



**Homologación del troquel C para la fabricación de copas de primera operación
de envases de atún en la empresa PRODENVASES S.A.S**

Mateo Viana Cadavid

Informe de semestre de industria presentado como requisito para optar al título de
Ingeniero Mecánico

Asesor Interno Javier Alfonso Ríos Pérez, Ingeniero Mecánico

Asesor Externo Edwin Mauricio Gallego Osorio, Ingeniero Mecánico

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería

Ingeniería Mecánica

Medellín, Colombia

2023

Cita	Viana Cadavid [1]
Referencia Estilo IEEE (2020)	[1] M. Viana Cadavid, “Homologación del troquel C para la fabricación de copas de primera operación del envase de atún en la empresa PRODENVASES S.A.S”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería Mecánica, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2023.



Ingeniería mecánica, semestre de industria



Centro de documentación de ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

Rector: John Jairo Arboleda Céspedes

Decano/Director: Julio César Saldarriaga Molina

Jefe departamento: Pedro León Simanca

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

TABLA DE CONTENIDO

1.	RESUMEN	7
2.	INTRODUCCIÓN	8
3.	OBJETIVOS	8
4.	MARCO TEÓRICO.....	9
5.	ANTECEDENTES.....	11
5.1.	DESCRIPCIÓN DE LAS OPERACIONES DEL ENVASE DE ATÚN.....	11
5.2.	DESCRIPCIÓN DEL TROQUEL C.....	13
6.	REQUISITOS DE DISEÑO	14
6.1.	PRODUCCIÓN.....	14
6.2.	MATERIAL	14
6.3.	DIMENSIONES.....	15
7.	CÁLCULO HERRAMIENTAS DE CORTE.....	15
7.1.	Cálculo del flanco de corte.....	15
7.2.	Presión de corte	16
7.3.	Fuerza de extracción.....	17
7.4.	Fuerza de expulsión.....	17
7.5.	Diámetro mínimo del punzón de corte.....	17
7.6.	Tolerancia entre la matriz y el punzón de corte	17
8.	CÁLCULO HERRAMIENTAS DE EMBUTICIÓN.....	18
8.1.	Fuerza de embutición	18
8.2.	Radio de la matriz de embutición.....	19
8.3.	Holgura entre matriz y punzón de embutición	20
8.4.	Presión del pisador	21
8.5.	Fuerza de pisado.....	21
9.	DIMENSIONAMIENTO DE LOS COMPONENTES PRINCIPALES.....	22
9.1.	Punzón de corte y matriz de embutición	22
9.2.	Matriz de corte	22
9.3.	Punzón de embutición	23
9.4.	Pisador.....	23
10.	ANÁLISIS MEDIANTE FEM	25
10.1.	Modelo CAD para el análisis.....	25
10.2.	Materiales para el análisis.....	26

10.3.	Mallado.....	27
10.3.1.	Matriz de embutición	27
10.3.2.	Punzón de embutición	27
10.3.3.	Pisador.....	27
10.3.4.	Lámina.....	27
10.4.	Condiciones de frontera.....	29
10.5.	Resultados y discusión.....	30
11.	VALIDACIÓN EXPERIMENTAL EN EL TROQUEL MODIFICADO	32
12.	CONCLUSIONES	35
13.	REFERENCIAS.....	36

LISTA DE TABLAS

TABLA 1 OPERACIONES NECESARIAS PARA LA OBTENCIÓN DEL ENVASE DE ATÚN EN PRODENVASES S.A.S	12
TABLA 2 PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL MATERIAL USADO PARA LA FABRICACIÓN DE ENVASES DE ATÚN EN PRODENVASES S.A.S	14
TABLA 3 COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL MATERIAL USADO PARA LA FABRICACIÓN DE ENVASES DE ATÚN EN PRODENVASES S.A.S	15
TABLA 4 COEFICIENTE m , TOMADO DE: [5].....	19

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fases del proceso de corte, tomado de [2].....	9
Figura 2. Troquel de embutición básico, tomado de [3].....	10
Figura 3. Diseño simple de un troquel de embutición con pisador, tomado de [3]	11
Figura 4. Troquel C usado en la línea de atún de PRODENVASES S.A.S	13
Figura 5. Dimensiones de la copa cilíndrica de primera operación	15
Figura 6. Volumen de la copa de primera operación	16
Figura 7. Huelgo de corte u entre punzón y matriz de corte, tomado de: [4]	17
Figura 8. Proceso de embutición, tomado de: [4]	18
Figura 9. Relaciones β para diferentes materiales, tomado de [4].....	20
Figura 10. Punzón de corte y matriz de embutición	22
Figura 11. Vida y ángulo de salida de una matriz de corte. Adaptado de [5].....	23
Figura 12. Diseño de la matriz de corte	23
Figura 13. Dimensiones del punzón de embutición.....	24
Figura 14. Dimensiones generales del pisador	24
Figura 15. Modelo CAD para el análisis FEM	25
Figura 16. Material escogido para el comportamiento de la lámina en la simulación numérica de la embutición.....	26
Figura 17. Material escogido para simular el comportamiento del punzón y matriz de embutición y el pisador en la simulación del proceso de embutición.....	27
Figura 18. Mallado de la matriz de embutición	28
Figura 19. Mallado del punzón de embutición	28
Figura 20. Mallado del pisador	28
Figura 21. Mallado de la lámina	29
Figura 22. Recorrido espaciotemporal del punzón de embutición	29
Figura 23. Esfuerzo equivalente de von-Mises	30
Figura 24. Deformación máxima de la copa.....	30
Figura 25. Fuerza total presente en el proceso de embutición.....	31
Figura 26. Dimensiones de la copa obtenida mediante simulación numérica	32
Figura 27. Troquel homologado para fabricación de copas de primera operación de envases de atún.....	33

Figura 28. Troquel modificado instalado en la prensa C para validación y ensayos.....	33
Figura 29. Dimensiones generales de la copa obtenida en el troquel homologado	34
Figura 30. Producto final obtenido a partir de la copa de primera operación fabricada en el troquel homologado	34

1. RESUMEN

Este trabajo presenta la homologación del troquel C para la fabricación de copas de primera operación de envases de atún en la empresa PRODENVASES S.A.S. Para transformar el troquel 1C de forma que realice la primera fase del envase de atún (crote y embutición), se reconoció en el troquel original las herramientas que necesitaban diseñarse y fabricarse como también las que necesitaban modificaciones.

El diseño de las herramientas se basó primeramente en cálculo teóricos haciendo uso de ecuaciones en su mayoría empíricas encontradas en literatura especializada. Con esto se determinaron las dimensiones generales de las piezas a intervenir, mientras que sus tolerancias dimensionales, geométricas, acabados superficiales y tratamientos térmicos se basan en el conocimiento desarrollado en el tiempo por la compañía.

Con el objetivo de validar los cálculos teóricos, se realizó una simulación numérica de la embutición de la copa haciendo uso del software Ansys Workbench, para determinar el comportamiento del material en un entorno real de trabajo y conocer los esfuerzos y las deformaciones que presenta, así como la fuerza necesaria para el trabajo de embutición.

Finalmente, con el troquel modificado se realizaron pruebas experimentales y se validaron las dimensiones de la copa obtenida y su desempeño en los troqueles posteriores que dan la forma final al envase.

2. INTRODUCCIÓN

El proceso de embutido de alta profundidad o comúnmente conocido como “deep drawing”, consiste en la transformación de una lámina metálica en un cuerpo hueco de revolución mediante la acción mecánica de un punzón. El punzón empuja la lámina metálica hacia la cavidad de una matriz que finalmente forma la geometría de la pieza deseada [1].

En la actualidad, los alimentos enlatados gozan de gran popularidad en la mayoría de la población mundial al mantener casi intactos los componentes nutricionales como los glúcidos, los lípidos y las proteínas en el proceso de conservación. Muchos de estos alimentos (atún, mejillones, sardinas) son cocinados en envases fabricados a partir del proceso de embutición. En este sentido, es de gran importancia para la industria alimenticia la fabricación óptima de envases de hoja lata que permitan un almacenamiento seguro y eficiente de los alimentos a ser conservados.

PRODENVASES S.A.S, cuenta en su línea de atún con diferentes prensas para la embutición de envases. En esta línea de producción es necesario contar con un troquel de respaldo en la primera operación, puesto que el troquel que se tiene actualmente ha agotado su vida útil. Por esta razón, se busca transformar el troquel C, para realizar copas de primera operación. Para lograr este objetivo es necesario el rediseño, ajuste e intervención de algunas de las piezas del troquel 1C, de tal forma que sean compatibles con los troqueles 1A y 1B en funcionamiento actualmente.

Por consiguiente, este proyecto busca realizar el diseño y ajuste de las piezas necesarias para la homologación del troquel C, basado en consideraciones geométricas y estructurales haciendo uso de ecuaciones analíticas y herramientas computacionales modernas.

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar mediante consideraciones geométricas, ecuaciones fundamentales y análisis estructurales las piezas necesarias para la homologación del troquel C en la embutición de copas de los troqueles 1A y 1B.

3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las piezas que necesitan ser diseñadas o modificadas para la homologación del troquel.
- Calcular los elementos básicos de corte y embutición (punzón de corte, matriz de corte, punzón de embutición, matriz de embutición y prensa chapas), con el uso de modelos matemáticos fundamentales.
- Realizar el modelado y los planos de fabricación de las modificaciones realizadas al troquel.
- Simular el proceso de embutición del troquel con las piezas intervenidas mediante el

método de elementos finitos (FEM).

- Comparar los resultados obtenidos mediante simulaciones numéricas con los obtenidos en el troquel.

4. MARCO TEÓRICO

Los numerosos diseños y tipos de troqueles usados en prensas para la producción de lámina metálica pueden ser divididos en dos clases generales. En la primera clase se encuentran todos los troqueles que simplemente cortan la lámina en las dimensiones requeridas, en la segunda, se encuentran todos los troqueles que cambian la forma plana del material original, ya sea doblando, embutiéndolo o extruyéndolo [2]. Ésta segunda división, a menudo incluye operaciones comunes de la primera división, es decir, en muchos troqueles el material es primero cortado a la medida necesaria y después transformado en su forma deseada.

El término “troquel” es comúnmente aplicado a la herramienta entera incluyendo ambos miembros inferior y superior, mientras que los términos de “punzón” y “matriz” o “die” son usados para referirse a partes o secciones del troquel completo. Estos términos deben ser usados adecuadamente con referencia a la forma y no en la ubicación, ya que el punzón es usualmente, pero no siempre el miembro superior de la herramienta. Cuando se usa el término “matriz” es aplicado al miembro que tiene una cavidad que recibe el punzón, ya sea para corte, embutición o formado.

En el proceso de corte, las variables más importantes son la fuerza del punzón, la velocidad de este, las condiciones superficiales de los materiales del punzón y la matriz, el tipo de lubricante y las tolerancias entre punzón y la matriz. Existen tres fases principales involucradas en el proceso de corte las cuales son mostradas en la Figura 1.

En la primera fase, el material de trabajo se comprime y se deforma levemente entre el punzón y el die, el esfuerzo y la deformación en esta fase no superan el límite elástico

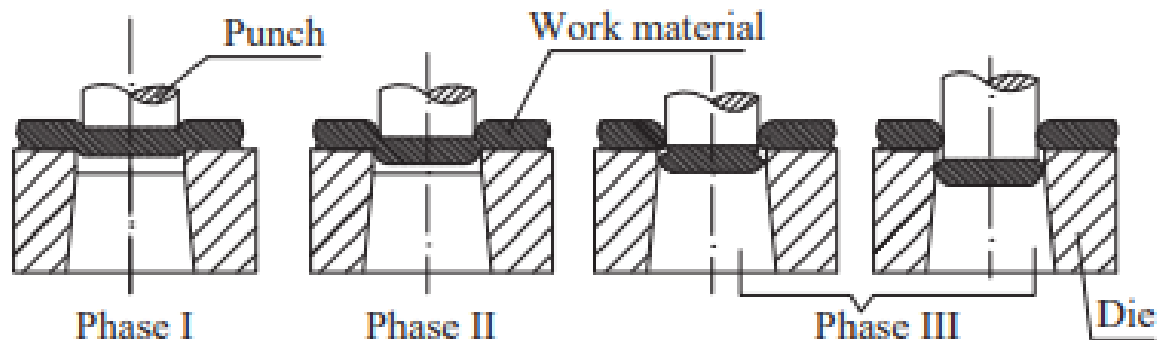


Figura 1. Fases del proceso de corte, tomado de [2]

En la segunda fase, la concentración de esfuerzos causa una deformación plástica de la lámina. Al final de esta fase, el esfuerzo en el material de trabajo cercano a los bordes del corte alcanza el valor correspondiente al esfuerzo de corte, pero el material resiste la fractura.

Finalmente, durante la fase 3, la deformación de la lámina alcanza el límite de fractura. Aparecen microgrietas seguidas por la separación de las partes de la pieza de trabajo.

Una vez se realiza el proceso de corte de lámina, es habitual que este proceso este seguido por una operación de embutición.

Un diseño básico de un troquel de embutición se muestra en la Figura 2. El material de trabajo a ser embutido se corta primeramente en un troquel de corte y luego se posiciona centrado mediante un vacío anular en la cara de la matriz. El punzón desciende y fuerza a la lámina a través de la cavidad de la matriz y se forma una copa, como se muestra en la parte derecha de la figura.

La copa formada se pega al punzón cuando este asciende debido a la fricción entre el borde superior de la copa y el borde inferior del die. Esta forma de troquel es conocida como ***“push-through die”*** y es usada comúnmente para láminas con espesores no menores a 3/32 o 1/16 de pulgada.

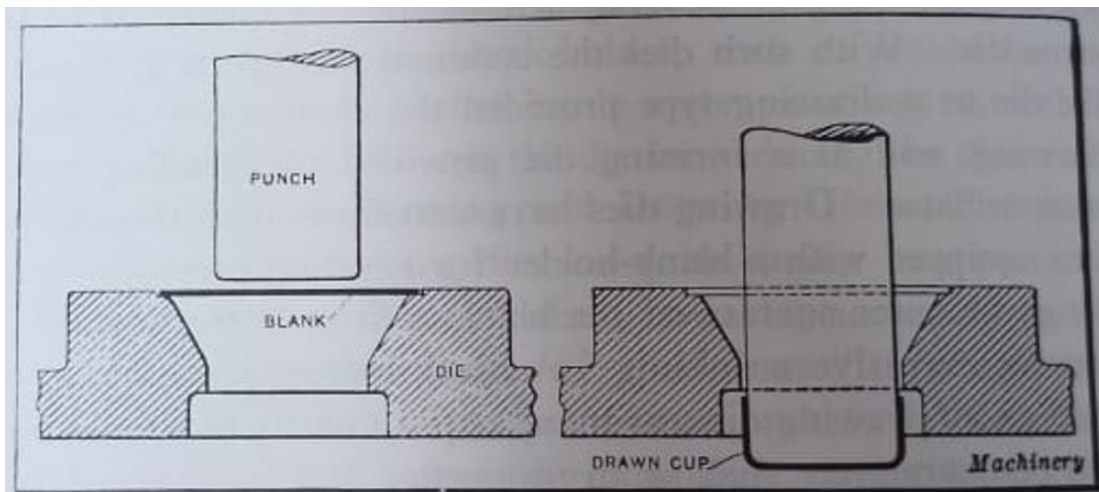


Figura 2. Troquel de embutición básico, tomado de [3]

Muchos troqueles de primera operación, o troqueles de embutición están equipados con un pisador o ***“blank-holder”*** el cual presiona la parte exterior de la lámina mientras el punzón la fuerza a través de la cavidad del die.

La ventaja de usar un pisador es que la lámina está rodeada por un cuerpo externo en la embutición que no permite la aparición de arrugas. Un diseño sencillo de un troquel de embutición con pisador se muestra en la Figura 3. Cuando el punzón desciende, el pisador **D** envuelve la lámina y cuando el movimiento de embutición continúa la almohadilla de presión de goma **F** se comprime y la lámina se sostiene firmemente por el pisador mientras el punzón de embutición introduce la lámina en la cavidad del die. De esta forma, la copa cilíndrica se forma de una lámina plana **A**, pasando por una semi-embutición **B**, para finalmente formar la copa **C**

La relación entre los diámetros y las profundidades de la embutición varía ampliamente y esta relación es un factor importante en el diseño de troqueles de embutición. Es evidente que, el cambio de lámina plana a una lámina embutida de poca profundidad es de menor problema mecánico que embuticiones de gran profundidad. Además, el espesor de la lámina su ductilidad o susceptibilidad a embutición y su resistencia al esfuerzo también deben ser tomados en cuenta para el diseño de troqueles.

Dado estas condiciones variables y otros factores que gobiernan el diseño de troqueles de embutición, se verá que estos troqueles no pueden ser diseñados en conformidad con normas fijas de diseño, a pesar de que existen ciertos principios que son generalmente aplicables

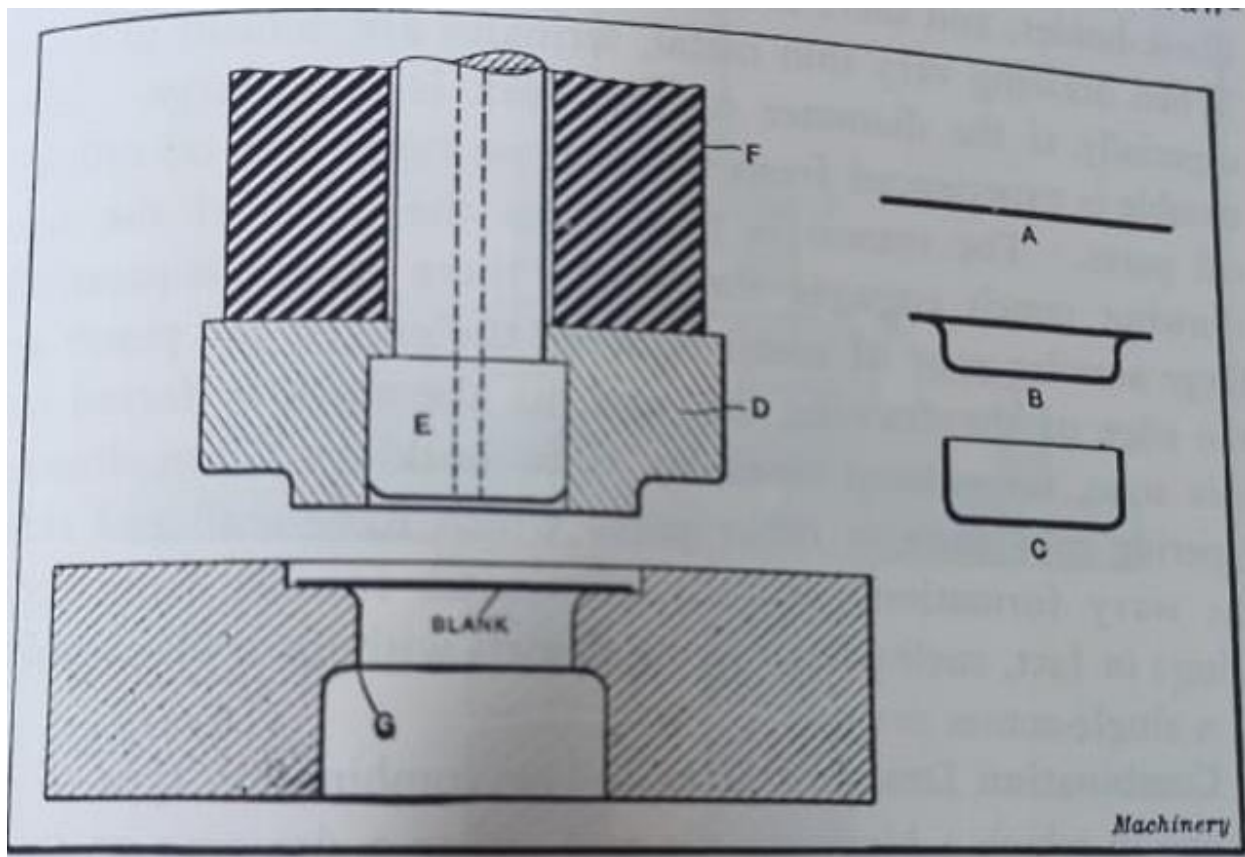


Figura 3. Diseño simple de un troquel de embutición con pisador, tomado de [3]

5. ANTECEDENTES

5.1. DESCRIPCIÓN DE LAS OPERACIONES DEL ENVASE DE ATÚN

En PRODENVASES S.A.S, el cuerpo del envase de atún se forma mediante tres operaciones las cuales se ilustran en la TABLA 1. En la primera operación, se da un corte de diámetro 150.92 mm y una embutición de profundidad 26.67 mm aproximadamente.

En la segunda operación, se da la embutición final del cuerpo del envase con dimensiones de 78 mm de diámetro y 30 mm de altura, y se le proporcionan al envase venas para aumentar su dureza mediante la operación de estampado.

Finalmente, en la operación de desbarbado se retira el exceso del material mediante la acción de un troquel de corte.

TABLA 1
OPERACIONES NECESARIAS PARA LA OBTENCIÓN DEL ENVASE DE ATÚN EN PRODENVASES S.A.S

Corte y embutición	Embutición y estampado
	
Desbarbado	
	

Actualmente en PRODENVASES S.A.S existen tres prensas para cada una de estas operaciones y se hace necesario contar con una prensa de respaldo en la primera operación. En el pasado, la prensa C contaba con la capacidad de realizar las dos primeras operaciones descritas anteriormente, no obstante, un cambio en el espesor y temple de la materia prima imposibilitó el uso de esta prensa ya que sus capacidades fueron excedidas.

Por estos motivos, se optó por reformar el troquel de la prensa C para realizar únicamente las operaciones de corte y primera embutición.

5.2. DESCRIPCIÓN DEL TROQUEL C

El troquel C, como se mencionó anteriormente, realizaba las operaciones de corte, embutición de alta profundidad y estampado. Las piezas más importantes de este troquel se pueden observar en la Figura 4.

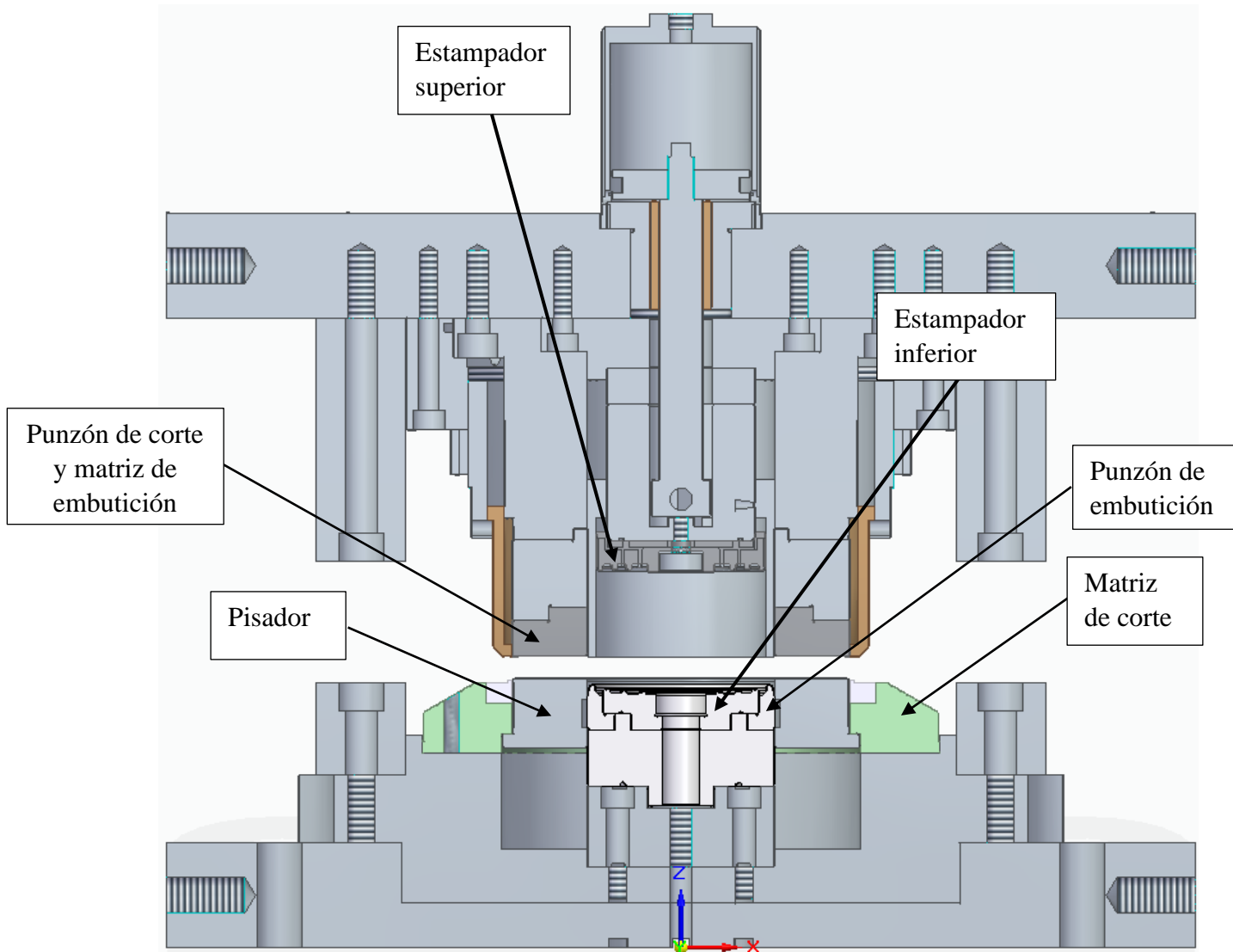


Figura 4. Troquel C usado en la línea de atún de PRODENVASES S.A.S

De manera general, la lámina de hoja lata se posiciona en el troquel y se da el corte del diámetro mayor del envase de atún entre el punzón de corte y la matriz de corte. Una vez hecho el corte, el punzón de corte desciende y la lámina se sostiene entre el punzón de corte y el pisador. Seguido de esto, el punzón de embutición fuerza la lámina hacia la cavidad de la matriz de embutición formando el cuerpo cilíndrico de revolución. Una vez se alcanza la profundidad de embutición

necesaria, las venas del envase se forman mediante la acción conjunta del estampador superior e inferior.

Ya que el objetivo de este trabajo es reformar el troquel C, de tal manera que realice únicamente las operaciones de corte y embutición, se plantea rediseñar los elementos más importantes de estas dos operaciones: matriz y punzón de corte y embutición y pisador, teniendo en cuenta que la primera operación cuenta con un mayor diámetro y menor altura que la copa de producto final. Además, los elementos necesarios para el correcto funcionamiento del troquel, como el botador, el colchón de pisado neumático y las bases para acoplar los elementos mencionados anteriormente, serán conservados de forma que las intervenciones en el troquel sean lo más económicas posibles.

6. REQUISITOS DE DISEÑO

6.1. PRODUCCIÓN

Las piezas fundamentales del troquel deben ser diseñadas de tal forma que sean capaces de fabricar un promedio de 75 000 copas de primera operación, en un día de producción promedio. Este número de piezas a fabricar cobrará importancia en los capítulos posteriores, en función de los materiales y acabados escogidos para las piezas a diseñar.

6.2. MATERIAL

En la industria alimenticia, el material óptimo para la fabricación de envases es el acero de bajo carbono laminado en frío y con un recubrimiento de estaño, conocido normalmente como Hojalata. Este material es ideal ya que combina la resistencia mecánica con la capacidad de conformado en frío y la resistencia a la corrosión del estaño.

TABLA 2
PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL MATERIAL USADO PARA LA FABRICACIÓN DE ENVASES DE ATÚN EN PRODENVASES S.A.S

Propiedades físicas y mecánicas	
Densidad (20°C)	7.8 g/cm ³
Límite elástico	455 MPa
Esfuerzo de fluencia	457 MPa
Dureza Rockwell HR-30T	65 mg/m ²
Coefficiente de Poisson	0.29
Porcentaje de elongación	25%

TABLA 3
COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL MATERIAL USADO PARA LA FABRICACIÓN DE ENVASES DE ATÚN
EN PRODENVASES S.A.S

Composición química	
C	0.040
Si	0.012
Mn	0.240
P	0.009
S	0.008

6.3. DIMENSIONES

Las dimensiones de la copa pueden encontrarse en la Figura 5.

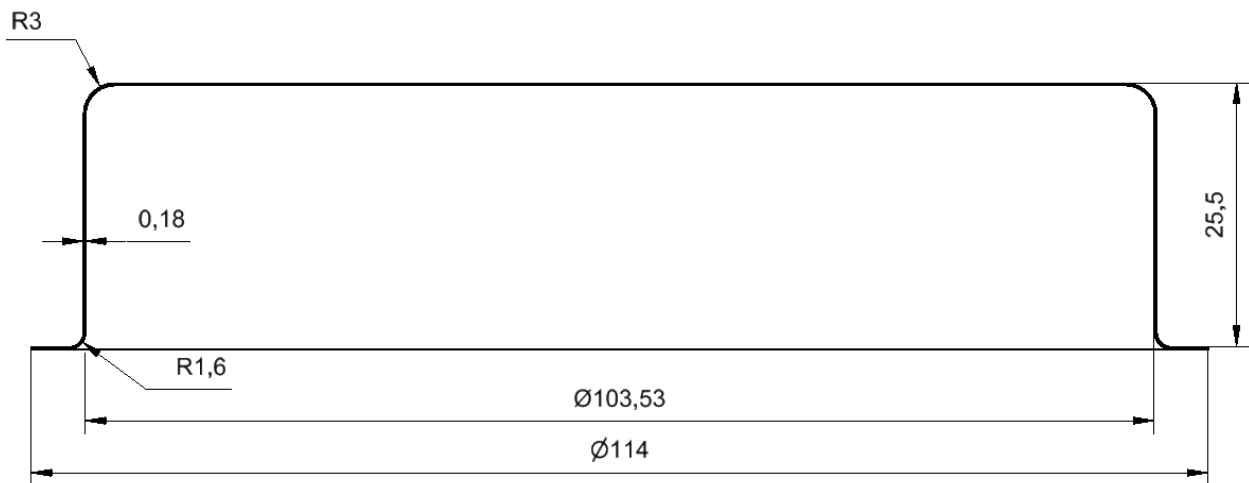


Figura 5. Dimensiones de la copa cilíndrica de primera operación

7. CÁLCULO HERRAMIENTAS DE CORTE

7.1. Cálculo del flanco de corte

Para el cálculo del flanco de corte, se plantea igualar el volumen de la copa formada con el volumen de una lámina plana de sección circular. Ya que la geometría de la copa cuenta con redondeos internos y externos, es necesario la mayor precisión posible, por lo que se optó por calcular el volumen de la copa mediante el software Autodesk Inventor, como se muestra en la Figura 6.

De esta forma:

$$V = \frac{\pi}{4} D^2 \cdot s$$

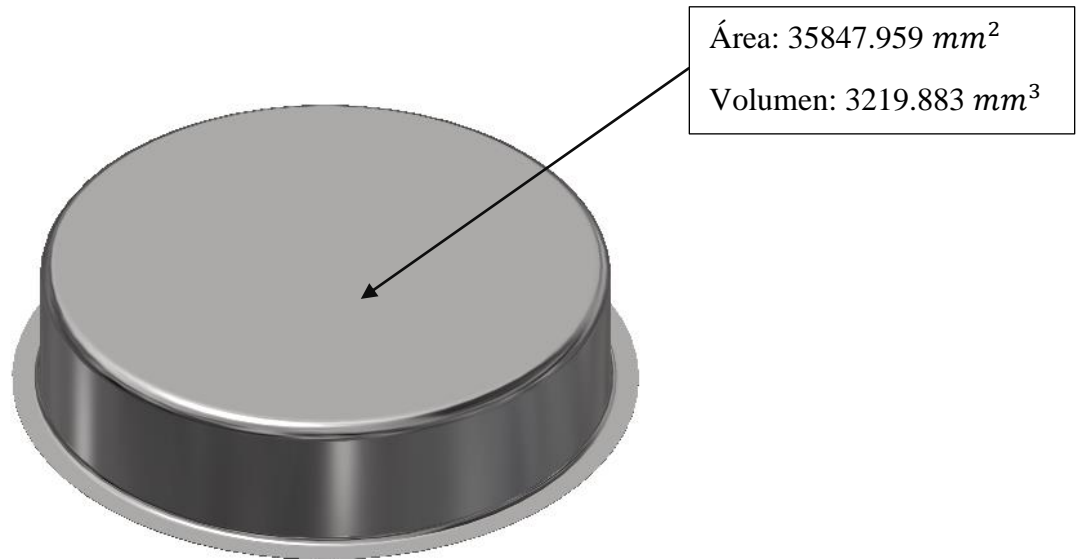


Figura 6. Volumen de la copa de primera operación

Siendo:

D : el flanco de corte

s : espesor de la lámina

Entonces:

$$3219.883 = \frac{\pi}{4} D^2 \cdot 0.18$$

$$D = 150.92 \text{ mm}$$

7.2. Presión de corte

Para cuerpos de corte con la relación $d/s \geq 2$, la resistencia a la cortadura se toma como $\tau_B = 0,8 \sigma_B$; donde d es el diámetro de corte, s el espesor del material y σ_B la resistencia a la rotura o al desgarramiento del material a cortar.

Para el caso de estudio:

$$\sigma_B = 457 \text{ MPa}$$

$$d = 150.92 \text{ mm}$$

$$s = 0.18 \text{ mm}$$

$$\tau_B = 356.6 \text{ MPa}$$

Luego, la máxima fuerza de corte se halla mediante la expresión [4]:

$$P_s = \tau_B \cdot L \cdot s$$

Donde L es la longitud de las aristas de corte, por lo tanto:

$$P_s = 356.6 \text{ MPa} \cdot \pi \cdot 150.92 \text{ mm} \cdot 0.18 \text{ mm}$$

$$P_s = 30.433 \text{ kN}$$

7.3. Fuerza de extracción

Es la fuerza necesaria para separar el recorte de lámina que queda sujeto al punzón de corte y se calcula mediante la expresión:

$$P_{ext} = 0.1 P_s$$

$$P_{ext} = 3.043 \text{ kN}$$

7.4. Fuerza de expulsión

Es la fuerza necesaria para extraer el recorte de lámina de la matriz de corte, la cual se halla mediante la expresión:

$$P_{exp} = 0.015 P_s$$

$$P_{exp} = 456.5 \text{ N}$$

7.5. Diámetro mínimo del punzón de corte

El diámetro mínimo que puede tener el punzón de corte puede ser calculado como se muestra a continuación:

$$d_{min} = s \sqrt[3]{\frac{\sigma_b}{35}} = 0.18 \sqrt[3]{\frac{457}{35}}$$

$$d_{min} = 0.42 \text{ mm}$$

7.6. Tolerancia entre la matriz y el punzón de corte

En el proceso de corte, es necesario mantener un huelgo entre el punzón y la matriz de corte, para conseguir una larga duración de los elementos de corte.

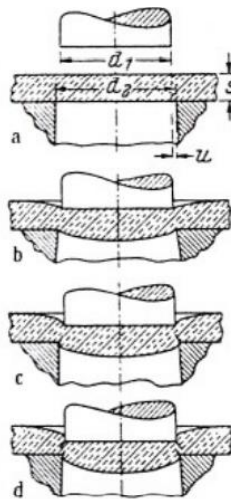


Figura 7. Huelgo de corte u entre punzón y matriz de corte, tomado de: [4]

El huelgo de corte u se calcula mediante la ecuación:

$$u = c \cdot s \cdot \sqrt{\tau_B}$$

Donde c puede tomar valores cercanos a 0.01 en la práctica, en consecuencia:

$$u = 0.01 \cdot 0.18 \sqrt{356.6} = 0.033 \text{ mm}$$

Que, al tratarse de un agujero exterior, la matriz de corte tendrá un diámetro exacto al diámetro de corte y el punzón será quien reciba la holgura calculada.

8. CÁLCULO HERRAMIENTAS DE EMBUTICIÓN

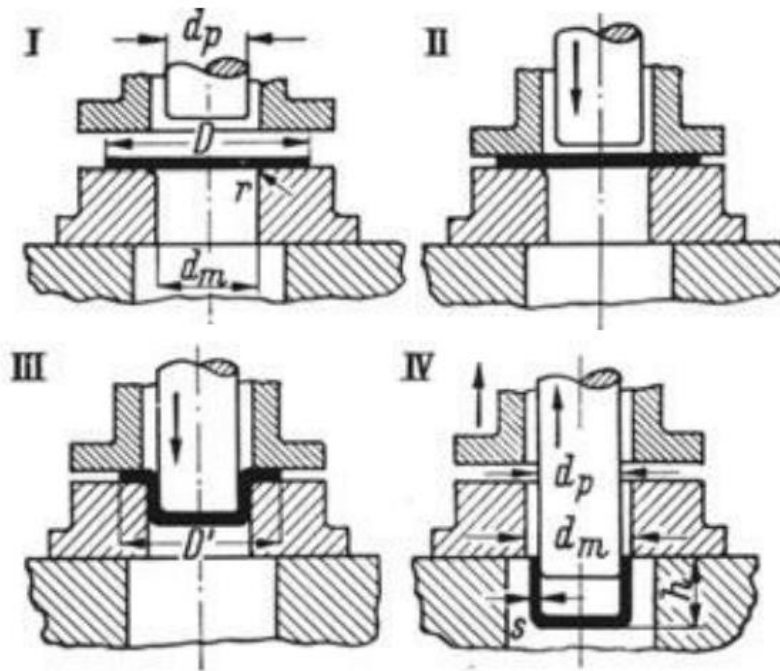


Figura 8. Proceso de embutición, tomado de: [4]

8.1. Fuerza de embutición

Para piezas cilíndricas de embutición de una sola fase, la fuerza de embutición depende del diámetro de embutición, la dimensión del blanco de embutición, el espesor y las propiedades de la lámina, puede calcularse mediante la expresión indicada:

$$F_z = \pi \cdot d_p \cdot s \cdot m \cdot \sigma_B$$

Donde:

d_p : Diámetro del punzón de embutición

s : Espesor de la lámina

m : coeficiente dependiente de la relación d_p/D

En este caso el factor m puede hallarse realizando una interpolación con los datos de la TABLA 4.

TABLA 4
COEFICIENTE m , TOMADO DE: [5]

Relación d_p/D	Coeficiente m
0.55	1.0
0.575	0.93
0.60	0.86
0.625	0.79
0.650	0.72
0.675	0.66
0.70	0.6
0.725	0.55
0.750	0.5
0.775	0.45
0.8	0.40

Siendo:

$$\frac{d_p}{D} = \frac{103.53}{150.92} = 0.685$$

Se interpola entre 0.675 y 0.70 y se obtiene un valor $m = 0.633$

Por lo tanto, la fuerza de embutición:

$$F_z = \pi \cdot 103.53 \text{ mm} \cdot 0.18 \text{ mm} \cdot 0.633 \cdot 457 \text{ Mpa}$$

$$F_z = 16.935 \text{ kN}$$

8.2. Radio de la matriz de embutición

El radio de redondeo de la matriz de embutición es de gran importancia en la distribución de esfuerzos, ya que, un radio excesivo causará aparición de pliegues en la lámina; mientras que un radio insuficiente causará roturas en la lámina ya que la matriz de embutición actúa como una de corte.

El radio de redondeo r_M de la matriz de embutición, se determina aplicando la ecuación:

$$r_M = \frac{0.04D}{d_p \beta_{100}} [50 + (D - d_p)] \sqrt{s}$$

Donde β_{100} es la relación máxima de embutición admisible, que depende mayoritariamente del material de la lámina a embutir y que puede ser hallado en la tabla que se muestra a continuación:

Tabla 36. Tratamiento y elaboración de las chapas

Material	1 TSt 10, St 10 (St I-III 23) St 0,24, 1,24	2 WUSt 12, USt 12 (St V/VI/IX 23) St 2,24	3 USt 13, RSt 13 (St VII 23) St 3,24	4 USt 14, RSt 14 (St VIII 23, StX 23) St 4,24	5 St 34, 22 P	6 St 37,21	7 St 42,21	8 Chapa de acero cobreada
A. Cortado								
1. Resistencia a la cortadura τ_B (kp/mm ²)	30-35	24-30	24-30	25-32	30	31	40	30-40
B. Curvado								
Factor mínimo de redondeado para $r_{\min} = c \cdot s$	0,6	0,5	0,5	0,5	1,5	1,8	2,0	0,8
2. Factor de retroceso elástico K con $r_2/s = 1$ con $r_2/s = 10$	0,99 0,97	0,99 0,97	0,985 0,97	0,985 0,96	0,99 0,97	0,99 0,97	0,99 0,975	—
C. Embutición	Aceites emulsionables en agua, con mayor proporción de jabón y grasa cuanto mayor sea la sollicitación o esfuerzo; bastan lechada de cal o agua jabonada con grafito granulado cuando se trata de chapas bastas				Aceite usado mezclado con pasta de carburo			
1. Lubricante								
2. Presión del punzón prensachapas β_B (kp/cm ²)	28	26	25	24	28	30	53	28
3. Relación de gradación β_{100} para la embutición ¹	1,7	1,8	1,9	2,0	1,9	1,7	1,6	1,5
2.ª embutición sin recocido intermedio	1,2	1,2	1,25	1,3	—	—	—	—
2.ª embutición con recocido intermedio	1,5	1,6	1,65	1,7	1,7	—	—	—
4. Factor q para embutición de piezas rectangulares	0,34	0,31	0,29	0,28	0,29	0,35	0,37	0,42
5. Temperatura de incandescencia (°C)	700-780°			650-750°		660-750°		680-750°
6. Indicación para mordentar	50 % de ácido clorhídrico o 20-30 % de ácido sulfúrico				30 % de ácido sulfúrico			
D. Característica del producto ² tal como se pone a la venta:								
1. Resistencia a la tracción σ_B (kp/mm ²)	28-50	28-42	28-40	28-38	34-42	37-45	42-50	30-35
2. Alargamiento δ_t (%) ³	—	24*	27	30	29-26	20-18	20-16	20-16
3. Profundidad de abollado t (mm) para $s = 0,5$ mm	7,5	8,2	8,7	9,2	—	—	—	7,5
$s = 1,0$ mm	9,2	9,8	10,2	10,6	—	—	—	9,5
$s = 2,0$ mm	11,0	11,9	12,1	12,3	—	—	—	11,6
E. Prescripciones DIN	DIN 1623 (Chapa), DIN 1624 (Cinta)				DIN 1622	DIN 1543		
1. Tipo de material y calidad	DIN 1541 para chapa fina. DIN 1544 para fleje de acero $s = 0,05$ a 5 mm				DIN 1542	DIN 1621, 1605		
2. Tolerancias de espesor y dimensiones ⁴	DIN 1016 para fleje de acero laminado en caliente $s = 0,8$ a 5 mm							

¹ El valor de β_1 está referido a $d = 100$ mm y $s = 1$ mm.
² Obsérvense también las normas DIN 1602-5 y DIN A 114.
³ Para las columnas 1 a 4, valor mínimo de alargamiento con longitud de medición $L = 80$.
⁴ Obsérvense también DIN 1620.

Figura 9. Relaciones β para diferentes materiales, tomado de [4]

Para aceros con resistencias a la tracción σ_B entre 294 -392 MPa el coeficiente β_{100} será de 1.5, por lo que el radio de redondeo de la matriz de embutición será:

$$r_M = \frac{0.04 \cdot 150.92}{103.53 \cdot 1.5} [50 + (150.92 - 103.53)]\sqrt{18}$$

$$r_M = 1.6 \text{ mm}$$

8.3. Holgura entre matriz y punzón de embutición

Una holgura excesiva la matriz y el punzón de embutición puede generar pliegues en la lámina, y deformaciones en el perfil de embutición, mientras que una holgura insuficiente puede causar adelgazamiento excesivo del espesor, rayaduras debido al aumento de fricción y mayor fuerza de embutición

Para calcular la holgura u_z entre la matriz y el punzón de embutición se usa la expresión:

$$u_z = s + 0,07 a \sqrt{10 s}$$

Donde se calcula como:

$$a = \beta_{100} \cdot \frac{d_p}{D} = 1.5 \cdot \frac{103.53}{150.92} = 1.028 \text{ mm}$$

De esta forma, el diámetro de la matriz de embutición será: $103.53 + \left(\frac{1.028}{2}\right) \approx 104 \text{ mm}$

8.4. Presión del pisador

La presión que ejercer el pisador sobre la lámina es de gran importancia para evitar defectos como los pliegues o arrugas y la rotura de la pieza en el radio de embutición.

La presión necesaria del pisador p_n , se obtiene en de la siguiente expresión:

$$p_n = C \left[\left(\frac{d_p}{D} - 1 \right)^2 + 0,5 \frac{d_p}{100 \cdot s} \right] \sigma_B$$

Siendo C un coeficiente con valor de 0.2 para casos prácticos

Luego,

$$p_n = 28 \text{ bar}$$

Esta presión aumenta durante la operación de embutición, ya que la fuerza del pisador suele permanecer constante pero la superficie de contacto entre la lámina y el pisador va disminuyendo a medida que la lámina va fluyendo en la embutición. Por lo tanto, es más conveniente el cálculo de la fuerza de presión, el cual se describe a continuación.

8.5. Fuerza de pisado

La fuerza del pisador P_n , se calcula partiendo de la presión de embutición p_n , el diámetro del flanco de corte D , el diámetro de la matriz de embutición d_m y el radio de la matriz de embutición r_M :

$$P_n = p_n \frac{\pi}{4} [D^2 - (d_m + 2 r_M)^2]$$
$$P_n = 2,8 \frac{N}{mm^2} [150.92^2 - (104 + 2 \cdot 1.6)^2] \frac{\pi}{4}$$
$$P_n = 24.817 \text{ kN}$$

De esta forma, la fuerza que necesita la prensa para realizar la embutición sería:

$$P = F_z + P_n = 16.935 \text{ kN} + 24.817 \text{ kN} = 41.752 \text{ kN} \approx 4.256 \text{ Ton}$$

9. DIMENSIONAMIENTO DE LOS COMPONENTES PRINCIPALES

9.1. Punzón de corte y matriz de embutición

Siguiendo la configuración y el diseño establecidos en el troquel C por PRODENVASES S.A.S, el punzón de corte, también realiza la función de matriz de embutición una vez se da el corte de la lámina. Para dimensionar este elemento, es necesario tener en cuenta el flanco de corte calculado como su holgura con la matriz de corte y el radio de embutición.

En la Figura 10, se puede observar la disposición geométrica general del punzón de corte, el cual tiene un diámetro mayor de ϕ 150.89 mm y un diámetro menor de ϕ 104 mm con un radio en su interior de r 1.6 mm y una altura de 22 mm.



Figura 10. Punzón de corte y matriz de embutición

Esta pieza se construye en carburo de tungsteno, ya que, al tratarse de una producción intensiva en serie, es necesario contar con un material con alta resistencia a la temperatura, de gran durabilidad en su afilado y que produzcan un acabado adecuado de las partes. En este sentido, el carburo de tungsteno es superior que el acero al carbono o acero rápido, ya que puede ser utilizado a mayor velocidad debido a su elevada dureza.

9.2. Matriz de corte

Cuando la salida de las piezas de corte se da por gravedad, es necesario diseñar las matrices de corte con un filo recto al principio y después con una cierta inclinación, como se muestra en la Figura 11.

Este ángulo de salida permite obtener cortes más limpios y menores fuerzas de corte. La parte recta de la matriz de corte se conoce como la vida de la matriz y debe tener una longitud igual a 2 o 3 veces el espesor de la lámina a cortar.

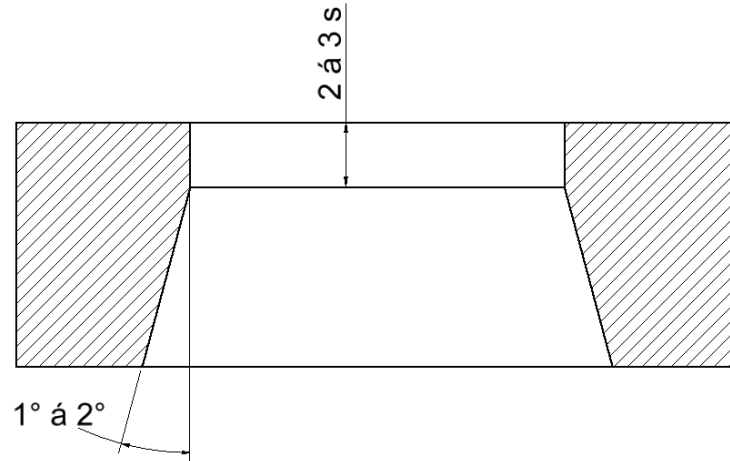


Figura 11. Vida y ángulo de salida de una matriz de corte. Adaptado de [5]

Con estas consideraciones, la Figura 12 muestra las principales dimensiones de la matriz de corte. El diámetro de corte que coincide de manera exacta con el flanco de corte en $\phi 150.92 \text{ mm}$, una vida de 5 mm y un ángulo de salida de 1° .

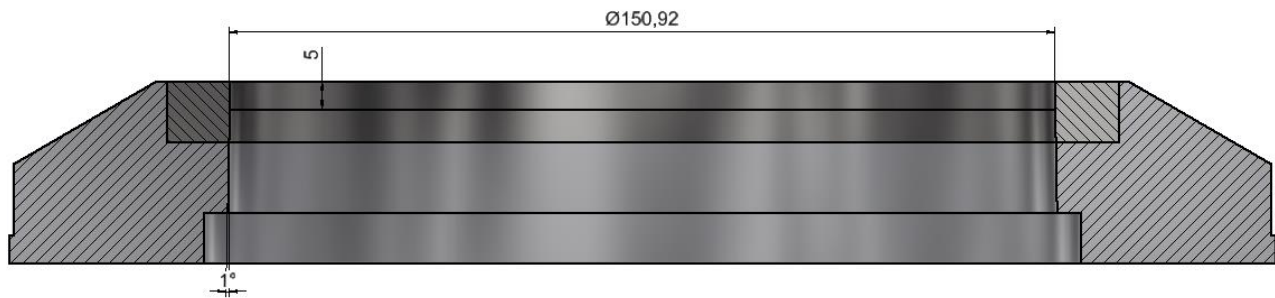


Figura 12. Diseño de la matriz de corte

9.3. Punzón de embutición

Las dimensiones más importantes del punzón de embutición se pueden deducir de la geometría misma de la copa. Pues el punzón de embutición debe conservar el mismo diámetro interno de la copa y su mismo radio interno. Las dimensiones de esta pieza se muestran en la Figura 13.

9.4. Pisador

El pisador debe sostener la lámina en toda la carrera de embutición, permitiendo que esta fluya y evitar obstrucciones entre el punzón y la matriz. En consecuencia, el pisador tiene una forma cilíndrica con un diámetro externo mayor que el diámetro de la matriz y un diámetro interno mayor al diámetro del punzón.

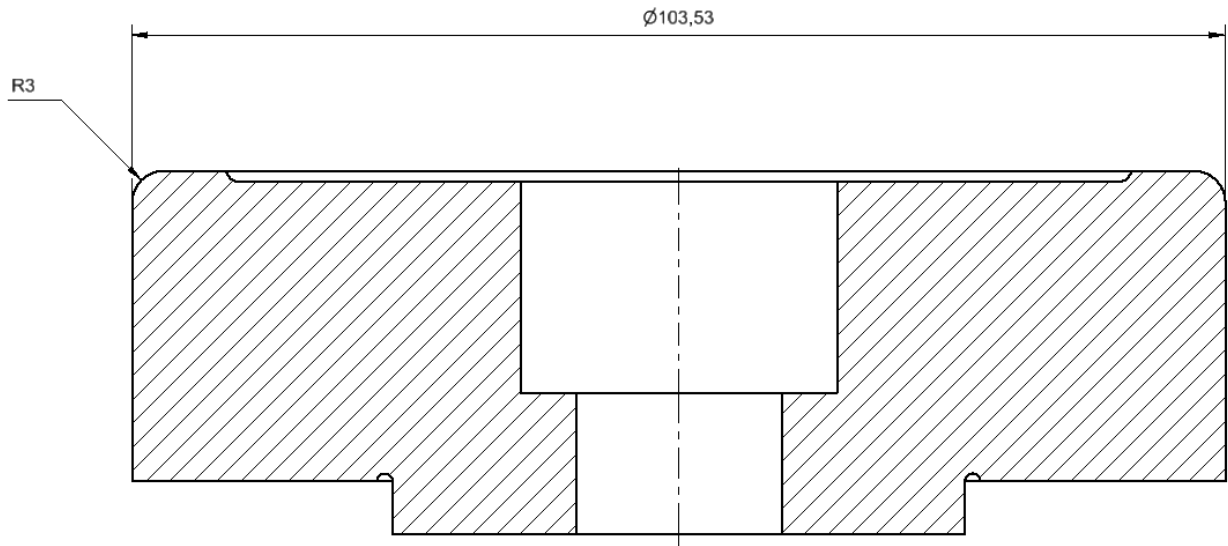


Figura 13. Dimensiones del punzón de embutición

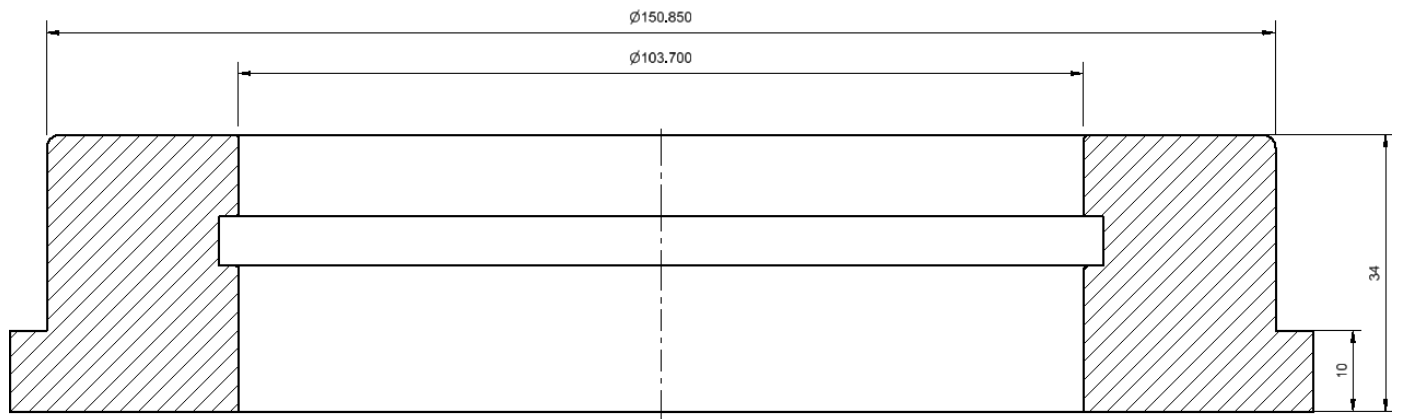


Figura 14. Dimensiones generales del pisador

10. ANÁLISIS MEDIANTE FEM

A continuación, se va a realizar una simulación mediante FEM (Método de los Elementos Finitos) de la embutición de la copa de primera operación, con el objetivo de validar los cálculos teóricos anteriormente presentados como también las dimensiones e interacciones entre las piezas diseñadas anteriormente. Esta simulación se realizará con el programa ANSYS Workbench, **que permitirá predecir el comportamiento del producto en un entorno real.**

10.1. Modelo CAD para el análisis

El modelo CAD contempla el ensamble formado por la lámina, el pisador, la matriz y el punzón de embutición. En este caso, el punzón se encuentra 2.13 mm debajo de la lámina como está en el troquel real y las dimensiones y tolerancias son las que se calcularon y presentaron anteriormente.

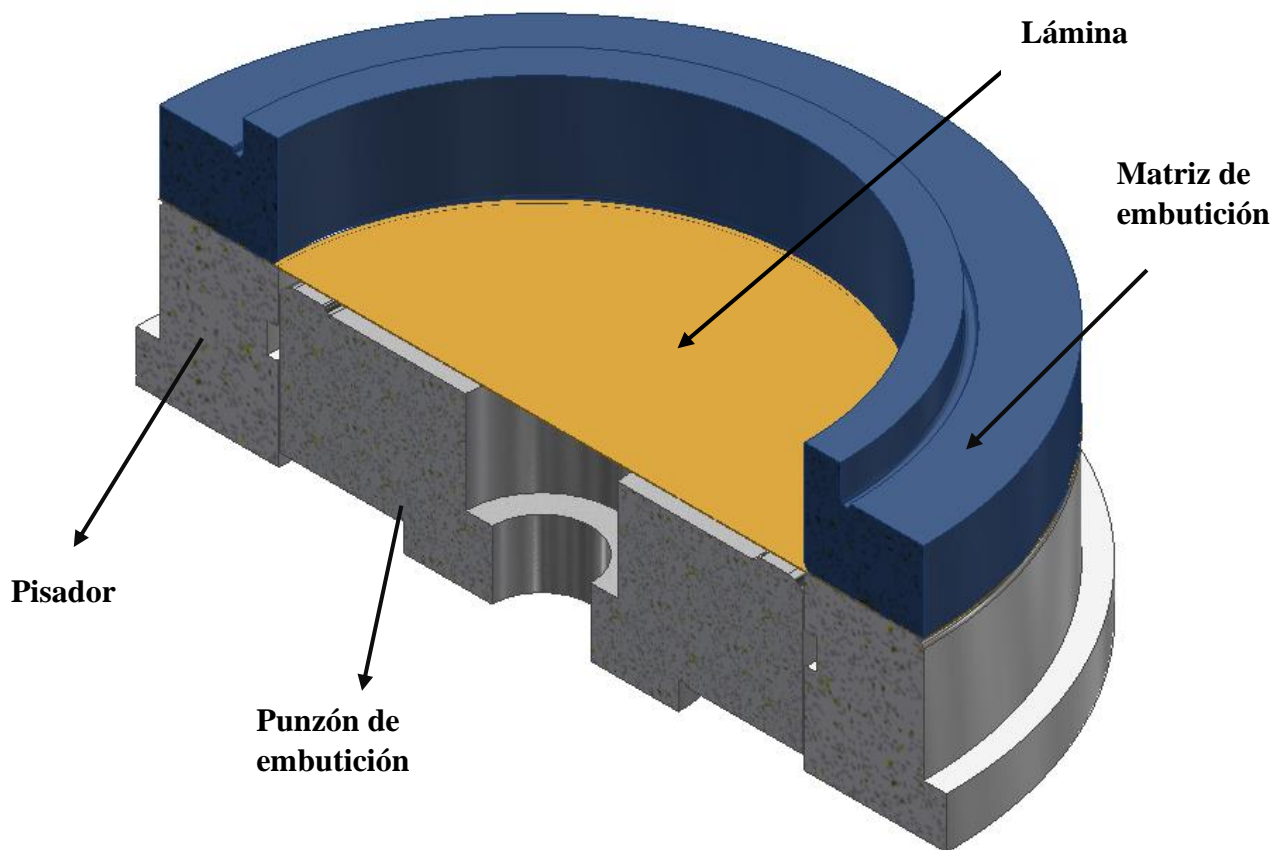


Figura 15. Modelo CAD para el análisis FEM

Este modelo CAD es realizado en el software INVENTOR e importado posteriormente en ANSYS Workbench.

10.2. Materiales para el análisis

Para simular las deformaciones permanentes de la copa, como consecuencia del ingreso en la zona plástica del material es necesario calcular el módulo tangente del material sujeto a deformación. El módulo tangente es la pendiente de la curva esfuerzo deformación, que, por debajo del límite proporcional es igual al módulo Young, mientras que, por encima de este punto, el módulo tangente cambia con la deformación y se calcula mediante los datos obtenidos en el ensayo esfuerzo-deformación [6].

En este caso, ANSYS Workbench en su módulo de materiales de ingeniería cuenta con un material denominado acero estructural no lineal, en el cual se calcula el módulo tangente mediante el endurecimiento bilineal isotrópico (véase Figura 16). Este material encontrado en la base de datos de ANSYS, tiene propiedades mecánicas muy similares a la hoja lata utilizada en PRODENVASES S.A.S, por lo que se escoge este material para simular el comportamiento de la lámina en el proceso de embutición

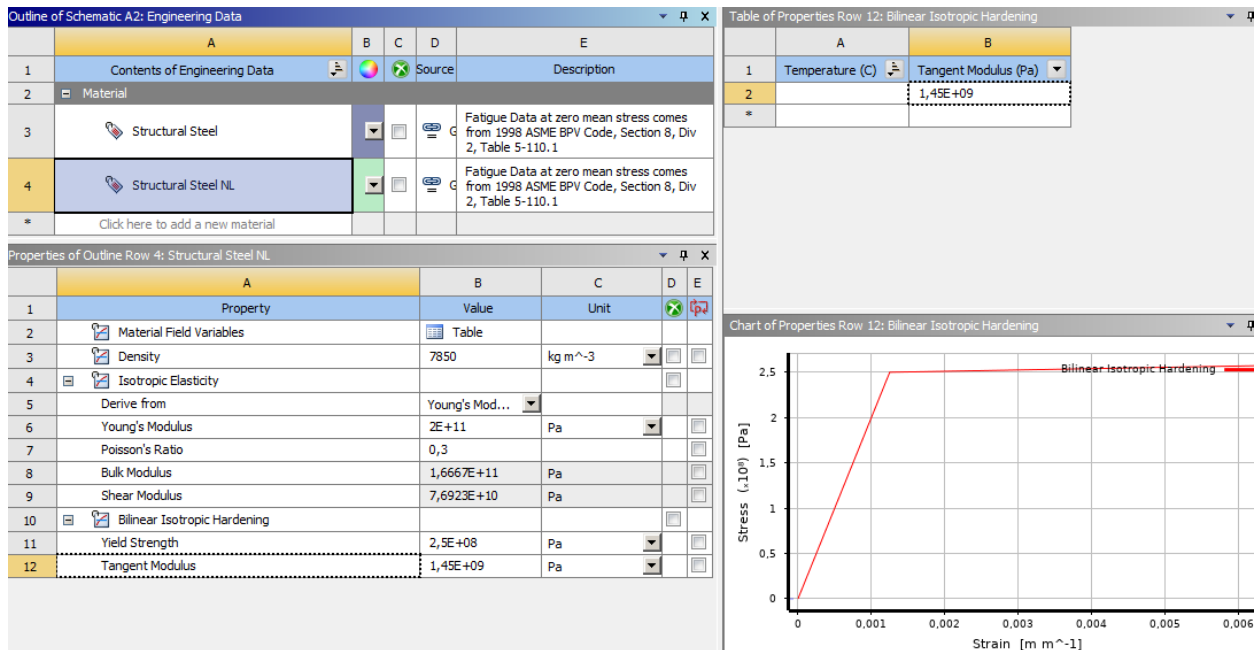


Figura 16. Material escogido para el comportamiento de la lámina en la simulación numérica de la embutición

Por otra parte, el material escogido para los otros elementos más importantes involucrados en el proceso de embutición es el acero estructural. En capítulos anteriores, se mencionó que tanto el pisador como la matriz de embutición en el troquel de PRODENVASES S.A.S son de carburo de tungsteno para alcanzar mejores acabados en el producto final, reducir la frecuencia de mantenimiento de las piezas en comparación a otros materiales como aceros inoxidables austeníticos.

Sin embargo, este análisis numérico no pretende abordar los acabados superficiales de la copa obtenida, tampoco encontrar los factores de fatiga de los elementos de embutición.

Se pretende, por el contrario, validar las dimensiones obtenidas en la copa, la aparición o no de defectos en la misma y la validación de los cálculos teóricos anteriormente obtenidos.

En este sentido, las propiedades de físicas y mecánicas del material escogido para el punzón y matriz de embutición y el pisador se muestran en la Figura 17.

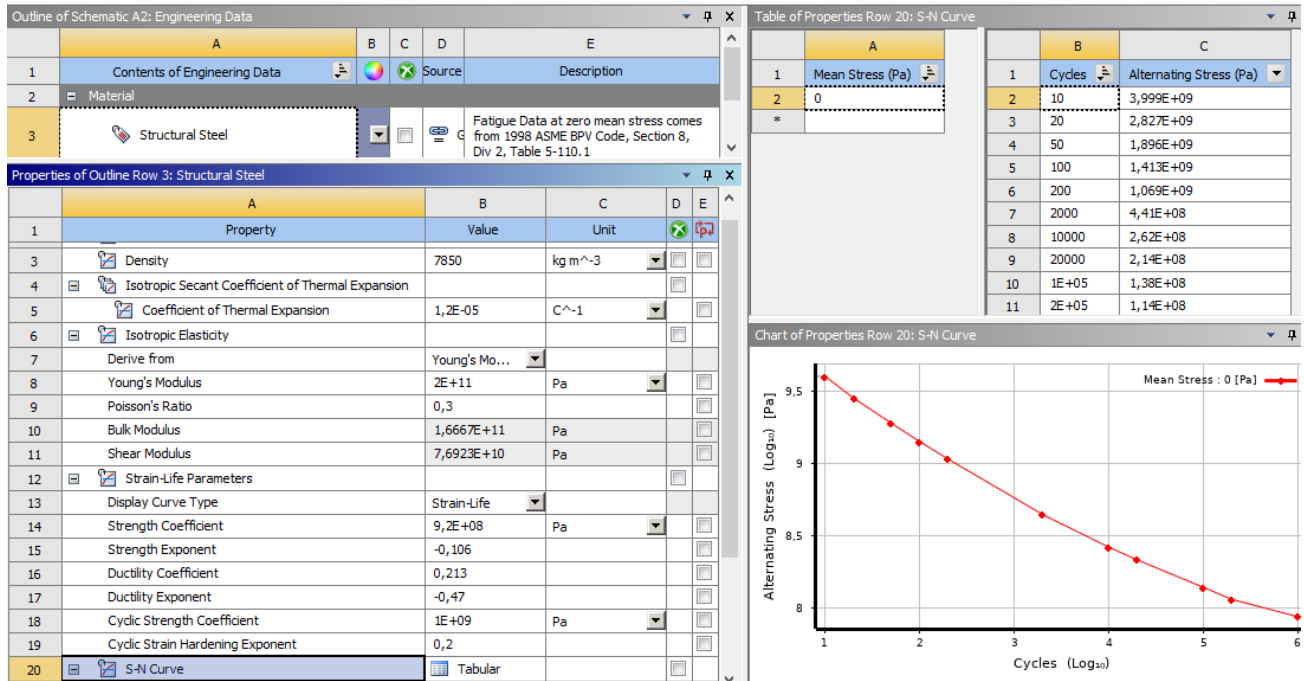


Figura 17. Material escogido para simular el comportamiento del punzón y matriz de embutición y el pisador en la simulación del proceso de embutición

10.3. Mallado

10.3.1. Matriz de embutición

La Figura 18, muestra la discretización en nodos y elementos de la superficie la matriz de embutición por donde se desliza la copa. En este caso, se usó un tamaño de elemento de 3 mm que es suficiente para el análisis.

10.3.2. Punzón de embutición

Similar a la matriz de embutición, el punzón de embutición cuenta con elementos de tamaño igual a 3mm para guardar una condición similar. El aspecto general de la malla se muestra en la Figura 19.

10.3.3. Pisador

El pisador, permite el flujo de la lámina entre el punzón y la matriz disminuyendo las probabilidades de formación de pliegues. Por esta razón, se considera que tiene igual importancia en el correcto desarrollo de la simulación y se establece un tamaño de 2.9 mm en los elementos.

10.3.4. Lámina

Finalmente, el aspecto general de la malla de lámina se muestra en la Figura 21.

Es posible observar que la malla de la lámina es mucho más refinada que la de los demás componentes, pues se consideró que la lámina tiene el mayor protagonismo en la simulación en tanto su forma y dimensiones son el principal interés de este análisis. En este caso se utilizó un mallado de tamaño 1.8 mm

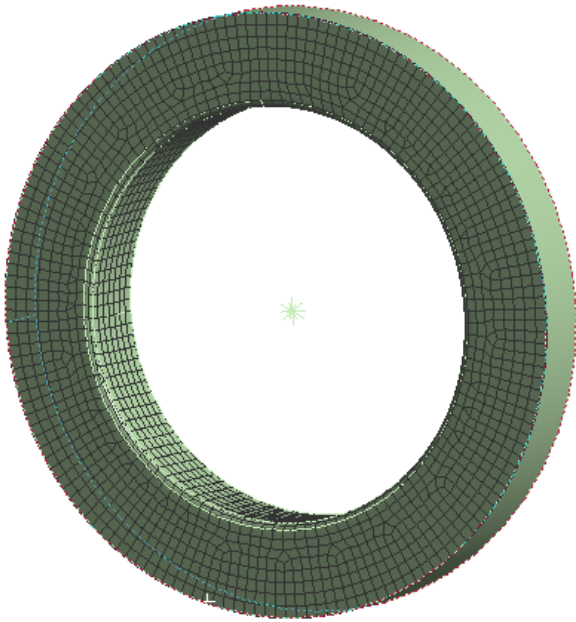


Figura 18. Mallado de la matriz de embutición

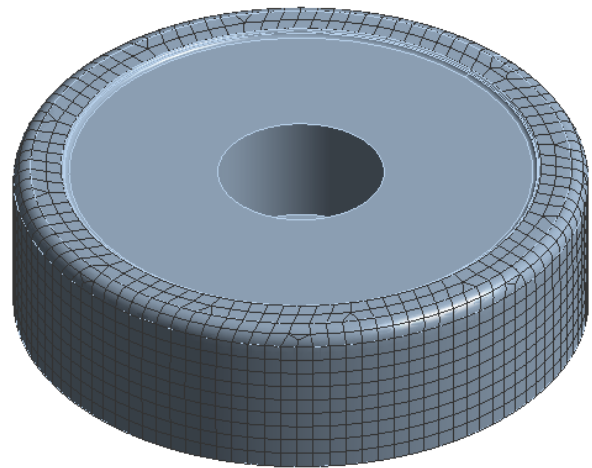


Figura 19. Mallado del punzón de embutición

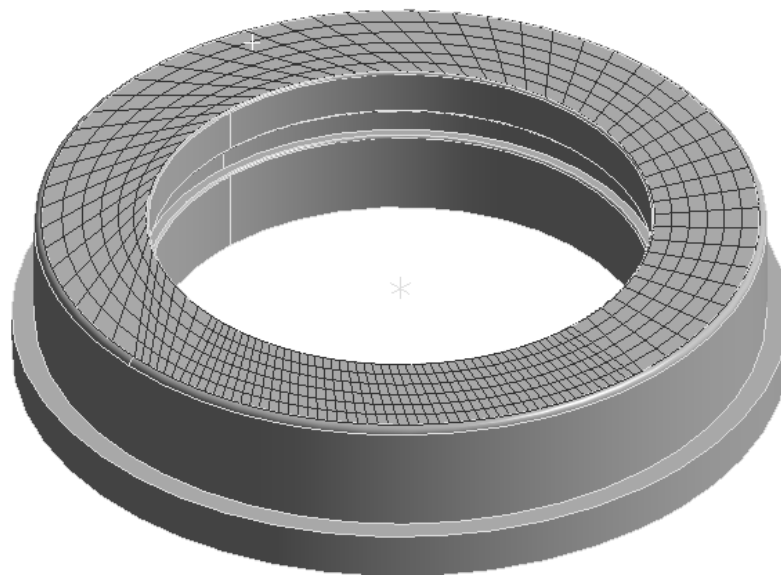


Figura 20. Mallado del pisador

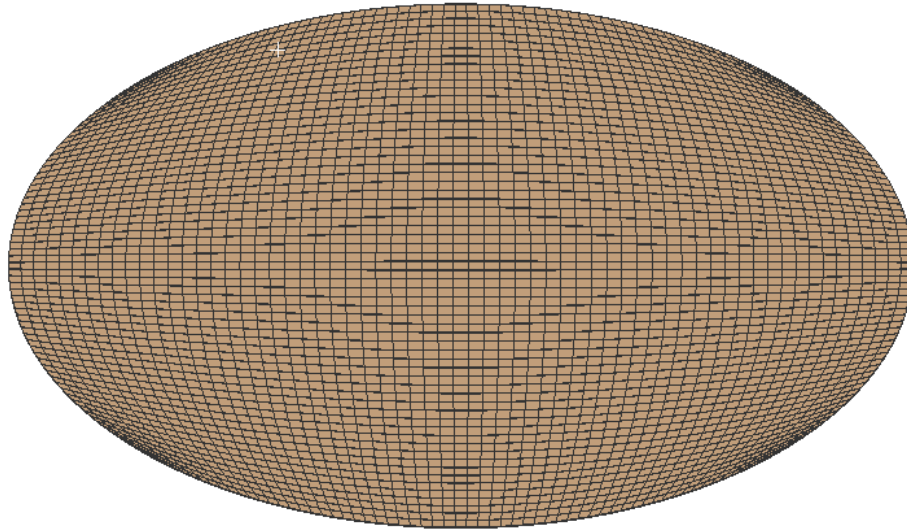


Figura 21. Mallado de la lámina

Como resultado, se obtiene un mallado de 8199 elementos y 41734 nodos.

10.4. Condiciones de frontera

Para establecer las interacciones entre los diferentes cuerpos presentes en el análisis, es necesario definir las condiciones iniciales del problema.

1. Entre la lámina y el pisador se establece de deslizamiento sin fricción, teniendo en cuenta que la lámina no se adhiere al pisador en el proceso de embutición.
2. Similarmente, entre la lámina y el punzón de embutición se estableció una condición sin fricción en tanto el punzón empuja la lámina, pero una vez se termina el proceso de embutición no existe adherencia entre el punzón y la lámina.
3. Finalmente, entre la lámina y la matriz de embutición, se establece un coeficiente de fricción de 0.47 por tratarse de interacción acero-acero.

Por último, tanto la matriz como el pisador se les establece una condición de anclaje fijo en todo momento, mientras que el punzón de embutición realiza un recorrido ascendente de 27.5 mm en un segundo y retrocede hasta su posición de partida en un segundo posterior, tal como se muestra en la Figura 22.

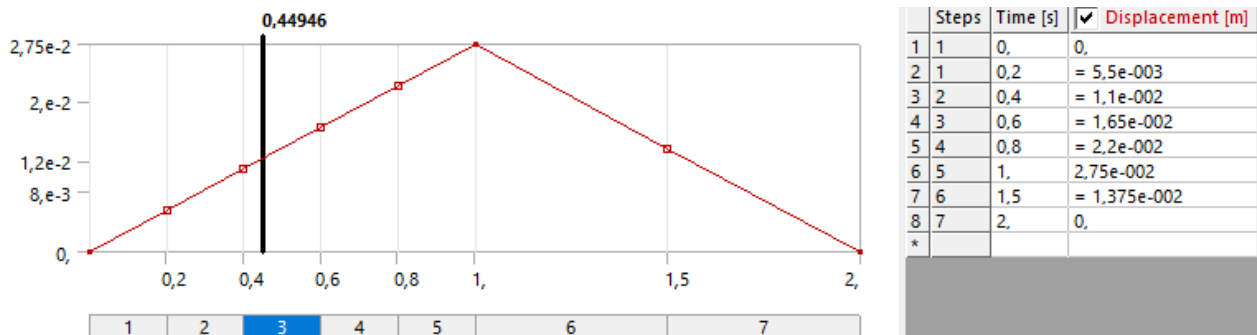


Figura 22. Recorrido espaciotemporal del punzón de embutición

10.5. Resultados y discusión

La Figura 23 muestra el esfuerzo máximo generado en la copa mediante el criterio de von Mises. De la figura se aprecia que el esfuerzo máximo de 659 MPa y se presenta en el cuello de la copa que hace contacto con la matriz de embutición. Si bien este esfuerzo sobre pasa el límite de fluencia del material para formar deformaciones permanentes, no hay evidencia de roturas en la formación de la copa.

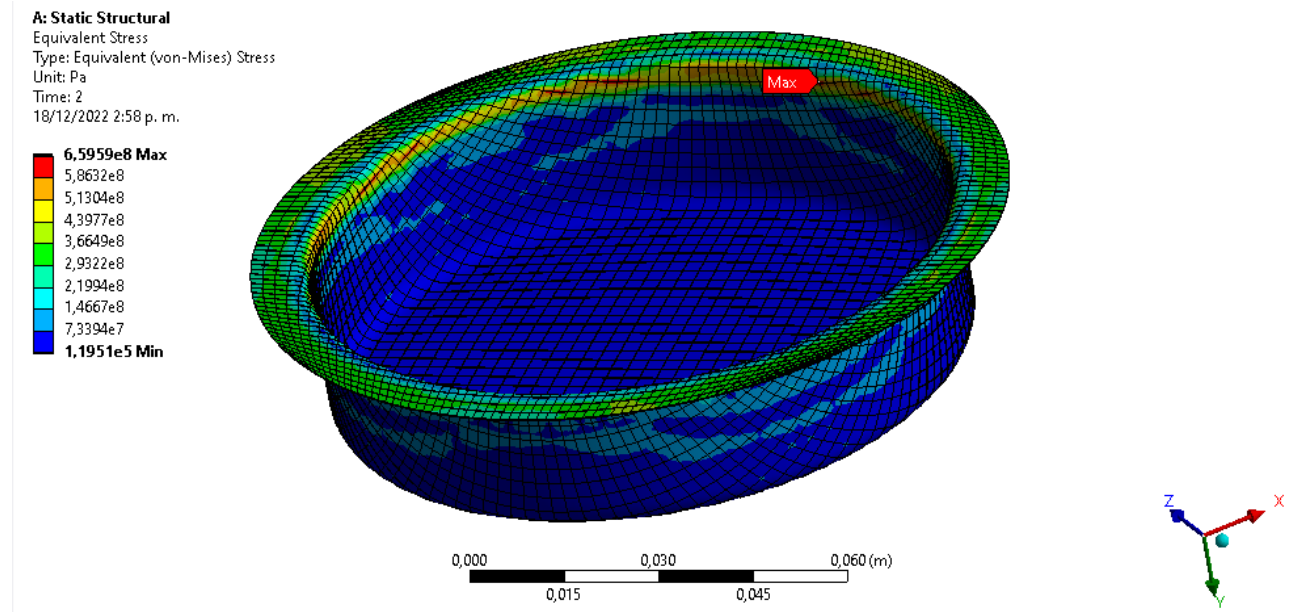


Figura 23. Esfuerzo equivalente de von-Misses

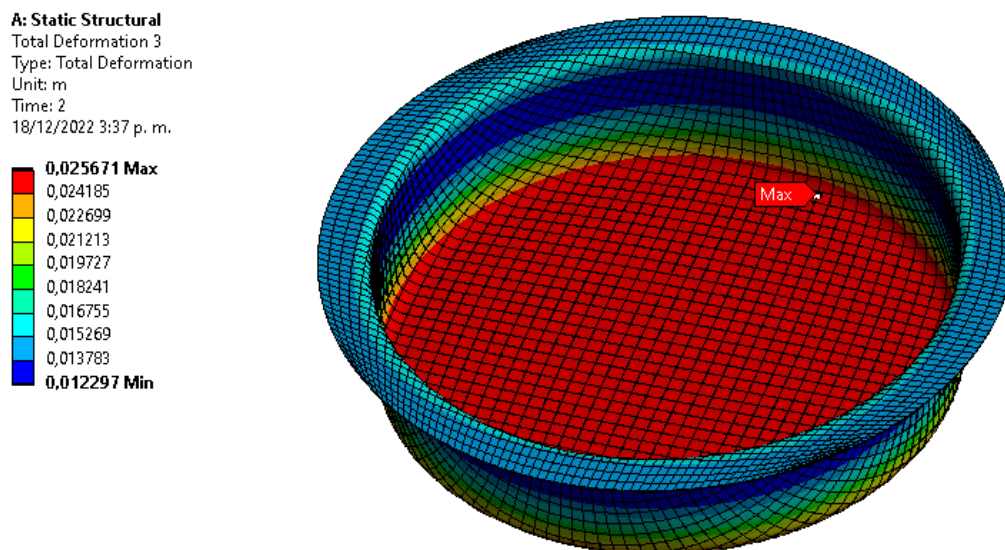


Figura 24. Deformación máxima de la copa

La Figura 24 muestra la deformación máxima de la copa en la simulación numérica, de 25.67 mm. En el resultado de deformaciones máximas se nota que en el proceso de embutición no se generan defectos como pliegues excesivos, rayaduras o falta de material.

Siguiendo con el análisis, la Figura 25 muestra la fuerza hallada mediante simulación numérica que se genera en el proceso de embutición. La fuerza máxima que se presenta, cercana al punto muerto superior del punzón de embutición es de 24.745 kN.

Este valor difiere del valor teórico hallado anteriormente (16.935 kN) cerca de 8kN. La simulación numérica representa un acercamiento al comportamiento mecánico real de la lámina en contacto con el punzón y la matriz, por lo que, para este análisis, se toma como valor real la fuerza de 24.745 kN y se establece un factor de seguridad de 1.5 para el valor hallado con las correlaciones empíricas tal como establecen Vedpathak, et al [6] en su análisis numérico de un proceso de embutición.

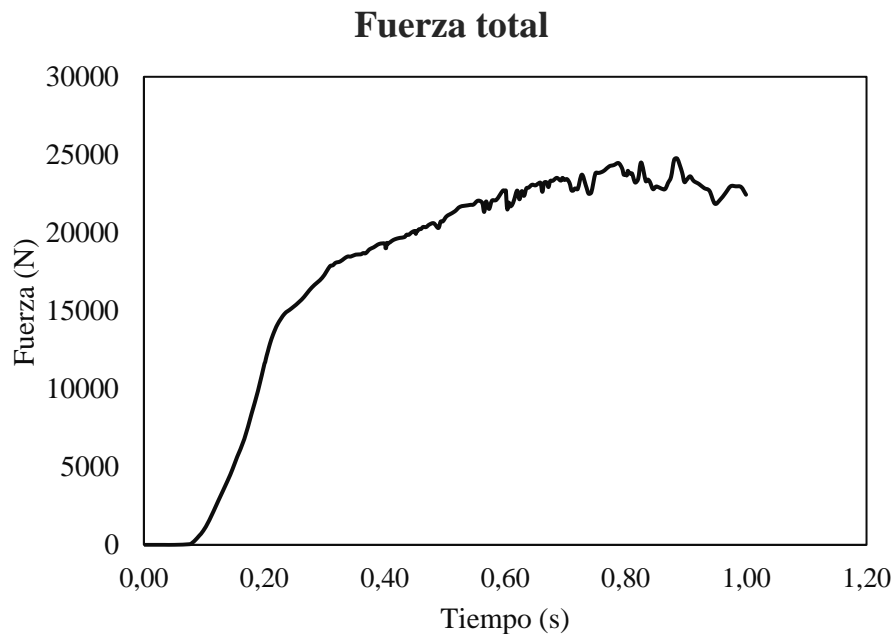


Figura 25. Fuerza total presente en el proceso de embutición

Finalmente, la Figura 26 muestra las dimensiones de la copa obtenida mediante simulación numérica. Esta copa conserva dimensiones muy similares a las dimensiones de una copa de primera operación obtenida en PRODENVASES S.A.S (véase Figura 5), teniendo la mayor desviación en el diámetro mayor. Esto puede deberse principalmente por menos deslizamiento del que se presenta en el troquel real, que, en la simulación se calcula mediante un coeficiente de fricción entre el punzón y la lámina.

Para generar un cálculo más detallado, sería necesario realizar un estudio que permita determinar el coeficiente de fricción entre la hoja lata que forma la copa y el punzón de embutición. No obstante, las dimensiones en general de la copa son muy cercanas a la realidad, lo que permite validar los modelos utilizados en este estudio.

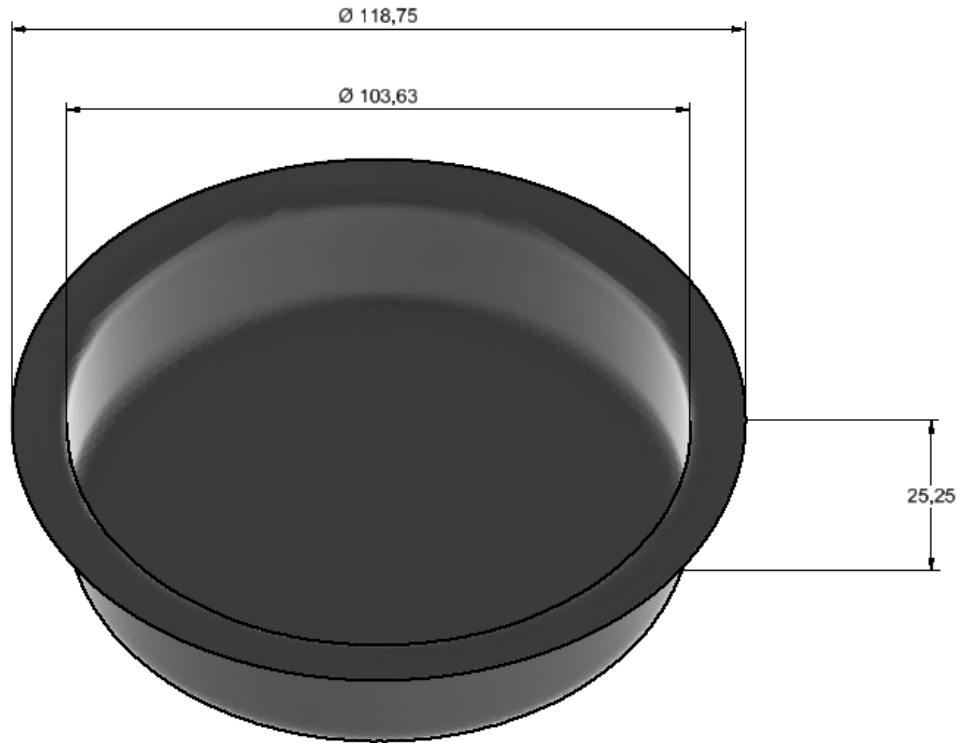


Figura 26. Dimensiones de la copa obtenida mediante simulación numérica

11. VALIDACIÓN EXPERIMENTAL EN EL TROQUEL MODIFICADO

La Figura 27, muestra una vista general del ensamble del troquel homologado para la fabricación de copas de primera operación del envase de atún. En esta figura se puede apreciar las piezas diseñadas en este trabajo en los capítulos anteriores, como también otras piezas necesarias para el funcionamiento correcto del troquel, como la base del punzón de embutición, anillo antifricción para evitar el desgaste de las piezas en contacto con el pisador y el sistema de agujas que transmite el movimiento del pistón de nitrógeno al pisador para evitar la formación de pliegues en la copa.

Una vez se fabricaron las piezas necesarias para la homologación, el ensamble del troquel se llevó acabo en el taller de PRODENVASES S.A.S, en donde se realizó una puesta a punto verificando las alturas relativas de las herramientas de corte y embutición con respecto a la base inferior, para garantizar que se conserven las relaciones establecidas en las piezas desde el diseño y se obtenga la forma deseada de la copa. La Figura 28, muestra el troquel homologado instalado en la prensa C.

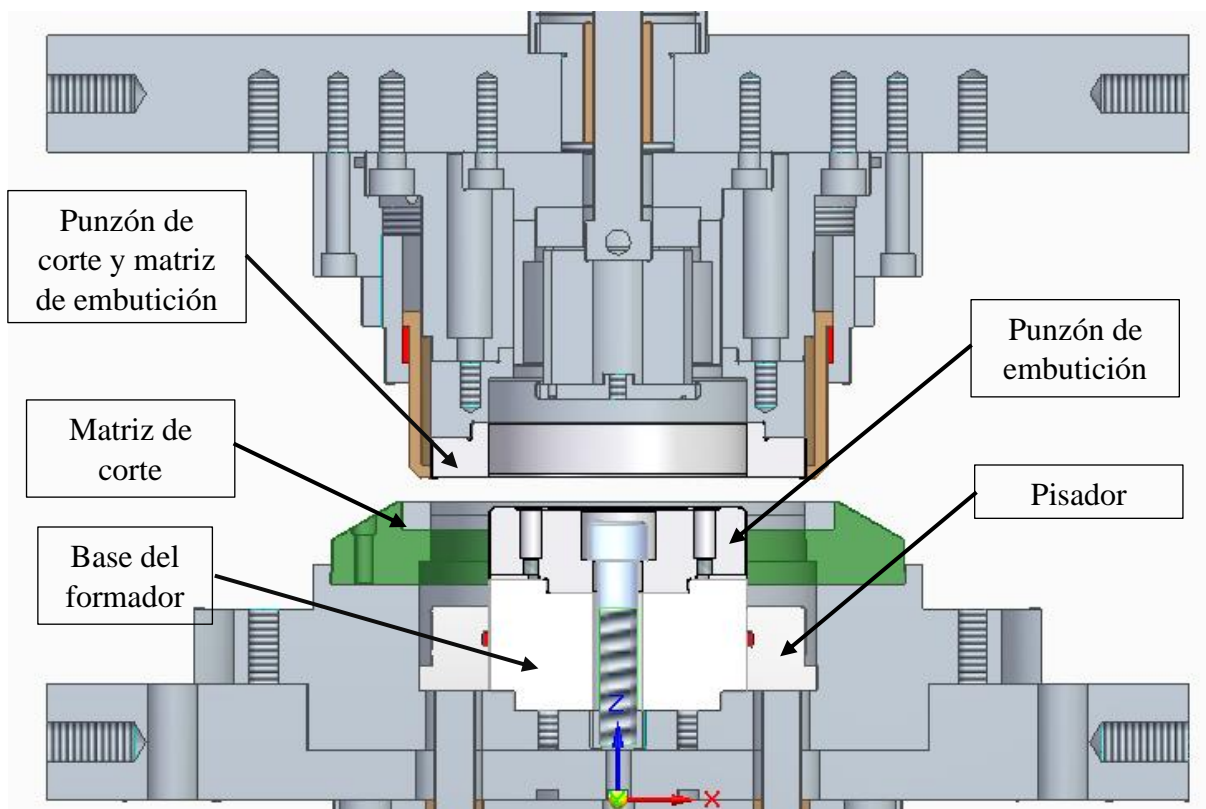


Figura 27. Troquel homologado para fabricación de copas de primera operación de envases de atún

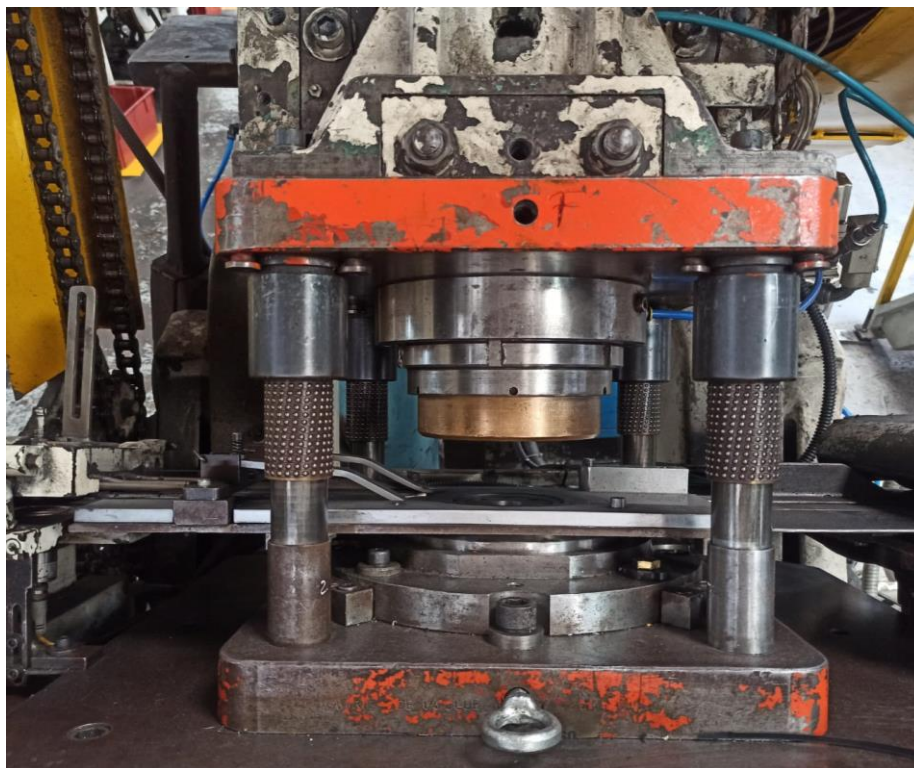


Figura 28. Troquel modificado instalado en la prensa C para validación y ensayos

La Figura 29 muestra las dimensiones generales de la copa de primera operación obtenida en el troquel homologado. En esta figura se puede apreciar que las dimensiones coinciden en gran medida con las especificaciones establecidas anteriormente.

Por otra parte, la Figura 30 muestra el cuerpo del envase de atún final, obtenido a partir de la copa mostrada en la Figura 29. Este producto final cumple los estándares dimensionales y estructurales definidos por PRODENVASES S.A.S para ser comercializados.



Figura 29. Dimensiones generales de la copa obtenida en el troquel homologado



Figura 30. Producto final obtenido a partir de la copa de primera operación fabricada en el troquel homologado

12. CONCLUSIONES

Este trabajo presentó la homologación del troquel C para la fabricación de copas de atún de primera operación en la empresa PRODENVASES S.A.S, basándose en consideraciones geométricas, ecuaciones analíticas, simulaciones numéricas y ensayos experimentales.

A partir de los resultados es posible concluir:

- Las ecuaciones analíticas permitieron dimensionar las herramientas fundamentales de corte y embutición, como también conocer las fuerzas involucradas en estos dos procesos, con el fin de obtener la capacidad necesaria de la prensa.
- Las simulaciones numéricas permitieron conocer el comportamiento de la copa al ser embutida, lo cual permitió descartar la aparición de defectos como pliegues o rasgaduras en la copa.
- La simulación numérica permitió confrontar los resultados analíticos, encontrando diferencias en la fuerza de embutición, lo cual permite calcular la capacidad de la prensa con mayor precisión.
- El perfil de la copa obtenido mediante simulación numérica difiere del que se obtiene en la prensa real. Esto puede deberse principalmente al material no lineal escogido en la simulación que no permite captar con total precisión la fluidez de la lámina entre el pisador y la matriz de embutición.
- Los ensayos realizados en la prensa C, permitieron obtener un producto final acorde a lo esperado dimensional y estructuralmente.

13. REFERENCIAS

- [1] J. M. Gómez and C. V. Drada, “Guía para diseño y construcción de troqueles,” Corporación universitaria autónoma de occidente, Santiago de Cali, 1995.
- [2] V. Boljanovic, *Sheet metal forming processes and die design*, 2nd ed., vol. 1. South Norwalk, 2004.
- [3] Jones. Franklin, *Die Design and Diemaking Practice* , 3rd ed., vol. 1. Industrial Press, 1985.
- [4] K. Oehler and A. Gerhard, *Herramientas de troquelar, estampar y embutir*. Barcelona, 1977.
- [5] T. L. Navarro, *Troquelado y Estampación con aplicación al punzonado, doblado, embutición y extrusión*. Barcelona, 1976.
- [6] V. Vedpathak, A. Tadamalle, and D. Burande, “Evaluation of Deep Drawing Force in Sheet Metal Forming”.