

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---



**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Análisis por elemento finito del proceso  
de fabricación de una cúpula de aerosol  
realizada en 4 pasos de embutido**

**TESIS**

Que para obtener el título de  
**Ingeniero mecánico**

**P R E S E N T A N**

Fájer de Prado Santiago

Rosas Ortiz Alejandro

**DIRECTOR(A) DE TESIS**

M. en C. Edgar Isaac Ramírez



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2019**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## **Prólogo**

Esta tesis presenta el análisis de un proceso de trabajo en lámina modelado en una paquetería de elemento finito, específicamente cuatro pasos de embutido, mediante los cuales se manufactura la tapa de una lata de pintura. Esto con el fin de estudiar el comportamiento de la lámina y la diferencia entre el flujo de ésta al considerarla isotrópica y anisotrópica.

En el capítulo 1 se hace una breve descripción del proceso de embutido, así como de los tipos de herramientas utilizadas para crear las piezas que son resultado de este proceso de manufactura además de los parámetros más importantes involucrados.

En el capítulo 2 se presenta un marco teórico en el que se describen los pasos a seguir para lograr el óptimo diseño de matrices y punzones para cada paso de embutido, partiendo de las chapas reales obtenidas en cada paso de embutido de la cúpula de aerosol, y a partir de ello se obtuvieron las características geométricas con las que se modelaron los instrumentales.

Con el fin de describir la metodología de la simulación, en el capítulo tres, se detalla cada parámetro ingresado en el software Abaqus/CAE®, además de la obtención de algunos datos importantes relacionados con la anisotropía del material.

En el cuarto capítulo se analizan las variables más importantes involucradas en el proceso de manufactura tales como deformaciones, esfuerzos, así como las velocidades para analizar el flujo del material embutido, dando énfasis a la comparación entre isotrópico y anisotrópico.

En el último capítulo se establecen las conclusiones obtenidas para contrastar y resaltar las diferencias de las variables analizadas en el cuarto capítulo entre los dos casos analizados; anisotrópico e isotrópico y se compara pieza real y la obtenida por simulación.

## Agradecimientos

A mis padres, Federico y Rosario, con todo mi cariño, por cada consejo y regaño, por todo su esfuerzo y dedicación invertidas en mí y por darme siempre lo mejor para que pudiera llegar a este momento.

A mis hermanos Alma y Federico por ser los mejores ejemplos que he tenido en la vida y por la ayuda incondicional que siempre me han proporcionado.

A Aidee por todo su apoyo y confianza, así como por ser la mejor amiga con la que he crecido y quien me brinda alegría en cada momento.

A mis amigos Paco, Buba, David, Rubén, el amijito y Aldo por todos y cada uno de los momentos vividos, además del aprendizaje constante que han traído consigo estas vivencias.

A Santi por la colaboración en el presente trabajo y por cada plática y los consejos que siempre me dio.

A mis abuelos Federico, Carmen, Ramón y Santa, así como a mis tíos Fernando, Miguel y Benjamín, y a mis tías Mari, Lolis, Elvi, Vicky y Mine por toda la ayuda que me han concedido desde siempre.

A la UNAM por ser mi Alma Mater, por brindarme los mejores momentos de mi vida y por permitirme formarme como ingeniero en la máxima casa de estudios.

Alejandro Rosas Ortiz.

A Rosy, Marimer, Jesús y Horacio, mi familia.

A Alejo por compartir este camino.

Santiago Fajer de Prado

## Índice:

1.- Generalidades de embutido.	1
1.1 Introducción.	1
1.2 Clasificación del embutido de lámina.	4
1.2.1 Embutido convencional.	5
1.2.2 Embutido no convencional.	5
1.3 Herramental para embutido.	6
1.3.1 Matrices.	6
1.3.2 Punzones.	8
1.3.3 Pisadores.	9
1.4 Prensas para embutido.	10
1.5 Lubricación.	11
1.5.1 Tipos de lubricantes en el proceso de embutido.	11
1.5.2 Coeficientes de fricción.	12
1.5.3 Lubricación de película sólida.	13
1.6 Defectos comunes de manufactura en el proceso de embutido.	13
1.7 Modelos de embutido de lámina.	14
1.7.1 Relación de embutido.	14
1.7.2 Fuerzas de embutido.	14
1.7.3 Fuerza de sujeción.	15
1.8 Anisotropía.	16
1.8.1 Anisotropía normal.	16
1.8.2 Anisotropía planar.	17
1.8.3 Cedencia anisotrópica.	19
1.8.4 Criterio de fluencia de Hill .	19
2.- Diseño para herramientas de embutido.	20
2.1 Metodología de diseño para matrices de embutido.	20
2.1.1 Diámetro de la lámina.	20
2.1.2 Parámetros de las matrices.	21
2.1.3 Radio de la matriz.	22
2.1.4 Radio de la esquina de la matriz para el primer embutido.	22
2.1.5 Radio de la esquina de la matriz para embutidos posteriores.	22
2.1.6 Juego entre el punzón y la matriz.	23
2.1.7 Diámetro nominal del punzón.	24
2.1.8 Radio de la esquina del punzón.	24
2.1.9 Diámetro nominal de la matriz.	25
2.1.10 Uso de sujetador de lámina.	25
2.2 Caso de estudio.	25
2.3 Diseño de herramental.	28
2.3.1 Primer paso de embutido.	28
2.3.2 Segundo paso de embutido.	30
2.3.3 Tercer paso de embutido.	31

2.3.4 Cuarto paso de embutido.	33
3.- Modelado mediante paquetería Abaqus/CAE® de elemento finito.	35
3.1 Generación de las geometrías.	35
3.1.1 Matrices.	35
3.1.2 Punzones.	36
3.1.3 Pisadores.	37
3.1.4. Anillos de presión.	37
3.1.5 Lámina.	38
3.2 Propiedades mecánicas de los materiales.	38
3.2.1 Material para la lámina.	38
3.2.2 Material para la matriz y el punzón.	40
3.2.3 Material para el pisador.	40
3.3 Ensamble.	41
3.4 Declaración de pasos.	41
3.5 Interacciones entre cuerpos.	42
3.5.1 Coeficiente de fricción entre matriz, punzón y lámina.	43
3.5.2 Coeficiente de fricción entre pisador y la lámina.	43
3.6 Condiciones de carga y de frontera.	43
3.6.1 Presión de sujeción del pisador.	43
3.6.2 Presión de sujeción primer paso.	43
3.6.3 Presión de sujeción segundo paso.	44
3.6.4 Presión de sujeción tercer paso.	44
3.6.5 Presión de sujeción cuarto paso.	44
3.6.6 Velocidad de embutido.	45
3.6.7 Restricciones de desplazamiento para herramientas	45
3.7 Malla.	45
3.7.1 Malla para la lámina.	45
3.7.2 Malla para la matriz y el punzón.	48
4.- Resultados.	49
4.1 Resultados del primer paso de embutido.	49
4.2 Resultados del segundo paso de embutido.	58
4.3 Resultados del tercer paso de embutido.	67
4.4 Resultados del cuarto paso de embutido.	75
4.5 Discusión.	86
5.- Conclusiones.	89
6.- Referencias	91

# 1. Generalidades de embutido.

## 1.1 Introducción.

La importancia comercial del embutido de lámina es muy grande, debido a que distintos productos a nivel industrial incluyen partes hechas con láminas de metal, tales como: latas para bebidas, electrodomésticos, cubiertos y varias piezas automotrices como cofres, toldos y las que forman la carrocería. (figura 1.1.) En México el sector dedicado a la producción de envases metálicos exporta la suma anual de 519 millones de dólares (Rueda et al., 2012).

El embutido de lámina se caracteriza por producir piezas con elevada resistencia, buen acabado superficial y bajo costo para producciones en masa. Figura 1.1.



a)



b)



c)



d)

Figura 1.1 Ejemplos de productos fabricados por embutido de lámina. a) Latas de aluminio para bebidas producidas en masa (Seberini, s.a.), b) Lavaplatos común de casa. (Focus technology Co., 2017), c) Cuchara de uso doméstico. (IndiaMART, 2018) d), Cofre de automóvil modelo Seat Ibiza III 2005 hatchback (6L) (autoparti.it, 2018)

Como se observa en la figura 1.1 existen diferentes tipos de piezas de uso cotidiano que se fabrican a través de este proceso. Para el envase de las latas de aerosol comunes (de pintura, por ejemplo) se necesitan fabricar tres piezas que serán ensambladas al final. La primera de ellas, comenzando de abajo hacia arriba, es la base. Después está el cilindro y por último la cúpula. (Ver figura 1.2).



Figura 1.2 Partes de una lata de aerosol.

El proceso de manufactura para cada elemento es distinto ya que cada pieza es diferente geoméricamente. La cúpula es una pieza que requiere nueve pasos de manufactura debido a su complejidad. (Figura 1.3)



Figura 1.3 Cúpulas para lata de aerosol (Zhoushan Golden Wing Machinery Co., Ltd., 2018).

El proceso de fabricación de la cúpula consiste en nueve pasos a partir de la chapa que será la materia por transformar.

Comienza con un embutido cilíndrico (ver figura 1.4a) continúa con otro embutido con un punzón con diámetro ligeramente mayor para formar dos niveles en la cúpula (ver figura 1.4b) posteriormente se embute con un punzón menor en tamaño y diámetro variable, con el cual va tomando una forma semiesférica para el nivel de en medio (ver figura 1.4c). A continuación, se realiza otro embutido con un punzón que tiene un diámetro aún menor que forma la cúpula terminada (ver figura 1.4d). En seguida se realiza un corte en la tapa de la cúpula, que es donde se coloca la válvula por donde saldrá el fluido (ver figura 1.4e). En los siguientes dos pasos se realiza un doblé en la porción de lámina que aún esta plana (ver figura 1.4f) y se realiza un rasurado en dicha zona con el fin de eliminar y emparejar de manera que quede circular (ver figura 1.4f). Después se realiza un rizo a la zona de la tapa (ver figura 1.4g) así como en la zona plana de la cúpula con el fin de eliminar los fillos (ver figura 1.4h). Por último, se realiza un doblé alrededor de la base de la cúpula (ver figura 1.4i).

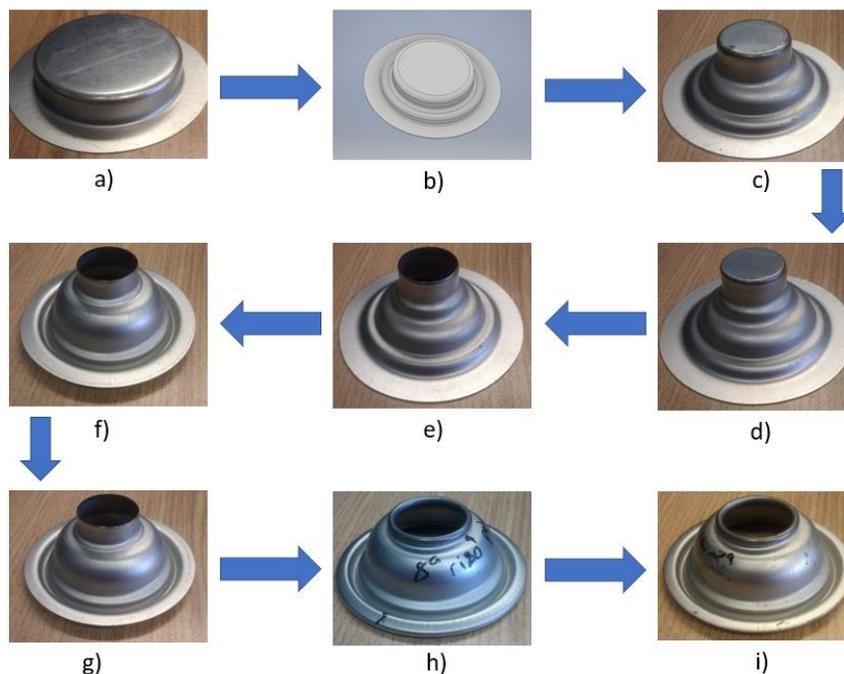


Figura 1.4 Pasos de Manufactura para la cúpula de lata de aerosol.

Debido a la dificultad y a lo extenso que es modelar los nueve pasos de manufactura, además de las complejidades que se presentan al realizar una separación en la malla para los pasos de corte, en este trabajo se analizan solamente los primeros cuatro pasos, que corresponden a los embutidos de lámina.

Durante un embutido se coloca la lámina sin deformar sobre la matriz o dado. Después se coloca el pisador sobre la lámina aplicando presión. Hasta ahora no ha sucedido ninguna deformación. Es hasta que el punzón se desplaza verticalmente hacia la matriz, el contorno de la lámina se desplaza radialmente hacia el centro conforme el punzón baja, (Ver figura 1.5). (Karali M., 2011).

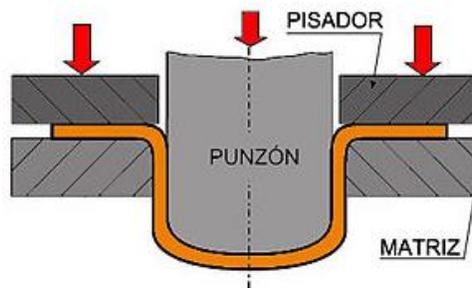


Figura 1.5 Embutido cilíndrico de lámina con los elementos principales involucrados. (Wikimedia commons, 2016)

## 1.2 Clasificación del embutido de lámina.

De manera general se puede clasificar el proceso de embutido de lámina como convencional (con herramientas) y no convencional (figura 1.6). El esquema presenta una clasificación del proceso basándose en su operación.

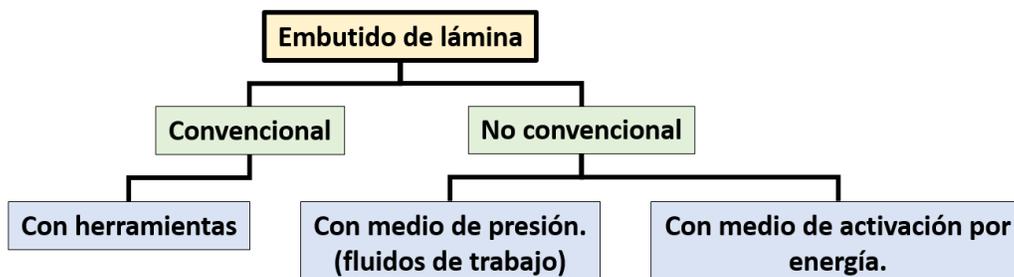


Figura 1.6 Clasificación del proceso de embutido por medio de su operación. (Swapa, (2017))

### **1.2.1 Embutido convencional.**

Este tipo de embutido no involucra más que sistemas de punzón y matriz. Y se realiza generalmente a temperatura ambiente.

Dentro de las limitaciones de este tipo de embutido se encuentra la complejidad para predecir el flujo del material, ya que el criterio de estabilidad del proceso de conformado no resulta fácil de definir. Esto conlleva a que la selección de los parámetros del proceso y del diseño de herramental se dificulten, por lo que se requiere usar un gran número de herramientas para lograr la pieza.

Se deberá que tener precaución con deformaciones severas en el embutido, ya que al tratarse de una deformación en frío se presentará acritud, pudiendo esto conducir a la fractura de la pieza.

### **1.2.2 Embutido no convencional.**

El embutido no convencional es todo aquel que no utilice un sistema de fuerza mecánico, otro aspecto que también marca esta diferencia, es el uso de sistemas adicionales para mejorar el conformado del material. Algunos de los procesos de embutido no convencionales son el hidro-formado, donde un fluido a presión se inserta en la cavidad de la matriz para deformar la chapa, el conformado superplástico, el cual se caracteriza por excepcionales deformaciones a muy reducida velocidad, esto puede efectuarse mediante un gas que entra a presión a la cavidad de la matriz para formar la pieza deseada, y por último, el conformado electromagnético, en el que una bobina crea una fuerza debido a la corriente inducida que hace que la chapa se deforme. (Ver figura 1.7).

Las limitantes de estos procesos es el requerimiento de más sistemas de seguridad y que el tiempo de manufactura es más largo elevando el costo. Por otra parte, se necesita tener control de muchos parámetros para lograr una pieza sin defectos de manufactura.

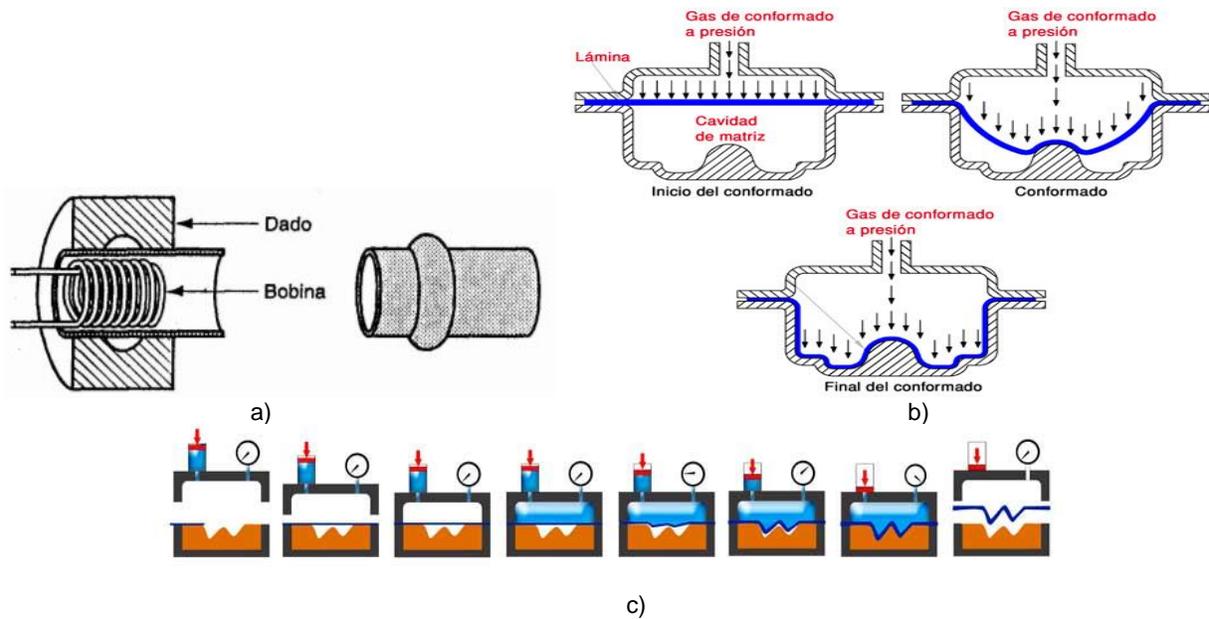


Figura 1.7 a) Conformado electromagnético, Derecha, Izquierda, es la pieza formada (materias.fcyt.umss.edu.bo,2018). b) Conformado superplástico (interempresas.net,2018) c) Hidroconformado (directindustry.es,2018)

## 1.3 Herramental para embutido.

### 1.3.1 Matrices.

#### Matrices de acción simple.

Este es el proceso de embutido más sencillo que existe. Estas herramientas no tienen un soporte para la lámina, lo cual hace que toda sea deformada. La matriz necesita tener una reducción de diámetro para que el material fluya con mayor facilidad y no se fracture. Estas matrices se limitan a producciones simples y normalmente se requieren pasos subsecuentes para concluir una pieza. Se recomienda para piezas en los que se lleva a cabo procesos de corte o embutido de un paso. (Ver figura 1.8.)

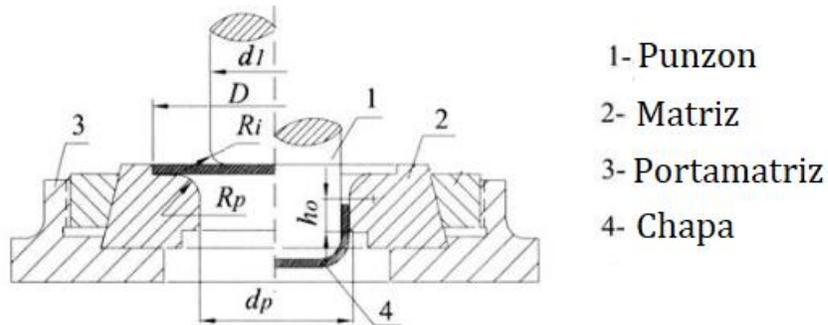


Figura 1.8 Matriz de acción simple (globalspec, 2018)

### Matrices de acción doble.

En este caso se tiene un soporte por encima de la lámina para que solo una sección de esta se deforme con el pistón. Esta configuración permite mantener la geometría plana de la lámina en los bordes.

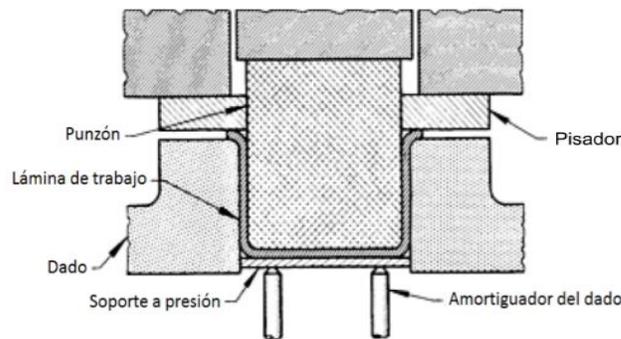


Figura 1.9 Matriz de acción doble (ASM Metal Handbook Volume 14 1988)

### Matrices progresivas.

Estos troqueles se caracterizan por desarrollar varias operaciones de corte, doblado y embutido de manera secuencial, pudiendo así realizar varias operaciones en una carrera de la herramienta y entregar una pieza, generalmente terminada, por cada una de éstas. Resultan las más costosas y complejas en su diseño y fabricación. En éstas la lámina se va moviendo a lo largo de la herramienta de manera que en cada paso de manufactura van realizando diferentes operaciones, como se puede ver (figura 1.10). Es importante que cada sección de trabajo permanezca unida a la anterior formando un esqueleto. Normalmente estas matrices se utilizan para la fabricación de piezas pequeñas.

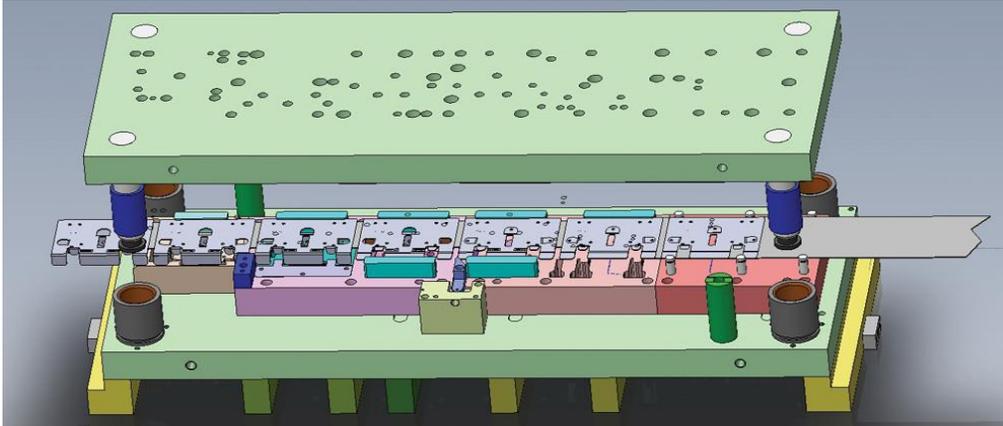


Figura 1.10 Modelo de un troquel progresivo (Weber, R., 2015)

### 1.3.2 Punzones.

El punzón normalmente es una barra metálica que al moverse hacia adentro de la matriz realiza la operación de corte, embutido o doblado. Generalmente son de geometría prismática con sección de la geometría que se desea el corte o el embutido (cuadrada, circular, ovalada, etc) para lograr entrar en el hueco de la matriz con la misma geometría.

Los ángulos de los bordes de los punzones están en función del uso. Es importante mencionar que en el proceso de embutido todos los bordes del herramental, que dan forma a la lámina (matrices y punzones) tienen un radio de curvatura. Esto se debe a que una geometría con bordes angulares genera la fractura o doblado de la lámina.

#### **Punzón cilíndrico.**

Estos punzones son los más comunes en procesos de embutido. En la figura 1.5 se representa un proceso de embutido con matriz de acción simple y punzón cilíndrico. Como su nombre lo indica se utilizan para generar geometrías cilíndricas, cerradas en la base y abiertas en el otro extremo.

### Punzón de diámetro variable.

Existen varios métodos para realizar expansiones en diámetros embutidos. La lámina reduce su espesor cuando se realiza una expansión. No es recomendable aumentar más del 30% del diámetro embutido en una sola operación para metales dúctiles como el acero de bajo carbono o el cobre. (ASM Metal Handbook Volume 14, 1988)

Uno de los métodos de expansión es a través de un punzón de diámetro variable, este punzón no difiere mucho de un punzón cilíndrico común. En la parte que hace contacto con la lámina, el diámetro es el mismo que en el paso anterior de embutido, sin embargo lo que hace la diferencia es un aumento gradual en el diámetro del punzón, hasta llegar al diámetro de expansión. Como se muestra en la figura 1.11

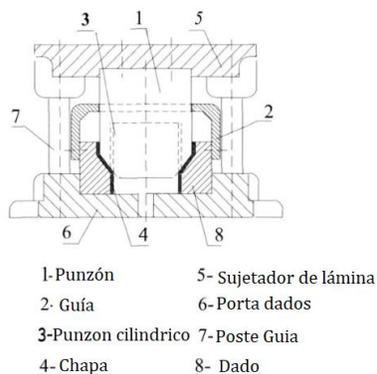


Figura 1.11 Punzón de diámetro variable (Boljanovic, 2004)

### 1.3.3 Pisador.

El propósito de los pisadores es prevenir arrugas y reducción de espesor así como evitar la fractura del material en el contorno de la lámina durante el embutido. El pisador ejerce una compresión que evita que el material de la lámina retroceda hacia el contorno evitando la formación de éstas.

Existen dos tipos de pisador, uno que está fijo a la matriz, el cual se usa cuando se requiere que la lámina del borde se engruese. El sujetador no tiene contacto alguno con la lámina durante el inicio del embutido, pero conforme el material fluye y el borde se hace grueso empieza a crecer la fricción. Es por lo que existe una brecha entre sujetador y lámina, la cual debe ser calculada con precisión. (figura. 1.12)

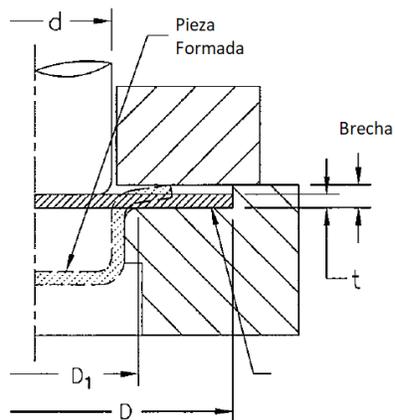


Figura 1.12 Sujetador de lámina fijo a la matriz (ASM Metal Handbook Volume 14 1988)

El otro tipo de pisador es ajustable, plano y no está fijo a la matriz, es el más utilizado en la producción porque puede ser ajustado mediante presión neumática o hidráulica. Y es como se muestra en la figura 1.13.

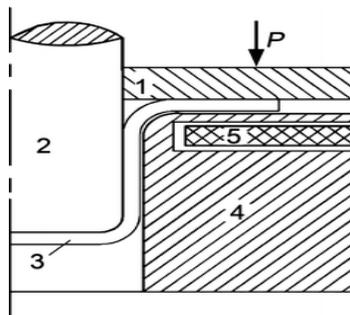


Figura.1.13 Pisador de lámina ajustable (Zhang, 2015)

## 1.4 Prensas para embutido.

Existen muchos tipos de prensas para el embutido de lámina. El abanico de posibilidades es tan grande como las demandas geométricas y de capacidades lo permiten. Para el estudio realizado, se considera una cúpula de aerosol. Lăzărescu y Banabic (2017) calcularon una fuerza de embutido para una pieza cilíndrica, de dimensiones correspondientes a las de una cúpula de aerosol (figura 1.14).

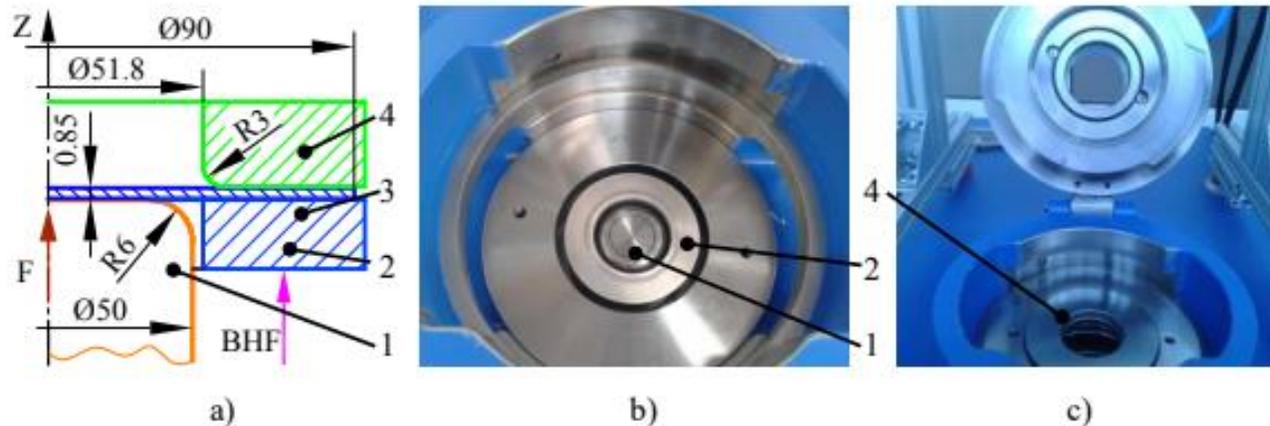


Figura 1.14 Herramental de embutido a) Dimensiones del herramental b) y c) Máquina universal de pruebas en lámina metálica. 1) Punzón 2) Pisador 3) Lámina metálica 4) Matriz. (Lăzărescu, 2017)

El valor de fuerza de embutido necesario para realizar esta operación oscila entre los 40 y 45 KN. La variación de la fuerza se debe a que se hace un análisis con distintos coeficientes de fricción. (Lăzărescu, 2017)

Así que los valores de carga que se requieren para realizar una cúpula para lata de aerosol serán los referentes a lo ya antes mencionado. Bajo los parámetros geométricos cumple de igual manera.

En términos del tipo de prensa, se requiere una prensa de acción simple, ya que los punzones en cada paso solo se mueven en la misma dirección y sentido.

## 1.5 Lubricación.

### 1.5.1 Tipos de lubricantes en el proceso de embutido.

Durante el proceso de embutido, existen diferentes condiciones de lubricación, desde lubricación de película gruesa en el pisador hasta lubricación de superficie en los radios del punzón, donde hay contacto entre metales. La lubricación en el proceso de embutido es importante para reducir fuerzas, aumentar la capacidad de formado, reducir las cargas en el herramental aumentando su vida útil y reducir los defectos de manufactura.

**Tabla 1.1 Algunos de los lubricantes comúnmente utilizados para embutido (Buljanovic, 2004 )**

<b>Material</b>	<b>Lubricante</b>
<b>Acero</b>	Operación leve: Aceite mineral de viscosidad media a alta.
	Operación media: Grasa de aceite en emulsiones con base de jabón, aceite+aceite mineral+cera, película de jabón seco.
	Operación severa: Película de jabón seco o de cera, recubrimientos de fosfatos o sulfatos + emulsiones y a veces aceites sulfurizados.
<b>Acero inoxidable</b>	Operación leve: Aceite de maíz, aceite de castor + jabón en emulsión, papel encerado o aceitado.
	Operación media: Grafito en polvo, película de cera.
	Operación severa: Litozona y aceite de linaza hervido, plomo blanco y aceite de linaza en consistencia pesada.
<b>Aluminio y aleaciones de aluminio</b>	Operación leve: Aceite mineral, aceite graso mezclado en aceite mineral (10 a 20% de aceite graso).
	Operación media: Sebo y parafina, aceite graso sulfurado (mezclas 10 a 15%) preferentemente Enriquecido con 10% de aceite graso.
	Operación severa: Película de jabón o película de cera seca, aceite mineral o aceite graso, emulsiones de grasa en agua de jabón + partículas finas
<b>Titanio</b>	Parafina clorada, jabón, polímero y cera
<b>Cobre</b>	Aceite graso+emulsiones de jabón+aceite mineral, Mezclas de aceite de manteca de cerdo (25 a 50%) en Aceite mineral, jabón seco aplicado adecuadamente.

La selección de un lubricante está en función de la dificultad de la operación, el tipo de operación de embutido y el material de la lámina. Buljanovic en 2004 presentó las recomendaciones de la tabla 1.1. Para esta tabla una operación *leve* es considerada un embutido de poca profundidad en un acero de bajo contenido de carbono, una operación *media* es un embutido profundo en un acero de bajo contenido de carbono y una operación *severa* es el embutido de un cartucho para bala.

### 1.5.2 Coeficientes de fricción.

Resulta necesario en el estudio de este proceso definir parámetros numéricos que permitan cuantificar la lubricación. El más común y útil en la interacción entre la pieza y el herramental es el coeficiente de fricción. El coeficiente de fricción en procesos de formado de lámina metálica por matriz y punzón, realizados en láminas de acero y aluminio, con un diámetro de matriz y punzón de 110 mm y 112.2 mm respectivamente y diferentes tipos de lubricantes se muestra en la tabla 1.2.

**Tabla 1.2 Coeficientes de fricción (Wang et al, 2017)**

Material	Película de PE	Grasa	PE y grasa	manteca	aceite
<b>Acero 1015</b>	0.0744	0.1388	0.0322	0.1626	0.1688
<b>Acero 1008</b>	0.1014	0.1967	0.0892	0.2164	0.2216
<b>Aluminio 5754</b>	0.0550	0.1296	0.0179		

### 1.5.3 Lubricación de película sólida.

Para este tipo de lubricación se utilizan diferentes tipos de sólidos como, por ejemplo: Disulfuro de molibdeno, grafito, carbonato de sodio, teflón y nylon. Estos sólidos proporcionan una lubricación hidrodinámica (película gruesa) siempre y cuando mantengan su integridad con las superficies de la matriz y la lámina. El comportamiento de estos lubricantes es prácticamente el mismo que el de la lubricación de película gruesa, lo único distinto es que en este caso se trata de un sólido.

### 1.6 Defectos comunes de manufactura en el proceso de embutido.

Los defectos de manufactura más comunes, que se presentan durante el proceso de embutido son la fractura, la formación de pliegues o arrugas y la formación de orejas. La fractura ocurre cuando la lámina de metal está sujeta a deformaciones que exceden el límite de deformación del material. La fractura normalmente ocurre cerca de la esquina del punzón. Esto es porque la carga máxima de formado aparece en el material de esta región, y también las líneas de concentración de esfuerzo convergen en esta sección. Una vez que la deformación ha excedido cierto valor se podrá encontrar una fractura en la pieza embutida. (figura 1.15).

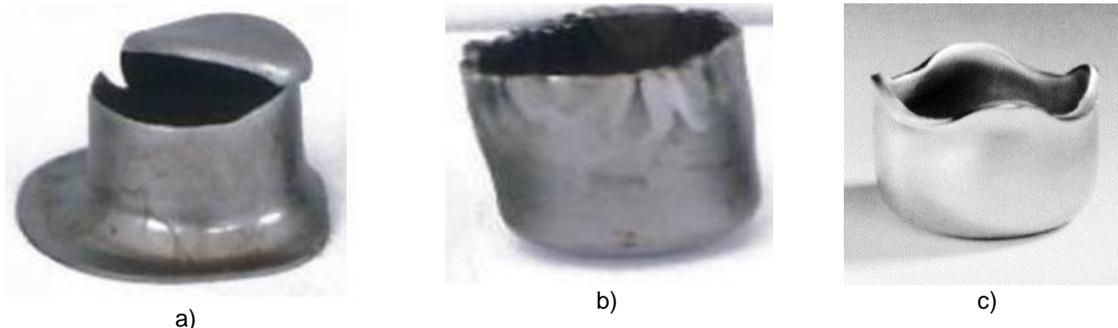


Figura 1.15 Defectos de Manufactura a) Fractura b) Presencia de arrugas c) Formación de orejas (Swapa, (2017))

La formación de arrugas ocurre en el contorno de la pieza cuando el esfuerzo de compresión en dirección circunferencial alcanza un punto crítico de inestabilidad. Puede suceder en regiones donde la pieza no está soportada o cuando la fuerza de sujeción de la lámina no es suficiente. (figura 1.12 b). Este tipo de defectos puede prevenirse aumentando la fuerza de sujeción de la lámina y usando un “talón” de embutido.

Por último, el embutido de materiales anisotrópicos genera, La formación de orejas en el contorno de la pieza. Este defecto puede apreciarse en la figura 1.14 c)

## 1.7 Modelos de embutido de lámina.

### 1.7.1 Relación de embutido.

Una de las medidas que determinan qué tan severa es la operación de embutido es la relación de embutido denotada por  $DR$ :

$$DR = \frac{D_o}{D_p} \quad (\text{ec 1.1})$$

donde  $D_o$  es el diámetro del disco inicial y  $D_p$  el diámetro del punzón como se ve en la figura 1.16 Entre más grande es ésta relación el embutido será más severo. El límite superior de relación de embutido tiene un valor de 2.0. (Groover, 2007)

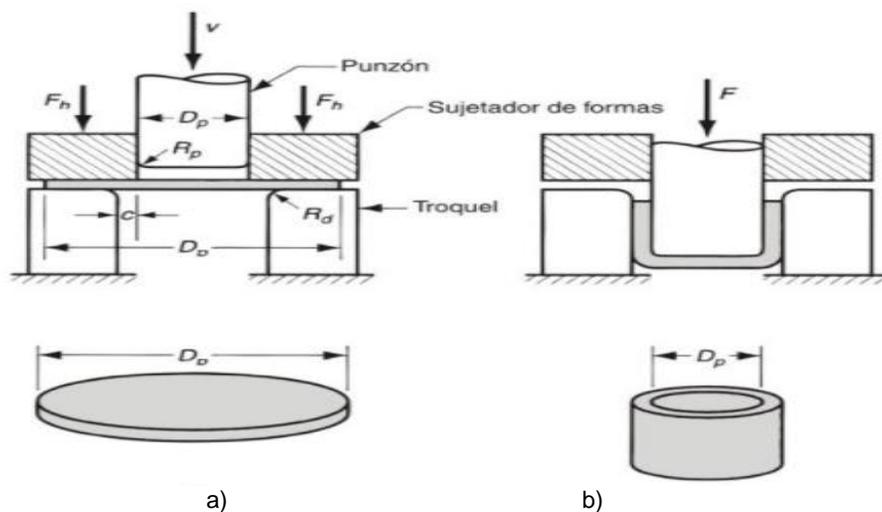


Figura 1.16 Se muestra un embutido cilíndrico antes de empezar a) y finalizado b) donde  $D_o$  y  $D_p$  son el diámetro del disco inicial y del punzón respectivamente,  $R_p$  es el radio de la esquina del punzón y  $R_d$  el radio de la esquina de la matriz y  $c$  es el espacio entre el punzón y la matriz (claro o luz) (Groover, 2007)

### 1.7.2 Fuerzas de embutido.

Las fuerzas de embutido requeridas para una operación están dadas por la ecuación 1.2. (Groover, 2007) En la figura 1.11 b) se ve que la fuerza de embutido es la que aplica el punzón sobre la lámina. Esta ecuación toma en cuenta el tamaño de la pieza y propiedades del material, además del espesor de la lámina y la razón de embutido.

$$F = \pi D_p t (TS) \left( \frac{D_0}{D_p} - 0.7 \right) \quad (\text{ec 1.2})$$

donde

F: Fuerza de embutido [N]

t: Espesor inicial la lámina a embutir [mm]

TS: Resistencia a la tensión [MPa]

$D_p$  y  $D_0$ : Diámetros del punzón e inicial de la pieza a embutir. [mm]

De acuerdo con Korhonen, (1982 la fuerza de embutido se calcula con la siguiente ecuación que considera el diámetro de la lámina el esfuerzo último del material y el espesor de la lámina:

$$F = D (UTS) \pi t_0 \quad (\text{ec 1.3})$$

Mientras que la fuerza de embutido máxima se calcula con ec. 1.4 la cual agrega a la ecuación el exponente de endurecimiento de la ecuación de Hollomon:

$$F = \left( \frac{1+r}{\sqrt{1+2r}} \right)^{1+n} (UTS) D_p \pi t_0 \quad (\text{ec 1.4})$$

donde

r:  $\frac{D_0}{D_p}$

n: Exponente de endurecimiento en la ecuación de Hollomon

UTS: esfuerzo último del material [Pa]

$t_0$ : espesor inicial [m]

### 1.7.3 Carga aplicada por el pisador.

La fuerza de sujeción está dada por la ecuación 1.5. Se aprecia la interacción de las fuerzas de sujeción y de embutido en la figura 1.13 a) con el punzón en movimiento y estático.

$$F_h = 0.015Y[D_0^2 - (D_p + 2.2t + 2R_d)^2] \quad (\text{ec 1.5})$$

$F_h$ : Fuerza de sujeción [N]

$Y$ : Resistencia a la fluencia de la lámina de metal [Pa]

$R_d$ : Radio de la esquina del troquel.[m]

### 1.8 Anisotropía.

Debido a la estructura cristalina y a las características del proceso de laminado mediante el cual es producida la lámina, ésta presenta un comportamiento anisotrópico muy particular, caracterizado por una simetría con respecto a los tres planos ortogonales. Este comportamiento se llama ortotropía.

La intersección con las líneas de simetría se llaman ejes ortotrópicos. En el caso de las láminas producidas por laminado las direcciones son las mostradas figura 1.17.

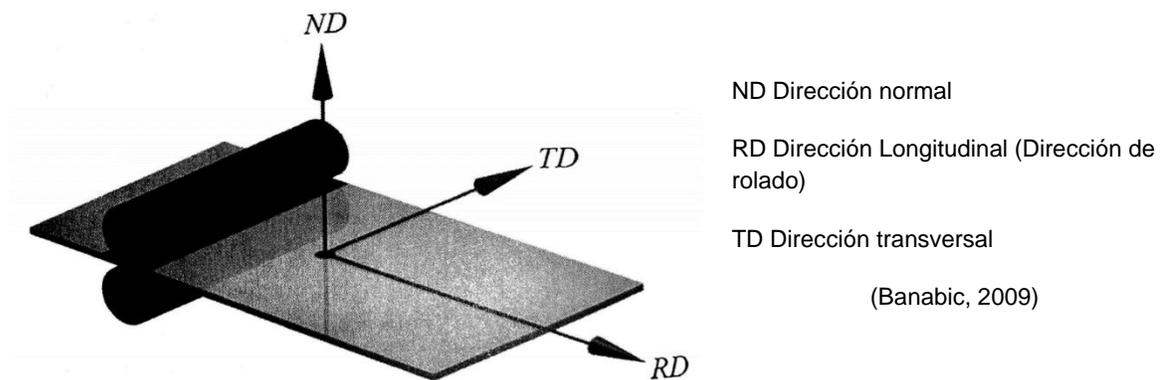


Figura 1.17 Ejes Ortotrópicos de la lámina hecha por laminado.

### 1.8.1 Anisotropía normal.

El cambio en el comportamiento plástico con respecto a la dirección se mide por un número llamado parámetro de anisotropía de Lankford o Índice de anisotropía. Este coeficiente se obtiene por medio de pruebas uniaxiales a tracción en láminas con forma de probeta. Este coeficiente denotado con  $r$  y se define como:

$$r = \frac{\varepsilon_{yy}}{\varepsilon_{zz}} \quad (\text{ec 1.6})$$

Donde  $\varepsilon_{yy}$  y  $\varepsilon_{zz}$  son las deformaciones en las direcciones del ancho y del grosor de la probeta respectivamente. En el caso de un material isotrópico el coeficiente tiene un valor de uno. Para casos con coeficientes de valor mayor a uno la deformación en el ancho dominará, mientras que para coeficientes con valor menor a uno la deformación en el grosor predominará.

Utilizando el concepto de deformación logarítmica, la ecuación 1.4 se puede reescribir de la siguiente forma:

$$r = \frac{\ln\left(\frac{w}{w_0}\right)}{\ln\left(\frac{t}{t_0}\right)} \quad (\text{ec 1.7})$$

donde

$w$  y  $w_0$  son el ancho final e inicial respectivamente [m]  
 $t$  y  $t_0$  son el grosor final e inicial respectivamente [m]

Como el grosor es mucho menor comparado con el ancho las tolerancias son muy diferentes. Por ello se recurre a la condición de volumen constante.

$$\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy} + \varepsilon_{zz} = 0 \quad (\text{ec 1.8})$$

Entonces despejando  $\varepsilon_{zz}$  de 1.8 y sustituyendo en 1.6 queda

$$r = - \frac{\varepsilon_{yy}}{\varepsilon_{xx} + \varepsilon_{yy}} \quad (\text{ec 1.9})$$

Finalmente

$$r = \frac{\ln\left(\frac{w}{w_0}\right)}{\ln\left(\frac{l_0 w_0}{l w}\right)} \quad (\text{ec 1.10})$$

donde  
 $l$  y  $l_0$  son el largo final e inicial respectivamente. [m]

### 1.8.2 Anisotropía planar.

La anisotropía recién explicada es la anisotropía normal, la cual mide el cambio de propiedades en la longitud orientada hacia el espesor de la lámina, pero también existe la anisotropía planar que mide las diferencias de las propiedades en varias direcciones dentro del plano de la lámina (Figura 1.18).

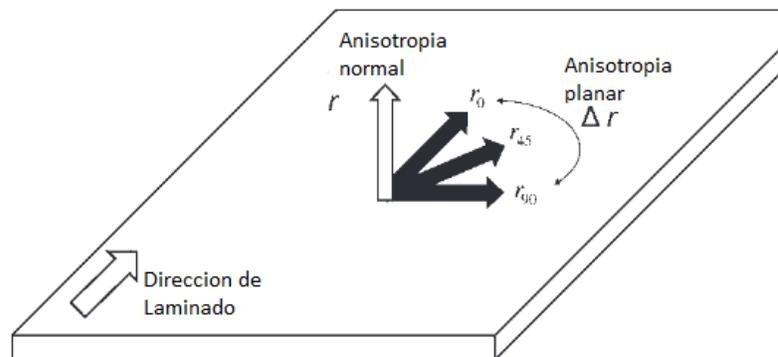


Figura 1.18 Se muestra la anisotropía normal como  $r$  y la anisotropía planar como  $\Delta r$  (Tekkaya et al., 2012)

Es importante considerar la anisotropía planar en casos en los cuales el corte de la lámina a estudiar se realice con algún ángulo dentro de la pieza laminada con respecto a la dirección de laminado (figura 1.19). Esto debido a que el factor  $r$  ahora es dependiente del ángulo  $\theta$

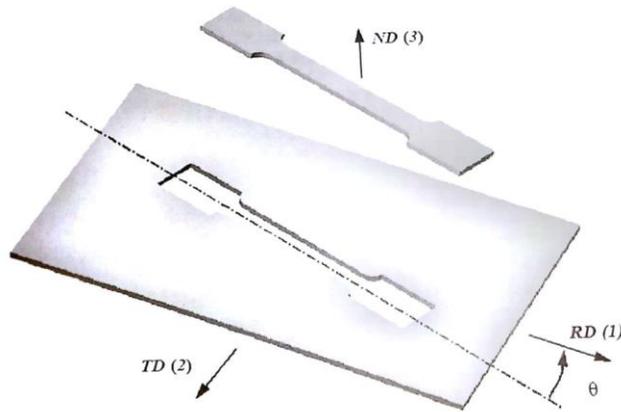


Figura 1.19 Muestra tomada de una lámina. Se observa como la muestra tiene un ángulo con respecto a la dirección de laminado. (Banabic, 2009)

La relación  $r$  o relación de deformación plástica debe ser determinada en las direcciones paralelas, diagonales y transversales a la dirección de laminado  $r_0, r_{45}$  y  $r_{90}$  respectivamente (Tekkaya et al, 2012).

### 1.8.3 Cedencia anisotrópica.

El comportamiento plástico anisotrópico se modela a través del uso de razones de esfuerzo de cedencia  $R_{ij}$ . Estas razones de esfuerzo se definen con respecto a un esfuerzo de cedencia de referencia  $\sigma^0$  (de la definición plástica del material), tal que si una carga, que genera un esfuerzo  $\sigma_{ij}$ , es aplicada, el esfuerzo de cedencia correspondiente es  $R_{ij}\sigma^0$ .

### 1.8.4 Criterio de fluencia de Hill.

La función de Hill, que es efectiva para describir criterios de fluencia en láminas anisotrópicas (Zhao et al, 2016), es una extensión de la función de Von Mises y se expresa de la siguiente manera:

$$f(\sigma) = \sqrt{F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + G(\sigma_{33} - \sigma_{11})^2 + H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 2L\sigma_{23}^2 + 2M\sigma_{31}^2 + 2N\sigma_{12}^2} \quad (\text{ec 1.11})$$

Donde F, G, H, L, M y N son constantes obtenidas a partir de pruebas en diferentes orientaciones del material y se definen:

$$F = \frac{(\sigma^0)^2}{2} \left( \frac{1}{\sigma_{22}^2} + \frac{1}{\sigma_{33}^2} - \frac{1}{\sigma_{11}^2} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_{22}^2} + \frac{1}{R_{33}^2} - \frac{1}{R_{11}^2} \right)$$

$$G = \frac{(\sigma^0)^2}{2} \left( \frac{1}{\underline{\sigma}_{33}^2} + \frac{1}{\underline{\sigma}_{11}^2} - \frac{1}{\underline{\sigma}_{22}^2} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_{33}^2} + \frac{1}{R_{11}^2} - \frac{1}{R_{22}^2} \right)$$

$$H = \frac{(\sigma^0)^2}{2} \left( \frac{1}{\underline{\sigma}_{11}^2} + \frac{1}{\underline{\sigma}_{22}^2} - \frac{1}{\underline{\sigma}_{33}^2} \right) = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{R_{11}^2} + \frac{1}{R_{22}^2} - \frac{1}{R_{33}^2} \right)$$

$$L = \frac{3}{2} \left( \frac{\tau^0}{\underline{\sigma}_{23}^2} \right)^2 = \frac{3}{2R_{23}^2}$$

$$M = \frac{3}{2} \left( \frac{\tau^0}{\underline{\sigma}_{13}^2} \right)^2 = \frac{3}{2R_{13}^2}$$

$$N = \frac{3}{2} \left( \frac{\tau^0}{\underline{\sigma}_{12}^2} \right)^2 = \frac{3}{2R_{12}^2}$$

Donde cada  $\underline{\sigma}_{ij}$  es la medida del esfuerzo de fluencia y  $R_{11}$ ,  $R_{22}$ ,  $R_{33}$ ,  $R_{12}$ ,  $R_{13}$  y  $R_{23}$  son razones de esfuerzo de cedencia anisotrópico, y  $\tau^0 = \frac{\sigma^0}{\sqrt{3}}$ . (Dassault Systèmes Simulia Corp., Abaqus 6.14 Analysis User's Manual).

## 2. Diseño de herramienta para embutido.

En el proceso de embutido los elementos más importantes a considerar son los siguientes:

- El espesor de la lámina.
- El tamaño y la geometría de la lámina.
- Superficie de la herramienta.
- Velocidad de embutido.
- Radio de la matriz.
- Coeficiente de fricción.
- El material
- Condiciones estructurales de la lámina

### 2.1 Metodología de diseño para matrices de embutido.

#### 2.1.1 Diámetro de la lámina.

Para determinar el diámetro de la lámina a embutir (en caso de ser circular) se recurre al principio de conservación de masa:

$$m_c = m_b$$

De donde:

$$w_c = w_b$$

Desarrollando el peso de la pieza en términos del volumen de la chapa circular queda.

$$w_c = \frac{D_d^2 \pi}{4} T \rho$$

Entonces

$$D_d = \sqrt{\frac{4w_c}{\pi T \rho}} \dots \quad (\text{ec 2.1})$$

Donde

$W_c$ =Masa de la pieza [Kg]

$W_b$ =Masa de la lámina desarrollada [Kg]

$D_d$ =Diámetro desarrollado de la lámina [m]

$T$ = Espesor del material [m]

$\rho$ =Densidad del material [Kg/m<sup>3</sup>]

Además, existen relaciones a partir de geometrías ya embutidas que tienen mayor aplicación debido a que son independientes de la densidad y del peso, ver figura 2.1.

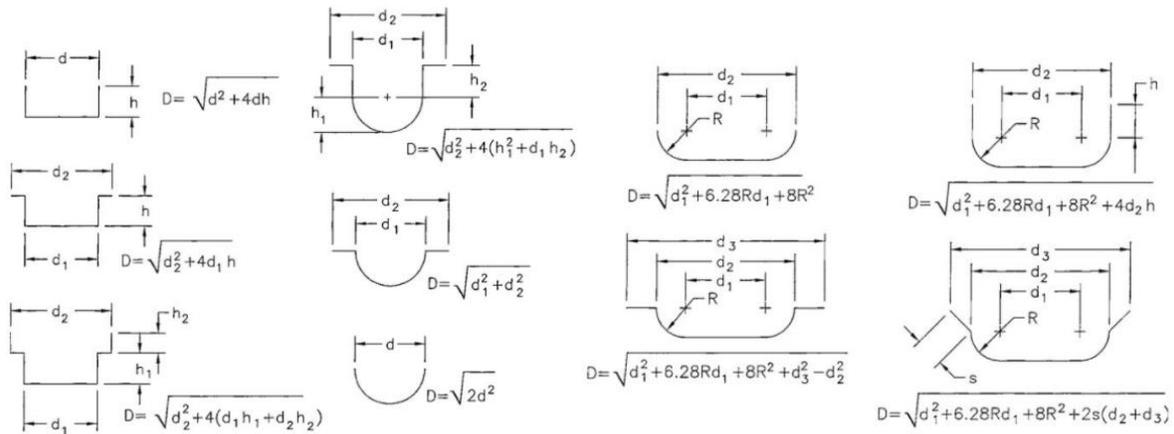


Figura 2.1 Obtención del diámetro de la lámina para embutido a partir de las dimensiones de la pieza final. (Suchy, 2006)

## 2.1.2 Parámetros de las matrices.

Una matriz de embutido para la primera operación tiene los siguientes elementos (ver figura 2.2).

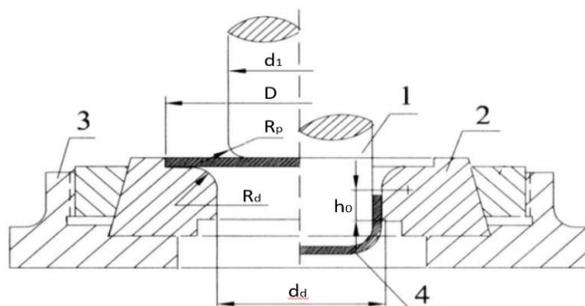
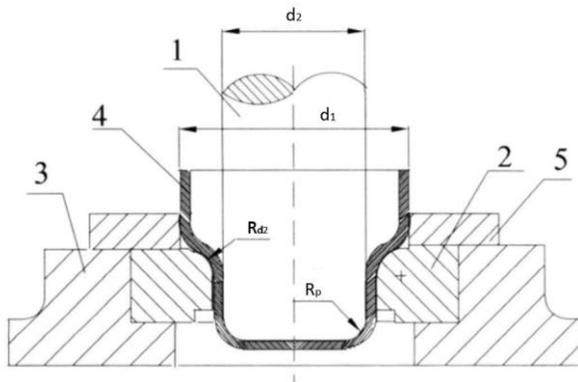


Figura 2.2 Matriz de embutido para la primera operación (Buljanovic, 2004)

A continuación, se presentan los parámetros y herramental para pasos subsecuentes.



5. Punzón
6. Matriz
7. Calza de la matriz
8. Lámina de trabajo
9. Anillo para centrar

$d_2$ = Diámetro del punzón para el segundo embutido  
 $R_{d2}$ = Radio de la esquina de la matriz para el segundo embutido  
 $h_0$ =Altura del cilindro embutido  
 $R_{d,p}$ =Radio de la matriz y del punzón

Figura 2.3 Matriz de embutido para operaciones subsecuentes. (Buljanovic, 2004)

### 2.1.3 Radio de la matriz.

Es frecuentemente utilizado para las primeras operaciones donde no existe reducción de espesor en el material embutido.

El valor óptimo para el radio de la esquina de la matriz se define experimentalmente y depende del espesor de la lámina de trabajo. Entre más pequeño es este radio se necesitará una fuerza mayor para embutir y habrá más posibilidades de una fractura en la lámina, mientras que si es muy grande la chapa no será retenida por el pisador y el embutido será imposible por la formación de pliegues (Wassilieff, 1966).

### 2.1.4 Radio de la esquina de la matriz para el primer embutido:

$$R_d = 0.8\sqrt{(D - d_1)T} \quad (\text{ec 2.2})$$

Donde T es el espesor de la lámina.

### 2.1.5 Radio de la esquina de la matriz para embutidos posteriores:

$$R_{d(n)} = 0.8\sqrt{(d_1 - d_n)T} \quad (\text{ec 2.3})$$

Donde  $d_n$  es el diámetro después de la n-esíma operación embutido.

### 2.1.6 Juego entre el punzón y matriz

El juego entre la matriz y punzón es importante en operaciones sin reducción de espesor, donde ésta debe ser mayor que el espesor de la lámina. Si es muy pequeño puede perforar la lámina o cortarse, si es muy grande la pieza se deformará y puede haber pliegues en la pared de la pieza embutida. (Wassilieff, 1966) (Buljanovic, 2004)

El cálculo se lleva a cabo con la siguiente expresión

$$c = T + k\sqrt{10T} \quad (\text{ec 2.4})$$

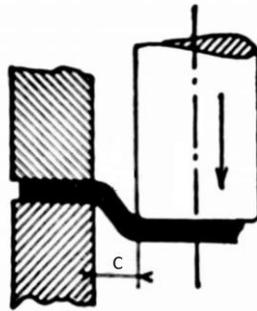


Figura 2.4 Espacio entre punzón y matriz "c". (Wassilief, 1966)

Donde

c= juego entre punzón y matriz [m]

T=Espesor del material [m]

K=Coefficiente del material [m<sup>1/2</sup>] (Ver tabla 2.1)

**Tabla 2.1 Coeficientes del material para juego entre matriz y punzón. (Suchy, 2006)**

Material	Coefficiente K
Lamina de acero	0.07
Lamina de aluminio	0.02
Lamina de otro material	0.04

### 2.1.7 Diámetro nominal del punzón.

El punzón para un embutido en el que no hay tolerancias tiene un diámetro igual al diámetro interno de la pieza final (Buljanovic, 2004).

$$d_p = d_u \quad (\text{ec 2.5})$$

Donde

$d_u$  = Es el diámetro interno nominal de la pieza final.

### 2.1.8 Radio de la esquina del punzón.

La medida del radio de la esquina del punzón está en función del espesor del material y del diámetro de la pieza, y está dado por las siguientes expresiones (Suchy, 2006):

Para diámetros  $d$

$$d = 6.3 \text{ a } 100\text{mm} \quad R_p = (3 \text{ a } 4)t \quad (\text{ec 2.6})$$

$$d = 100 \text{ a } 200\text{mm} \quad R_p = (4 \text{ a } 5)t \quad (\text{ec 2.7})$$

$$d = \text{arriba de } 200\text{mm} \quad R_p = (5 \text{ a } 7)t \quad (\text{ec 2.8})$$

Se usa la tabla 2.2 para comparar los resultados obtenidos.

Tabla 2.2 Radio para matriz y punzones (Suchy, 2006)	
Espesor de la lámina [mm]	Radios de punzón y matriz [mm]
0.36 - 0.45	4.00 - 6.35
0.50 - 0.70	4.75 - 7.15
0.80 - 1.20	4.75 - 8.00
1.20 - 1.60	6.35 - 9.50
2.00 - 2.25	8.00 - 11.00
2.28 - 3.50	8.7 - 12.00

### 2.1.9 Diámetro nominal de la matriz.

$$d_d = d_u + 2c \quad (\text{ec 2.9})$$

### 2.1.10 Uso de sujetador de lámina.

Un embutido se puede realizar sin sujetador de lámina, para lo cual se deben satisfacer las siguientes condiciones (Buljanovic, 2004):

$$T_r = \frac{T}{D} \times 100 \geq 2\% \quad (\text{ec 2.10})$$

$$m_i = \frac{d_i}{D} \geq 0.6 \quad (\text{ec 2.11})$$

$T_r$ = Razón de grosor relativo del material

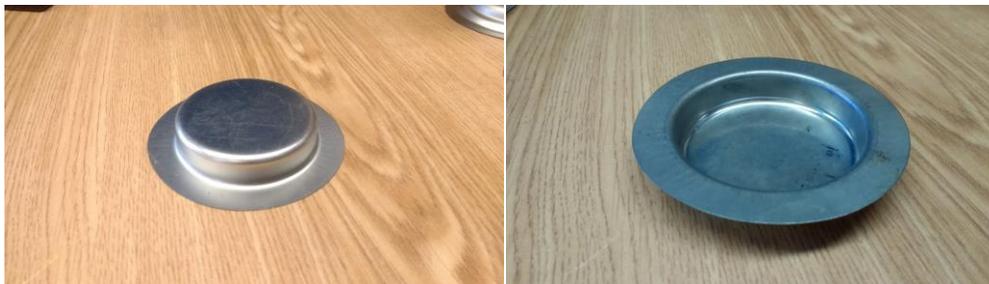
$m_i$ = Razón de embutido

## 2.2 Caso de estudio

La simulación del embutido es de una cúpula de lata de aerosol.

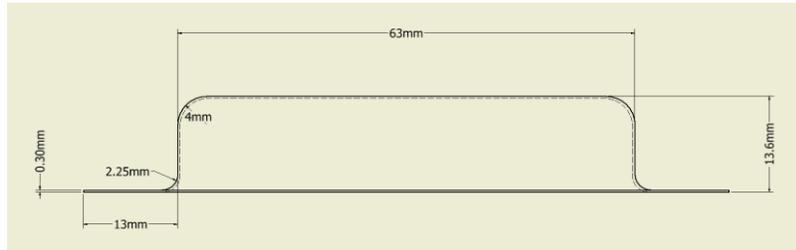
El cálculo para la obtención de los parámetros del herramental de embutido se desarrollará en este capítulo. Para lo cual primero se describen los pasos del proceso de fabricación y el resultado de dichos pasos. El diseño del herramental de embutido se caracterizó geoméricamente cada pieza obtenida en cada paso de embutido.

Como primer paso se realizó un embutido cilíndrico en la lámina de acero de forma circular como se muestra en la figura 2.5.



a)

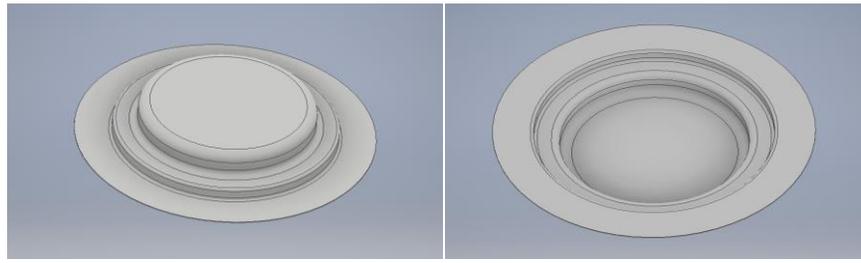
b)



c)

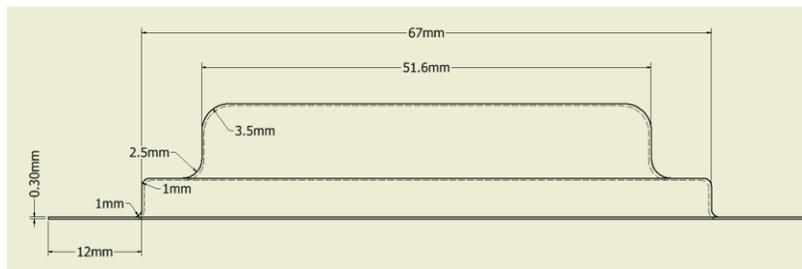
Figura. 2.5 a) vista superior b) vista inferior c) Acotaciones del primer paso de embutido.

Posteriormente se embute otro cilindro en sentido del embutido anterior como se aprecia en la figura 2.6.



a)

b)



c)

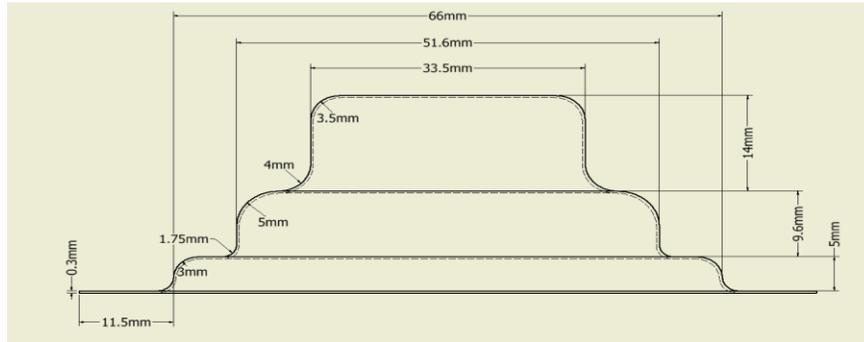
Figura. 2.6 a) vista superior b) vista inferior c) Acotaciones del segundo paso de embutido.

Se vuelve a embutir un tercer cilindro en el sentido de los anteriores. (Figura 2.7)



a)

b)



c)

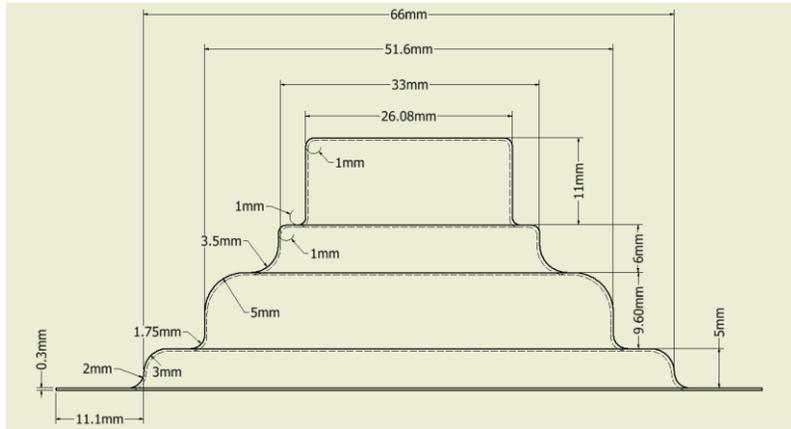
Fig. 2.7 a) vista superior b) vista inferior c) Acotaciones del tercer paso de embutido

Se realiza el último embutido cilíndrico similar a los anteriores. (Figura 2.8)



a)

b)



c)

Figura. 2.8 a) vista superior b) vista inferior c) Acotaciones del último paso de embutido.

## 2.3 Diseño de herramental.

### 2.3.1 Primer paso de embutido.

Para el primer paso de embutido lo primero que se realizó fue el corte a partir de la cinta, con esto se obtuvo una pieza de partida con un diámetro definido con base en las dimensiones del producto embutido, esto por la ecuación que se presenta en la figura 2.5 que es:

$$D_b = \sqrt{d_2^2 + 4d_1h} = \sqrt{(8.9cm)^2 + 4(6.33cm)(1.34cm)} = 10.636cm$$

#### - Radio de la esquina de la matriz.

De acuerdo con la ecuación 2.2

$$R_d = 0.8\sqrt{(D - d_1)T} = 0.8\sqrt{(10.63cm - 6.3cm)(0.03cm)} = 0.2883cm = 2.883mm$$

#### - Espacio entre punzón y matriz.

De acuerdo con la ecuación 2.4 sabiendo que se consideró que el material de trabajo es un acero de bajo carbono se usa  $k=0.07$

$$c = T + k\sqrt{10T} = 0.3mm + 0.07\sqrt{10(0.3mm)} = 0.4212mm$$

Como se considera que el espesor no cambia en todo el proceso se utilizará este dato en todas las matrices

- **Diámetro del punzón.**

De acuerdo con la ecuación 2.5 y sabiendo que la lámina antes de embutirse mide

$$d_p = d_u = 6.3cm$$

- **Radio de la esquina del punzón.**

Si la lámina antes de embutirse medía 106.5mm, se debe utilizar la ecuación 2.10 debido a que el espesor que se utilizó en la lámina sale de los rangos de valores de la tabla 2.2 utilizando el factor de 5 para acercarse a los valores de la tabla.

$$R_p = (4 a 5)t = 5(0.3mm) = 1.5mm$$

Dado que se considera que el espesor no cambia en todo el proceso se utilizará este dato en todos los punzones.

- **Cálculo del diámetro de la matriz**

Usando la ecuación 2.9

$$d_d = d_u + 2c = 63mm + 2(0.4212mm) = 63.8mm$$

- **Uso de sujetador de lámina.**

Utilizando las ecuaciones 2.10 y 2.11

$$T_r = \frac{T}{D} \times 100\% = \frac{0.3mm}{106.5mm} \times 100\% = 0.2816\% \leq 2\% \quad \text{Por lo tanto necesita sujetador}$$

$$m_i = \frac{d_i}{D} = \frac{63mm}{106.5mm} = 0.59 \leq 0.6 \quad \text{Por lo tanto necesita sujetador}$$

- **Relación de embutido**

Utilizando la ecuación 1.1

$$r = \frac{D_0}{D_p} = \frac{10.63 \text{ cm}}{6.3 \text{ cm}} = 1.687$$

Donde  $D_0$  es el diámetro inicial y  $D_p$  el diámetro del punzón

La matriz queda como se muestra en la figura 2.9.

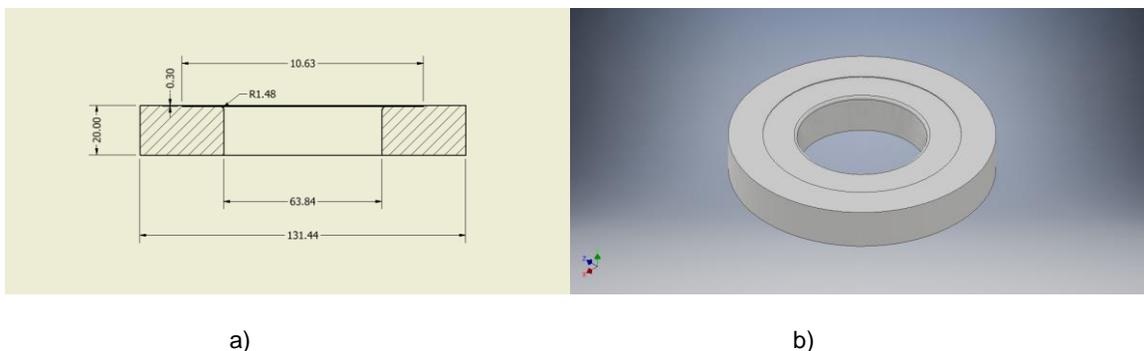


Figura 2.9 Matriz para primer paso de embutido a) Plano en mm b) Modelo

### 2.3.2 Segundo paso de embutido.

Siguiendo la misma secuencia que para el primer paso se comienza con el radio de la esquina de la matriz.

- **Radio de la esquina de la matriz.**

De acuerdo con la ecuación 2.3

$$R_{d(2)} = 0.8\sqrt{(d_1 - d_2)T} = D_b = 0.8\sqrt{(6.3cm - 5.16cm)(0.03cm)} = 0.14794cm = 1.48mm$$

- **Diámetro del punzón.**

De acuerdo con la ecuación 2.5 y sabiendo lo que mide la lámina antes de embutirse

$$d_p = d_u = 5.16cm$$

- **Cálculo del diámetro de la matriz.**

Usando la ecuación 2.9

$$d_d = d_u + 2c = 51.6mm + 2(0.4212mm) = \mathbf{52.442mm}$$

- **Uso de sujetador de lámina.**

Utilizando las ecuaciones 2.10 y 2.11

$$T_r = \frac{T}{d_{i-1}} \times 100\% = \frac{0.3\text{mm}}{63\text{mm}} \times 100\% = 0.476\% \leq 2\% \text{ Por lo tanto, necesita sujetador}$$

$$m_i = \frac{d_i}{D} = \frac{51.6\text{mm}}{63\text{mm}} = 0.819 > 0.6 \text{ Aunque esta condición se cumpla por la condición anterior debe llevar sujetador}$$

- **Relación de embutido**

Utilizando la ecuación 1.1

$$r = \frac{D_0}{D_p} = \frac{9.1\text{ cm}}{5.16\text{ cm}} = 1.7636$$

La matriz queda como se muestra en la figura 2.10

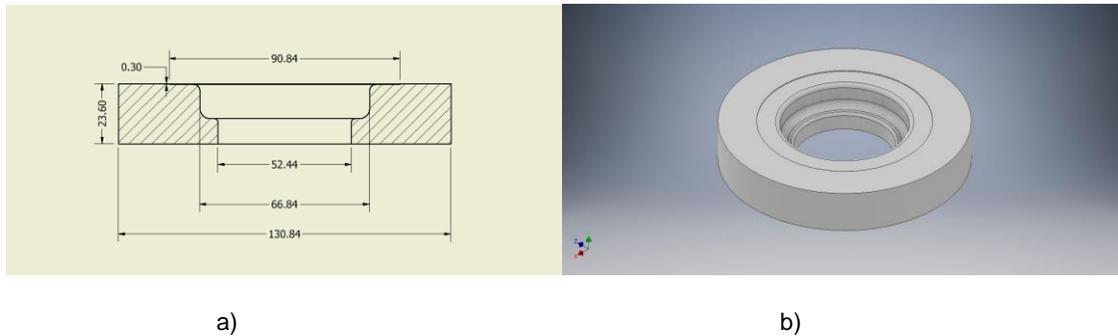


Figura. 2.10 Matriz para el segundo paso de embutido a) Plano en mm b) Modelo

**2.3.3 Tercer paso de embutido.**

Para la obtención de los parámetros se inicia con el cálculo del radio de la esquina de la matriz

- **Radio de la esquina de la matriz**

De acuerdo con la ecuación 2.3

$$R_{d(2)} = 0.8\sqrt{(d_1 - d_2)T} = 0.8\sqrt{(6.3\text{cm} - 3.35\text{cm})(0.03\text{cm})} = 0.238\text{cm} = 2.38\text{mm}$$

- **Diámetro del punzón.**

De acuerdo con la ecuación 2.5 y sabiendo que antes de embutirse la lámina mide

$$d_p = d_u = 3.35cm$$

- **Cálculo del diámetro de la matriz.**

Usando la ecuación 2.9

$$d_d = d_u + 2c = 33.5mm + 2(0.4212mm) = \mathbf{34.342mm}$$

- **Uso de sujetador de lámina.**

Utilizando las ecuaciones 2.10 y 2.11

$$T_r = \frac{T}{d_{i-1}} \times 100\% = \frac{0.3mm}{51.6mm} \times 100\% = 0.5813\% \leq 2\% \text{ Por lo tanto, necesita sujetador}$$

$$m_i = \frac{d_i}{D} = \frac{33.5mm}{51.6mm} = 0.649 \leq 0.6 \text{ Aunque esta condición se cumpla por la condición anterior debe llevar sujetador}$$

- **Relación de embutido**

Utilizando la ecuación 1.1

$$r = \frac{D_0}{D_p} = \frac{8.9 cm}{3.35 cm} = 2.6567$$

La matriz queda como se muestra en la figura 2.11

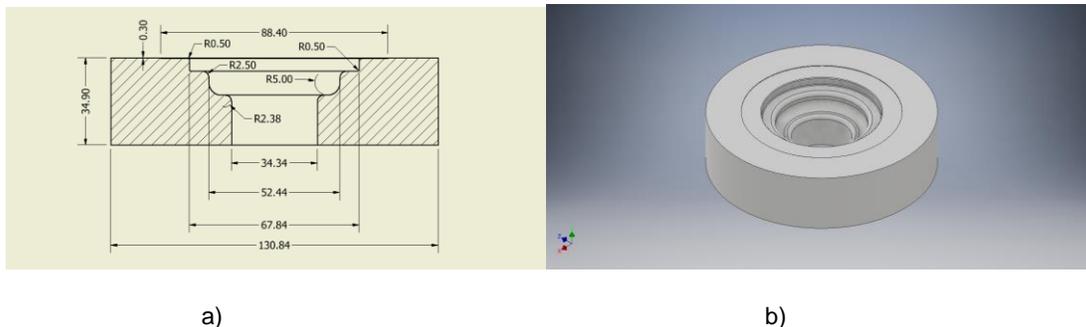


Figura 2.11 Matriz para el tercer paso de embutido a) Plano en mm b) Modelo

### 2.3.4 Cuarto paso de embutido.

Una vez más se inicia con el radio de la esquina de la matriz

- **Radio de la esquina de la matriz.**

De acuerdo con la ecuación 2.3

$$R_{d(4)} = 0.8\sqrt{(d_1 - d_4)T} = 0.8\sqrt{(6.3cm - 2.608cm)(0.03cm)} = 0.266cm = 2.662m$$

- **Diámetro del punzón**

De acuerdo con la ecuación 2.5 y considerando el diámetro de la lámina antes de embutirse

$$d_p = d_u = 2.608cm$$

- **Cálculo del diámetro de la matriz.**

Usando la ecuación 2.9

$$d_d = d_u + 2c = 26.08mm + 2(0.4212mm) = \mathbf{26.922mm}$$

- **Uso de sujetador de lámina.**

Utilizando las ecuaciones 2.10 y 2.11

$$T_r = \frac{T}{d_{i-1}} \times 100\% = \frac{0.3mm}{33.5mm} \times 100\% = 0.8955\% \leq 2\% \text{ Por lo tanto, necesita sujetador}$$

$$m_i = \frac{d_i}{D} = \frac{26.08mm}{33.5mm} = 0.78 \leq 0.6 \text{ Aunque esta condición se cumpla por la condición anterior debe llevar sujetador}$$

- **Relación de embutido**

Utilizando la ecuación 1.1

$$r = \frac{D_0}{D_p} = \frac{8.82 cm}{2.608 cm} = 3.3819$$

La matriz queda como se muestra en la Figura 2.12



a)

b)

Figura 2.12 Matriz para el cuarto paso de embutido a) Plano en mm b) Modelo

Con lo realizado se tienen las herramientas necesarias para desarrollar el modelado del proceso.

## **3. Modelado mediante paquetería Abaqus/CAE® de elemento finito.**

Para realizar la simulación del embutido para comparar modelo anisotrópico con isotrópico se utiliza la paquetería de análisis por elemento finito Abaqus/CAE® y se resuelve como un modelo dinámico explícito.

En este capítulo se describirán cada uno de los parámetros que se utilizaron en el modelado del proceso de manufactura de la lámina.

### **3.1 Generación de las geometrías.**

En este módulo se generaron las geometrías a partir de las cuales se obtuvieron los sólidos con los que se trabajó. Todos los sólidos fueron realizados por la revolución de un dibujo plano. A partir de los datos calculados en el capítulo anterior se generaron las matrices, los punzones y la lámina a embutir.

#### **3.1.1 Matrices.**

La matriz para el primer paso de embutido se generó a partir de un perfil rectangular con una esquina redondeada de acuerdo a los cálculos realizados con la ecuación 2.5 para el radio de la esquina de la matriz. Además, se agregó un desnivel de 0.3mm, que es el espesor de la lámina para colocarla sobre éste. Ver figura 3.1 a). Las matrices posteriores se generaron de manera similar agregando un nivel con curva, a manera que la pieza generada del embutido anterior ensamble perfectamente.

Una vez que estos perfiles han sido generados se obtiene la geometría de las matrices (figura 3.1).

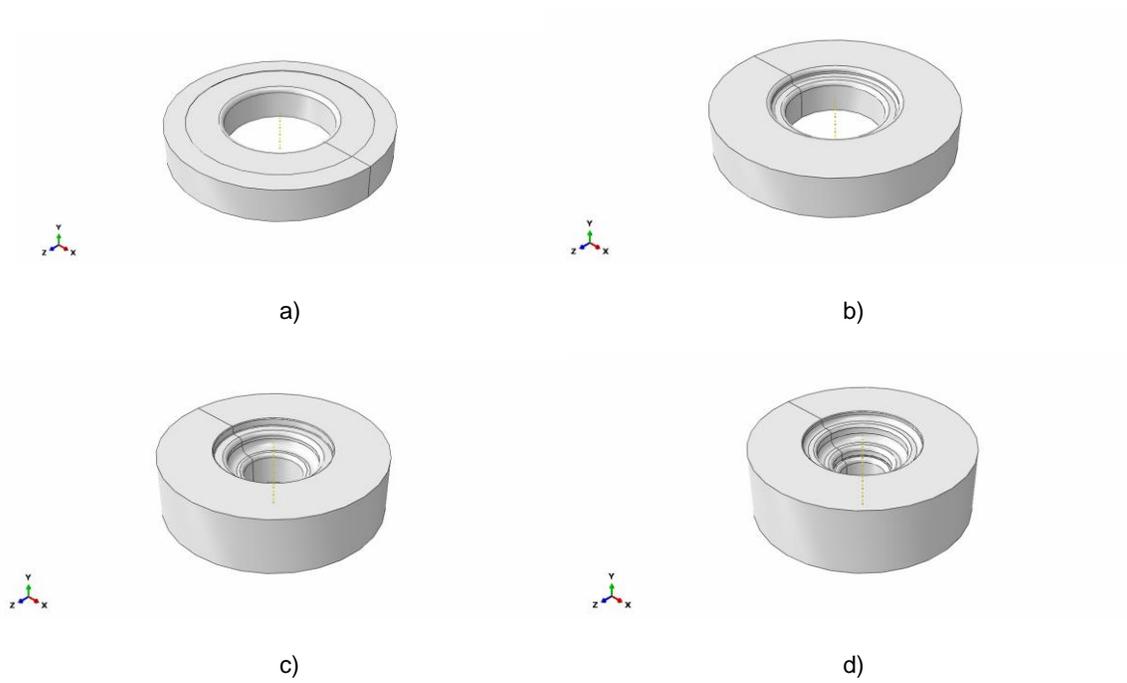


Figura 3.1 Matrices de embutido a) primer paso b) segundo paso c) tercer paso d) cuarto paso

### 3.1.2 Punzones.

De manera similar a las matrices los punzones también se generaron a partir de un perfil de revolución. Al revolucionarse se obtiene un sólido como el de la figura 3.2



Figura 3.2 Punzón de primer embutido

Los punzones de los pasos siguientes tienen el mismo radio de la esquina de punzón y solo varían en el diámetro.

### 3.1.3 Pisadores.

Los pisadores son anillos con perfil rectangular. Una vez desarrollado el sólido de revolución se obtiene como se ve en la figura 3.3. Posteriormente se convirtió en un shell discretamente rígido para enfocar el estudio de la deformación de matrices, punzones y lámina.

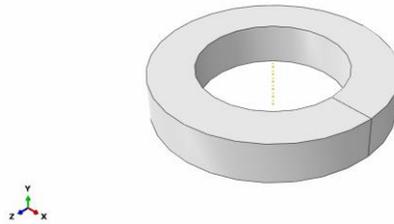


Figura 3.3 Pisador de lámina

### 3.1.4 Anillos de presión.

Para los pasos 2 y 4, se requirió de unos anillos de presión auxiliares los cuales ayudaron a formar las curvas en la cúpula, que de no ser por los anillos se hubieran arrugado o estirado. Estos anillos tienen perfil rectangular con los vértices redondeados con radio igual al de las curvas de la matriz. El anillo obtenido a partir de este perfil se muestra en la figura 3.4.



Figura 3.4 Anillo de presión

### 3.1.5 Lámina.

La lámina se desarrolló a partir de un perfil rectangular revolucionado como se muestra en la figura 3.5.

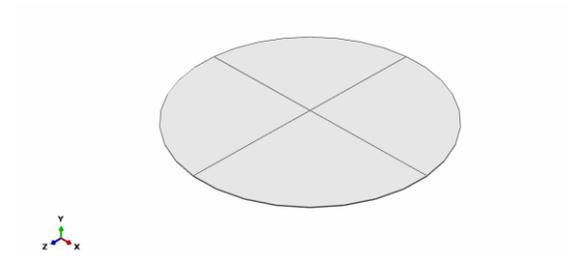


Figura 3.5 Lámina circular para embutido.

## 3.2 Propiedades mecánicas de los materiales.

### 3.2.1 Material para la lámina.

La lámina está construida como un sólido deformable. De acuerdo con Valderas en 2012 para la fabricación de hojalata por lo que se utilizan las propiedades del acero para el modelado. También menciona que el acero para estañado normalmente es acero suave con porcentaje de carbono menor al 0.10%. Por ello se eligió un acero estructural Q195 bajo en carbono hecho en china con equivalencia ASTM A238 grado A con un 0.114% de carbono.

Con el fin de obtener una simulación con resultados más confiables y dado que se estudió el flujo del metal dentro del herramental, se utilizará una lámina con características anisotrópicas para describir el comportamiento plástico del material ya que es la más significativa del proceso. Además, se modelará una lámina con características isotrópicas para comparar los resultados obtenidos con la lámina anterior

El acero ASTM A238 tiene una densidad de  $7800 \text{ kg/m}^3$ . Para la parte elástica se modelará como isotrópico con un módulo elástico de  $200 \text{ GPa}$  y una relación de Poisson de 0.25 (Matweb s.a.)

Para modelar la parte plástica se utilizó la función doble-Voce (ecuación. 3.1) obtenida experimentalmente por Zhao et al en 2015

$$\sigma = \sigma_0 + Q_1(1 - e^{-b_1\varepsilon}) + Q_2(1 - e^{-b_2\varepsilon}) \quad (\text{ec 3.1})$$

Donde:

$$\begin{aligned} \sigma_0 &= 200 \text{ GPa} \\ Q_1 &= 617.86 \\ b_1 &= 0.6646 \\ Q_2 &= 116.41 \\ b_2 &= 19.167 \end{aligned}$$

Las propiedades mecánicas se mantendrán independientes de la temperatura debido a que es un proceso a temperatura ambiente donde para este material los efectos difusivos son despreciables.

Es necesario añadir un criterio de daño para complementar la parte plástica del proceso de manufactura, para lo cual se decidió utilizar el criterio de Hill, ya que es el que describe de mejor manera el comportamiento de aceros suaves y convencionales (Banabic, 2010).

En Abaqus/CAE® es posible definir el criterio de Hill a partir de las relaciones de esfuerzo de cedencia (ratios of yield stress), que se obtienen por las siguientes expresiones a partir de las constantes de Lankford de anisotropía “r” (Zhao et al., 2015):

$$R_{11} = R_{13} = R_{23} = 1 \quad (\text{ec 3.2})$$

$$R_{22} = \sqrt{\frac{r_{90}(r_{00}+1)}{r_{00}(r_{90}+1)}} \quad (\text{ec 3.3})$$

$$R_{33} = \sqrt{\frac{r_{90}(r_{00}+1)}{(r_{00}+r_{90})}} \quad (\text{ec 3.4})$$

$$R_{12} = \sqrt{\frac{3(r_{00}+1)r_{90}}{(2r_{45}+1)(r_{00}+r_{90})}} \quad (\text{ec 3.5})$$

**Tabla 3.2 Valores de constante de Lankford para acero ASTM A238 grado A (Zhao et al., 2015)**

$r_{90}$	2.099
$r_{00}$	2.356
$r_{45}$	1.516

Para utilizar un material anisotrópico se debe asignar una orientación en el material para lo cual se elige la dirección preferencial de la laminación dentro de un sistema de referencia.

### **3.2.2 Material para la matriz y el punzón.**

La matriz fue modelada como sólido deformable. De acuerdo con las recomendaciones de ASM Metals Handbook, y considerando una producción de 1,000,000 de unidades, se debe utilizar un acero de herramientas de media aleación AISI A2 o uno de alto cromo y alto carbono AISI D2.

Debido al alto contenido de cromo que endurece la presencia a través de la presencia de carburos se eligió el acero de herramientas AISI D2.

El acero AISI D2 tiene una densidad de  $7670 \text{ kg/m}^3$  y un modulo de Young de 209.9 GPa y relación de Poisson de 0.3. Además de que se necesita un dato de esfuerzo de fluencia para delimitar la zona en la que trabajará el herramental, el cual es de 2200 MPa (Matweb s.a.).

### **3.2.3 Material para el pisador.**

Una opción para el material del sujetador de lámina, es una aleación de aluminio-bronce debido a sus características de lubricación y de no afinidad. (Szumera, 2003). Debido a sus propiedades mecánicas y a sus propiedades tribológicas se eligió una aleación UNS C60600 con densidad  $8170 \text{ kg/m}^3$ , un módulo de elasticidad de 121 GPa, una relación de Poisson de 0.326 y esfuerzo de cedencia de 165 MPa (Matweb s.a.).

### 3.3 Ensamble

En el módulo ensamble se unen las piezas antes creadas para posicionarlas en la forma más conveniente para realizar la simulación. Para comodidad de la simulación los herramientas están superpuestas a manera de que al terminar un embutido pueda continuar con el siguiente sin tener que mover la lámina, únicamente activando y desactivando las herramientas cuando entran en acción y desactivándolas cuando no. (ver figura 3.6)

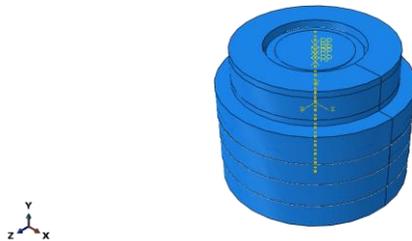


Figura 3.6 Ensamble con todos los herramientas y chapa superpuestos.

### 3.4 Declaración de pasos

En el módulo Step se declaran los pasos que va a seguir la simulación, así como su duración y el factor de escalamiento de masa. Para determinar un correcto factor de escalamiento de masa, se comienza con uno muy grande y se va disminuyendo hasta obtener uno que tenga la mejor relación entre exactitud de los resultados y tiempo de computo. El tiempo de cada paso se obtuvo con la velocidad del punzón y la distancia a la cual fue colocado.

Entre cada paso de embutido existe un paso de recuperación para que al retirar la carga, el material de la lámina se relaje elásticamente del paso previo.

En total se realizaron 12 pasos, sin contar el paso inicial que Abaqus/CAE® tiene por default, ya que los embutidos de los pasos 2 y 4 se dividieron en tres etapas para facilitar el uso de los anillos de presión. Tabla 3.3

<b>Tabla 3.3 Descripción de pasos declarados</b>			
<b>Pasos</b>	<b>Nombre del paso</b>	<b>Duración (s)</b>	<b>Factor de escalamiento de masa</b>
1	Embutido 1	0.066	3000
2	Reposo 1	0.01	7000
3	Embutido 2.1	0.053	500
4	Embutido 2.2	0.007	500
5	Embutido 2.3	0.004	500
6	Reposo 2	0.01	500
7	Embutido 3	0.0946	500
8	Reposo 3	0.01	500
9	Embutido 4.1	0.0935	500
10	Embutido 4.2	0.0065	500
11	Embutido 4.3	0.004	500
12	Reposo4	0.001	500

### **3.5 Interacciones entre cuerpos.**

En este módulo se declaran como son las interacciones entre cada cuerpo involucrado en la simulación. Todas las interacciones son del tipo contacto superficie con superficie y se utiliza un coeficiente de fricción para cada situación, siendo matriz-lámina, punzón-lámina y sujetador-lámina las interacciones principales.

### 3.5.1 Coeficiente de fricción entre matriz, punzón y la lámina.

El coeficiente de fricción varía dependiendo la zona de contacto entre el punzón, la lámina y la matriz, sin embargo, de acuerdo con la investigación realizada por Wang et al en 2017 se puede utilizar un coeficiente de fricción que describa todo el proceso de embutido, por lo que se tomó el valor obtenido en dicha investigación realizada en un acero dulce con un lubricante de película de polietileno.

$$\mu_{lámina-matriz} = \mu_{lámina-punzón} = 0.0763$$

(Wang et al, 2017)

### 3.5.2 Coeficiente de fricción entre pisador y la lámina.

El material con el que está hecho el pisador es una aleación de bronce con aluminio debido a sus propiedades lubricantes. El coeficiente de fricción de las aleaciones de aluminio-bronce utilizado en embutidos está en un valor cercano a 0.1 (Li et al, 2006).

## 3.6 Condiciones de carga y de frontera.

### 3.6.1 Presión de sujeción del pisador.

La presión para que el pisador detenga a la lámina debe ser calculada, ya que si se ejerce una presión excesiva en la lámina se presentarán reducción de espesor y fractura, por el otro lado si es muy pequeña la lámina puede tener arrugas durante el proceso de embutido.

### 3.6.2 Presión de sujeción primer paso.

El primer pisador tiene un radio exterior de 0.053m y el interno de 0.035m por lo que el área es de:  $0.0049m^2$

Utilizando la ecuación 1.5 y dividiéndola entre el área:

$$P_{h1} = 0.015(187MPa)[(0.1063m)^2 - (0.063m + 2.2(0.3 \times 10^{-3}m) + 2(0.002883m))^2]/0.00489977m^2$$

$$P_{h1} = 3.719 MPa$$

### 3.6.3 Presión de sujeción segundo paso.

El segundo pisador tiene un radio exterior de 0.045m y el interno de 0.033cm por lo que el área es de:  $0.0029m^2$

Utilizando la ecuación 1.5 y dividiéndola entre el área:

$$P_{h2} = 0.015(187MPa)[(0.09084m)^2 - (0.0516m + 2.2(0.3 \times 10^{-3}m) + 2(0.002883m))^2]/0.0029722m^2$$
$$P_{h2} = 4.622 MPa$$

### 3.6.4 Presión de sujeción tercer paso.

El tercer pisador tiene un radio exterior de 0.045m y el interno de 0.034cm por lo que el área es de:  $0.0028m^2$

Utilizando la ecuación 1.5 y dividiéndola entre el área:

$$P_{h3} = 0.015(187MPa)[(0.0884m)^2 - (0.0335m + 2.2(0.3 \times 10^{-3}m) + 2(0.002883m))^2]/0.00286642m^2$$
$$P_{h3} = 6.102 MPa$$

### 3.6.5 Presión de sujeción cuarto paso.

El cuarto pisador tiene un radio exterior de 0.045m y el interno de 0.034m por lo que el área es de:  $0.0027m^2$

Utilizando la ecuación 1.5 y dividiéndola entre el área:

$$P_{h4} = 0.015(187MPa)[(0.0882)^2 - (0.02608m + 2.2(0.3 \times 10^{-3}m) + 2(0.002883m))^2]/0.00275277m^2$$
$$P_{h4} = 6.867 MPa$$

### **3.6.6 Velocidad de embutido.**

La velocidad de embutido es la velocidad del punzón cuando deforma la lámina. La velocidad en un embutido cilíndrico depende del material de la lámina a embutir, para aceros de bajo carbono se recomienda una velocidad de 280 mm/s (Wassilief, 1966).

### **3.6.7 Restricciones de desplazamiento para herramientas.**

Se crearon restricciones de empotramiento en la base de las matrices de tal forma que no exista movimiento, pero si puedan deformarse. Por otro lado, para el segundo y cuarto paso de embutido se crearon restricciones de movimiento en los ejes X y Z en los anillos de presión para que no exista movimiento con las reacciones de la lámina en dichas direcciones.

## **3.7 Malla.**

Con el fin de obtener una malla que permita disminuir el tiempo de cómputo sin sacrificar precisión en los resultados se experimentó con el tamaño de éstas en el primer paso de embutido. Éste experimento consistió en utilizar mallas con elementos muy grandes e ir disminuyendo el tamaño en cada simulación para identificar de esta forma una tendencia en el valor de los resultados.

### **3.7.1 Malla para la lámina.**

La medida registrada en cada simulación fue el valor máximo de esfuerzo en cada pieza. Siendo los resultados mostrados en la tabla 3.4.

**Tabla 3.4 Relación tamaño de elemento-Esfuerzo máximo en la lámina con un elemento en el espesor.**

Tamaño de nodos	Número de nodos en los ejes	S (MPa)	t(s)	Número de elementos
0.025	5	692	1000	60
0.01	10	706	2046	320
0.005	20	601	4325	1156
0.004	25	633	7201	1344
0.004	30	653	7558	2268
0.003	40	640	7700	2240

Para asignar nodos a un borde en la lámina se tuvo que realizar una partición del sólido y se asignaron en dirección radial como se muestra en la figura 3.12. Los nodos de color rosa son los del borde y los negros son de los ejes.

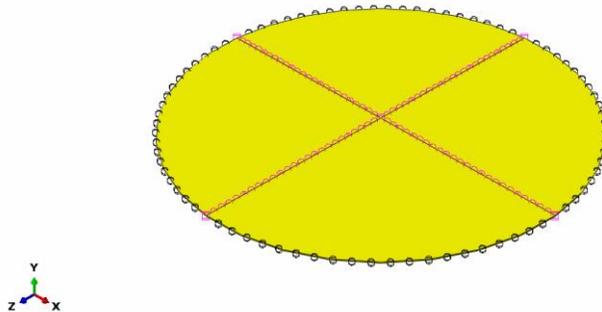


Figura 3.7 Disposición de las semillas en la lámina

Se concluyó que conforme los elementos de la malla se hacen más pequeños el valor de esfuerzo máximo tiende a un valor de 640MPa, por lo que se podría utilizar una malla con un tamaño de 0.004 y 25 semillas en los bordes, dado que con más nodos los resultados son similares y se aumentaría el tiempo de computo.

Posteriormente se realizaron pruebas aumentando el número de elementos en el grosor de la lámina haciendo pruebas con 2 (ver tabla 3.5) y 3 elementos (ver tabla 3.6).

**Tabla 3.5 Relación tamaño de elemento-Esfuerzo máximo con lámina con dos elementos en el espesor**

<b>Tamaño de nodos</b>	<b>Número de nodos en los bordes</b>	<b>S(MPa)</b>	<b>t(s)</b>	<b>Número de elementos</b>
0.025	5	643	1430	120
0.01	10	636	2128	640
0.005	20	614	4958	2312
0.004	25	608	7542	2688
0.004	30	620	8608	4536

**Tabla 3.6 Relación tamaño de elemento-Esfuerzo máximo con lámina con tres elementos en el espesor**

<b>Tamaño de nodos</b>	<b>Número de nodos en los bordes</b>	<b>S(MPa)</b>	<b>t(s)</b>	<b>Número de elementos</b>
0.025	5	720	1466	180
0.01	10	676	2278	960
0.005	20	611	5517	3468
0.004	25	600	7990	4032
0.004	30	665	9099	6804

A partir de estos resultados se determinó que los elementos en el espesor de la lámina fluctúan entre 609 y 720 MPa por lo que se optó por elegir una malla que obtuvieran resultados que se encuentre entre estos valores, dado que no se encontró una tendencia clara, además de que fue importante tener un mayor número de elementos para disminuir distorsiones. Por ello se eligió una malla de 0.003 m y con 40 elementos en el radio.

### 3.7.2 Malla para la matriz y el punzón.

La elección de la malla de la matriz y el punzón se realizó con base en los resultados obtenidos en el análisis de sensibilidad del modelo. Se observó que los nodos en los bordes influyeron en el flujo de la lámina durante el embutido, de tal forma que a mayor número de elementos la distorsión era menor, esto tanto para la matriz como para el punzón. Por lo tanto se eligió un valor de tamaño de semilla de 0.002 m para las matrices y punzones y 6 semillas para el borde en los radios de ambos. El tamaño de nodos se muestra en color negro y el número de nodos en el borde son los que se ven en rosa. (figura 3.8)

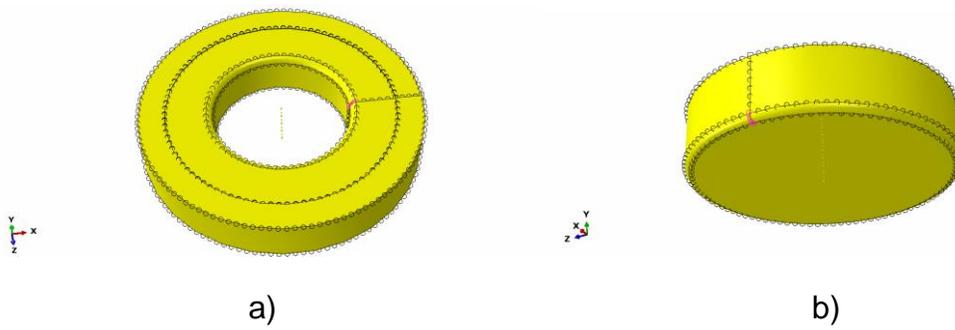


Figura 3.8 Disposición de las semillas a) matriz y b) punzón

# 4. Resultados.

A continuación, se describen los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas, se muestran en el orden de los pasos de embutido comparando el caso isotrópico con el anisotrópico.

## 4.1 Resultados del primer paso de embutido

Como se observa en la figura 4.1 los esfuerzos se distribuyen de una manera homogénea en el caso isotrópico, mientras que en el caso anisotrópico se distribuyen de manera radial variando en la dirección del plano XZ como se muestra en las figuras 4.2 y 4.4.

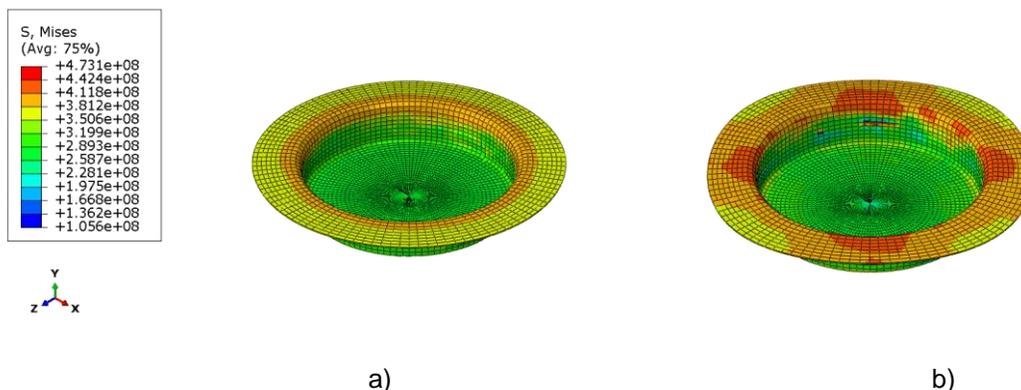
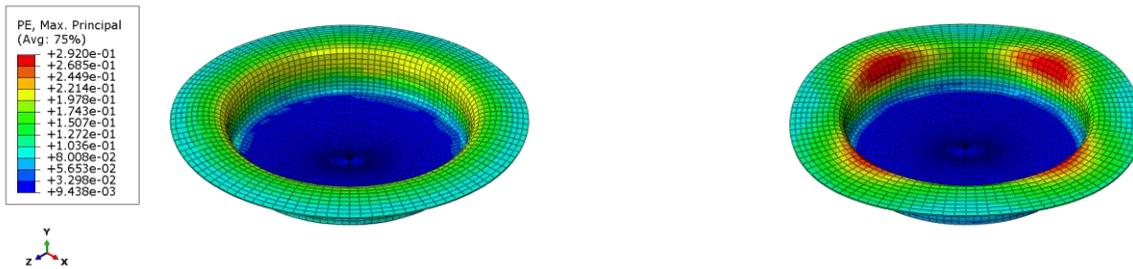


Figura 4.1 Distribución de esfuerzos primer paso de embutido a) isotrópico b) anisotrópico

Después del primer reposo se observa el contraste de la deformación plástica presentada en ambos casos. En el caso isotrópico se observa que la formación de orejas es casi nulo mientras que en el caso anisotrópico se observa ligeramente esta deformación propia del trabajo en lámina para chapas con este comportamiento del material ver figura 4.2.



a) b)  
 Figura 4.2 Distribución de deformación plástica primer paso de embutido a) isotrópico b) anisotrópico.

Los valores de esfuerzos presentados en la figura 4.1 corresponden a la distribución de deformación plástica de la figura 4.2 y a su vez congruentes con la ecuación 3.1 que describe el comportamiento del material utilizado para la chapa.

Para graficar los esfuerzos y deformaciones en la pieza del primer paso se tomaron los nodos que se encuentran a lo largo del anillo, que se muestra en la figura 4.3. Debido a que es en esta región dónde se aprecia la mayor variación de esfuerzos.

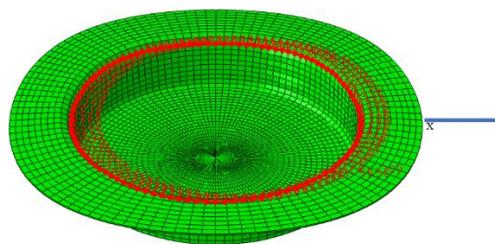


Figura 4.3 Nodos que se utilizaron para graficar la distribución de esfuerzos y deformación plástica

Existe una diferencia aproximada de 20MPa entre el promedio de cada una de las distribuciones. De acuerdo con la figura 4.4 se observa una variación del 6.89% en los esfuerzos distribuidos a lo largo de la circunferencia formada por el primer embutido para el caso anisotrópico, esto muestra cómo varían las propiedades mecánicas de la lámina en dicha dirección. Se observa que los máximos esfuerzos se encuentran en las direcciones correspondientes a 45°, 135°, 225° y 315° a partir del eje x.

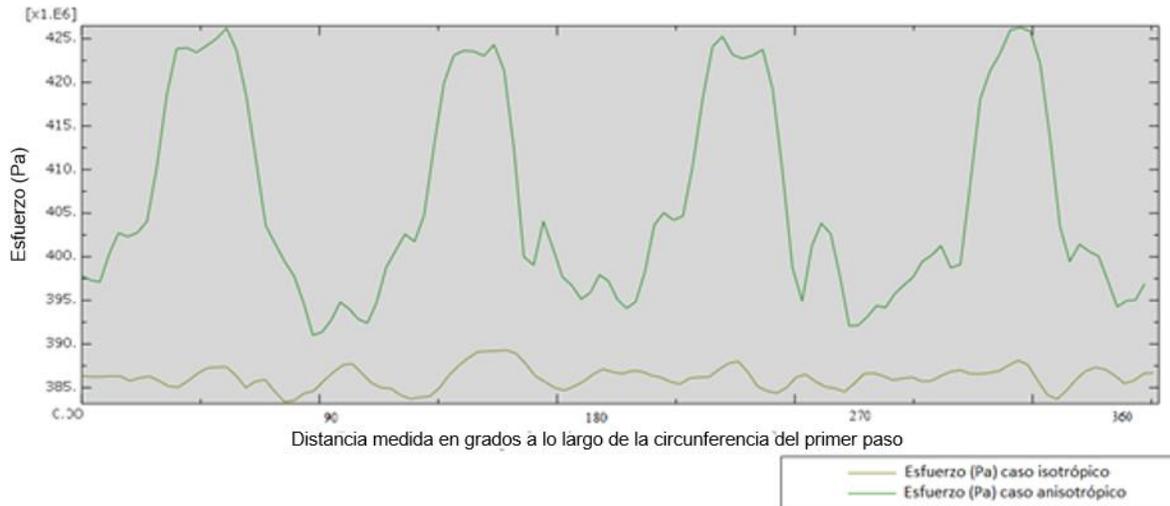


Figura 4.4 Gráfica donde se muestra la variación del esfuerzo para ambos casos en función del ángulo respecto al eje X

En la figura 4.5 se muestra una deformación máxima de 0.29mm/mm para el caso anisotrópico a  $90^\circ$  con respecto del eje x mientras que en el caso isotrópico el máximo se encuentra cerca de los  $45^\circ$  y es de 0.221mm/mm. El caso isotrópico tiene una amplitud de onda (del máximo al mínimo) de 0.02mm/mm que es muy pequeña, sin embargo, el caso anisotrópico tiene una amplitud de 0.118mm/mm. La variación del caso isotrópico representa el 16.9% de la variación del caso anisotrópico. Mientras que la media para el caso anisotrópico es de 0.2323mm/mm y para el caso isotrópico es de 0.2117mm/mm, por lo que la diferencia de las medias es 0.0206mm/mm.

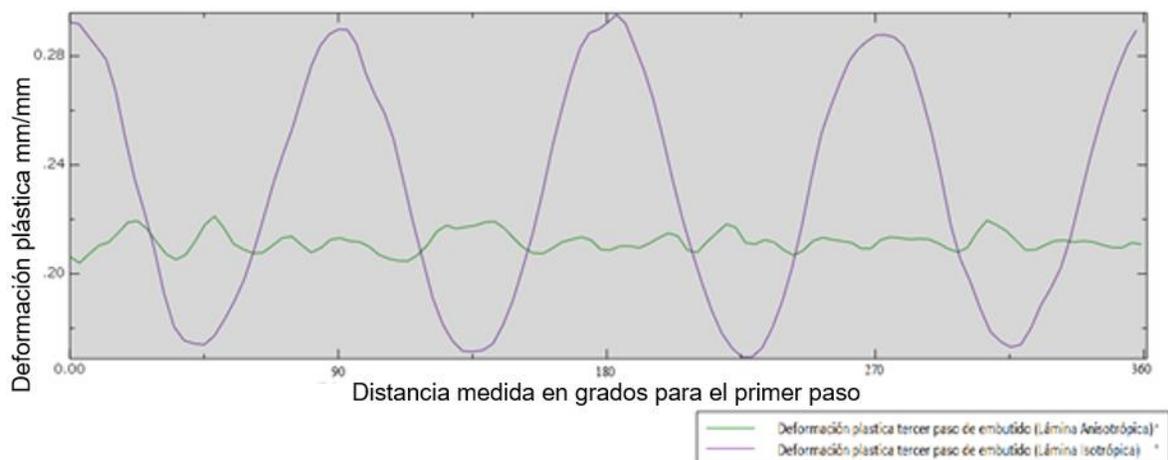


Figura 4.5 Gráfica donde se muestra la deformación plástica para ambos casos en función del ángulo respecto al eje X

El flujo de la lámina será analizado con los vectores de velocidades de la lámina (figura 4.6) y sus magnitudes indican la preferencia de la lámina a fluir en las regiones donde el material se comporta de manera más dúctil por la anisotropía, es evidente la diferencia entre ambos casos, en el caso isotrópico la lámina fluye en dirección radial de manera uniforme mientras que en el caso anisotrópico lo hace de manera más rápida en las zonas ubicadas cada 45 grados respecto del eje “x”. En la figura 4.6 se observa también el corte del primer paso de embutido para ambos casos, lo que facilita la apreciación de las magnitudes de los vectores.

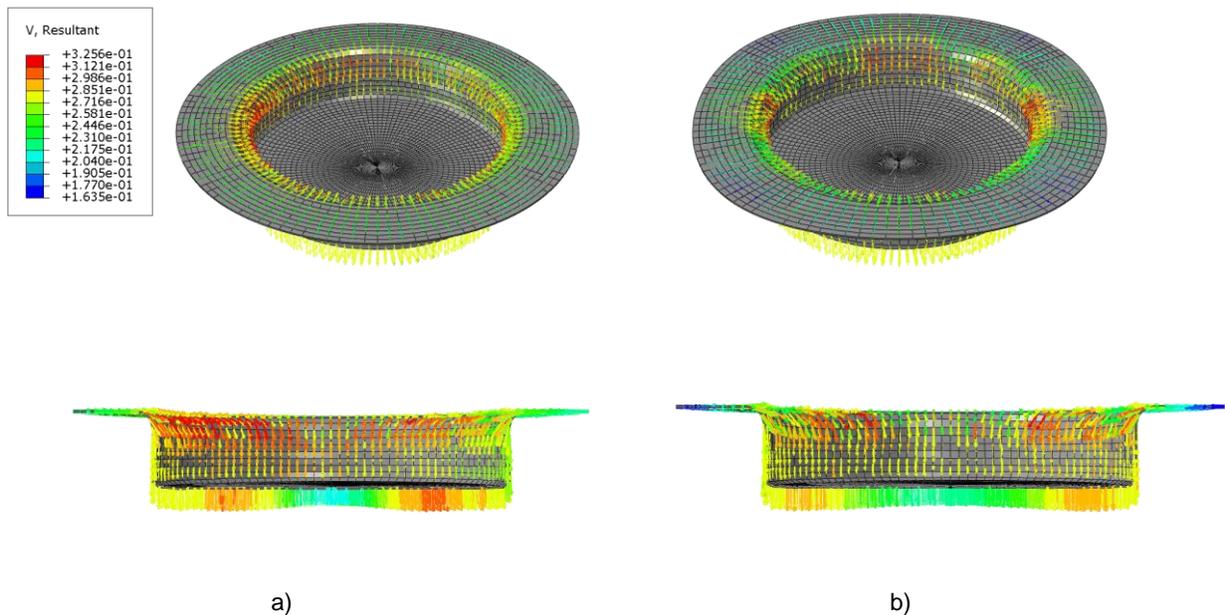


Figura 4.6 diferencia en el flujo arriba vista superior abajo corte caso a) isotrópico b) anisotrópico

Debido al calibre tan delgado de la lámina simulada (calibre 30), es importante considerar el espesor de ésta a través del proceso, dado que fluye dentro del herramental y se somete a esfuerzos que hacen que varíe el espesor en diferentes puntos de la pieza.

La mayor variación de espesor de la lámina fue en el punto donde se dobla la lámina en el punto B para caso isotrópico y punto A para el caso anisotrópico. Esto se debe al flujo del material en sentido radial hacia estas zonas al realizarse el embutido, ver tabla 4.1 y figura 4.7.

En la tabla 4.1 complementada con la figura 4.7 se presentan las medidas tomadas para el espesor de la chapa en 4 casos diferentes, el primero es “A (0)” que se tomó en la simulación de la lámina anisotrópica medida a 0 grados respecto al eje X, el segundo caso es en la misma simulación a 45 grados del eje x en el plano XZ es “A (45)”, el tercer caso se midió en el caso Isotrópico “I” y por último la medida de la pieza real en la columna “Real”. La lámina utilizada para el caso real es un calibre más grueso que la simulada, por lo que se comparó el porcentaje de variación en espesores. Las variaciones se calcularon a partir de la medida tomada y el espesor original de la chapa siendo 0.3 mm para las simulaciones y 0.38 mm para la pieza real.

Los cambios más significativos de espesor se dieron en la zona “A” del primer paso pues existió un engrosamiento en los 3 casos debido al flujo del material, lo cual es congruente con la medición de la pieza real. De la misma forma en la zona “B” existieron adelgazamientos lógicos de acuerdo con las medidas tomadas en la pieza real siendo el caso isotrópico el que mostró mayor engrosamiento, lo cual sigue siendo lógico ya que en dicha zona se esperaba este comportamiento. Sin embargo, en la zona C de las piezas simuladas no existió un adelgazamiento importante del espesor (menor a 3%) más que en el caso isotrópico y de acuerdo con las medidas tomadas en la pieza real el comportamiento fue el esperado.

Tabla 4.1 Espesores para el paso 1								
Punto	A (0) (mm)	Variación <sub>1</sub> %	A (45) (mm)	Variación <sub>1</sub> %	I (mm)	Variación <sub>1</sub> %	Real (mm)	Variación <sub>2</sub> %
A	0.319	-6.333	0.314	-4.667	0.323	-7.667	0.399	-4.92
B	0.286	4.667	0.282	6	0.262	12.667	0.357	6.12
C	0.297	1	0.294	2	0.287	4.333	0.3335	12.24

1. Respecto a un espesor inicial 0.3

2. Respecto a un espesor inicial 0.38

\*Los valores negativos representan un aumento en el espesor

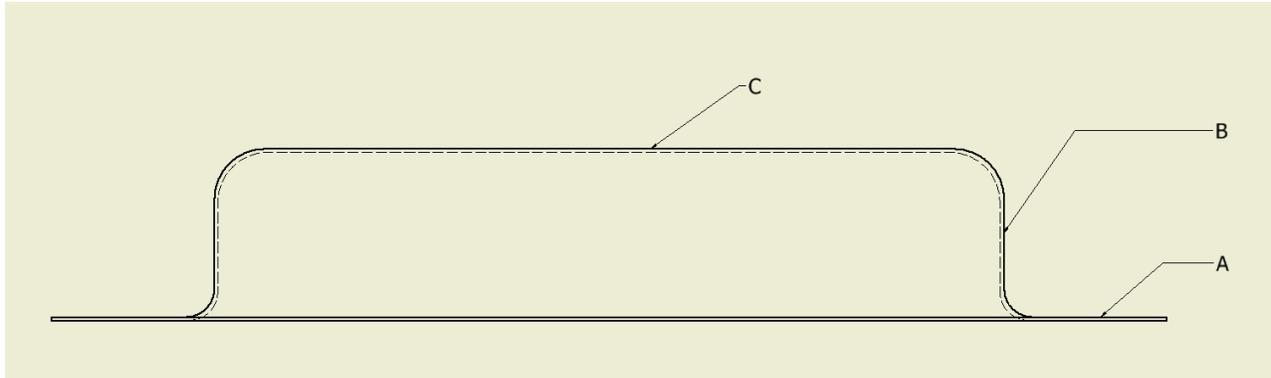


Figura 4.7 Variación del espesor de la lámina para primer paso de embutido

De acuerdo con la figura 4.8 se observa que la fuerza con la que comienza a moverse el punzón es muy grande, esto debido a la inercia del punzón que se ve alterada por el factor de escalamiento de masa utilizado, sin embargo, en el momento que toca con la lámina para realizar el embutido, en 0.0198s la fuerza disminuye. Hasta ese momento la fuerza de reacción es igual para ambos casos, dado que los punzones son iguales, pero cuando la lámina comienza a deformarse se observa una variación, ya que para deformar la lámina isotrópica se requirió de más fuerza para realizar el embutido, es importante notar que las fuerzas de embutido son mucho más grandes que las fuerzas experimentales medidas en casos similares, las cuales rondan los valores de 40-35 KN (Lăzărescu y Banabic, 2017). Ver figura 4.8 y tabla 4.2.

El punzón utilizado en embutido con lámina isotrópica muestra una mayor fuerza de reacción mostrando una diferencia máxima de 45 KN (23%) que el utilizado con lámina anisotrópica en el momento 0.0396s.

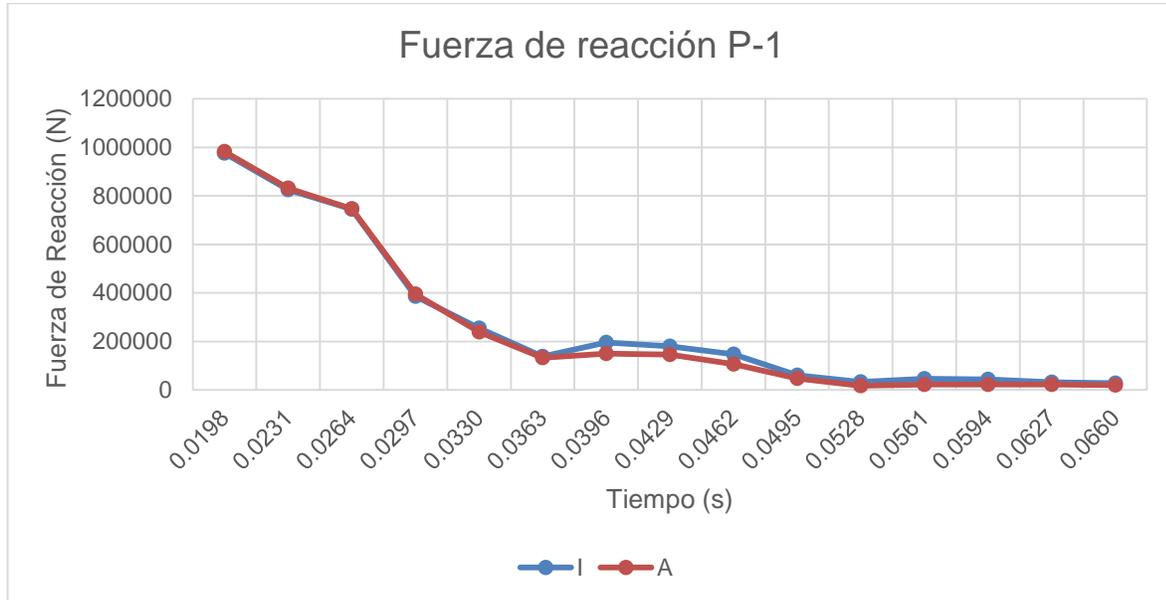


Figura 4.8 Gráfica que muestra la fuerza de embutido a partir del contacto de la herramienta con la lámina

Se calcularon las fuerzas de embutido con las ecuaciones 1.2, 1.3 y 1.4 para el paso 1 y los resultados se muestran en la tabla 4.2 junto con el valor máximo obtenido en la simulación.

Como se aprecia las fuerzas obtenidas son menores en comparación con las fuerzas obtenidas mediante la simulación en Abaqus/CAE® por un orden de magnitud.

<b>Tabla 4.2 Fuerzas de embutido teóricas contra fuerzas de la simulación primer paso</b>			
<b>Máxima simulación</b>	<b>Ecuación 1.2</b>	<b>Ecuación 1.3</b>	<b>Ecuación 1.4</b>
195 KN	12 KN	24 KN	33.1 KN

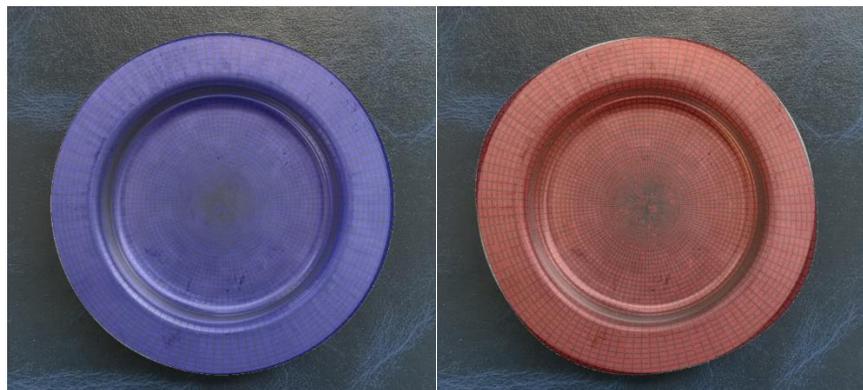
A continuación, se muestra la comparación entre la simulación de las piezas obtenidas en cada caso para el primer paso de embutido y la pieza real. (Figura 4.9)



a) b) c)  
Figura 4.9 Primer paso de embutido a) Real b) Con lámina isotrópica c) Con lámina anisotrópica

Para el caso anisotrópico el diámetro de la pieza embutida es de 9.288 cm (3.2% respecto a la pieza real), para la pieza isotrópica es de 9.096 cm (1.06% respecto a la pieza real), mientras que la pieza real mide 9.0 cm. La pieza anisotrópica presenta deformación en direcciones preferenciales lo que hace que el diámetro máximo sea más grande debido al flujo no homogéneo del material.

A continuación, se muestra una comparación entre el flujo de la pieza real y las simuladas, para lo cual los diámetros de las últimas serán igualados al de la pieza real. (Figura 4.10). Se aprecia que la lámina isotrópica se acopla un poco mejor que la anisotrópica a la real, sin embargo, al igual que la lámina anisotrópica, la pieza real tiene ciertas deformaciones preferenciales, las cuales, debido al factor de escalamiento de masa, en la lámina anisotrópica se ven exageradas.



a) b)  
Figura 4.10 Comparación de los flujos del primer paso con la pieza real a) isotrópico b) anisotrópico

Las matrices para el primer paso utilizadas en las simulaciones de ambos casos presentaron un comportamiento adecuado, ya que los esfuerzos presentados estuvieron por debajo del valor del esfuerzo de cedencia, siendo el esfuerzo máximo de 189 MPa (8.59% del esfuerzo de cedencia) para el caso Isotrópico y 187 MPa (8.5% del esfuerzo de cedencia) para el caso anisotrópico como se ilustra en la figura 4.11. Se observa que para ambos casos los esfuerzos se distribuyen en los radios de la matriz.

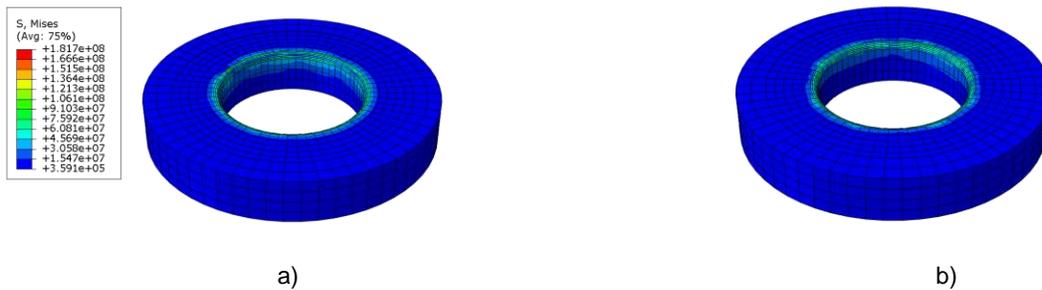


Figura 4.11 Matrices utilizadas para el primer paso a) isotrópico b) anisotrópico

Los punzones para este paso tuvieron un esfuerzo máximo de 307.2 MPa (13.95% del esfuerzo de cedencia) para el caso isotrópico y 274.2 MPa (12.45% del esfuerzo de cedencia) para el caso anisotrópico. La distribución de esfuerzos para los punzones es similar al de la lámina, dado que en el caso anisotrópico se observa que los esfuerzos se concentran en las mismas direcciones que lo hace en la chapa embutida, a diferencia del caso isotrópico, donde los esfuerzos son muy similares en todo el radio del punzón. Ver figura 4.12.

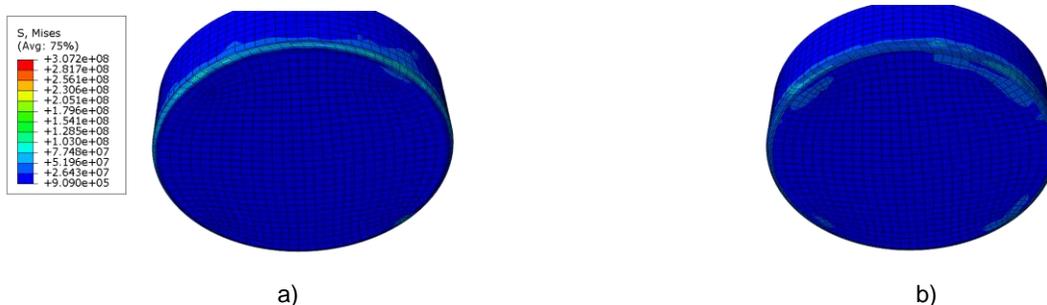


Figura 4.12 Punzones utilizados para el primer paso a) isotrópico b) anisotrópico

## 4.2 Resultados del segundo paso de embutido

Aunque la distribución de esfuerzos se nota más homogénea en el modelo de la figura 4.13b que en el primer paso de embutido, se alcanza a ver la formación de orejas, mientras que en el modelo de la figura 4.13a la deformación de la lámina es uniforme en todas las direcciones sin demostrar ninguna tendencia a la formación de orejas.

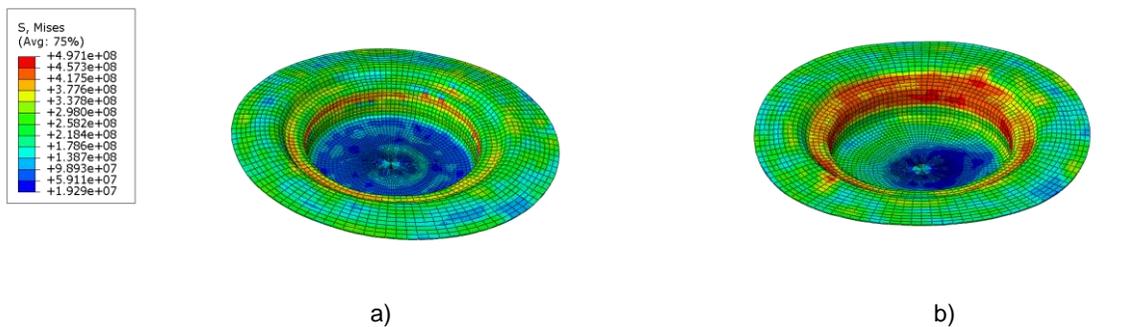


Figura 4.13 Segundo paso de embutido distribución de esfuerzos a) isotrópico b) anisotrópico

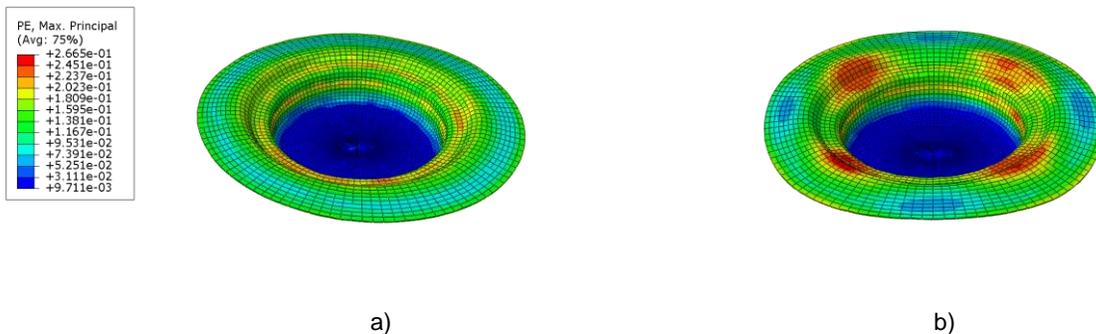
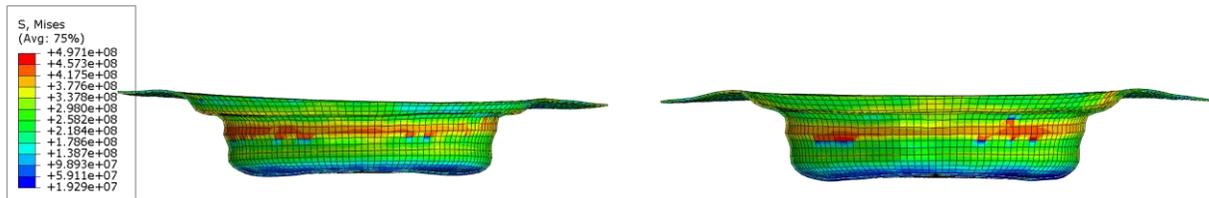


Figura 4.14 Segundo paso de embutido distribución de deformación plástica a) isotrópico b) anisotrópico

En la figura 4.15 se observa mejor el inconveniente de la formación de orejas que se mencionaba anteriormente y como es más pronunciado en el modelo anisotrópico.



a) b)  
 Figura 4.15 Corte después del segundo reposo del proceso a) isotrópico b) anisotrópico

Debido a la concentración de esfuerzos y a que fue el lugar donde se presentó la mayor deformación se utilizaron los nodos en la zona mostrada en la figura 4.16 para obtener las gráficas con los valores de esfuerzo y deformación obtenidas en este paso.

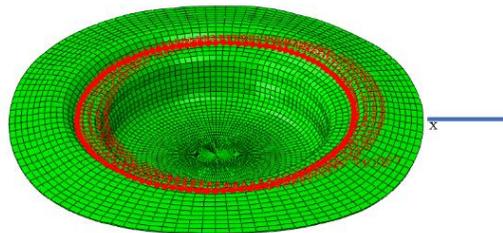


Figura 4.16 Nodos que se utilizaron para graficar la distribución de esfuerzos y deformación plástica

Existe una diferencia de 25.83 MPa entre las medias de cada una de las distribuciones de esfuerzo. De acuerdo con la figura 4.17 se muestra una variación entre máximo y mínimo de 54.98% alrededor de la circunferencia de la chapa para el caso anisotrópico. A diferencia del paso anterior en el caso anisotrópico la distribución de esfuerzos tiene un máximo cerca de los  $100^\circ$  y el mínimo cerca de  $315^\circ$  respecto del eje X. Mientras que como era de esperarse para el caso isotrópico la línea de tendencia es muy marcada y homogénea. (Figura 4.17). Es importante mencionar que el pico cercano a los  $315^\circ$  se encontró en un solo nodo del anillo y por lo tanto solo representa un salto puntual dentro de los resultados asociado a la distorsión de la malla.

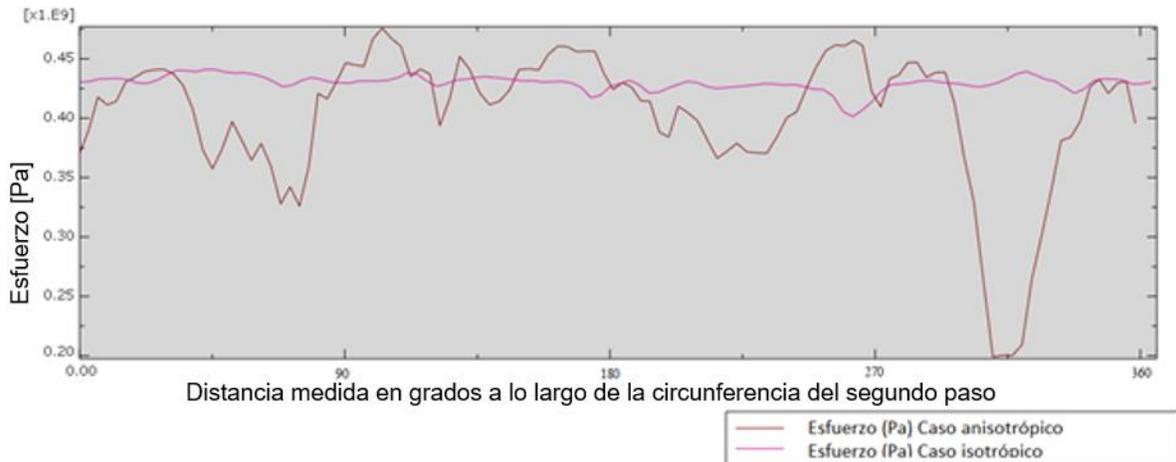


Figura 4.17 Gráfica donde se muestra la variación del esfuerzo en función del ángulo respecto al eje X

La figura 4.18 muestra una deformación máxima de 0.26 mm/mm para el caso anisotrópico a los 90 grados del eje x mientras que en el caso isotrópico la máxima es de 0.187 mm/mm cerca de los 45 grados del eje x. Por otro lado, el mínimo para el caso anisotrópico es de 0.12 mm/mm a los 135 grados respecto al eje coordenado x, para el caso isotrópico el mínimo es de 0.163 mm/mm cercano a los cero grados.

Las amplitudes máximas para caso anisotrópico e isotrópico son 0.107 mm/mm y 0.052 mm/mm respectivamente. Las variaciones del caso isotrópico representan el 48.59% de las variaciones en el caso anisotrópico.

El promedio del caso anisotrópico es de 0.186 mm/mm mientras que para el caso isotrópico es de 0.173 mm/mm por lo que su diferencia es de 0.013 mm/mm que representa el 6.99% de diferencia entre las medias.

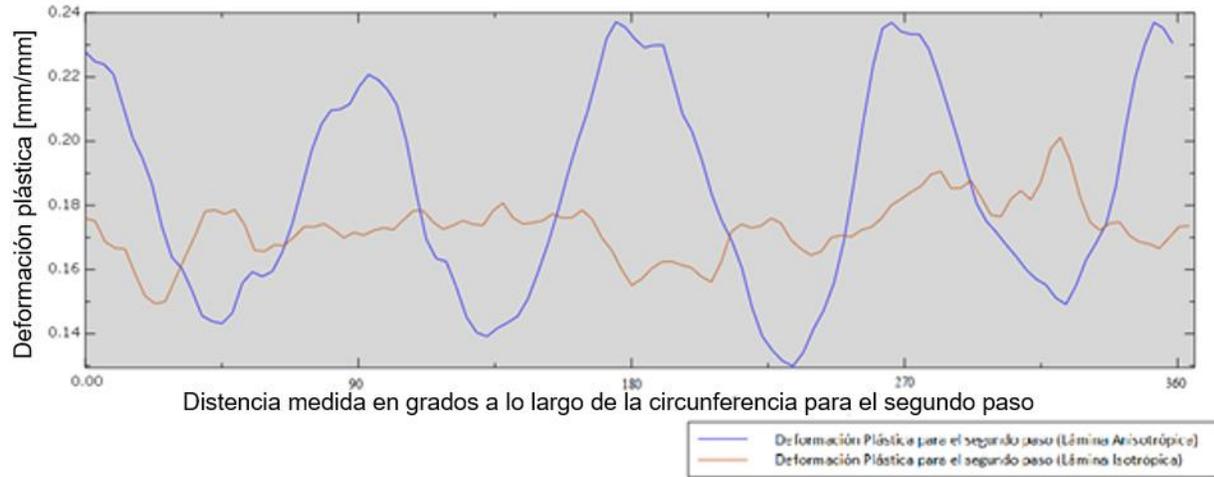


Figura 4.18 Gráfica donde se muestra la variación de la deformación plástica en función del ángulo respecto al eje X

El perfil de velocidades del segundo paso de embutido presenta vectores en la dirección del eje Y en sentido positivo, contrarias al movimiento del punzón, las cuales pueden deberse a reacciones del material fluyendo, presentándose en mayor medida en el caso anisotrópico como era de esperarse, además es apreciable la velocidad de la lámina en las regiones donde se forman las orejas, los cuales corresponden a los máximos. Ver figura 4.18.

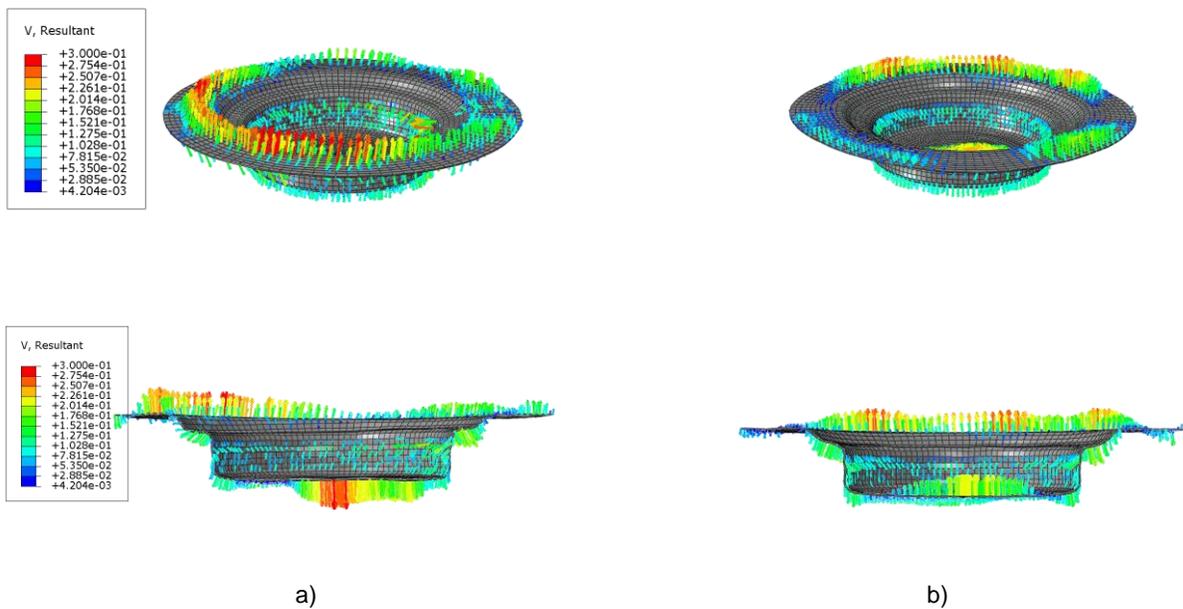


Figura 4.18 Arriba perfiles de velocidad de casos isotrópico y anisotrópico abajo cortes realizados a la chapa para observar el flujo

También es evidente que la velocidad de la base de la chapa del caso anisotrópico tiene componentes en dirección positiva del eje “y” mientras que en el caso isotrópico no existen lo que supone arrugamiento de las superficies para el caso anisotrópico.

En la tabla 4.3 y en la figura 4.20 se muestran las mediciones de los espesores con la misma nomenclatura que en la tabla 4.1 “A (0)” fue medida en la simulación anisotrópica a 0 grados del eje X y “A (45)” a 45 grados del eje X sobre el plano XZ Mientras que la columna “I” es para el caso isotrópico. Debido a que para este paso no se contó con la pieza real no se agregó a esta tabla.

En el punto “A” la chapa embutida siguió engrosando, lo cual tiene sentido, pues en los pasos primero y tercero de embutido en la pieza real mostró un aumento en su espesor. En el punto “B” se esperaba un engrosamiento por la zona en la que se encuentra, sin embargo solo mostró un crecimiento en esta medida en el caso “A(45)”, debido probablemente a que este paso de embutido fue de poca profundidad. En el punto “C” se mostraron comportamientos diferentes entre ambos casos (anisotrópico e isotrópico) ya que en las dos medidas tomadas del caso anisotrópico la lámina presentó un engrosamiento, mientras que en el caso isotrópico adelgazó en las mismas proporciones. Fue en este punto en el que se esperaba un crecimiento en el espesor debido al radio formado por el embutido, pero el anillo de presión utilizado en este paso representó un factor importante en el caso isotrópico porque adelgazó la lámina en esta zona. En el punto “D” el flujo orientado en la lámina anisotrópica puede explicar el engrosamiento en una zona y el adelgazamiento en otra, aunque en esta zona se esperaba adelgazamiento de la lámina. El espesor en el punto “E” no tuvo variación significativa como se esperaba.

Tabla 4.3 Espesores para el paso 2						
Punto	A (YZ) (mm)	Variación (%)	A (45) (mm)	Variación (%)	I (mm)	Variación (%)
A	0.307	-2.333	0.305	-1.667	0.312	-4
B	0.302	-0.667	0.315	-5	0.3	0
C	0.341	-13.667	0.352	-17.333	0.254	15.333
D	0.273	9	0.329	-9.667	0.282	6
E	0.292	2.667	0.295	1.667	0.283	5.667

1. Respecto a un espesor inicial 0.3

2. Respecto a un espesor inicial 0.38

\*Los valores negativos representan un aumento en el espesor

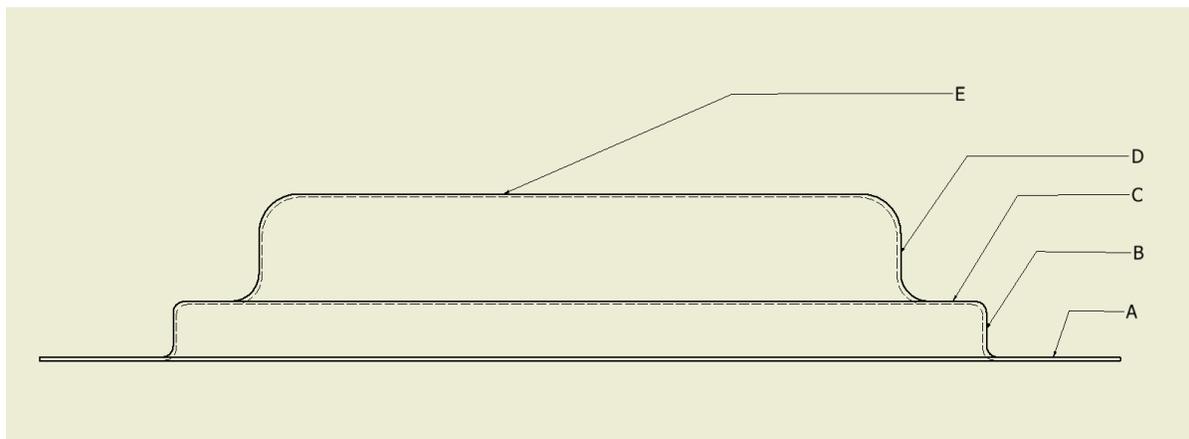


Figura 4.20 Variación del espesor de la lámina para segundo paso de embutido

La figura 4.21 muestra la gráfica del segundo paso de embutido, la cual tiene un comportamiento disperso, con amplitudes grandes entre los valores medidos en los nodos, lo cual se puede explicar con el ruido ocasionado por los nodos de contacto, sin embargo, presenta una tendencia de mayor a menor como se esperaba.

Se observa que la mayor diferencia entre ambos casos es de 13.5KN (7.08%) en el momento 0.115(s), lo cual es una diferencia despreciable. Además, es importante mencionar que la fuerza necesaria para realizar el segundo embutido fue prácticamente la mitad que la necesaria para realizar el primero. La lámina toca con el punzón en el instante 0.1078 (s) por lo que se muestra la gráfica a partir de este momento.

De la misma forma que en el primer paso las fuerzas son muy grandes comparadas con las calculadas teóricamente debido al factor de escalamiento de masa, el cual fue menor para este paso, lo cual puede explicar que las fuerzas sean casi la mitad que las reportadas en el primer paso, además de que el diámetro del punzón es menor. También se muestran las líneas de tendencia de ambos casos, que se asemejan al comportamiento esperado.

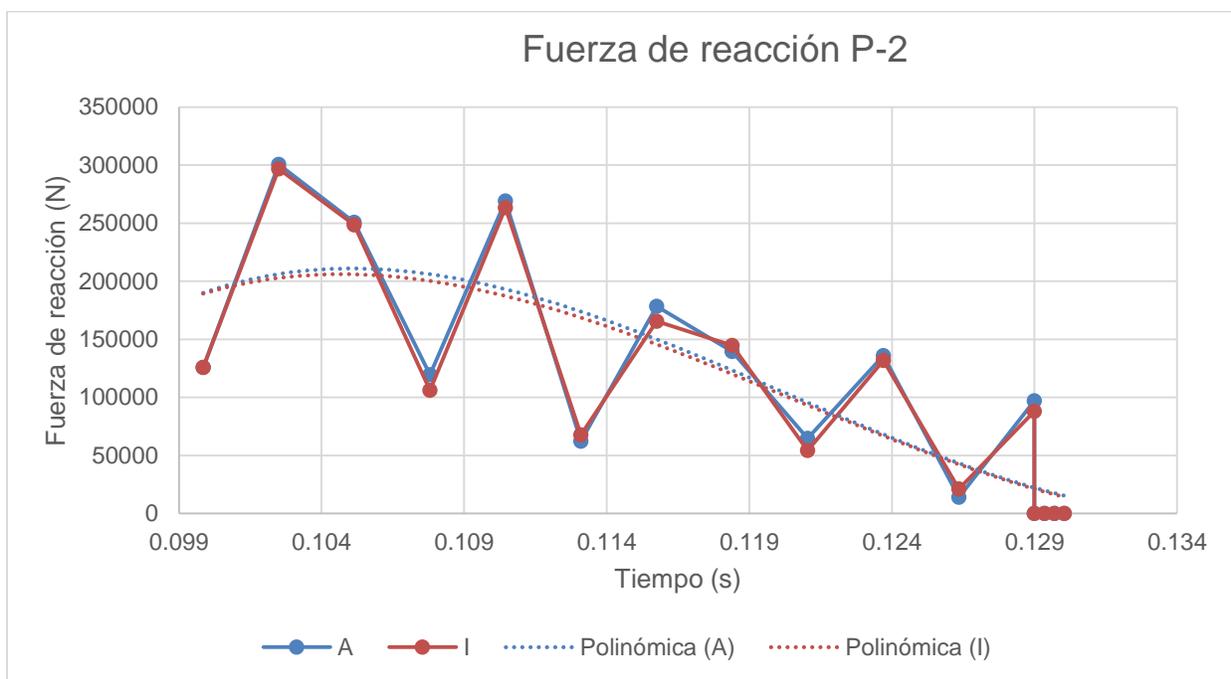


Figura 4.21 Gráfica que muestra la fuerza de embutido durante el tiempo transcurrido en el segundo paso de embutido.

A continuación, se muestra en la tabla 4.4 las fuerzas teóricas y simuladas para el segundo paso, estando aún un orden de magnitud por encima de lo esperado.

<b>Tabla 4.4 Fuerzas de embutido teóricas contra fuerzas de la simulación segundo paso</b>			
<b>Máxima embutido</b>	<b>Ecuación 1.2</b>	<b>Ecuación 1.3</b>	<b>Ecuación 1.4</b>
263 KN	5.1 KN	19.7 KN	24.8 KN

A continuación, se muestra la comparación entre la simulación de las piezas obtenidas en cada caso para el segundo paso de embutido. (Figura 4.22)

Para el caso anisotrópico el diámetro de la pieza embutida es de 9.73cm (6.92% de la pieza teórica), para la pieza isotrópica es de 9.57 cm (5.16% de la pieza teórica), mientras que la pieza real mediría 9.1 cm de acuerdo con la teoría. Al igual que en el caso anterior el caso anisotrópico varía más debido al flujo hacia direcciones preferenciales, sin embargo, la variación entre las piezas real y las simuladas es más grande, lo cual se debe a la presencia del sujetador de lámina, el cual no se utiliza en el proceso real. En este paso no se contó con la pieza real, por lo que no se hizo comparación de los flujos.



Figura 4.22 Segundo paso de embutido a) Con lámina isotrópica b) Con lámina anisotrópica

Las matrices utilizadas para las simulaciones presentaron esfuerzos máximos de 729.7MPa (33.16% del esfuerzo de cedencia) y 833.2 MPa (37.87% del esfuerzo de cedencia) para el caso anisotrópico e isotrópico respectivamente (figura 4.23).

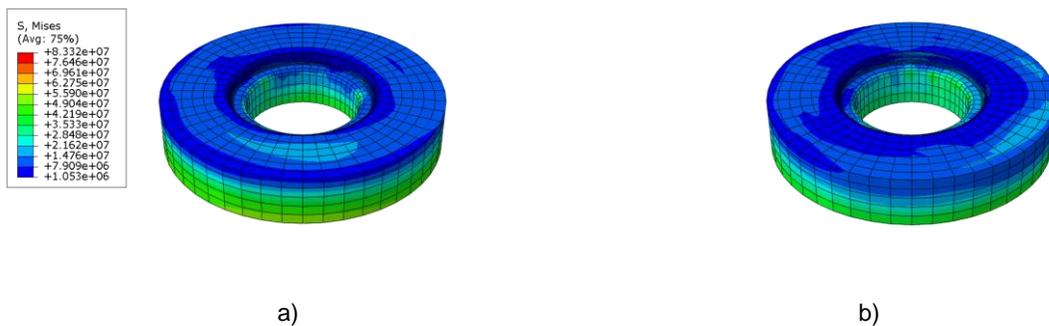


Figura 4.23 Matrices utilizadas para el segundo paso a) isotrópico b) anisotrópico

Los esfuerzos se distribuyeron de manera muy similar en ambos casos pues solamente se concentraron en la zona donde la lámina fluye hacia el herramental y en las paredes internas de la matriz, además de que la base presentó un mayor nivel de esfuerzos, esto se debe a la carga que ejerce el anillo de presión auxiliar para el herramental de este paso y que afecta también a los esfuerzos, aumentando respecto al primer paso de embutido.

Los punzones de este paso tuvieron esfuerzos máximos de 141.9MPa (6.45% del esfuerzo de cedencia) en el caso isotrópico y de 83.2 MPa (3.78% del esfuerzo de cedencia) en el caso anisotrópico y al igual que el caso anterior se distribuyeron en el radio de la esquina del punzón. En el caso isotrópico la distribución fue homogénea, sin embargo, para el caso anisotrópico se presentaron picos con máximos en las zonas donde la lámina también lo hizo. Ver figura 4.24.

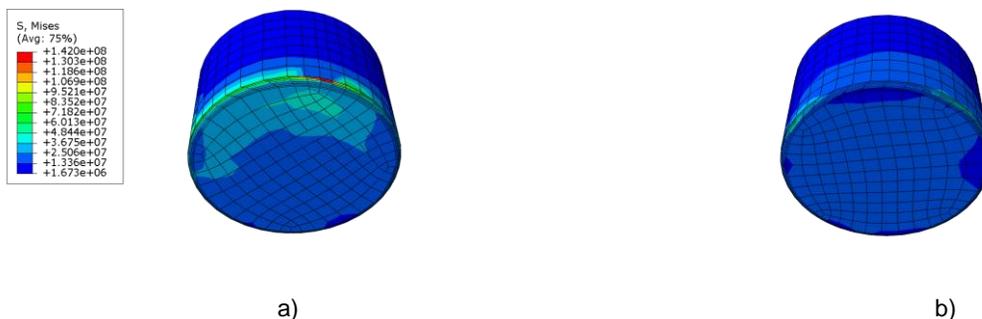
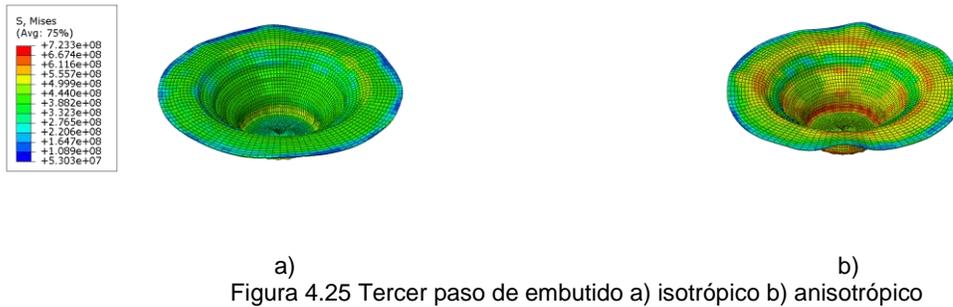


Figura 4.24 Punzones utilizados para el segundo paso a) isotrópico b) anisotrópico

### 4.3 Resultados del tercer paso de embutido

En comparación con los pasos anteriores, en éste se observa más pronunciada la formación de orejas para la simulación anisotrópica mientras que la deformación en la simulación isotrópica este defecto aparece de una forma más sutil como se observa en la figura 4.25.



La distribución de esfuerzos alrededor de la circunferencia en la chapa respeta la relación que se ha dado durante todo el proceso hasta el momento, se encuentran concentraciones de esfuerzos cada 45 grados a partir del eje de las abscisas en el plano XZ para el caso anisotrópico, mientras que en el caso isotrópico se observa una distribución homogénea. (Figura 4.26 y 4.27).



Figura 4.26. Distribución de esfuerzos en el tercer paso a) Isotrópico b) Anisotrópico

En la parte de la chapa que está en contacto con el punzón existe una distorsión excesiva en los elementos de la malla que muy probablemente se deba al factor de escalamiento de masa utilizado para minimizar el tiempo de cómputo, adicional a los dos pasos anteriores de deformación. Después del reposo correspondiente al tercer paso de embutido se observan las siguientes distribuciones en la deformación plástica (Figura 4.27).

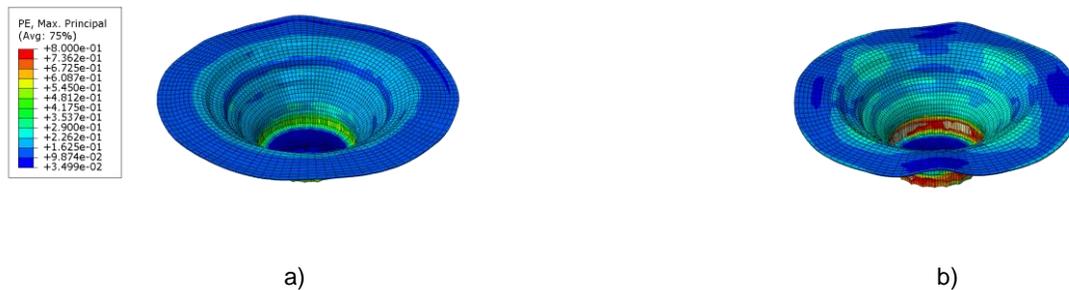


Figura 4.27. Distribución de deformación plástica en el tercer paso. a) isotrópico b) anisotrópico.

Los valores de esfuerzos y deformaciones parecen tener sentido con las ecuaciones utilizadas para el comportamiento del material, sin embargo, para la zona más profunda del embutido existe una zona con deformación excesiva debido a la calidad de la malla, los elementos y nodos en esta zona son pocos y la distorsión presente es evidente.

Para graficar los esfuerzos y deformaciones en la pieza del tercer paso de embutido se midió a lo largo de un anillo que se encuentra en la zona en la que está en contacto el punzón con la lámina y donde se presenta la distribución de esfuerzos esperada de acuerdo con el comportamiento anisotrópico, ver la figura 4.28.

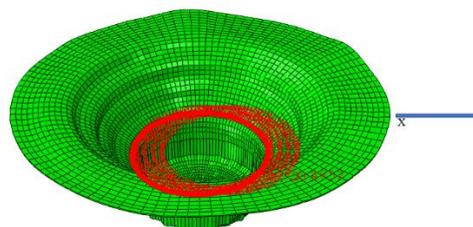


Figura 4.28 Nodos que se utilizaron para graficar la distribución de esfuerzos y deformación plástica del tercer paso.

El promedio de los esfuerzos para los casos anisotrópico e isotrópico son de 430 MPa y 401 MPa respectivamente, por lo que la diferencia entre el promedio de los esfuerzos es de 29 MPa lo que representa el 6.744% de la diferencia, la amplitud máxima del caso anisotrópico es de 65 MPa (15.116%) mientras que para el caso isotrópico es de 23.2 MPa (5.786%).

Nuevamente se repite la distribución en los ángulos 45°, 135°, 225° y 315° a partir del eje x. (figura 4.29)

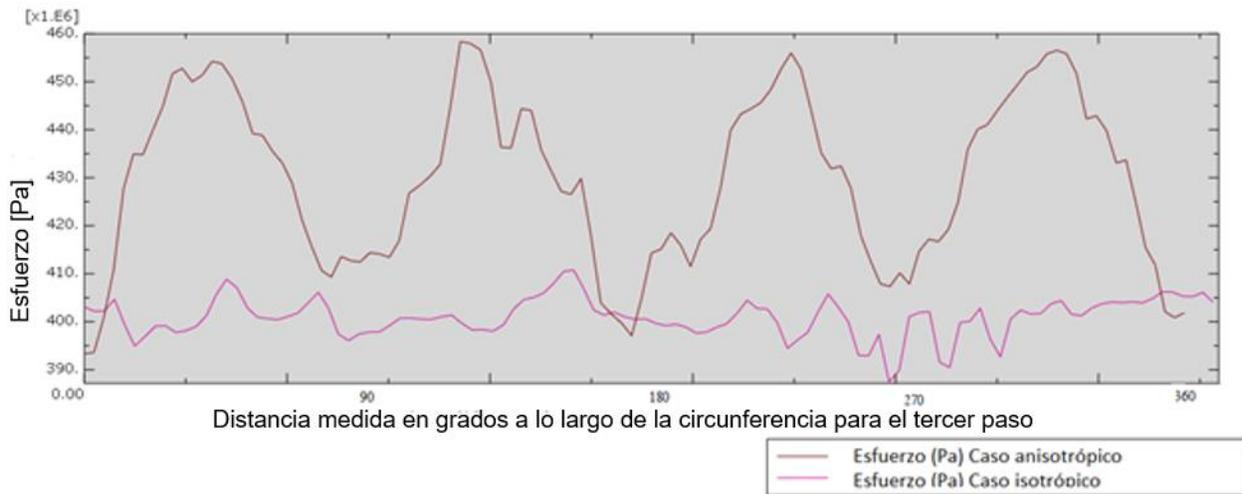


Figura 4.29 Gráfica donde se muestra la variación de esfuerzos en función del ángulo respecto al eje X

Para el caso de la deformación plástica es apreciable un máximo cerca de los 360° para caso anisotrópico de 0.214 mm/mm y para isotrópico el máximo está cerca de 130° con un valor de 0.199. El promedio para cada caso es de 0.196 mm/mm para caso anisotrópico y de 0.185 mm/mm para el isotrópico por lo que la diferencia es de 0.011 mm/mm entre ambos casos, que representa un 5.6% de variación. Por otro lado, la amplitud máxima del caso anisotrópico es de 0.034 mm/mm mientras que para el otro caso es de 0.027mm/mm. (Figura 4.30).

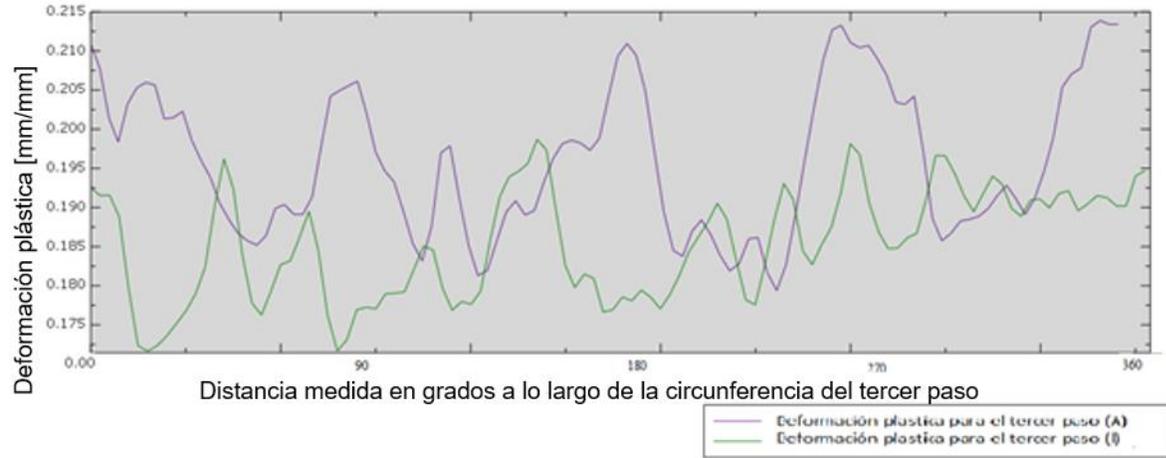
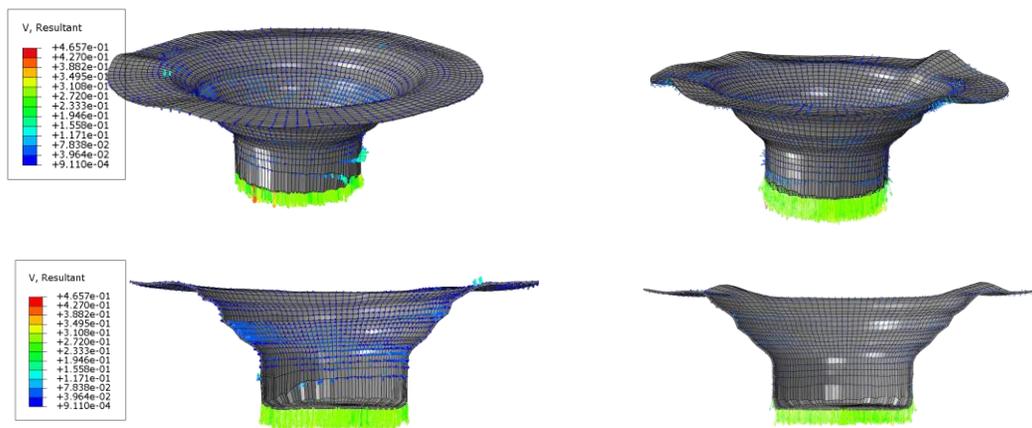


Figura 4.30 Gráfica donde se muestra la variación de la deformación plástica en función del ángulo respecto al eje XZ

Al transcurrir el reposo se ve como la deformación presenta una distribución preferencial, como podría esperarse del caso anisotrópico, esto ocasiona que el flujo de material afecte su velocidad a través del herramental, influida además por la distorsión en la malla ocasionando que no fluya como debiera, estos fenómenos son determinantes en la formación de las orejas, (Ver figura 4.31.)



a)

b)

Figura 4.31 Arriba se ven los gradientes de velocidad de la chapa al finalizar el paso de embutido en a) caso isotrópico b) caso anisotrópico

También se observa que al terminar el tiempo de reposo posterior al embutido hay una recuperación en el material de la chapa y por ello disminuye la magnitud de las orejas en el caso isotrópico cosa que sucede en menor medida en el caso anisotrópico ver figura 4.32.

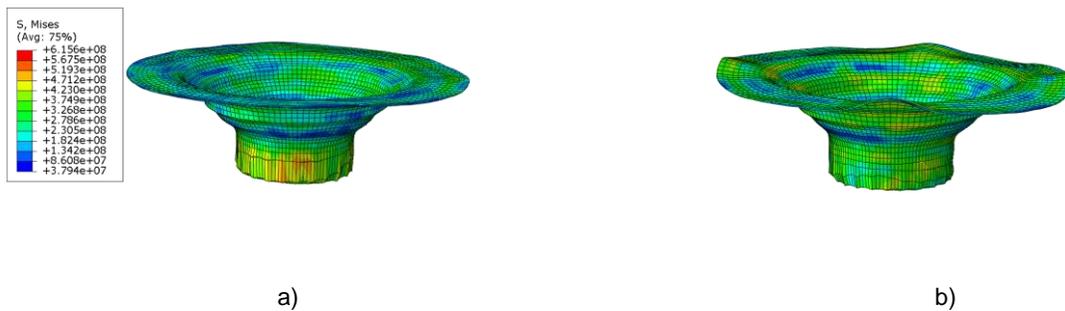


Figura 4.32 Perfil de esfuerzos para el momento posterior al reposo del tercer embutido a) isotrópico b) anisotrópico

Como en los casos anteriores la tabla 4 muestra las mediciones de los espesores para la lámina embutida en la simulación anisotrópica sobre el eje X “A (0)” a 45 grados del eje X sobre el plano XZ “A (45)” y en la lámina Isotrópica “I”. Además de la pieza real (figura 4.33).

Durante el embutido se observó que el espesor en la zona sobre la que ésta el pisador de lámina “A” aumentó un poco, lo cual se puede explicar con el flujo que experimenta el material, mismo flujo que explica el adelgazamiento en la zona E, que es donde los valores son congruentes con la pieza real. En la zona B se engruesa en la pieza real, esto debido a que el material fluye en sentido radial mientras que en las piezas simuladas adelgazan, aunque la pieza anisotrópica si adelgaza, solamente es en la medición con dirección a 45°. El punto C muestra un aumento en el espesor de la pieza real, sin embargo, la medición de este punto fue complicada debido a su geometría, además en este punto se esperaba que el espesor aumentara. En los puntos D y E se mostró una tendencia a incrementar el espesor, lógicos con los valores de espesor de la pieza real.

Tabla 4.5 Espesores para el paso 3								
Punto	A (YZ) (mm)	Variación (%)	A (45) (mm)	Variación (%)	I (mm)	Variación (%)	Real (mm)	Variación (%)
A	0.305	-1.667	0.299	0.333	0.303	-1.000	0.421	-10.658
B	0.298	0.667	0.302	-0.667	0.289	3.667	0.382	-0.395
C	0.314	-4.667	0.336	-12.000	0.341	-13.667	0.368	3.158
D	0.278	7.333	0.280	6.667	0.281	6.333	0.318	16.316
E	0.277	7.667	0.276	8.000	0.278	7.333	0.343	9.868

1. Respecto a un espesor inicial 0.3
  2. Respecto a un espesor inicial 0.38
- \*Los valores negativos representan un aumento en el espesor

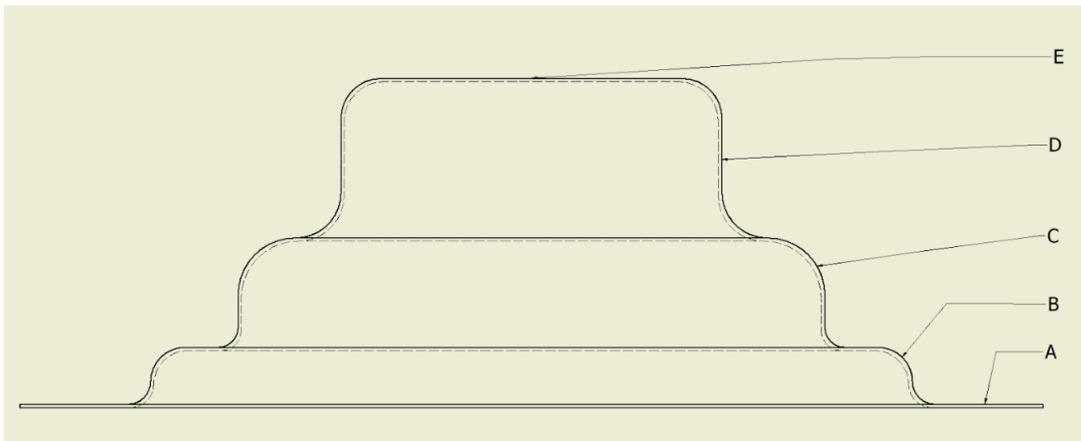


Figura 4.33 Variación del espesor de la lámina para tercer paso de embutido

La gráfica mostrada en la figura 4.34 muestra que ambos casos en el tercer paso tienen un poco más de variación en el momento en el que la lámina y el punzón entran en

contacto que es en el momento 0.1642s, lo cual tiene sentido ya que se tiene que vencer la fuerza de fricción generada por el pisador y la chapa.

La mayor diferencia entre ambos casos es casi al terminar este embutido en 0.2442s y es de 9.3 KN (47.11%) son debidas a la distorsión de la malla.

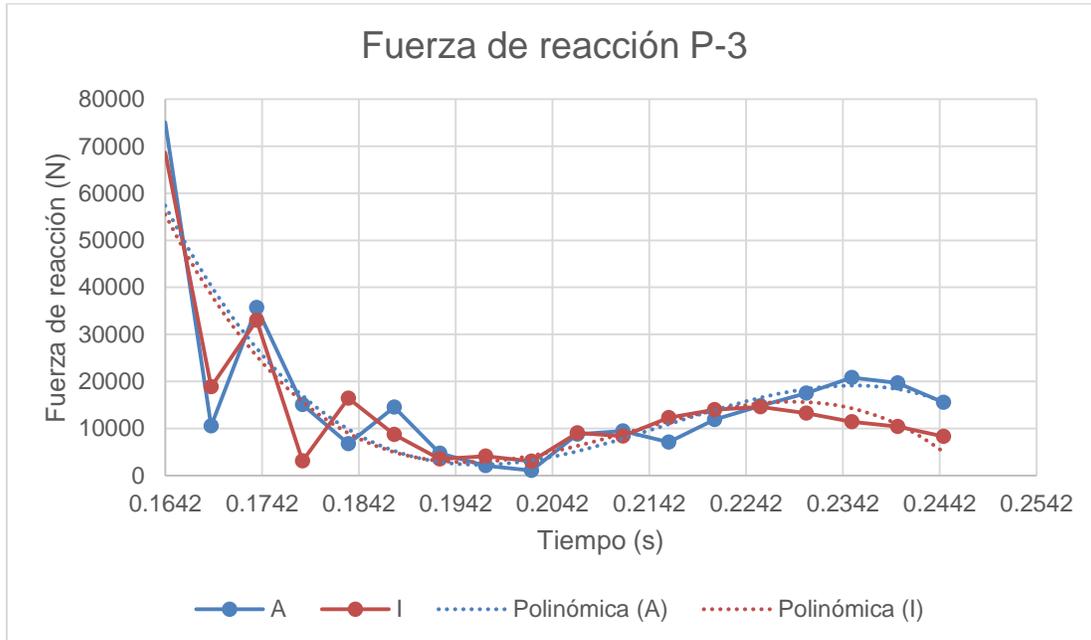
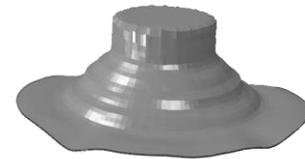


Figura 4.34 Gráfica que muestra la fuerza de embutido durante el tiempo transcurrido en el tercer paso de embutido.

La fuerza de embutido calculada para el paso 3, en el caso isotrópico es de 86.1 kN mientras que para el caso anisotrópico es de 85.3 kN. El mínimo se repite para ambos casos y es de 0.52 kN. Al igual que con los casos anteriores el factor de escalamiento de masa influyó en las fuerzas calculadas, siendo mayores en comparación con las calculadas teóricamente, aunque van acercándose a los valores teóricos, lo cual es congruente con el comportamiento de la comparación energía cinética vs energía interna que se va estabilizando conforme avanza el proceso. ver tabla 4.6.

<b>Tabla 4.6 Fuerzas de embutido teóricas contra fuerzas de la simulación tercer paso</b>			
<b>Máxima embutido</b>	<b>Ecuación 1.2</b>	<b>Ecuación 1.3</b>	<b>Ecuación 1.4</b>
35.7 KN	5.44 KN	12.8 KN	17.1 KN

A continuación, se muestra la comparación entre la simulación de la pieza obtenida en cada caso para el tercer paso de embutido y la pieza real. (Figura 4.35).



a) b) c)  
Figura 4.35 Tercer paso de embutido a) Real b) Con lámina isotrópica c) Con lámina anisotrópica

Para el caso anisotrópico el diámetro de la pieza embutida es de 9.712 cm (9.123% respecto a la pieza real), para la pieza isotrópica es de 9.6 cm (7.865% respecto a la pieza real), mientras que la pieza real mide 8.9 cm. En este paso la variación entre la pieza real y las simuladas es más notoria, debido a que el flujo de material en la simulación fue radial hacia las orillas lo que ocasiono que las piezas aumentaran de diámetro en la base en las simulaciones, además de que el uso del sujetador influye en este parámetro.

Al igual que en el primer paso se realizará la comparación entre las geometrías y el flujo de la lámina, para lo cual se igualarán los diámetros de las piezas de la simulación y la pieza real (Figura 4.36). Es apreciable como en este paso el caso anisotrópico mostró más compatibilidad con la pieza real que el isotrópico. Aunque el flujo de la simulación fue menor dado que llega un momento donde se atora con la herramienta.



a)

b)

Figura 4.36 Comparación de los flujos del tercer paso con la pieza real a) isotrópico b) anisotrópico

Las matrices utilizadas en el tercer paso presentaron un esfuerzo máximo de 324.3 (14.74% del esfuerzo de cedencia) y de 229.9 MPa (10.45% del esfuerzo de cedencia) para el caso anisotrópico e isotrópico respectivamente. Ver figura 4.37.

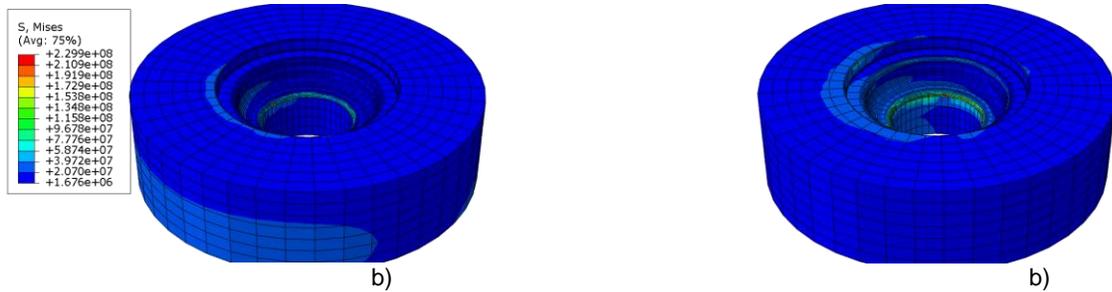


Figura 4.37 Matrices utilizadas para el tercer paso a) isotrópico b) anisotrópico

La distribución de esfuerzos en este paso se presenta en la zona del radio de la esquina de la matriz en ambos casos, y en el caso anisotrópico se extienden hacia la pared interna de la matriz. A diferencia de los pasos anteriores los esfuerzos se distribuyeron de manera casi homogénea en ambos casos extendiéndose por las paredes en el caso anisotrópico.

Los punzones que se ocuparon presentaron esfuerzos máximos con valores de 176.5 MPa para el caso anisotrópico y de 232.3 MPa para el caso isotrópico y su distribución fue similar a la de la lámina para el caso anisotrópico ya que tiene mayores esfuerzos en las esquinas. Ver figura 4.38.

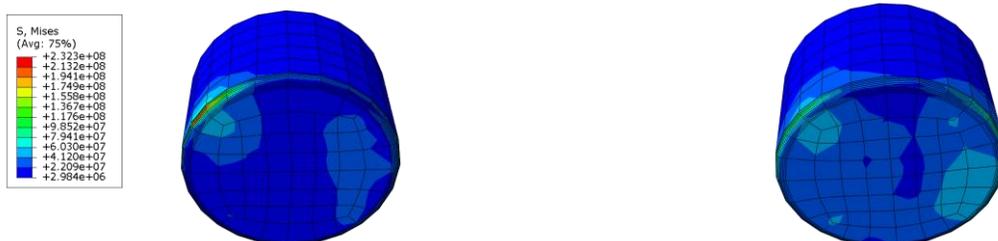


Figura 4.38 Punzones utilizadas para el tercer paso a) isotrópico b) anisotrópico

## 4.4 Resultados del cuarto paso de embutido

En el último paso se obtiene la pieza, ya en su forma y se logran apreciar algunas diferencias notorias. La pieza anisotrópica se deformó de manera dispereja en la zona del contorno, lo que ocasiona que obtenga una forma con algunos lados ligeramente aplanados como se ve en la figura 4.39 b. En el caso isotrópico se observa la pieza final circular. Además, las diferencias en las distribuciones de esfuerzos son muy evidentes, ya que en el caso isotrópico se ven homogéneas variando mientras se alejan o se acercan de forma radial del centro de la pieza, para el segundo caso es diferente, se ve que no solo varía en función de la distancia radial del centro, sino también en función del ángulo que se forma con el eje X obedeciendo a las distribuciones para los pasos anteriormente descritos.

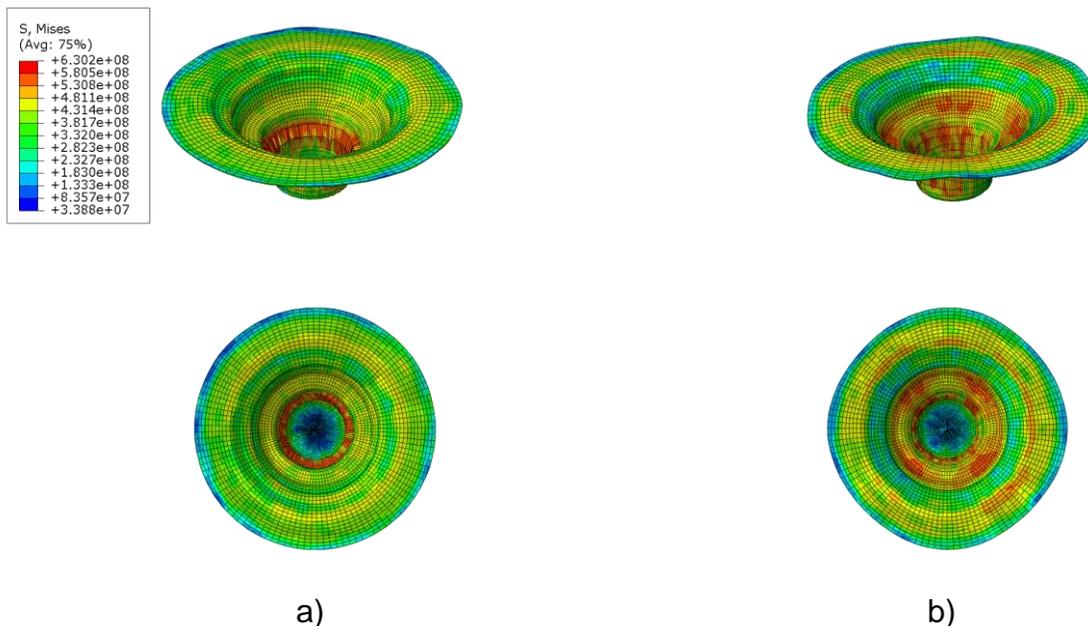


Figura 4.39 Distribución de esfuerzos para el cuarto paso a) isotrópico b) anisotrópico.

Las deformaciones en el caso isotrópico respetan la distribución que se presentó en todos los casos dándose los máximos en los mismos ángulos que en el resto de los pasos de este proceso. Es importante mencionar que para ambos casos se presentó una distorsión de la malla en la parte más profunda de la pieza, como se mencionó en el apartado anterior, lo que hizo que se presentara una zona con deformaciones y esfuerzos mayores a los registrados en las ecuaciones que describen las propiedades del material (Figura 4.40).

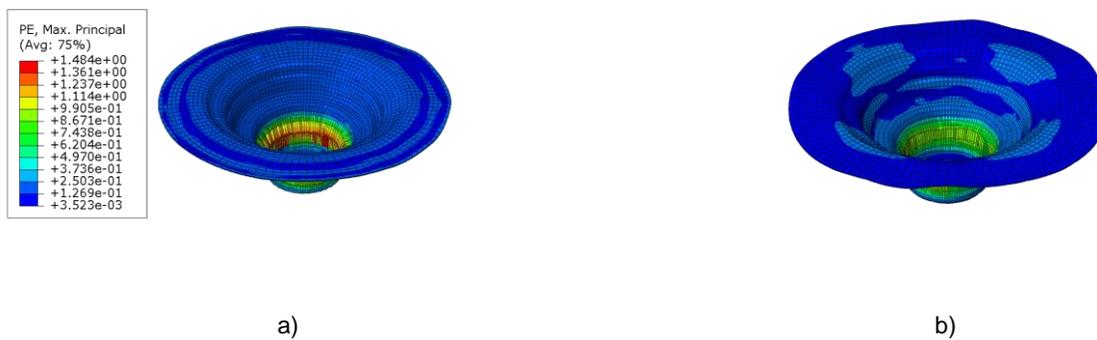


Figura 4.40 Distribución de deformaciones para el cuarto paso a) isotrópico b) anisotrópico

Para graficar los esfuerzos y deformaciones en la pieza se midió a lo largo de un anillo donde se encuentra la distribución de esfuerzos máximos ya que es donde existe el contacto con el herramental, que se muestra en la figura 4.41.

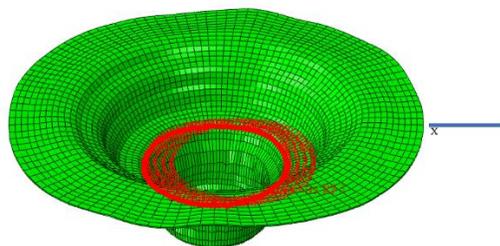


Figura 4.41 Nodos que se utilizaron para la distribución de esfuerzos y deformación plástica

La distribución de esfuerzos se mostró con variación notoria en los valores de un nodo a otro ocasionando cierto ruido en el caso anisotrópico, sin embargo, mantuvo la tendencia de tener ciertos picos en los mismos ángulos que los casos anteriores, este ruido pudo ser generado por la estabilidad de la malla, ya que en este punto la malla tuvo distorsiones lo que ocasiona que los nodos de contacto se alteren. Para el caso isotrópico el esfuerzo tuvo un valor casi constante durante todo el proceso, el promedio de esfuerzos para este caso es de 434.77 MPa para el caso anisotrópico fue de 459.12 MPa. La mayor amplitud para el caso anisotrópico es de 184 MPa y para el caso isotrópico es de 22.6 MPa. La amplitud del caso isotrópico representa el 12.28% de la amplitud del caso anisotrópico. Ver figura 4.42.



Figura 4.42 Distribución de esfuerzos a lo largo de la circunferencia embutida cuarto paso.

Los valores que se presentan en la figura 4.43 para el caso anisotrópico son 0.3101 mm/mm en el máximo, localizado sobre el eje X y 0.2315 mm/mm en el mínimo, muy cercano a los 180° con respecto del eje X. En este caso no se aprecia la secuencia cíclica que presentaba en los casos anteriores ya que la distorsión de la malla en este paso afecta a este resultado, sobre todo en el caso isotrópico, donde los valores que se presentaron fueron de 0.2549 mm/mm para el máximo cercano a los 330° máximo y de 0.1834 mm/mm en el mínimo localizado muy cerca de los 165°.

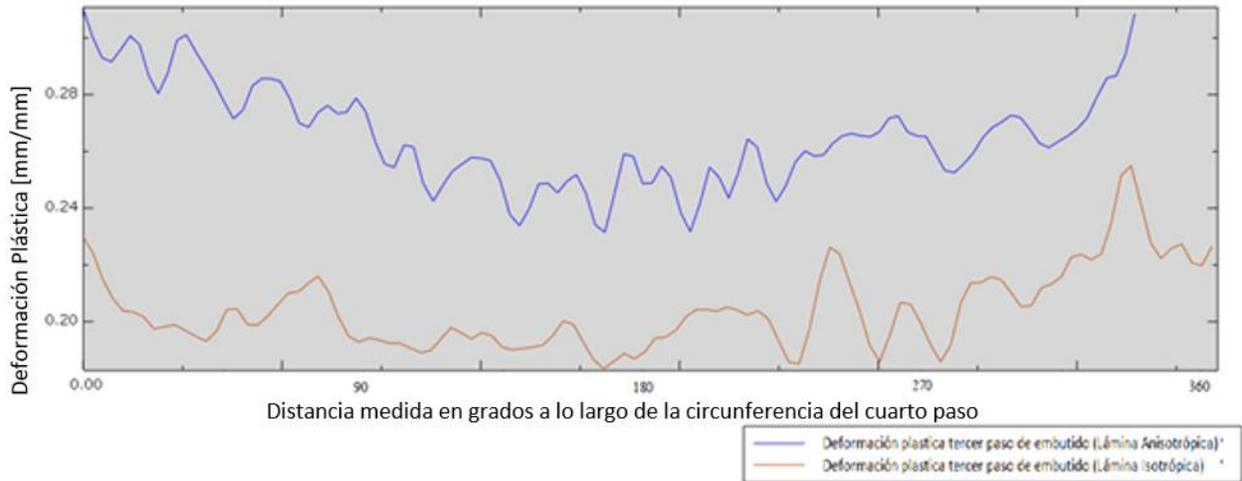


Figura 4.43 Distribución de deformación plástica a lo largo de la circunferencia embutida cuarto paso.

La chapa se deforma plásticamente principalmente en las direcciones que coinciden con los ejes X y Z en el caso anisotrópico mientras que para el caso isotrópico la distribución es homogénea en la circunferencia de la pieza finalizada. Ver figura 4.44.



Figura 4.44. Deformación plástica cuarto paso a) isotrópico b) anisotrópico

El flujo de la lámina tiene zonas preferenciales donde la velocidad es mayor de acuerdo con la distribución de propiedades del material en la lámina. La velocidad máxima para el caso anisotrópico se localiza en las zonas donde se ha ido formando Las orejas de la lámina durante los pasos anteriores. Ver figura 4.45.

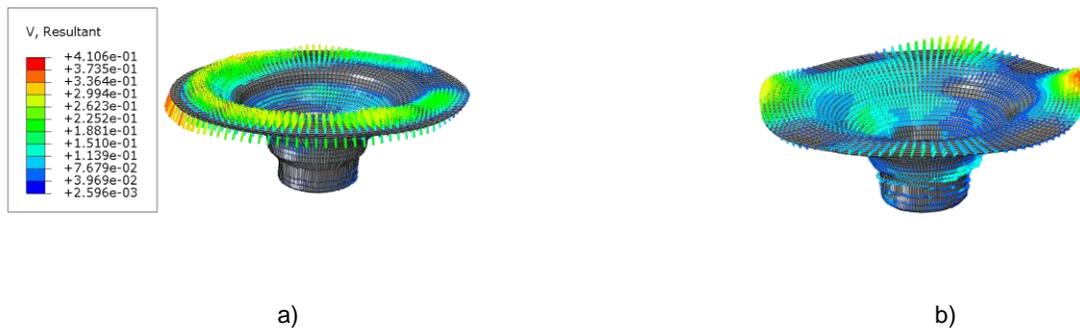


Figura 4.45 Gradiente de velocidades a) Isotrópico b) anisotrópico

Como en los casos anteriores la tabla 4.7 muestra las mediciones de los espesores para la lámina embutida en la simulación anisotrópica sobre el eje X “A (0)” a 45 grados del eje X sobre el plano XZ “A (45)” y en la lámina Isotrópica “I”. Además de la medición de la pieza real. (Tabla 4.7).

El punto “A” muestra una variación casi despreciable en cada caso, lo cual era el comportamiento esperado y aunque en los dos modelos engruesa (distinto a la pieza real) es mínimo este cambio, al igual que el adelgazamiento de la pieza real. En el punto “B” se esperaba un aumento en el espesor, lo cual solamente sucedió en “A (45)” probablemente esto sea así por el anillo auxiliar que se utilizó en este paso. En “C” la lámina anisotrópica adelgazó en A (YZ) y engrosó en misma medida en “A (45)” esto se explica con el flujo de la pieza. En este mismo punto en “I” el cambio del espesor fue prácticamente despreciable. En el punto D el espesor de ambas láminas aumentó, lo cual resulta lógico por la zona en la que se encuentra, sin embargo, este crecimiento fue mucho más grande del que se muestra en la pieza real. Cabe mencionar que en estos puntos la toma de la medida fue compleja y no muy precisa debido a la falta de herramientas adecuadas. En el punto E la malla estaba demasiado distorsionada y tenía deformación de los 4 pasos, por lo que la lámina ya era muy delgada en esta zona y en algunos puntos como en A(XY) se mostró un adelgazamiento excesivo. (Ver figura 4.46).

Tabla 4.7 Espesores para el paso 4								
Punto	A (YZ) (mm)	Variación Respecto al original (%)	A (45) (mm)	Variación Respecto al original (%)	I (mm)	Variación Respecto al original (%)	Real (mm)	Variación Respecto al original (%)
A	0.306	-2.000	0.298	0.667	0.312	-4.000	0.368	3.092
B	0.311	-3.667	0.298	0.667	0.316	-5.333	0.362	4.737
C	0.344	-14.667	0.254	15.333	0.307	-2.333	0.365	3.947
D	0.269	10.333	0.299	0.333	0.255	15.000	0.371	2.500
E	0.012	96.000	0.267	11.000	0.260	13.333	0.400	-5.263
F	0.256	14.667	0.271	9.667	0.256	14.667	0.378	0.658

1. Respecto a un espesor inicial 0.3

2. Respecto a un espesor inicial 0.38

\*Los valores negativos representan un aumento en el espesor

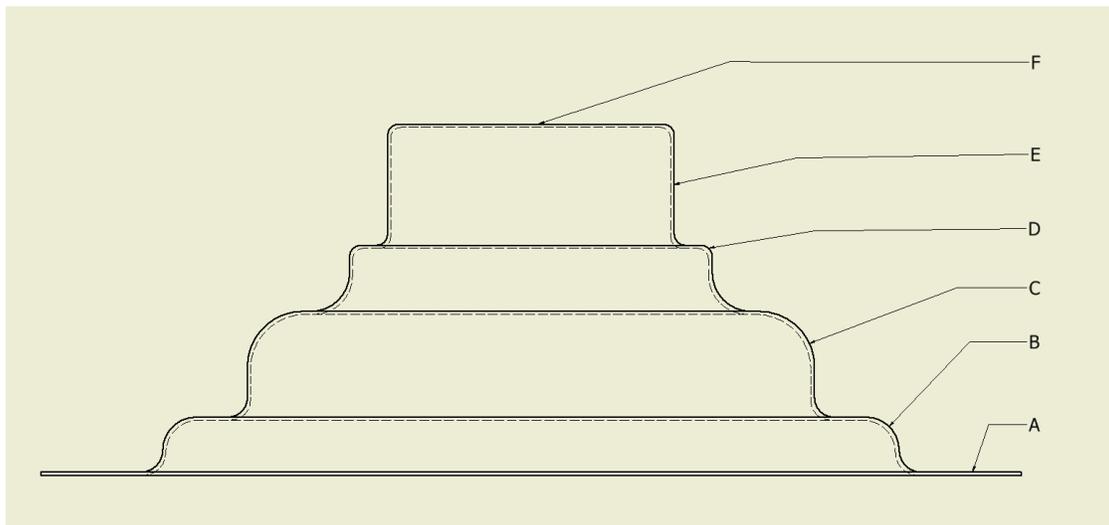


Figura 4.46 Variación del espesor de la lámina para cuarto paso de embudo.

La gráfica del último embutido muestra una diferencia más pronunciada que los casos anteriores, ya que la fuerza aplicada en la lámina isotrópica cae después que la anisotrópica, pero esto es porque la lámina y el punzón entran en contacto primero en el caso anisotrópico. El momento en el que la lámina y el punzón entran en contacto es en 0.31(s) por lo que se mostrará la gráfica a partir de este momento. Ver figura 4.47. A diferencia de los pasos anteriores éste muestra una fuerza casi constante que oscilan sobre un promedio de 6.6 KN para el caso anisotrópico y de 9.3 KN para el caso isotrópico. Esto debido a que conforme avanzó la simulación, las fuerzas se estabilizaron y se fueron acercando al valor teórico de la fuerza de embutido. Las fuerzas máximas medidas en el primer paso de las simulaciones fueron de un orden de magnitud mayor que el valor teórico, por otro lado, en el cuarto paso se obtuvieron valores de fuerza máxima solamente 26% arriba de la fuerza teórica calculada con la ecuación 1.4. La lámina entra en contacto en el momento 0.3207s. En los últimos momentos de embutido se observa como la fuerza en la lámina isotrópica aumenta, consecuencia de la distorsión de la malla.

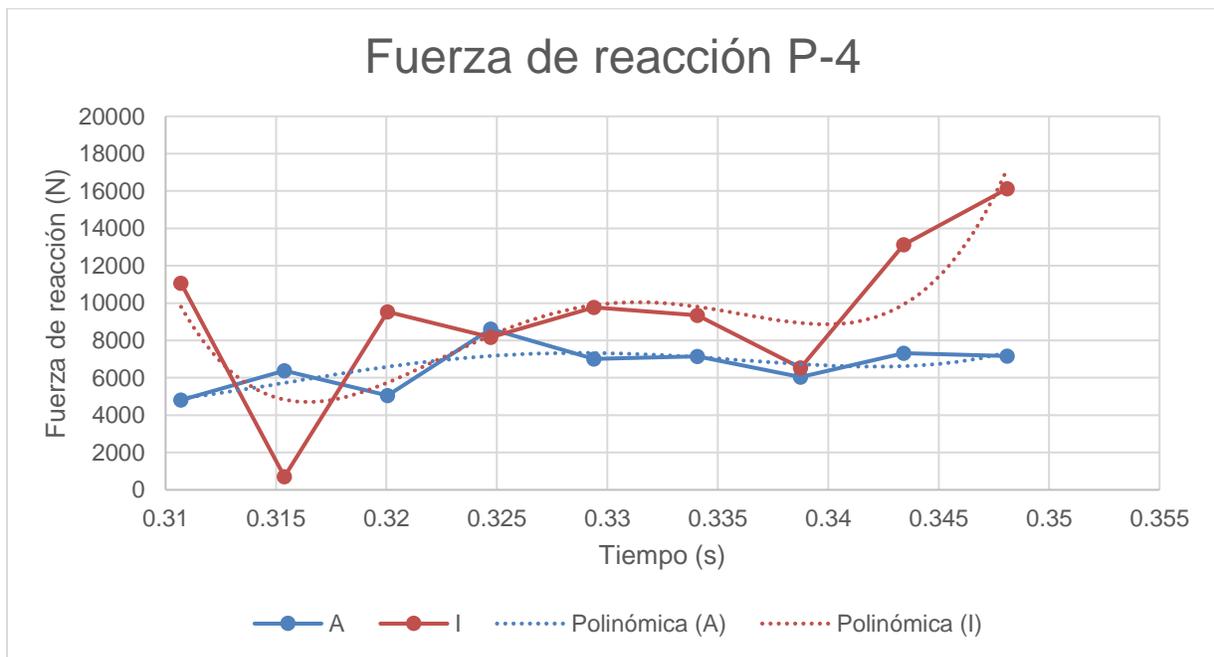
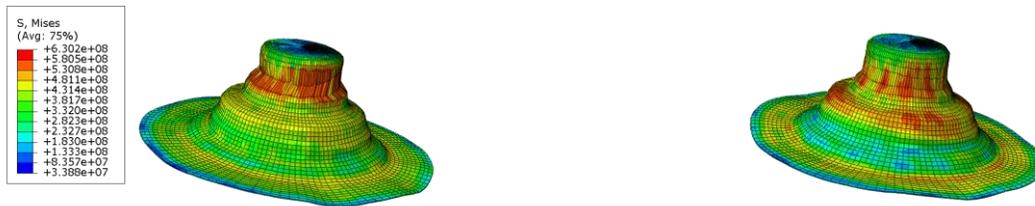


Figura 4.47 Gráfica que muestra la fuerza de embutido a partir del momento en que la herramienta toca la lámina en el cuarto paso de embutido.

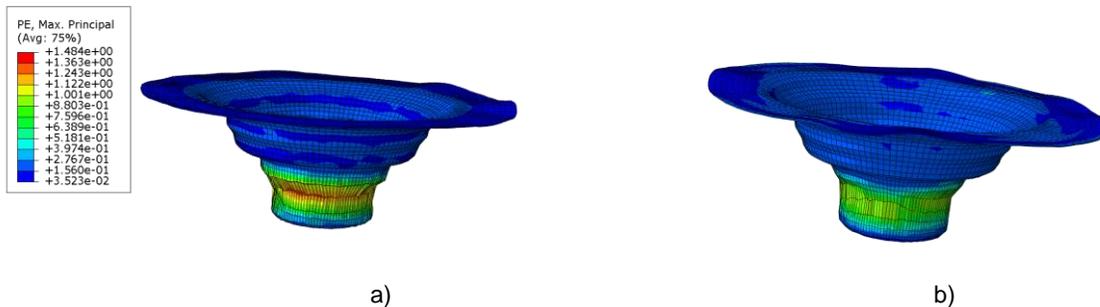
Tabla 4.8 Fuerzas de embutido teóricas contra fuerzas de la simulación cuarto paso			
Máxima simulación	Ecuación 1.2	Ecuación 1.3	Ecuación 1.4
16 KN	2.95 KN	9.95 KN	12.7 KN

La pieza finalizada se puede apreciar en la figura 4.48. La pieza con mejores resultados en cuanto a la geometría y a la distorsión de la malla resultó ser la pieza con comportamiento anisotrópico, además de que hubo varios elementos de la malla, en la zona de las paredes de embutido de este paso, que se distorsionaron excesivamente en la pieza isotrópica.



a) b)  
Figura 4.48 Piezas finalizadas a) isotrópico b) anisotrópico

En ambos casos se puede ver una ligera formación de orejas en la lámina, sin embargo, en el caso anisotrópico se observan dichas deformaciones en las mismas zonas donde los esfuerzos son máximos para el paso, es decir a cada 45 respecto del eje X en el plano XZ, mientras que las orejas del primer caso no corresponden a ninguna distribución ver figura 4.49.



a) b)  
Figura 4.49 Orejeos en a) Isotrópico b) anisotrópico

A continuación (figura 4.50), se muestra la comparación entre la simulación de las piezas obtenidas en cada caso para el cuarto paso de embutido y la pieza real.

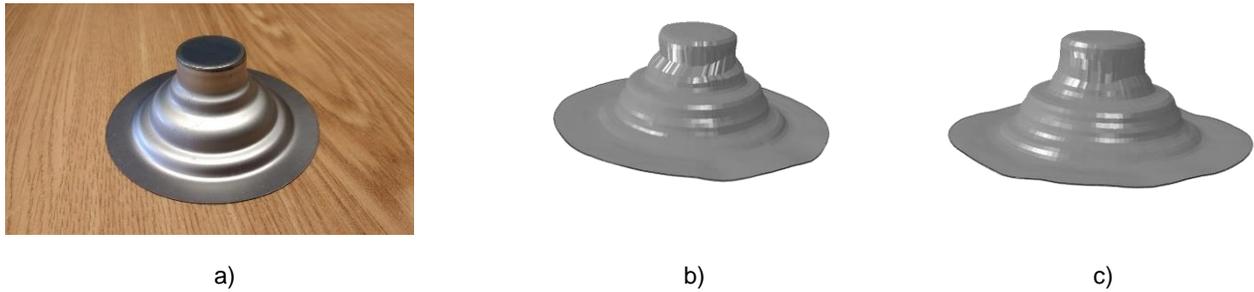
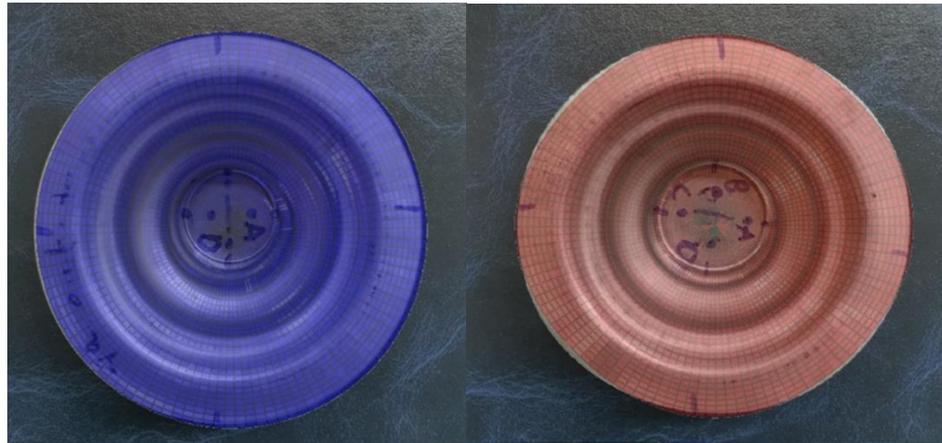


Figura 4.50 Cuarto paso de embutido a) Real b) Con lámina isotrópica c) Con lámina anisotrópica

Para el caso anisotrópico el diámetro de la pieza embutida es de 9.75 cm (10.54% respecto del real), para la pieza isotrópica es de 9.615 cm (9.01% respecto del real), mientras que la pieza real mide 8.82 cm. Al igual que en los casos anteriores el flujo fue en sentido radial hacia las orillas de la pieza, lo que fue ocasionado en mayor medida por el uso del pisador de acuerdo con Kareem M. (2013), los espesores de embutidos presentan mayor adelgazamiento en las zonas cercanas a la base del embutido, donde como base se considera la parte que está en contacto con el sujetador, por lo que el material va fluyendo hacia esta zona haciendo crecer el espesor de la lámina. Se comparó el flujo y la geometría final de la pieza igualando los diámetros de las piezas y sobreponiéndolos uno sobre otro (Ver figura 4.51). Al igual que el paso anterior la lámina anisotrópica mostró más afinidad con la lámina real, aunque aún se nota algo exagerado el flujo preferencial en la simulación. Se distingue como en los contornos donde la lámina anisotrópica se aplanan un poco lo hace también la lámina real, aunque no tan evidente.

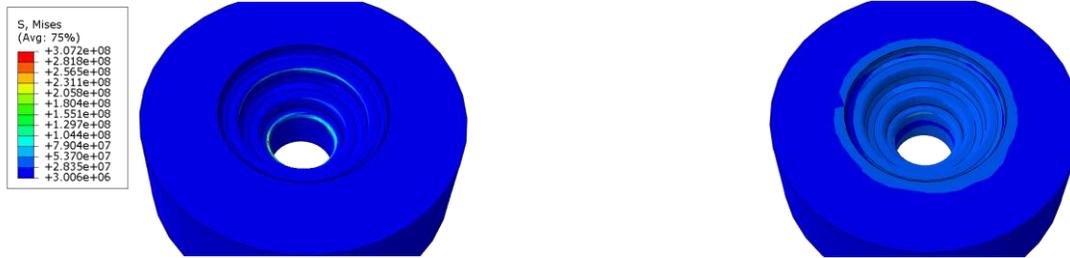


a)

b)

Figura 4.51 Comparación de los flujos del primer paso con la pieza real a) isotrópico b) anisotrópico

Las matrices se comportaron dentro del rango elástico a excepción de un sólo elemento, el cual presentó distorsión excesiva. Ignorando este elemento los máximos esfuerzos para cada caso fueron de 192.3 MPa (8.74% del esfuerzo de cedencia) en el caso anisotrópico y 307.2 MPa (13.96% del esfuerzo de cedencia) en el caso isotrópico. Ver figura 4.52.



a)

b)

Figura 4.52 Matrices utilizadas para el tercer paso a) isotrópico b) anisotrópico

Las zonas donde los esfuerzos presentaron valores considerables fueron prácticamente en toda la zona donde se encuentran en contacto la chapa y la matriz para el caso anisotrópico y en el caso isotrópico se dio en la zona del radio de la matriz, esto último puede deberse a que la chapa anisotrópica era empujada hacia abajo no solamente por el punzón y el sujetador, sino por la fuerza ejercida por las orejas que se formaron en la pieza.

Los punzones no presentaron deformación plástica y tuvieron esfuerzos máximos de 383.8 MPa (17.44% del esfuerzo de cedencia) para caso anisotrópico y 651.0 MPa (29.59% del esfuerzo de cedencia) para caso isotrópico, al igual que en el caso anterior el punto máximo del caso isotrópico se dio solamente en dos elementos de la malla como consecuencia de la distorsión ocasionada en la malla de la lámina que está en contacto con esa zona y al flujo de la lámina que parece estancarse en algunas zonas.

Sin embargo, la distribución de esfuerzos es muy similar en ambos casos, aunque abarcando una mayor área en el caso isotrópico Ver figura 4.53.

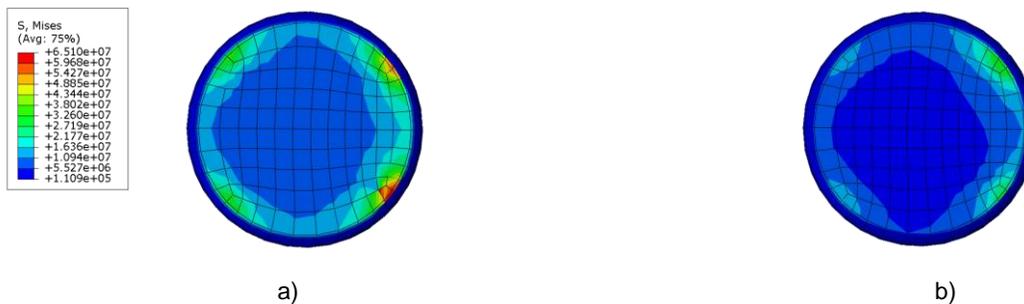


Figura 4.53 Punzones utilizadas para el tercer paso a) isotrópico b) anisotrópico

## 4.5 Discusión

La diferencia más importante entre los dos casos de las simulaciones presentadas es la distribución de esfuerzos, que como consecuencia tiene una variación muy notoria en las deformaciones causadas. Se observa que la variación del coeficiente anisotrópico ( $r$ ) respeta la presentada en Banabic en 2009 figura 4.54, puesto que los esfuerzos máximos de cada paso de embutido se encuentran en los ángulos  $45^\circ$ ,  $135^\circ$ ,  $225^\circ$  y  $315^\circ$ .

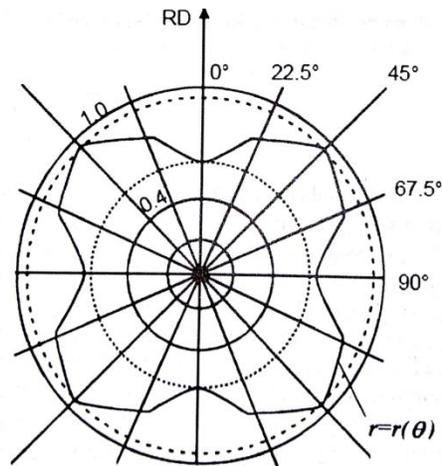


Figura 4.54 Variación de coeficiente Lanckford "r" con respecto a la dirección de laminado (Banabic, 2009)

Debido a esta variación del coeficiente de anisotropía se mostró la presencia de orejas, las cuales se formaron en las zonas donde el coeficiente de anisotropía era mayor, dado que los esfuerzos en esa zona eran mayores y por lo tanto la tendencia a deformarse era distinto por regiones, además el flujo de la lámina presentó mayores velocidades en las 3 componentes espaciales en éstas zonas, lo que influyó en mayor medida en la formación de dichos defectos y en la deformación dispareja de la lámina creando una circunferencia irregular. Por otro lado, la lámina de la simulación con propiedades isotrópicas se deformó de manera homogénea, debido a la distribución de esfuerzos tan homogénea en toda su circunferencia en cada paso, y tuvo una geometría circular al final del trabajo en la chapa y mostró, en menor medida, cierta tendencia a formar orejas que puede ser consecuencia del escalamiento de masa que se utilizó para disminuir el tiempo de cómputo.

Las fuerzas de embutido en los primeros pasos fueron casi idénticas en los casos anisotrópico e isotrópico, sin embargo, en los siguientes pasos se presentaron diferencias de hasta el 47% en las fuerzas, siendo la lámina isotrópica la que presentó las menores. Lo que indica que la lámina isotrópica ha sido mejor descrita mediante los parámetros teóricos.

De las gráficas obtenidas para las fuerzas de embutido los primeros 3 pasos se asemejan a las gráficas obtenidas por Nazarov en 2008 ver figura 4.55, lo que se observa más claro al realizar una interpolación polinómica de 3er orden o mayor sobre las gráficas, por lo que es posible deducir que se cumple al menos con la segunda etapa de embutido dónde se observa que la fuerza de embutido disminuye a medida que el área de contacto entre la lámina y el sujetador de lámina disminuye. La primera etapa no es notoria en la simulación debido a la inestabilidad al inicio de cada paso producto de la inercia, provocada por el factor de escalamiento de masa.

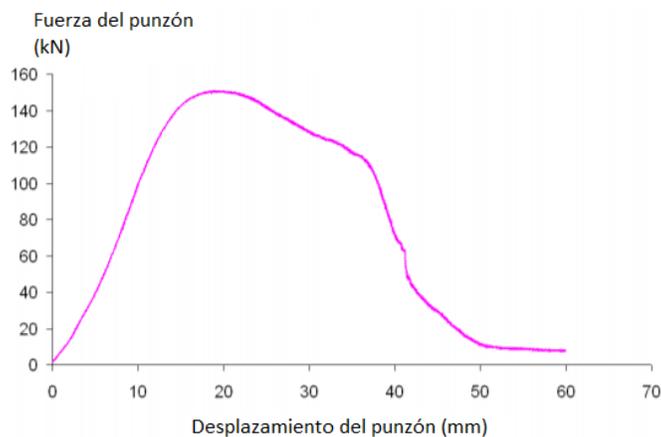


Figura 4.55 Fuerza de embutido vs Desplazamiento del punzón (Nazarov, 2008)

En el cuarto paso de embutido se observa que el comportamiento es diferente al recién descrito, pero es notorio que la fuerza necesaria para realizar el embutido es mucho más aproximada a la fuerza teórica, lo que indica una tendencia a estabilización en las energías de la simulación.

Las herramientas de los pasos 1 y 2 fueron diseñadas de manera adecuada, dado que en estos pasos no se presentó ninguna concentración de esfuerzos inesperada y se trabajó en un rango no mayor a 38% del esfuerzo de cedencia, sin embargo para los pasos 3 y 4 se presentaron defectos de arrugamiento de la lámina, lo cual es debido a que el número de elementos de la malla en esta zona de la chapa no fue suficiente y a la falta de control en el remallado, sumándole la deformación acumulada en cada paso, lo que provocó que

cada elemento se deformara demasiado, además de que el escalamiento de masa utilizado influyó en estos resultados.

Las presiones de los sujetadores fueron adecuadas para los pasos 1, 2 y 4 dado que permitieron que no se formarían arrugas en la zona donde la lámina fluye y no fue lo suficientemente grande para provocar alguna posible ruptura en la chapa. Sin embargo, para el paso 3 existió un momento donde las orejas formadas en la lámina tuvieron la fuerza suficiente para levantar el pisador.

El factor de escalamiento de masa utilizado no favoreció los resultados de este trabajo, ya que hubo elementos de la malla que tenían deformaciones excesivas, tal es el caso del arrugamiento del paso 4 de cada caso. Debido al factor de escalamiento de masa utilizado el tiempo de cómputo fue de 212121 segundos, 2 días con 11 horas para el caso anisotrópico, mientras que para el caso isotrópico fue de 200721 segundos, 2 días con 8 horas, obtenidos con un procesador Intel® Core™ i5-7200U CPU @ 2.50GHz 2.70GHz, por lo que se tiene que seguir trabajando en su optimización para encontrar equilibrio entre tiempo de cómputo y exactitud en los resultados.

## 5. Conclusiones.

En el análisis del trabajo se observa que la distribución de los esfuerzos para los cuatro pasos se presentó de manera muy diferente, tal como se esperaba, para cada caso. Se obtuvo una distribución con un máximo cada 90 grados en el caso anisotrópico, mientras que el caso isotrópico fue una distribución homogénea, por lo que es importante considerar la anisotropía en la lámina si lo que se requiere es estudiar los esfuerzos y deformaciones en un modelo de embutido cilíndrico como el presente caso. Los valores de los esfuerzos y las deformaciones fueron congruentes con los datos comparados con la curva esfuerzo-deformación en toda la simulación, salvo en algunos elementos particulares donde la malla de la lámina se interceptó con la malla de la matriz.

Como consecuencia de la distribución de esfuerzos, el flujo del material tuvo una dirección preferencial, ocasionando deformación plástica diferenciada hacia estas regiones en la lámina anisotrópica, lo que ocasionó que se deformara y se formaran orejas, que aunque en la lámina isotrópica se presentaron orejas, por causa del factor de escalamiento de masa y de las deformaciones previas. Se concluye que es importante considerar anisotropía para casos donde se requiera estudiar la deformación y la presencia de defectos como orejas en operaciones de embutido.

Las fuerzas de embutido no variaron significativamente entre los dos primeros casos y ambos presentan una gráfica de fuerzas con el comportamiento esperado. Se puede decir que si la variable a estudiar es la fuerza podría simplificarse el cálculo y disminuir el tiempo de cómputo considerándose un modelo isotrópico y optimizando el factor de escalamiento de masa para eliminar las inestabilidades presentadas en este trabajo.

Las condiciones de simulación del presente trabajo no favorecieron a los cálculos, por lo que se recomienda utilizar el menor factor de escalamiento de masa si el parámetro a estudiar es la fuerza de embutido.

Cabe mencionar que las fuerzas obtenidas por cálculos teóricos son menores que las obtenidas por paquetería ABAQUS/CAE® en un orden de magnitud por abajo para los primeros casos. Por otro lado, las fuerzas de los dos últimos pasos parecían estabilizarse con el paso del tiempo, lo cual es otra razón para optimizar el factor de escalamiento de masa.

Las piezas simuladas resultaron muy parecidas a las piezas reales, aunque la deformación acumulada de cada paso los nodos generó una distorsión por lo que es necesario utilizar una malla más fina en la zona de embutido y un número de escalamiento de masa más pequeño para pasos de reembutido, esto generará un aumento en el tiempo de computo.

El sujetador de lámina influyó en el flujo de la lámina simulada, ya que, a diferencia de la pieza real, la pieza simulada aumento en medidas del diámetro conforme se realizaban los pasos de embutido, afectando también en el cambio de espesor a través de todos los pasos.

Los cambios de espesores obtenidos con la simulación en algunos puntos fueron congruentes con la pieza real, donde la deformación no fue tan severa, en comparación con la zona de embutido, donde la lámina presentó una distorsión excesiva y hubo adelgazamientos mayores a lo esperado, por lo que sería importante estudiar el remallado de la lámina.

Otra variable en la que la anisotropía afectó considerablemente fue en la velocidad de la chapa embutida, ya que, aunque las magnitudes fueron similares para los dos casos estudiados, fluyó más rápido en las zonas donde los esfuerzos eran máximos. Las geometrías obtenidas por el modelo anisotrópico fueron más parecidas al modelo real en los últimos pasos, magnificando las zonas donde el flujo fue mayor, en comparación con la real. Por ello, si lo que se quiere estudiar es el flujo se recomienda utilizar el modelo anisotrópico.

## Referencias:

- Amada de México (2017). Estampado. Recuperado de: <http://www.amada-mexico.com/Stamping> 20 de julio de 2017
- Arab Najmeddin, Javadimanesh Abotaleb 2013 *Theoretical and Experimental Analysis of Deep Drawing Cylindrical Cup*.
- ASM Handbook Volume 14 (1988), *Forming and Forging*.
- autoparti.it (2018). <https://www.autoparti.it/seat/ibiza-iv-6l1/19220/11754/cofano-motore-componenti-insonorizzazione> Consultado 15 de Enero de 2018
- Banabic, D, (2009), *Sheet Metal Forming Processes: Constitutive modelling and numerical simulation*, Cluj Napoca, Rumania, Springer
- Buljanovic, V, (2004) *Sheet metal forming processes and die design*, New York, USA., Industrial Press Inc.
- Dassault Systèmes Simulia Corp., Abaqus 6.14 Analysis User's Manual
- Digital tool & Die Inc. (2015). Transfer Dies. Recuperado de: <http://digitaltoolanddie.com/service/transfer-dies/> 4 de abril del 2017
- Doyle, L, (1969), *Procesos de manufactura y materiales para ingenieros*, New Jersey, USA., Diana.
- Focus technology Co. (2017). Recuperado de: [http://es.made-in-china.com/co\\_xinhe2013/product\\_Stainless-Steel-Kitchen-Sink-Double-Bowl-Deep-Drawn-Topmount-Self-Rimming-Countertop-Sink-D67-\\_egeonuugg.html](http://es.made-in-china.com/co_xinhe2013/product_Stainless-Steel-Kitchen-Sink-Double-Bowl-Deep-Drawn-Topmount-Self-Rimming-Countertop-Sink-D67-_egeonuugg.html) 07/12/2017
- Groover, P, (2007), *Fundamentos de manufactura moderna*, USA., John Wiley & Sons inc.
- Hatch, Jhon, (1984), *Aluminum: Properties and physical metallurgy*, Ohio, USA., American Society for Metals
- <http://www.b2bmetal.eu/en/pages/index/index/id/134/> 05 de noviembre de 2017
- <http://www.bebonchina.com/News/ASTM-A238-Grade-ABCDASME-SA283-Grade-ABCD.html> 05 de noviembre de 2017
- <http://www.directindustry.es/prod/dunkes/product-7405-385878.html> Consultado 24 de junio del 2018
- <http://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/42219-Conformado-superplastico-Aproximacion-a-tecnologias-emergentes.html> Consultado 24 de junio del 2018
- <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=67e1b53cedc944b19ae5a9d46cef3096> 05 de noviembre de 2017
- <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=a193077ff1724fc69793ede06633d33a> Consultado 07 de noviembre de 2017
- <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=bcbf506c860444a08a1ff23635b6815f> Consultado 07 de noviembre de 2017
- <http://www.otaisteel.com/technical-support/aisi-d2-vs-d3-cold-work-steel-stm-a681/> Consultado 07 de noviembre de 2017

- <https://www.cedinox.es/es/acero-inoxidable-actividades/destacado/destacado-en-detalle/Hidroconformado-de-acero-inoxidable/> Consultado 24 de junio del 2018
- <https://www.globalspec.com/reference/76910/203279/chapter-11-deep-drawing-dies> Consultado el 31 de julio de 2018
- IndiaMART (2018). <https://www.indiamart.com/shreegajanmetalindustries/kitchenware-dies-moulds.html> Consultado 15 de enero 2018
- Karali M. (2011) *Examination of the strength and ductility of AA. 1050 material shaped with the multi-stage deep drawing method* Archives [http://imim.pl/files/archiwum/Vol2\\_2011/3.pdf](http://imim.pl/files/archiwum/Vol2_2011/3.pdf) Consultado 11 de abril 2018.
- Karem M, Younis (2013) Effect of blank holder type on deep drawing of cups. *The Iraqi Journal for mechanical and material Engineering*, 13,106-119
- Korhonen A.S. (1982) Drawing Force in Deep Drawing of Cylindrical Cup With Flat-Nosed Punch. *Journal of Engineering for Industry*, 104, 29-37
- Lăzărescu, L., Banabic, I. (2017) Evaluation of deep drawing force under different friction conditions. *MATEC Web of Conferences*, 137, 05003.
- Li, W. S., Wang, Z. P., Lu, Y., Jin, Y. H., Yuan, L. H., Wang, F. (2006). Mechanical and tribological properties of a novel aluminum bronze material for drawing dies. *Wear*, 261, 155-163
- Maquinaria Chicago. Prensas / Dobladoras de Cortina. Recuperado de: <https://www.maquinariachicago.com/Prensa-Dobladora-de-Cortina> 20 de julio de 2017
- Nazarov, R., Ayadi, Z., Nikulin, S.A., (2008). Analytical Model for deep-drawing of a cylindrical cup. *3rd France-Russia Seminar*, 15-18
- Power Team. Prensa de cama rodante. Recuperado de: [http://www.spxflow.com/es/assets/pdf/PT503E\\_Pagina\\_142\\_143.pdf](http://www.spxflow.com/es/assets/pdf/PT503E_Pagina_142_143.pdf) 20 de julio de 2017
- Robles M, Rosen C, Rueda A, (2012), *Envases metálicos en México dos siglos de innovación con visión al futuro*, México., Editorial armonia, canafem.
- Seberini, M. Latas de Aluminio. Recuperado de: <https://es.dreamstime.com/fotograf%C3%ADa-de-archivo-libre-de-regal%C3%ADas-latas-de-aluminio-image22063157> 07/12/2017
- Shi-Hong Zhang, Shuai-Feng Chen, Yan Ma, Hong-Wu Song, Ming Cheng. Developments of New Sheet Metal Forming Technology and Theory in China. *Acta Metallurgica Sinica(English Letters)*, 2015, 28(12): 1452-1470
- Suchy, I. "Handbook of die design", 2006, McGrawHill Handbooks, 2a Edición
- Swapna D. Srinivasa Rao Ch. Radhika S. (2017) *A review on deep drawing process*. [https://www.researchgate.net/profile/Chsrinivasa\\_Rao/publication/318044067\\_A\\_Review\\_on\\_Deep\\_Drawing\\_Process/links/5976288fa6fdcc8348aa3348/A-Review-on-Deep-Drawing-Process.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Chsrinivasa_Rao/publication/318044067_A_Review_on_Deep_Drawing_Process/links/5976288fa6fdcc8348aa3348/A-Review-on-Deep-Drawing-Process.pdf) Consultado 12 de abril del 2018
- Szumera, James, *The metal stamping process : your product from concept to customer* New York : Industrial Press, 2003
- Tekkaya E., Altan T., (2012), *Sheet Metal Forming: Fundamentals*, Ohio, USA., ASM International

- Valderas, A. (2012). Todo sobre el envase metálico. España. El mundo de la lata. Recuperado de <http://www.mundolatas.com/Informacion%20tecnica/HOJALATA.htm> 05 de noviembre de 2017
- Wang, C., Ma R., Zhao, J. y Zhao, J. (2017). Calculation method and experimental study of coulomb friction coefficient in sheet metal forming. *Journal of manufacturing processes*, 27, 126-137.
- Wassilieff, B, (1966), *Embutición*, París, Francia, Dunod Paris.
- Weber, R (2015). Flight of a complex progressive stamping--from customer print to finished part. Recuperado de: <http://www.thefabricator.com/article/stamping/flight-of-a-complex-progressive-stamping-from-customer-print-to-finished-part> 4 de abril del 2017
- Wikimedia Commons (2016). [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EMBUTIDO\\_1.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EMBUTIDO_1.jpg) 07/12/2017
- Zhao Kunmin, Wanga Limin, Changa Ying y Yan Jianwen. (2015). Identification of post-necking stress-strain curve for sheet metals by inverse method. *Mechanics of Materials*, 92, 107-118
- Zhoushan Golden Wing Machinery Co., Ltd. (2018). <https://spanish.alibaba.com/product-detail/automatic-aerosol-spray-tin-can-cap-lid-bottom-cone-dome-making-machine-production-line-60245050625.html>  
Consultado 11 de Abril de 2018