esto, representa grandes ventajas para prevenir fallas durante su implementación (SolidWorks, 2024). El presente trabajo muestra el proceso calado de chapa de acero inoxidable AISI 316L de 2 mm de espesor, mediante la implementación de una prensa troqueladora con capacidad de 4000 kgf (4 tnf) y el uso dos troqueles simples de acero AISI D2, para la obtención de rondanas planas. Los herramientas fueron manufacturados mediante los procesos de remoción de material por arranque de viruta de torneado, fresado, taladrado y roscado. Con la finalidad de conferir las propiedades mecánicas adecuadas a los herramientas, estos fueron tratados térmicamente mediante temple y revenido. El claro entre las superficies de los punzones y matrices, fue determinado a partir de la estimación de propiedades mecánicas de la chapa de acero AISI 316L.

Metodología

Fueron diseñados dos troqueles simples en acero grado herramienta AISI D2 para la obtención de arandelas planas de acero inoxidable AISI 316L con diámetro exterior, $D_{ext.} = 25.4$ mm, diámetro interior, $D_{int.} = 12.7$ mm y espesor, $t = 0.5$ mm. Una vez calculadas las dimensiones de ambos herramientas, fueron obtenidos dos modelos en dos y tres dimensiones; mediante el programa informático SolidWorks versión 2016. El mismo programa fue usado para la obtención de simulaciones numéricas para predecir el comportamiento mecánico de los punzones al estar expuestos a esfuerzos normales a la aplicación de la carga. Posteriormente, las piezas de los troqueles simples fueron manufacturadas mediante los procesos de torneado, fresado, taladrado y roscado. Los parámetros de maquinado fueron estimados mediante las ecuaciones 1-4, mostradas en la introducción del presente documento. Las piezas mecanizadas fueron tratadas térmicamente mediante temple y revenido a 1010 °C y 250 °C, respectivamente. Ambos tratamientos fueron realizados mediante el uso de un horno tipo mufla. Las temperaturas usadas en los tratamientos fueron de acuerdo a la información técnica correspondiente al acero AISI D2. Las propiedades mecánicas del acero tratado térmicamente fueron estimadas a partir de mediciones de dureza Rockwell, HRC. Dichas mediciones fueron llevadas a cabo en un durómetro de marca Hoytom mediante la aplicación de una carga de 150 kgf. Los herramientas manufacturados fueron ensamblados en

una troqueladora de 4000 kgf (4 tnf) ton de capacidad, con la finalidad de determinar su efectividad en el corte de la chapa para la obtención de las arandelas.

Resultados

La tabla 1 muestra los parámetros usados en el diseño de dos troqueles para la obtención de arandelas de acero inoxidable AISI 316L en dos pasos u operaciones de calado; esto, debido a que la capacidad de la prensa troqueladora que fue implementada en el presente proyecto fue de 4000 kgf (4 tnf). Por lo tanto, fue necesario diseñar y manufacturar dos troqueles simples para el calado de la chapa. La operación de calado externo requirió el 80.2% de la capacidad de carga de la máquina troqueladora. En el caso de la operación de calado interno, fue requerido el 35.6% de la capacidad de aplicación de carga del equipo. La sumatoria de la capacidad de carga mecánica estimada para realizar ambas operaciones juntas corresponde a 4634.202 kgf (4.634 tnf). La diferencia de diámetros entre punzones y matrices fue establecida 0.12 mm, aproximadamente.

Tabla 1. Diámetros de punzones y matrices. Fuente: Elaboración propia.

Herramental	Operación	Diámetro del punzón, mm	Diámetro de matriz, mm	Ángulo de salida en matriz	Área de corte, mm ²	Fuerza de corte, kgf
Troquel 1	Calado externo	25.4	25.52	5	45.60	3208.84
Troquel 2	Calado interno	13.21	13.33	5	20.25	1425.35

La Figura 1 muestran un plano del troquel 2 de acuerdo a las dimensiones establecidas en la tabla 1. Cabe mencionar que la distancia por lado entre las superficies de los punzones y matrices, han sido descritas en la literatura de acuerdo al tipo de materia de la chapa metálica a procesar mediante calado (Boljanovic, 2005; Muñoz, 1995). La diferencia existente entre los troqueles 1 y 2, es el diámetro externo del punzón y el diámetro interno de la matriz; el resto de las dimensiones fueron las mismas. El diámetro del punzón del troquel 2 fue aumentado, para obtener arandelas con un diámetro interno de 13.21mm, con la finalidad de generar una holgura de 0.25 mm por lado cuando sean usadas con tornillos de 12.70 mm (0.50”).

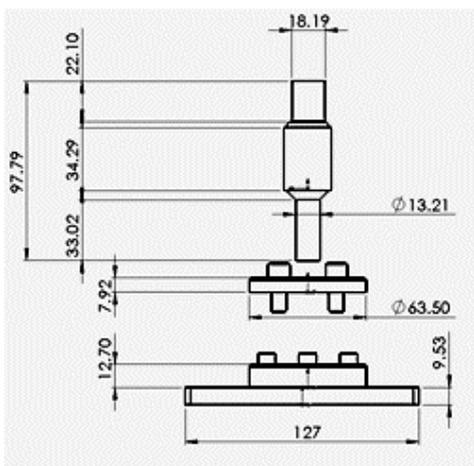


Figura 1. Plano del troquel 2. Fuente: Elaboración propia.

Las Figuras 2 a-b muestran los modelos en vista lateral de los herramientales y las partes principales de los mismos. Los modelos fueron obtenidos con el programa de diseño SolidWorks versión 2016. En el diseño se implementó un plano en la espiga de sujeción de cada punzón para facilitar su ensamble a la corredera de la máquina troqueladora. Cabe mencionar que las matrices tienen cajas para que las cabezas de los tornillos de fijación de las mismas, queden posicionadas por debajo del nivel del área de trabajo. La figura 2c muestra la proyección isométrica del diseño correspondiente al troquel 2.

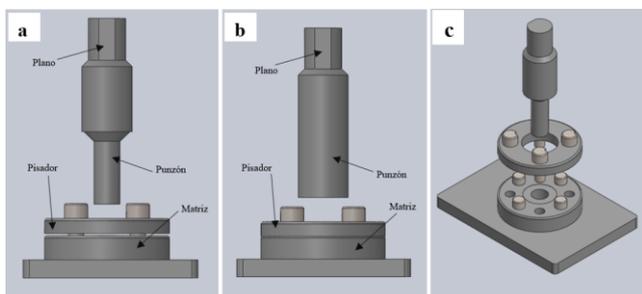


Figura 2. Herramientales. a-b, Vistas laterales. c, Vista en isométrico del troquel de corte de 12.7 mm de diámetro. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 3 muestra la simulación numérica del comportamiento mecánico del punzón con diámetro de 25.4 mm cuando recibe una fuerza de 3208.843 kgf (3.20 tfn). Es posible observar que existe una concentración de esfuerzos en espiga de sucesión del punzón. Sin embargo, estos esfuerzos no superan el límite elástico ($9.35 \times 10^8 \text{ Nm}^{-2}$) de acero D2 tratado térmicamente cuando presenta una dureza de 60 HRC.

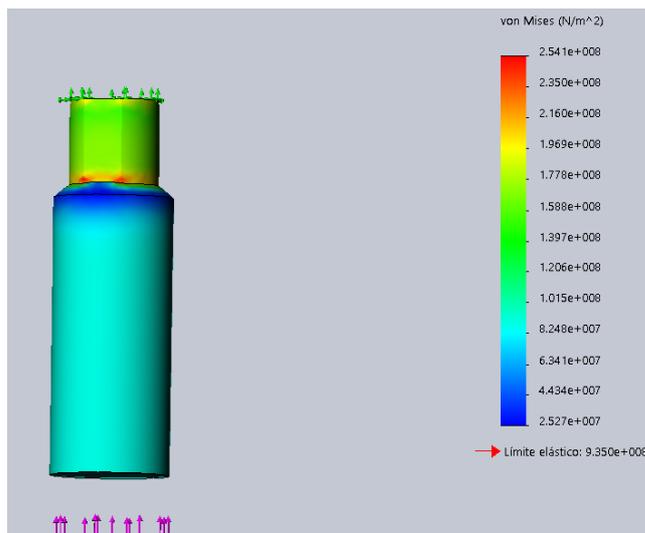


Figura 3. Simulación numérica del comportamiento mecánico del punzón de 25.4 mm de diámetro. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 4 muestra las magnitudes de los esfuerzos resultantes de la aplicación de una fuerza de 1425.359 kgf (1.425 tfn) al punzón diámetro de 13.21 mm, indicaron que el comportamiento mecánico del elemento se encontraría realizándose dentro de la región elástica del material al igual que en el caso del punzón de 25.4 mm de diámetro.

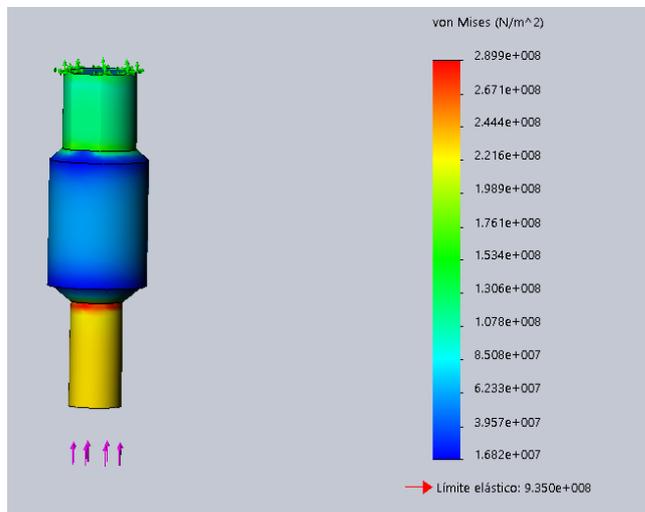


Figura 4. Simulación numérica del comportamiento mecánico del punzón de 13.21 mm de diámetro. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 5 a-b muestra algunas de las partes de los herramientales manufacturados. La Figura 5a muestra uno de los troqueles obtenidos. Cabe mencionar que las piezas tratadas térmicamente no presentaron oxidación ni decarburación. Además, obtuvieron valores de dureza aproximados a 60 HRC (HRC = 59.4). Mientras que la

Figura 5b muestra la preparación de una laminilla de acero AISI 316L para ser procesada mediante el calado en su zona central. También muestra los dispositivos de sujeción del punzón a la corredera y de la matriz a la mesa de la prensa troqueladora.

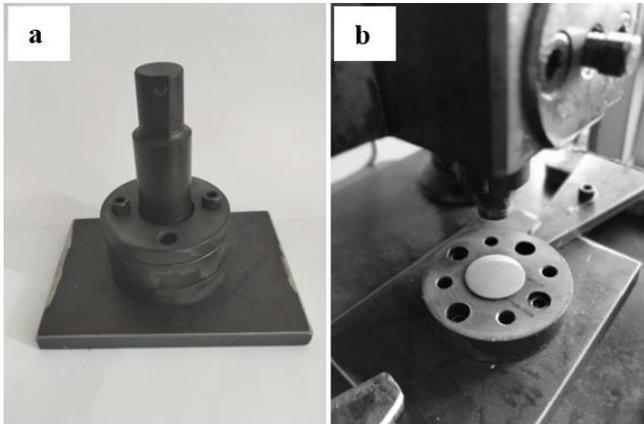


Figura 5. Troqueles. (a), troquel con punzón con diámetro de 25.4 mm. (b), preparación para el calado en disco de chapa. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 6 muestra una de las arandelas obtenidas y el material sobrante producido por el calado de la chapa metálica. Por lo tanto, el proceso para la obtención de arandelas es adecuado para obtener arandelas en pequeñas cantidades con el uso de una prensa mecánica de baja capacidad. De acuerdo a los resultados experimentales, los herramientas no presentaron daño durante su funcionamiento, debido que trabajaron dentro de la región elástica, esto de acuerdo a la simulación numérica del comportamiento mecánico de los punzones.

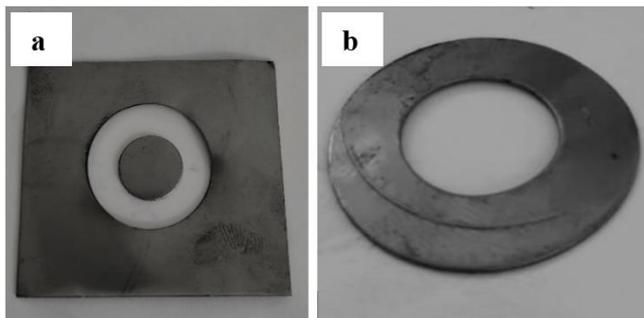


Figura 6. Productos de las operaciones de calado. (a), Material sobrante. (b) Arandela plana. Fuente: Elaboración propia.

Conclusiones

Los troqueles simples que fueron diseñados y manufacturados, resultaron adecuados para la obtención

de arandelas planas de acero inoxidable AISI 316L de acuerdo las dimensiones establecidas. La simulación numérica del comportamiento mecánico de los punzones, permitió estimar los valores de los esfuerzos mecánicos que son generados al aplicar fuerzas normales a la superficie de corte para el calado de la chapa usada en presente trabajo.

Referencias

- Askeland D. R. (2016). *The Science and Engineering of Materials*. (7th Ed.). Cengage Learning.
- Boljanovic, V. (2005). *Die Design Fundamentals* (3a ed.). Industrial Press.
- Muñoz Gómez J.J. Valenzuela Drada C. (1995). *Guía para diseño y construcción de troqueles* [Corporación Universitaria Autónoma de Occidente]. file:///C:/Users/carlo/Downloads/T0001510.pdf
- Sandvik Coromant. (s/f). Sandvik Coromant. Recuperado el 9 de abril de 2024, de <https://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/machining-formulas-definitions/boring-formulas-definitions>
- Smith, E. H. (2000). *Manual del Ingeniero Mecánico - 3 Tomos*. Prentice Hall.
- Solidworks.com. Recuperado el 9 de abril de 2024, de <https://www.solidworks.com/>