



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Evaluación del Proceso de Embutición y Re-embutición Cilíndrica en Función del Tipo de Lubricante Utilizado.

Br. Deric Páez
Br. José Castro

Naguanagua, 10 de Mayo de 2011



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Evaluación del Proceso de Embutición y Re-embutición Cilíndrica en Función del Tipo de Lubricante Utilizado.

Trabajo especial de grado presentado ante la Ilustre Universidad de Carabobo para optar al título de Ingeniero Mecánico

Tutor académico:
Ing. Sandra Cabello

Autores:
Br. Deric Páez
Br. José Castro

Naguanagua, 10 de Mayo de 2011



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



Evaluación del Proceso de Embutición y Re-embutición Cilíndrica en Función del Tipo de Lubricante Utilizado.

Trabajo especial de grado presentado ante la Ilustre Universidad de Carabobo para optar al título de Ingeniero Mecánico

Br. Deric Páez

Br. José Castro

Naguanagua, 10 de Mayo de 2011



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA



CERTIFICADO DE APROBACIÓN

Quienes suscriben, Miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica para examinar la Tesis de Pregrado titulada ***“Evaluación del proceso de embutido y re-embutido cilíndrico en función del tipo de lubricante”***, presentada por los bachilleres: **Deric Páez** y **José Castro**, portadores de la Cédula de Identidad N°: **16.405.500** y **17.739.971**, respectivamente; hacemos constar que hemos revisado y aprobado el mencionado trabajo.

*Ing. Sandra Cabello,
Presidente del jurado*

*Ing. Gennifer Aparicio
Miembro del jurado*

*Ing. Juan Carlos Pereira
Miembro del jurado*

En Nguanagua a los 10 días del mes de Mayo de 2011

Índice General

Certificado de Aprobación	v
Índice de Tablas	xiii
Índice de Figuras	xv
Índice de Graficas	xix
Simbología	xxi
Agradecimientos	xxiii
Resumen	xxvii
INTRODUCCION	1
CAPÍTULO 1 El Problema	3
1.1 El Problema, 3	
1.1.1 Planteamiento del problema, 3	
1.2 Objetivos, 5	
1.2.1 <i>Objetivo General</i> , 5	
1.2.2 <i>Objetivos Específicos</i> , 5	
1.3 Justificación, 5	

1.4 Limitaciones, 6

1.5 Alcance, 6

1.6 Antecedentes, 7

CAPÍTULO 2 Bases Teóricas

11

2.1 Embutición, 11

2.2 Tipos de embutición, 13

2.3 Determinación del diámetro de desarrollo, 14

2.4 Parámetros de diseño en la embutición de metales, 17

2.4.1 Relación de embutición, 17

2.4.2 Porcentaje de reducción de área, 19

2.4.3 Métodos alternativos para calcular el numero de operaciones de embutido, 20

2.4.4 Juego entre punzón y matriz, 22

2.4.5 Redondeo de la matriz de embutición, 22

2.4.6 Redondeo del punzón, 23

2.4.7 Velocidad de embutición, 23

2.4.8 Lubricación, 24

2.4.9 Presión del prensa lamina, 25

2.5 Embutición sin prensa lamina, 26

2.6 Fuerza máxima para embutir, 26

2.7 Defectos que aparecen al embutir, 27

2.7.1 Líneas de fluencia, 27

2.7.2 Recuperación elástica, 27

2.7.3 Defectos presentados por la chapa metálica, 28

2.7.4 Chapa de poca calidad, 28

2.7.5 Punzón descentrado, 28

2.7.6 Inclinação del punzón, 29

2.7.7 Desgarro del fondo en todo su perímetro, 29

2.7.8 Formación de flecos en el borde lateral, 30

- 2.7.9 *Formación regular de sinuosidades,31*
- 2.7.10 *Formación irregular de sinuosidades,31*
- 2.7.11 *Juego excesivamente grande y formación de
labios en el borde de la pared lateral,32*
- 2.7.12 *Estrangulamiento en el borde del fondo, 32*
- 2.8 *Punzonado, 32*
- 2.9 *Parámetros de diseño en el punzonado, 33*
 - 2.9.1 *Claro, 33*
 - 2.9.2 *Dimensión del dispositivo de corte (punzón y
matriz), 34*
 - 2.9.3 *Estimación de la fuerza teórica de corte, 34*

CAPÍTULO 3 Marco Metodológico 37

- 3.1 *Diseño y construcción del dispositivo de embutición
cilíndrica y de punzonado,37*
 - 3.1.1 *Generalidades, 37*
 - 3.1.2 *Selección del material para herramientas, 38*
 - 3.1.3 *Parámetros de diseño en el proceso de embutido y
re-embutido, 39*
 - 3.1.3.1 *Primera etapa de embutido (Embutido simple),
41*
 - 3.1.3.2 *Segunda etapa de embutido (Re-embutido),
46*
 - 3.1.4 *Parámetros de diseño en el proceso de punzonado
del disco de desarrollo, 50*
 - 3.1.5 *Diseño y cálculos resistentes para las piezas del
dispositivo de embutido, 51*
 - 3.1.6 *Diseño y cálculos resistentes para las piezas del
dispositivo de punzonado, 54*
 - 3.1.7 *Construcción, mecanizado y ensamblaje de las*

piezas del dispositivo de embutido, 55	
3.1.8 Construcción, mecanizado y ensamblaje de las piezas del dispositivo de punzonado, 62	
3.2 Ensayos de embutición cilíndrica, 67	
3.2.1 Condiciones de ensayo, 67	
3.2.2 Procedencia y preparación del material a ensayar, 69	
3.3 Procedimiento para la preparación de los ensayos de embutición y re-embutición cilíndrica, 72	
3.4 Rugosidad superficial, 73	
CAPITULO 4	Resultados
4.1 Piezas obtenidas para el dispositivo de embutido obtenido, 75	75
4.2 Dispositivo de punzonado obtenido, 79	
4.3 Ensayos experimentales según el tipo de lubricante utilizado, 80	
4.3.1 Comportamiento de la chapa en cada ensayo, 80	
4.3.2 Descripción de los envases obtenidos a través de los distintos ensayos, 100	
4.3.3 Resumen de los resultados obtenidos de cargas y rugosidad en cada ensayo, 111	
CAPITULO 5	Análisis de resultados
5.1 Embutido utilizando Agua Jabonosa (Primera etapa),115	115
5.2 Embutido utilizando Agua Jabonosa (Segunda etapa), 116	
5.3 Embutido utilizando Aceite de Manzanilla (Primera Etapa), 116	
5.4 Embutido utilizando Aceite de Manzanilla (Segunda Etapa), 117	

5.5 Embutido utilizando Bisulfuro de Molibdeno (Primera Etapa),	117
5.6 Embutido utilizando Bisulfuro de Molibdeno (Segunda Etapa),	119
5.7 Embutido utilizando Manteca Vegetal (Primera Etapa),	120
5.8 Embutido utilizando Manteca Vegetal (Segunda Etapa),	120
5.9 Embutido utilizando Vaselina (Primera Etapa),	121
5.10 Embutido utilizando Vaselina (Segunda Etapa),	122
5.11 Comparación entre resultados obtenidos y estimados teóricos,	122

CAPITULO 6	Conclusiones y recomendaciones	125
	Referencias bibliográficas	129
Apéndice A	Comportamiento del material a ensayar	133
Apéndice B	Valores de parámetros involucrados en el proceso de embutido recomendados por algunos autores y organizaciones.	139
Apéndice C	Proceso de fabricación de las piezas del dispositivo de embutición y punzonado.	145
Apéndice D	Planos constructivos de las piezas del dispositivo de embutición y punzonado	173
Anexo	Propiedades de algunas aleaciones de aluminio	202

Índice de Tablas

2.1	Determinación del número de embuticiones y la altura del envase.	20
2.2	Velocidad de embutición recomendada para diferentes materiales.	24
2.3	Lubricantes a usar en la embutición en relación al material a deformar.	25
2.4	Valores de m en función de d/D.	27
2.5	Tolerancias de corte para distintos grupos de materiales	33
3.1	Propiedades mecánicas del acero 5115.	38
3.2	Propiedades mecánicas del acero 1045.	39
3.3	Propiedades del lubricante agua jabonosa.	68
3.4	Propiedades del bisulfuro de molibdeno.	68
3.5	Propiedades de la manteca vegetal	69
3.6	Propiedades de la vaselina	69
3.7	Composición química experimental del aluminio 3003-H14	70
3.8	Composición química del aluminio 3003-H14.	70
3.9	Esfuerzo ultimo del aluminio	71
3.10	Cantidad de probetas utilizada para estudiar el proceso.	72
4.1	Envases obtenidos con la primera etapa con agua jabonosa.	100
4.2	Envases obtenidos con la primera etapa con aceite de manzanilla.	102

4.3	Envases obtenidos con la primera etapa con bisulfuro de molibdeno.	103
4.4	Envases obtenidos con la segunda etapa con bisulfuro de molibdeno.	105
4.5	Envases obtenidos en la primera etapa con manteca vegetal.	106
4.6	Envases obtenidos en la segunda etapa con manteca vegetal.	107
4.7	Envases obtenidos en la primera etapa con vaselina.	108
4.8	Envases obtenidos en la segunda etapa con vaselina.	110
4.9	Resultados de fuerza 1era etapa.	111
4.10	Resultados de fuerza 2da etapa.	112
4.11	Resultados de rugosidad.	113
5.1	Comparación entre rugosidades encontradas	124

Índice de Figuras

2.1	Proceso de embutición de piezas cilíndricas.	12
2.2	Esquema de una embutición con goma.	13
2.3	Embutición de repujado.	14
2.4	Diámetro de desarrollo para algunas formas comunes.	16
2.5	Diámetro de desarrollo para algunas formas comunes.	17
2.6	Disposición descentrada del eje del punzón con respecto a la matriz de embutición.	29
2.7	Disposición inclinada de eje del punzón con respecto a la matriz de embutido.	29
2.8	Pieza embutida desgarrada en el fondo.	30
2.9	Pieza con flecos en los bordes.	30
2.10	Pieza con sinuosidades en el borde de embutición.	31
2.11	Formación de un labio en el borde de una pieza embutida.	32
2.12	Punzonado de aluminio.	33
3.1	Esquema de holgura entre punzón y matriz de la primera etapa.	43
3.2	Redondeo de punzón	44
3.3	Contacto entre matriz y portamatriz.	53
3.4	Etapas del mecanizado del punzón.	55

3.5	Diseño del punzón.	55
3.6	Etapas del mecanizado del punzón.	56
3.7	Diseño del punzón.	56
3.8	Etapas del mecanizado de la matriz.	57
3.9	Diseño de la matriz.	57
3.10	Etapas del mecanizado de la matriz.	58
3.11	Diseño de la matriz.	58
3.12	Etapas del mecanizado del porta matriz.	59
3.13	Diseño del porta matriz.	59
3.14	Mecanizado del prensa lamina.	60
3.15	Diseño del prensalámina numero.	60
3.16	Etapas del mecanizado del prensalámina.	61
3.17	Diseño del prensalámina.	61
3.18	Etapas de mecanizado del punzón.	62
3.19	Diseño del punzón.	62
3.20	Etapas de mecanizado de la matriz.	63
3.21	Diseño de la matriz.	63
3.22	Etapas de mecanizado del prensalámina.	64
3.23	Diseño del prensalámina.	64
3.24	Etapas de mecanizado base del punzón.	65
3.25	Diseño de la base de punzón.	65
3.26	Etapas de mecanizado de guías inferiores.	66
3.27	Etapas de mecanizado de guías superiores.	66
3.28	Diseño de las guías.	67
3.29	Probetas para ensayo de tracción de sección rectangular.	71
4.1	Punzón de la primera etapa.	75
4.2	Matriz de la primera etapa.	76
4.3	Prensa lamina de la primera etapa.	76
4.4	Punzón de la segunda etapa.	76
4.5	Matriz de la segunda etapa.	77

4.6	Prensa lamina de la segunda etapa.	77
4.7	Porta Matriz de ambas etapas.	77
4.8	Conjunto de piezas (primera etapa).	78
4.9	Conjunto de piezas (segunda etapa).	78
4.10	Punzón de corte.	79
4.11	Prensalámina.	79
4.12	Matriz de corte.	79
4.13	Troquel de punzonado	80

Índice de gráficas

2.1	Método gráfico para calcular el número de embuticiones.	21
4.1	Carga vs Desplazamiento. Primer ensayo.	80
4.2	Carga vs Desplazamiento. Segundo ensayo.	81
4.3	Carga vs Desplazamiento. Tercer ensayo.	81
4.4	Carga vs Desplazamiento. Cuarto ensayo.	82
4.5	Carga vs Desplazamiento. Quinto ensayo.	82
4.6	Carga vs Desplazamiento. Primer ensayo.	83
4.7	Carga vs Desplazamiento. Segundo ensayo.	83
4.8	Carga vs Desplazamiento. Tercer ensayo.	84
4.9	Carga vs Desplazamiento. Cuarto ensayo.	84
4.10	Carga vs Desplazamiento. Quinto ensayo.	85
4.11	Carga vs Desplazamiento. Primer ensayo.	85
4.12	Carga vs Desplazamiento. Segundo ensayo.	86
4.13	Carga vs Desplazamiento. Tercer ensayo.	86
4.14	Carga vs Desplazamiento. Cuarto ensayo.	87
4.15	Carga vs Desplazamiento. Quinto ensayo.	87
4.16	Carga vs Desplazamiento. Primer ensayo.	88
4.17	Carga vs Desplazamiento. Segundo ensayo.	88

4.18	Carga vs Desplazamiento. Tercer ensayo.	89
4.19	Carga vs Desplazamiento. Cuarto ensayo.	89
4.20	Carga vs Desplazamiento. Quinto ensayo.	90
4.21	Carga vs Desplazamiento. Primer ensayo.	90
4.22	Carga vs Desplazamiento. Segundo ensayo.	91
4.23	Carga vs Desplazamiento. Tercer ensayo.	91
4.24	Carga vs Desplazamiento. Cuarto ensayo.	92
4.25	Carga vs Desplazamiento. Quinto ensayo.	92
4.26	Carga vs Desplazamiento. Primer ensayo.	93
4.27	Carga vs Desplazamiento. Segundo ensayo.	93
4.28	Carga vs Desplazamiento. Tercer ensayo.	94
4.29	Carga vs Desplazamiento. Cuarto ensayo.	94
4.30	Carga vs Desplazamiento. Quinto ensayo.	95
4.31	Carga vs Desplazamiento. Primer ensayo.	95
4.32	Carga vs Desplazamiento. Segundo ensayo.	96
4.33	Carga vs Desplazamiento. Tercer ensayo.	96
4.34	Carga vs Desplazamiento. Cuarto ensayo.	97
4.35	Carga vs Desplazamiento. Quinto ensayo.	97
4.36	Carga vs Desplazamiento. Primer ensayo.	98
4.37	Carga vs Desplazamiento. Segundo ensayo.	98
4.38	Carga vs Desplazamiento. Tercer ensayo.	99
4.39	Carga vs Desplazamiento. Cuarto ensayo.	99
4.40	Carga vs Desplazamiento. Quinto ensayo.	100
5.1	Comparación cargas experimentales con teóricas, 1era etapa.	122
5.2	Comparación cargas experimentales con teóricas, 2da etapa.	124
A.1	Comportamiento esfuerzo vs deformación Probeta 1.	135
A.2	Comportamiento esfuerzo vs deformación Probeta 2.	135
A.3	Comportamiento esfuerzo vs deformación Probeta 3.	136
A.4	Comportamiento esfuerzo vs deformación Probeta 4.	136
A.5	Comportamiento esfuerzo vs deformación Probeta 5.	137

Simbología

a:	Tolerancia recomendada para el claro entre punzón y matriz de punzonado.
A_0 :	Área de sección transversal de la probeta de tracción.
c:	Claro entre punzón y matriz de punzonado.
D:	Diámetro de desarrollo.
d:	Diámetro externo del envase.
D_b :	Diámetro del punzón de corte.
dc:	Rebaje del punzón de corte.
D_p :	Diámetro del punzón de embutido.
D_m :	Diámetro interno de la matriz de embutido.
D_{pm} :	Diámetro del punzón de embutido de una etapa previa.
D_{pn} :	Diámetro del punzón de embutido de etapas sucesivas.
e:	Deformación ingenieril.
F:	Carga.
F_c :	Fuerza teórica del corte.
F_{maxG} :	Carga teórica según Groover.
F_{maxW} :	Carga teórica según Wassilieff.
h:	Altura.
K:	Coeficiente de resistencia del material.
L:	Longitud calibrada de la probeta de tracción.
L_b :	Longitud de borde de la forma a punzonar.
L_0 :	Longitud inicial entre las marcas calibradas de la probeta.
m:	Coeficiente dependiente de la relación D_p/D según Wassilieff.
n:	Coeficiente de endurecimiento del material.
P:	Presión del prensalámina.

p :	Presión media recomendada según el tipo de material.
r_m :	Redondeo de la matriz de embutición.
r_p :	Redondeo del punzón.
R_e :	Relación de embutición.
R_{en} :	Relación de embutición para etapas sucesivas.
S :	Esfuerzo ingenieril.
S_D :	Superficie del disco desarrollado.
S_E :	Superficie exterior del punzón.
S_u :	Esfuerzo último a tracción del material.
S_y :	Esfuerzo a fluencia del material.
t :	Espesor de chapa.
W :	Juego u holgura entre punzón y matriz.
W_p :	Trabajo durante el punzonado.
$\%R$:	Porcentaje de reducción de área.
ε :	Deformación real o verdadera.
σ :	Esfuerzo real.
σ_1 :	Esfuerzo a compresión punzón embutición 1.
σ_2 :	Esfuerzo a compresión punzón embutición 2.
σ_c :	Esfuerzo de contacto.
τ :	Resistencia al corte de la lámina.
$\bar{\varepsilon}$:	Deformación efectiva en la embutición.

Agradecimientos

Ante todo gracias a dios por ser el principal partcipe de este logro, por prestarme la firmeza, valor y perseverancia en los momentos que más lo necesite.

A mis padres Yoleida y José, dignos ejemplos a seguir y pilares fundamentales de mi vida, por apoyarme en todo el recorrido de esta nueva meta y por ofrecerme en todo momento el soporte, desde cualquier punto de vista, que en repetidas oportunidades necesite.

Mi más extendido agradecimiento al Ing. Landy Roa y compañeros por su importante colaboración en el desarrollo de este proyecto.

A mis abuelos Rosa y Lisandro, de los cuales he obtenido siempre innumerables aprendizajes y que por el simple hecho de creer en esta meta se hacen merecedores de mis más amplios agradecimientos.

A toda mi familia en general, a mis hermanos Francisco y Sol, al Sr. Jhonathan Urbina, a Daylis Torrealba, a Charo y Julio, a mis tíos, primos, amigos y compañeros de estudio que de alguna manera contribuyeron en la culminación de este logro.

José L. Castro T.

Agradecimientos

Ante todo gracias a dios por ser el principal partcipe de este logro, por prestarme la firmeza, valor y perseverancia en los momentos que más lo necesite.

A mis padres Yoleida y José, dignos ejemplos a seguir y pilares fundamentales de mi vida, por apoyarme en todo el recorrido de esta nueva meta y por ofrecerme en todo momento el soporte, desde cualquier punto de vista, que en repetidas oportunidades necesite.

Mi más extendido agradecimiento al Ing. Landy Roa y compañeros por su importante colaboración en el desarrollo de este proyecto.

A mis abuelos Rosa y Lisandro, de los cuales he obtenido siempre innumerables aprendizajes y que por el simple hecho de creer en esta meta se hacen merecedores de mis más amplios agradecimientos.

A toda mi familia en general, a mis hermanos Francisco y Sol, al Sr. Jhonathan Urbina, a Daylis Torrealba, a Charo y Julio, a mis tíos, primos, amigos y compañeros de estudio que de alguna manera contribuyeron en la culminación de este logro.

José L. Castro T.

Agradecimientos

A Dios por sobre todas las cosas, darme fuerza, sabiduría, paz y tranquilidad cuando más lo necesitaba.

A mis padres, Zaida y Erick, por darme el apoyo incondicional y ser mi ejemplo de lucha por obtener lo que se quiere en la vida.

A la empresa CHEMSEAL C.A. por darnos el apoyo a la construcción de las piezas, para poder lograr los objetivos de este trabajo.

A mis compañeros de estudios Sergio, Rafael, Gerardo, Stevens, Jhosselyn, Corina, Alejandro, Denny y José por estar en las buenas y malas en este largo camino que tuvimos.

Deric J. Páez T.

Resumen

El embutido de chapas es un proceso de fabricación muy usado en la actualidad para crear piezas metálicas de forma acopada que van desde envases cilíndricos hasta elementos con diseños en revolución bastante complejos. Por tratarse de la deformación plástica de un metal para transformarlo en diversas formas, intervienen en el mismo diversas variables de las cuales depende la culminación satisfactoria del mismo, entre estos parámetros se encuentran la presión del prensalámina, la fuerza necesaria, lubricación, velocidad del punzón, curvaturas en matrices y punzones, entre otros. Este trabajo está enfocado a evaluar una de estas variables (lubricación) y su efecto en la carga aplicada en un proceso en el que se apliquen dos etapas de embutido, adicionalmente se compararon los valores de dichas cargas con las obtenidas teóricamente por los modelos *WASSILIEFF* Y *GROOVER*, así mismo establece el diseño y construcción de los elementos necesarios para aplicar el proceso a una chapa de aluminio 3003 H14 de 0,3mm de espesor, donde resaltan el conjunto de piezas para realizar la primera y segunda etapa del procedimiento y un troquel de punzonado para la obtención de los desarrollos necesarios, tales elementos tienen la posibilidad de ser usados académicamente en la ejecución de prácticas de laboratorio. Cabe destacar que los dispositivos se construyeron considerando las dimensiones de un troquel de embutido fabricado previamente (*Baldayo y Bracho, 2009*). Los lubricantes usados fueron aceite de manzanilla, agua jabonosa, bisulfuro de molibdeno, vaselina y manteca vegetal. Los resultados obtenidos demuestran la importancia de la lubricación en este tipo de procesos arrojando como mejor opción el uso de la manteca vegetal en su aplicación; y muestran además algunas discrepancias entre lo que dicta la teoría y lo que relata práctica en cuanto a valores de carga obtenidos.

Palabras claves: Embutición, re-embutición, punzonado, ensayos de tracción.

Introducción

La embutición es un proceso de conformado de chapas que se utiliza para fabricar piezas de forma cóncava de innumerables secciones transversales. En el proceso se transforma un disco plano en un cuerpo hueco. Las piezas que comúnmente se fabrican por embutido son latas de bebidas, utensilios de cocina y partes para carrocería automotriz, en el proceso influyen diversos parámetros de los cuales depende su efectividad en la fabricación de las piezas. Este trabajo de investigación se enfoca específicamente en la variación de uno de esos parámetros, la lubricación, en una etapa de embutición simple y una etapa de re-embutición.

La lubricación juega un rol importante en este conformado puesto que durante el proceso intervienen diversas fuerzas de fricción que dependen directamente de la geometría de la herramienta y del coeficiente de roce entre las superficies en contacto, que pueden ocasionar fallas en la pieza y desgaste excesivo en el herramental, es por ello que este parámetro influye en el aumento de la capacidad de embutición, la reducción de los defectos en las piezas y en el aumento de la vida útil de las herramientas. Debido a que el aluminio (material de ensayo) tiende a adherirse a las herramientas de embutido, del tipo de lubricante que se use depende del incremento o no de la efectividad del proceso.

La etapa de re-embutido se aplica cuando el cambio de forma en el diseño que se requiere es algo severo. El re-embutido se usa extensamente

en recipientes para alimentos, tapas para alimentos, tapas de las plumas fuente, carcasas de los filtros de aceites, émbolos de los amortiguadores, etc.

Ambos parámetros, fueron evaluados e investigados a lo largo de este trabajo para establecer las mejores condiciones en un proceso de re-embutición cilíndrica, y obtener para cada condición datos experimentales que permitan comparar dichas condiciones.

Cabe destacar que el capítulo I refleja claramente el contexto de estudio, que plantea la realidad de la problemática y objetivos de la investigación.

En el capítulo II se hace referencia a las fundamentaciones teóricas del proceso de embutición de láminas metálicas

El capítulo III se da a conocer la metodología utilizada para el diseño y construcción del dispositivo de embutido, parámetros de diseño, condiciones de ensayos y preparación del material a ensayar.

El capítulo IV, muestra los resultados obtenidos de los ensayos de embutición, imágenes del dispositivo construido y envases obtenidos.

En el capítulo V, IV, se presentan los análisis de resultados, conclusiones y recomendaciones respectivamente.

CAPÍTULO 1

El Problema

A continuación se presenta el problema que se desea abordar, así como el objetivo general de la investigación, de igual manera y subsiguiente a este segundo se describen los objetivos específicos requeridos para alcanzarlo, las condiciones de los ensayos que se realizarán, como el tipo de material, el tipo de lubricante y las etapas del conformado, las limitaciones a las que se expone esta investigación.

1.1 EL PROBLEMA

1.1.1 Planteamiento del Problema:

En la industria moderna los procesos de conformado son ampliamente utilizados para la fabricación de piezas y productos metálicos, semi-elaborados o terminados, por medio de la deformación plástica de chapas o láminas. Algunos de los productos que se obtienen en este tipo de procesos son piezas con forma de copa (cubetas, vasos, piezas de automóviles) que resultan de un procedimiento de embutido, en el cual, se lleva a cabo la transformación de un trozo de chapa plana en un cuerpo hueco, sea cilíndrico

o de formas mas complejas, dependiendo del tipo de punzón y de matriz que se utilice.

Durante la realización de este tipo de procedimiento, no deben aparecer defectos en la pieza, como el arrugamiento del material y hasta fractura del mismo, de allí la necesidad de establecer parámetros, como la presión ejercida por el prensalámina, la lubricación, etapas de re-embutición de ser necesario, entre otros, de manera que se llegue a resultados satisfactorios en el producto.

Si bien es cierto que la presión del prensalámina es un parámetro relativamente importante durante este proceso, no se puede omitir ni restarle importancia a la lubricación de la chapa, pues esta variable esta íntimamente relacionada con la primera, y ambas repercuten directamente en la aparición o no de arrugas en el material a embutir además de influir en la carga requerida para realizar el proceso y en el acabado superficial final del producto. Una lubricación racional reduce el rozamiento entre la chapa, la matriz y el pisador, permitiendo obtener una mejor calidad superficial, un menor esfuerzo del punzón y un mínimo desgaste de las herramientas.

Así mismo cuando hay que embutir piezas de gran profundidad, éstas tienden a agrietarse, de manera que es necesario la aplicación de una o más etapas sucesivas de re-embutido en matrices diferentes, donde el principal problema está en determinar el número mínimo de operaciones y de herramientas a utilizar, además de la determinación de los diámetros sucesivos, pues éstos están íntimamente ligados al aumento de profundidad del embutido.

Es por ello que para lograr resultados eficientes en este proceso, es de vital importancia el análisis de estos factores, obteniéndose para distintos materiales y lubricantes datos experimentales que sirvan de base para realizar las comparaciones pertinentes entre estos parámetros y así establecer el mejor escenario de condiciones en la realización de este proceso. Entre estos

análisis resalta con mucha importancia la aplicación de una etapa de re-embutido, de tal manera que con ésta se puedan obtener las notables diferencias entre realizar el embutido de una pieza sin ésta etapa adicional y hacerlo aplicando esta segunda etapa.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Evaluar el proceso de embutido y re-embutido cilíndrico en relación al tipo de lubricante.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Obtener los desarrollos de la parte a embutir.
- Construir las partes requeridas como punzón y matriz para una etapa de re-embutición a un dispositivo hecho en una investigación previa.
- Analizar el efecto de una etapa de re-embutición en función de tres tipos de lubricante, en la carga aplicada en el proceso de embutición cilíndrica.
- Analizar el acabado superficial de la pieza según el tipo de lubricante utilizado.
- Comparar los resultados obtenidos experimentalmente con el modelo teórico de Wassilieff para el cálculo de la carga de embutición.

1.3 Justificación

Debido a la amplia gama de variables y parámetros que influyen en el proceso de embutido y de su impacto directo en el desenvolvimiento efectivo del mismo, es necesario evaluar y analizar los efectos positivos y negativos que puedan tener éstos sobre las piezas o productos que se fabriquen con este proceso.

Así mismo todos estos efectos deben ser evaluados en diferentes condiciones de operación, ya sea utilizando distintos tipos de lubricante o varias etapas de re-embutido, para poder establecer las diferencias más notables entre ensayo y ensayo, definir la condición mas viable, y reducir al mínimo o eliminar por completo el número de defectos en el producto terminado.

La realización de este trabajo de investigación, tiene ventajas útiles sobre la realización actual de prácticas de embutido en el Laboratorio de Procesos de Fabricación, de la Facultad de Ingeniería (UC), puesto que en ésta, se implementa una nueva etapa de embutido y condiciones de lubricación en el proceso, además del análisis de sus efectos en la carga y calidad de superficie de la pieza obtenida; obteniéndose así un incremento en el conocimiento de este procedimiento tan utilizado en la industria moderna.

1.4 Limitaciones

- Disponibilidad en el mercado de los materiales a ensayar y del material para la fabricación de las herramientas
- Disponibilidad de los lubricantes a utilizar en los ensayos.

1.5 Alcance

Se realizará la construcción de un troquel de punzonado para obtener el desarrollo de la pieza a embutir, adicionalmente se construirá y adaptará al dispositivo de embutido existente, la herramienta necesaria para obtener una etapa de re-embutido, donde una aleación de aluminio de la serie 3000 será evaluada experimentalmente con dos condiciones principales, una, practicando un embutido simple al material y otra con un re-embutido, para cada una de ellas se realizarán cinco ensayos con tres lubricantes distintos (agua jabonosa, bisulfuro de molibdeno y aceite vegetal de manzanilla),

llegando a un total de treinta ensayos, de manera tal que se puedan comparar y evaluar los tres lubricantes en la etapa de embutición y de re-embutición

1.6 Antecedentes

En las últimas décadas se han desarrollado diversos trabajos de investigación en relación al embutido, entre los cuales destacan el de Cabello (2001), en el que realizó un estudio sobre el proceso de conformado, planteando una metodología para evaluar la formabilidad en materiales metálicos, donde se expresa que la metodología Nakazima propone la alternativa de seleccionar para una óptima operación de conformado; la velocidad más adecuada, el espesor más eficiente, la disposición de la chapa y el mejor lubricante. Se plantea hacer una adaptación al dispositivo para el ensayo Erichsen de un sistema de espejos que permiten la observación de la superficie del domo durante el ensayo, y así utilizar la apariencia del material como criterio de detección del ensayo antes de la rotura de la chapa.

Colgan y Monaghan (2003), por medio de un análisis numérico experimental y la fabricación de matrices y punzones de distintas geometrías estudian las etapas iniciales de un proceso de embutición profunda, usando el método de elementos finitos y con el fin de determinar los factores más importantes que influyen en este proceso. Los parámetros incluyeron la variación de los radios del punzón, la velocidad de golpe, la fuerza de sujeción del prensa-lamina, la fricción y la profundidad. Colgan y Monaghan llegan a la conclusión de que la fuerza de embutición y los radios del punzón tienen el mayor efecto sobre la deformación de espesores en las chapas de acero suave, en comparación a la fuerza o la fricción. Cuando el radio del punzón es menor, mayor es la fuerza ejercida y menor es el diámetro de desarrollo. También resaltan que la velocidad de embutición desempeña un papel importante, en la medida en que, cuanto mayor es la velocidad, mayor es el desarrollo, enfatizan que si la fuerza utilizada en el prensa-lamina no se

mantiene dentro de los límites superior e inferior del rango razonable esta tendrá un efecto significativo en la profundidad de la pieza, si la fuerza es demasiado alta o demasiado baja, se pueden producir arrugas en el área de la brida.

Lang et al. (2004) investigaron un proceso especial de embutición profunda hidrodinámica asistida por presión radial, utilizando la aleación de Al 6016-T4, donde estudiaron posibles defectos como fracturas y arrugas localizadas durante el experimento. Clasificaron las fracturas en inicial, media y final de acuerdo a los perfiles de deformación de las paredes de la pieza. Establecieron los límites entre el óptimo y el peor de los valores de parámetros como el pre-abultamiento en la chapa y la presión del lubricante en la cavidad del molde. Por último estudiaron la calidad de la pieza obtenida por este método de conformado y llegan a la conclusión de que en comparación con otros métodos de conformado, éste trae ventajas en cuanto a calidad superficial de la pieza se refiere.

Kuvin (2005) publicó un seminario en la revista *metalfforming*, sobre embutición profunda donde se cubren los temas del diseño de herramientas, materiales para las herramientas, lubricantes adecuados, desarrollo del proceso de embutición y simulación por computadoras.

Valdivia et al. (2006) construyen un troquel sensorizado, mediante el empleo de la electrónica moderna y técnicas de sensorización, para el estudio de las principales fuerzas que intervienen en el desarrollo de éste proceso, así como la generación de la fuerza de fricción. En general muestran el procedimiento de diseño y selección de los componentes del sistema de regulación y control del troquel, tipos de sensores o captadores de los elementos de medición y control de los parámetros del proceso. Con estos estudios se busca lograr la disminución de los defectos en las piezas, disminuir la fricción y adicionalmente obtener un control integral del conformado.

Allen *et al.*, (2007) realizaron un análisis de la influencia que tiene la lubricación en los procesos de embutición profunda de aceros realizando ensayos con distintos lubricantes con distintas viscosidades, realizaron una simulación numérica del proceso basada en el método de elementos finitos, con la finalidad de establecer comparaciones entre el modelo teórico, conferido por el programa de simulación numérica, y los resultados experimentales, concluyendo que para ambos casos se obtuvieron resultados similares y agregando que mientras menos viscoso es el lubricante, mayor es la fricción entre el prensa lámina y la chapa.

Kim *et al.* (2009) realizó estudios de la eficacia de los lubricantes en reducir la fricción de la matriz con la lámina, así como el efecto del calor generado por la deformación y la fricción en el proceso de embutición profunda. El rendimiento de los lubricantes en las pruebas de embutición se evaluaron mediante el uso de la fuerza máxima de perforación, máximo BHF aplicables, por inspección visual y longitud y perímetro de las piezas a obtener, basándose en los criterios propuestos por Kim *et al* en investigaciones anteriores, dando como resultados que los lubricantes a base de polímeros con aditivo EP dan mejores acabados superficiales con una menor fuerza máxima de embutición, mientras que las emulsiones lubricantes y aceites puro presentan fractura del material a determinada fuerza.

Baldayo *et al.* (2009) realizó el estudio proceso de embutido cilíndrico usando la aleación de aluminio 1100, variando la velocidad de embutición (10 mm/min, 20 mm/min, 30 mm/min) y el tipo de lubricante (Agua Jabonosa, Aceite Sintético, Bisulfuro de Molibdeno), dando como resultado que el bisulfuro de molibdeno da un excelente acabado superficial, a pesar de que es necesario aplicar una mayor carga de embutición, que con el agua jabonosa. El aceite sintético no es recomendable para aplicarlo con esta aleación, ya que genera fracturas en las paredes cercanas a la copa del envase.

CAPÍTULO 2

Bases Teóricas

En este capítulo se mostrarán los fundamentos teóricos necesarios para el desarrollo de la investigación que sirven de base para el cálculo de los parámetros mas importantes en el dispositivo a diseñar, parámetros como el diámetro de desarrollo, redondeo del punzón y matriz de embutido, el juego entre el punzón y la matriz, entre otros, además se definirá cuan importante es la variable lubricación en el desarrollo del proceso y cuales deben ser sus características fisicoquímicas para el buen desenvolvimiento del mismo.

2.1 Embutición

La operación de embutido consiste en transformar una chapa plana de un metal laminado en un cuerpo de revolución o prismático, procediendo para ello gradualmente mediante una o más operaciones. (Navarro, 1976). El proceso de embutición se expone de manera gráfica en la figura 2.1 en donde se obtiene una pieza embutida de forma cilíndrica siguiendo los pasos a continuación:

- I. Se coloca el disco de chapa metálica de diámetro D sobre el aro para embutir.
- II. Desciende el prensalámina y el punzón de embutir. El prensalámina entra en contacto con el disco de chapa ejerciendo presión sobre su contorno exterior.

- III. El punzón de diámetro d establece contacto con la chapa y presionando la embute a través de la matriz, con lo que el material del disco de chapa fluye por encima de la arista de embutición de radio r_m y el diámetro exterior D de dicho disco disminuye hasta alcanzar el valor D' . El cuello que se forma entre la matriz y el prensalámina se denomina brida o pestaña de chapa, esta disminuye de diámetro a medida que el punzón continua introduciéndose, desapareciendo finalmente cuando se ha embutido la pieza. Si se desea que quede una brida de chapa, ha de limitarse la profundidad de embutición.
- IV. Una vez que se ha conseguido la forma definitiva, habiendo el punzón alcanzado su posición mas baja, este y el prensalámina vuelven a subir.

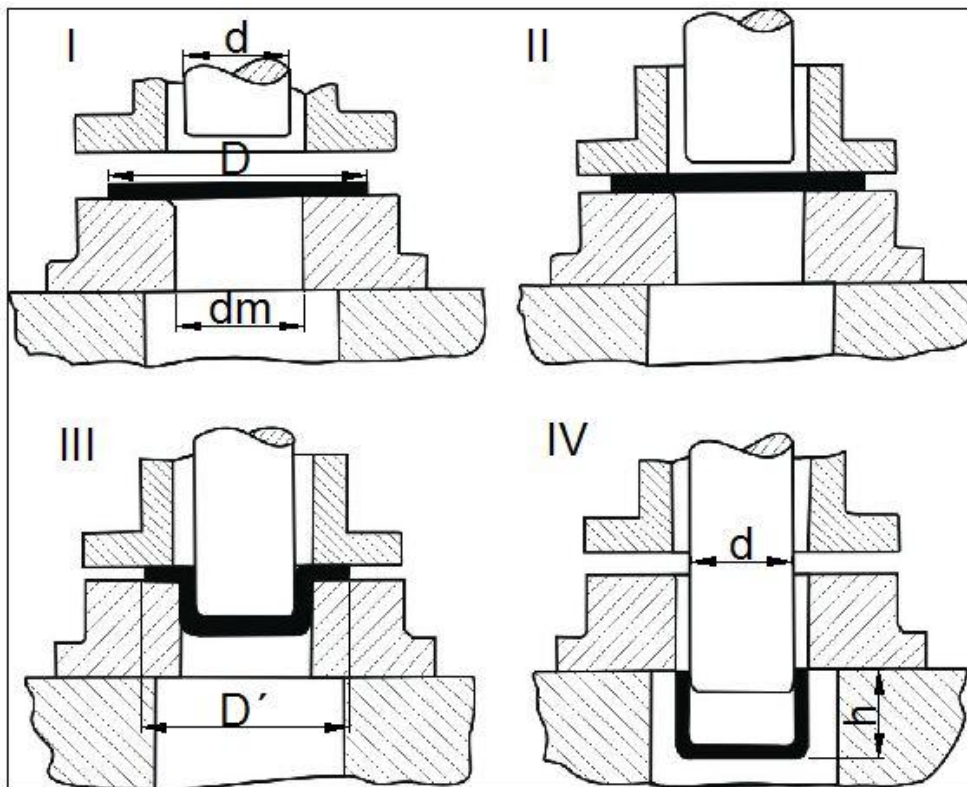


Figura 2.1 Proceso de embutición de piezas cilíndricas.

2.2 Tipos de embutición

- Embutición por goma: esta operación consiste en la utilización de un elastómero para la formación de la chapa, como se muestra en la figura 2.2. El elastómero, que viene en muchas formas y tamaños, es casi incompresible, se expande de modo que conforma la chapa a la forma de la matriz. Esta propiedad del elastómero indica que el volumen al cual es desplazado por el punzón, equivale al volumen del ensanchamiento lateral.

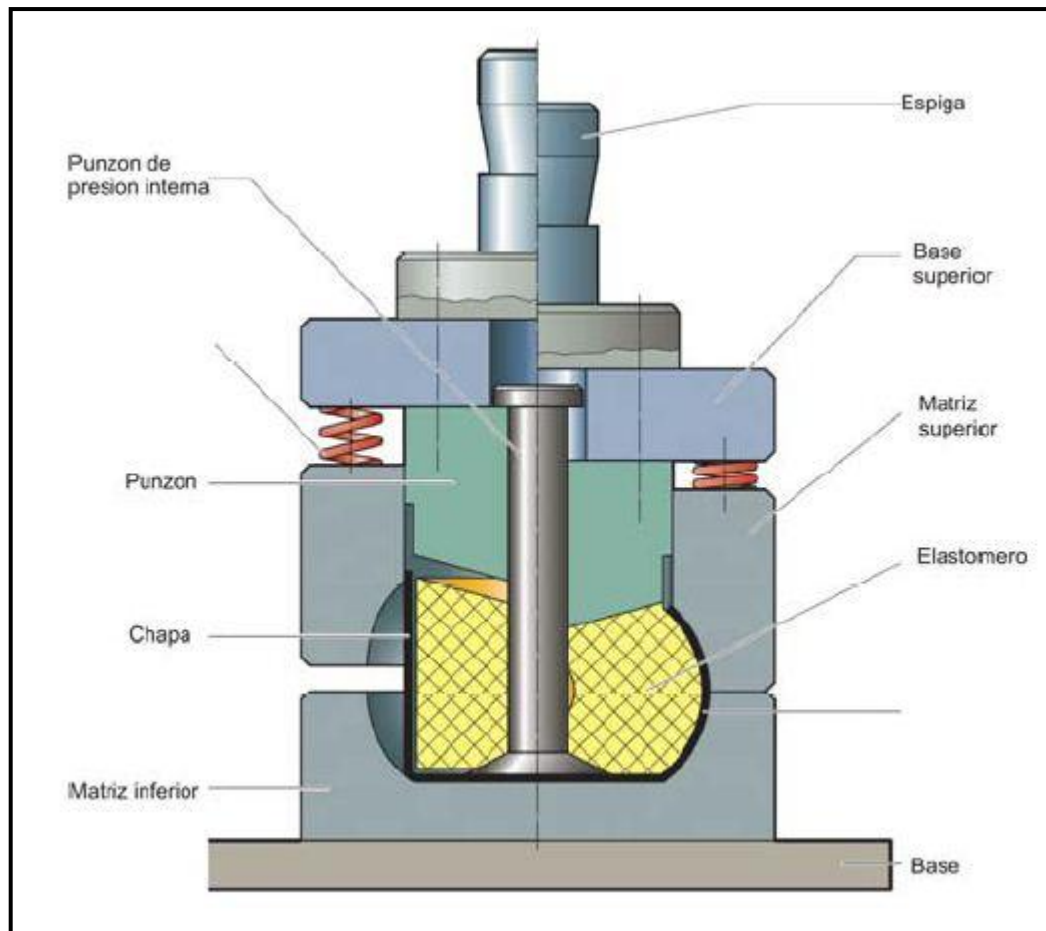


Figura 2.2. Esquema de una embutición con goma.

- Repujado: es un proceso donde la chapa se presiona contra un mandril que se hace girar en un torno, se emplea para piezas sencillas y conllevan un trabajo manual considerable. En la figura 2.3 se puede apreciar parte del proceso.

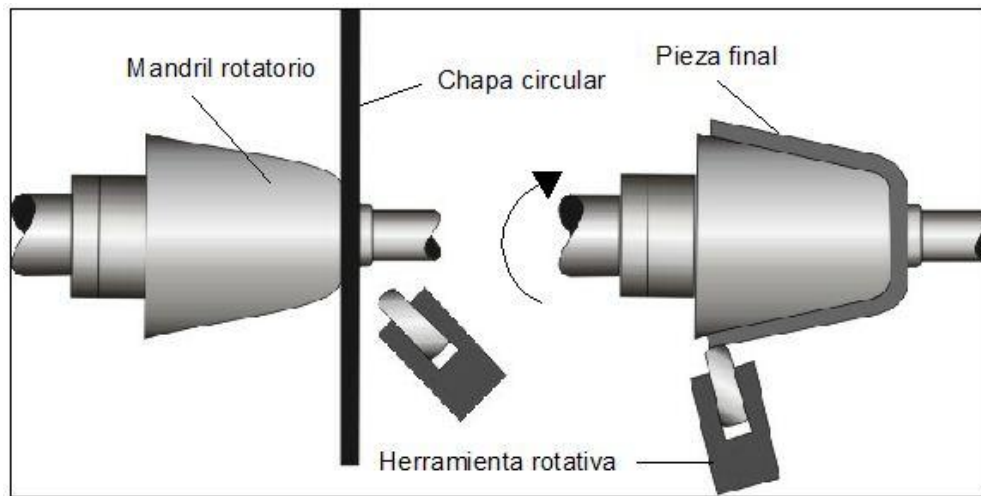


Figura 2.3. Embutición de repujado (Rodríguez et al., 2006)

- Embutición por estirado: se emplea para obtener formas sencillas de chapa. Se realiza sujetando los bordes de la chapa y estirándola hasta que se comienza a deformar. Posteriormente se va adaptando a una matriz con la forma deseada.

2.3 Determinación del diámetro de desarrollo

Para lograr una dimensión satisfactoria de una pieza cilíndrica embutida, se necesita el diámetro correcto de la chapa inicial. Este debe ser lo suficientemente grande para suministrar el material necesario que complete la pieza. Si hay demasiado material, habrá desperdicio innecesario. Para formas no cilíndricas existe el mismo problema de estimar el tamaño de la forma inicial, sólo que esta no será redonda (Cabello, 2009).

En este sentido hay diversos métodos de obtener el diámetro desarrollo para embutir piezas cilíndricas y uno de ellos, es el de conservación de volumen, estableciendo que el volumen inicial del disco es igual al volumen final y teniendo las dimensiones finales del recipiente, se resuelve para el diámetro D , suponiendo que el adelgazamiento de las paredes es nulo, para facilitar los cálculos. La superficie del desarrollo no es precisamente la misma que la superficie de la pieza embutida, ya que el material se ha estirado en el proceso.

De este modo se describe otro método de calcular el desarrollo como es el de principio de equivalencia (*Wassilieff, 1966*). Donde para una pieza embutida cilíndrica se tiene que:

La superficie del disco desarrollado (S_D) es:

$$S_D = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (2.1)$$

Superficie exterior del cilindro, S_E

$$S_E = \frac{\pi \cdot D^2}{4} + \pi \cdot d_p \cdot h \quad (2.2)$$

Siendo h la altura del recipiente, e igualando las dos superficies se obtiene

$$\frac{\pi \cdot D^2}{4} = \frac{\pi \cdot D^2}{4} + \pi \cdot d_p \cdot h$$

Simplificando:

$$\pi \cdot D^2 = \pi \cdot D^2 + 4 \cdot \pi \cdot d_p \cdot h$$

Donde:

$$D^2 = D^2 + 4 \cdot d_p \cdot h$$

Obteniendo

$$D = \sqrt{d_p^2 + 4 \cdot d_p \cdot h} \quad (2.3)$$

Del ejemplo anterior descrito se puede calcular los desarrollos aproximados para realizar el proceso de embutición de diferentes envases de formas cilíndricas sin redondeo en la base. En la figura 2.4 se tiene formulas simplificadas de diámetros de desarrollo para algunas formas comúnmente utilizadas de la embutición cilíndrica.

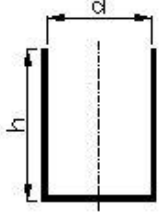
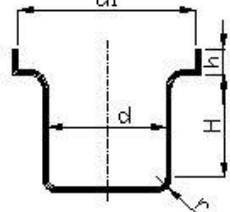
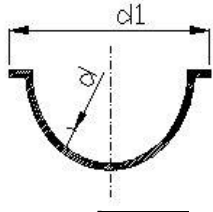
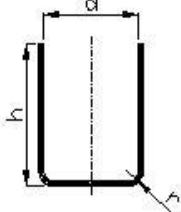
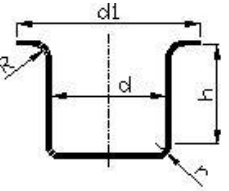
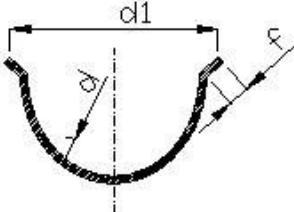
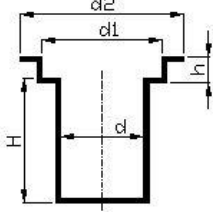
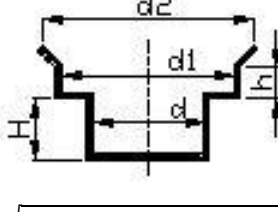
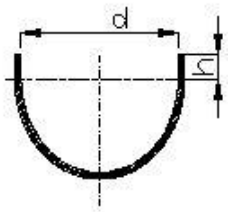
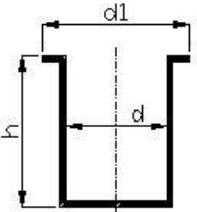
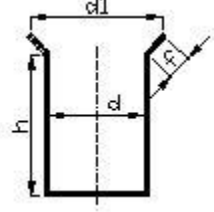
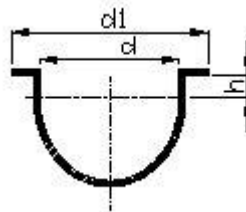
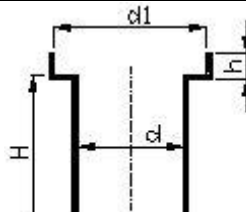
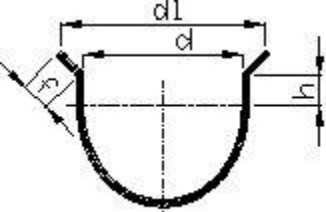
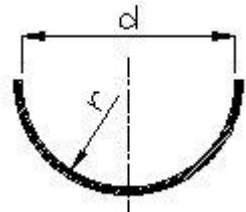
 $D = \sqrt{d^2 + 4dh}$	 $D = \sqrt{d_1^2 + 4d(H + 0,57r) + 4d_1h}$	 $D = \sqrt{d^2 + d_1^2}$
 $D = \sqrt{d^2 + 4d(h + 0,57r)}$	 $D = \sqrt{d_1^2 + 4d[h + 0,57(R + r)]}$	 $D = 1,414\sqrt{d^2 + f(d + d_1)}$
 $D = \sqrt{d_2^2 + 4(dH + d_1h)}$	 $D = \sqrt{d_1^2 + 4(dH + d_1h)2f(d_1 + d_2)}$	 $D = 1,414\sqrt{d^2 + 2dh}$
 $D = \sqrt{d_1^2 + 4dh}$	 $D = \sqrt{d^2 + 4dh + 2f(d + d_1)}$	 $D = \sqrt{d^2 + d_1^2 + 4dh}$
 $D = \sqrt{d_1^2 + 4(dH + d_1h)}$	 $D = 1,414\sqrt{d^2 + 2dh + f(d + d_1)}$	 $D = \sqrt{8r^2} = 1,414d$

Figura 2.4 Diámetro de desarrollo para algunas formas comunes

(Fuente: ASCAMM).

El diseño del desarrollo para piezas embutidas de forma irregular y con distintas curvaturas resulta difícil, por lo que suele obtenerse mediante estimación del grado de deformación. Corrientemente; el procedimiento empleado consiste en determinar previamente la superficie de la pieza para obtener un primer desarrollo en el cual se traza una cuadrícula; este desarrollo se somete a embutición, cuando esta operación ha sido efectuada, se puede conocer, en realidad donde falta o donde sobra material. Con esta pieza como referencia, se realiza un segundo desarrollo restando o sumando material en los sitios donde corresponda y de acuerdo con la cuadrícula se somete nuevamente a embutición y observando el resultado obtenido se llega a conseguir el desarrollo real de la pieza.

2.4 Parámetros de diseño en la embutición de metales:

2.4.1 Relación de Embutición (R_e).

La relación de embutición proporciona un indicativo de la severidad de una determina operación de embutido. A mayor relación, mayor severidad de la operación. Un límite superior aproximado de la relación de embutición es un valor de 2. Si se tiene una relación mayor a 2, el proceso debe dividirse en varias etapas (Groover, 1997).

Es evidente que los valores límites de embutición dependen del tamaño del desarrollo, geometría del troquel y propiedades del material.

Esta relación se define más fácilmente para una forma cilíndrica como:

$$R_e = \frac{D}{d_p} \quad (2.4)$$

R_e = Relación de embutición de la primera etapa

D = Diámetro de desarrollo

d_p = Diámetro del punzón.

Y si el proceso requiere más de una etapa de embutición se tiene:

$$R_{en} = \frac{d_p}{d_{pn}} \quad (2.5)$$

R_{en} = Relación de embutición de las etapas sucesivas.

d_p = Diámetro del punzón de la etapa anterior.

d_{pn} = Diámetro de punzón de la etapa sucesiva.

Es importante resaltar que la relación de embutición depende del factor de endurecimiento del material a trabajar, pues es este parámetro el que define la capacidad de deformación del material luego de una primera embutición o cualquier otro proceso de conformado.

Para determinar el factor de endurecimiento, se debe hacer un ensayo de tracción al material de acuerdo a la norma ASTM E8M, en el que se obtiene la curva carga-alargamiento, a partir de la cual se determina la curva esfuerzo-deformación ingenieril, que se define a partir de la sección transversal original de la muestra y de su longitud inicial como se indica:

$$S = \frac{F}{A_0} \quad (2.6)$$

$$e = \frac{L-L_0}{L_0} \quad (2.7)$$

S = Esfuerzo ingenieril.

F = Carga aplicada en el ensayo.

A_0 = Área de la sección transversal inicial.

e = deformación ingenieril.

L = Longitud entre marcas calibras instantánea.

L_0 = Longitud inicial entre marcas calibradas.

Debido a que la curva esfuerzo-deformación ingenieril no considera la variación que se genera en el área de la sección transversal de la probeta durante el ensayo, es necesario determinar la curva esfuerzo-deformación real, la cual considera tanto el cambio en la sección transversal como en la deformación con las siguientes ecuaciones:

$$\sigma = S \cdot (1 + e) \quad (2.8)$$

$$\varepsilon = \ln(1 + e) \quad (2.9)$$

De esta forma llevando a escala log-log la curva esfuerzo-deformación real da como resultado una relación lineal, donde el factor de endurecimiento por deformación es la pendiente de la línea recta obtenida en escala log-log.

2.4.2 Porcentaje de reducción de área (%R).

Otra forma de caracterizar una o varias operaciones de embutido y que esta estrechamente vinculada con la relación de embutición es el porcentaje de reducción de área, donde:

$$\%R = \frac{D - d_p}{D} \cdot 100 \quad (2.10)$$

D = Diámetro de Desarrollo

d_p = Diámetro de punzón

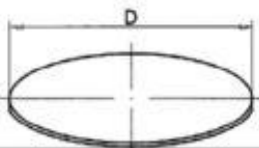
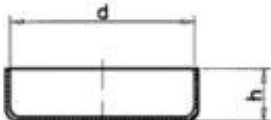
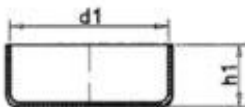
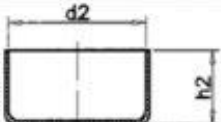
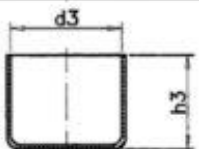
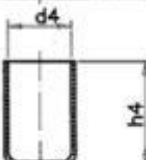
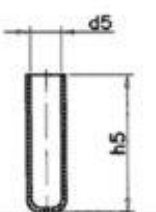
Esta reducción se puede aplicar siguiendo la sugerencia que hace Wick, C., et al. (1984).: para el primer embutido, la reducción máxima de la forma inicial debe ser de 40 a 45%; para el segundo embutido (primer reembutido), la reducción máxima debe ser 30%; para el tercer embutido (segundo reembutido), la reducción máxima de ser 16%.

En el apéndice B se puede apreciar valores recomendados de estas variables críticas según diversos autores y asociaciones internacionales.

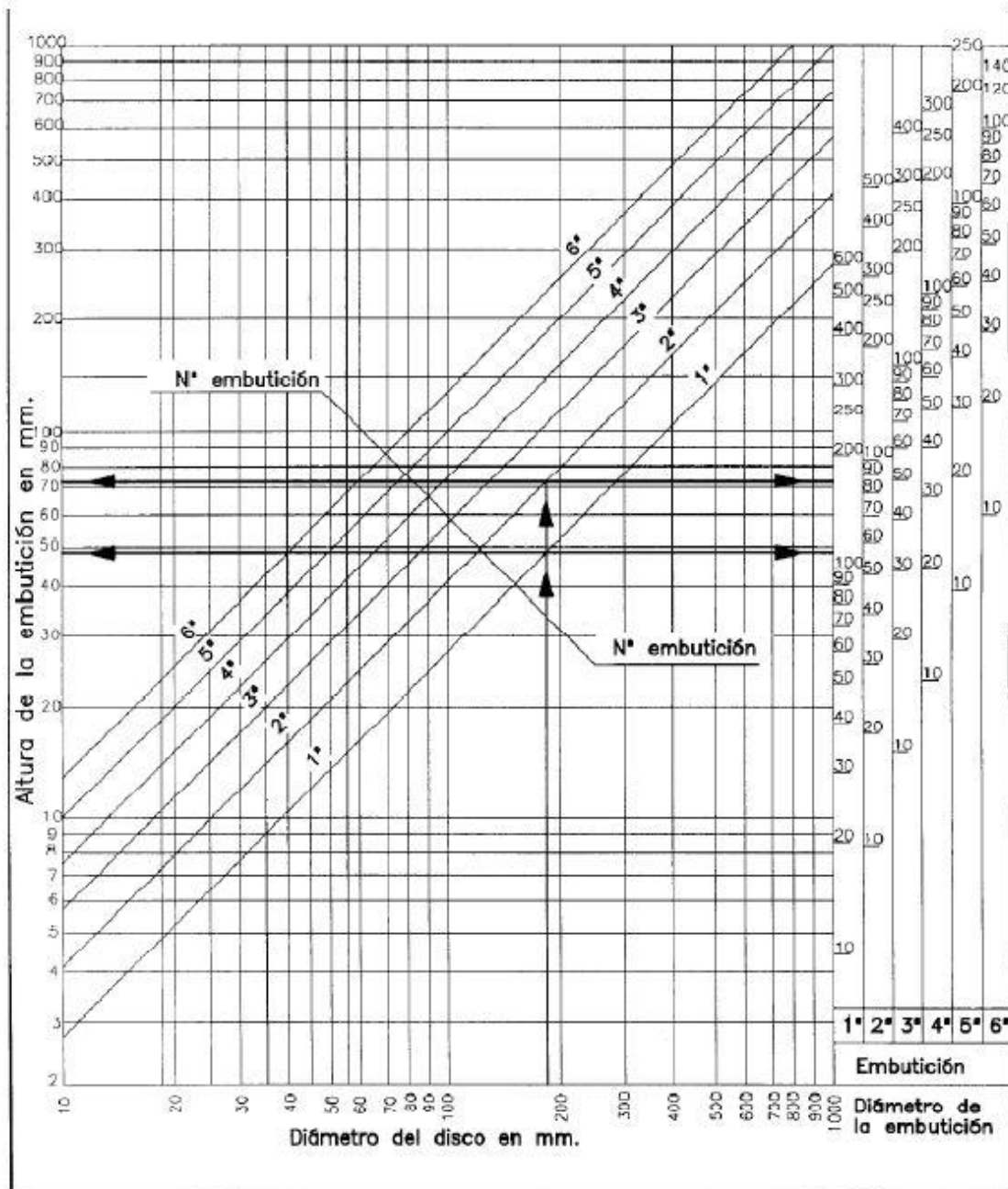
2.4.3 Métodos alternativos para calcular el número de operaciones de embutido.

Para complementar los métodos de obtener el número de operaciones de embutido, la Fundación ASCAMM (Asociación Catalana de Empresas de Moldes y Matrices) sugiere los siguientes métodos:

Tabla 2.1. Determinación del número de embuticiones y la altura (ASCAMM)

FASE Nº	PASOS FORMA CILÍNDRICA	DIMENSIONES DEL VASO	
		DIÁMETRO	ALTURA
CORTAR DISCO		$D = \sqrt{d^2 + 4dh}$	
1ª		$d = 0,6 D$	$h = 0,266 D$
2ª		$d_1 = 0,48 D$	$h_1 = 0,401 D$
3ª		$d_2 = 0,384 D$	$h_2 = 0,555 D$
4ª		$d_3 = 0,307 D$	$h_3 = 0,737 D$
5ª		$d_4 = 0,245 D$	$h_4 = 0,959 D$
6ª		$d_5 = 0,196 D$	$h_5 = 1,225 D$

El método gráfico como se aprecia en la gráfica 2.1, se traza una línea vertical en el valor correspondiente al diámetro del disco o desarrollo, luego se irán comprobando los diámetros y las alturas a cada lado de la gráfica, hasta hallar el más aproximado a la pieza que se necesite fabricar.



Grafica 2.1. Método gráfico para calcular el numero de embuticiones (ASCAMM)

2.4.4 Juego entre punzón y matriz (W).

Es un parámetro a tener en cuenta a la hora de ejecutar el proceso de embutido, ya que por experiencia se ha demostrado que a medida que este factor aumenta, el esfuerzo causado por el contacto entre punzón y matriz disminuye considerablemente. Si el juego es muy elevado traería como consecuencia deformaciones en el perfil de la pared, desviaciones en la trayectoria del punzón y formación de ondulaciones en el borde de la pieza embutida, por otra parte si el juego es menor al espesor de la chapa a embutir, se producirá un aplastamiento o adelgazamiento de la pared que puede causar rotura del material.

Por consiguiente, el valor del juego debe estar bien determinado. Aunque este aspecto no esté todavía bien resuelto teóricamente, pueden aplicarse, en general, las siguientes ecuaciones. Según *Wassilieff (1966)*:

$$W = t + 0,02\sqrt{10t} \quad \text{Para Aluminio} \quad (2.11)$$

$$W = t + 0,07\sqrt{10t} \quad \text{Para aceros} \quad (2.12)$$

$$W = t + 0,04\sqrt{10t} \quad \text{Para metales no ferrosos} \quad (2.13)$$

$$W = t + 0,2\sqrt{10t} \quad \text{Para aleaciones resistentes a altas temperaturas} \quad (2.14)$$

2.4.5 Redondeo de la matriz de embutición (r_m).

El radio de embutición tiene una importancia muy grande, tanto para la calidad de las piezas como para la distribución de los esfuerzos. Esta influencia del radio de la matriz se ve más claro comparando los dos casos extremos:

- Haciendo $r_m = 0$, la matriz de embutición se transforma en una matriz de corte, ya que la chapa está guiada al máximo y será taladrada por el punzón sin sufrir deformaciones alguna.

- Haciendo r_m máximo, es decir $r_m = \frac{D-d_p}{2}$, la chapa no será retenida en absoluto por el pisador y la embutición no será posible a causa de la formación de los pliegues. De este modo es necesario admitir que el valor conveniente del radio debe encontrarse entre estos dos límites.

$$0 < r_m < \frac{D-d_p}{2} \quad (2.15)$$

Sin embargo, este problema no está resuelto del todo, por lo que se han propuesto varias soluciones con base experimental. Para el aluminio y sus aleaciones, que poseen características mecánicas más débiles, se toma el radio un poco mayor al 10%. (*Wassilieff, 1966*):

$$r_m = 0,9\sqrt{(D-d)t} \quad (2.16)$$

2.4.6 Redondeo del punzón (r_p).

Cuando se observa el comportamiento de la chapa en la matriz por efecto del punzón, es fácil comprobar que se produce un simple plegado de la chapa alrededor de este. Si el punzón posee un radio menor al radio de la matriz se puede producir un perforado de la chapa a embutir. Para evitar el riesgo de que ocurra una perforación de la chapa el radio de este debe ser de 3 a 5 veces mayor al radio de la matriz.

$$5t < r_p < 0,3d \quad (2.17)$$

2.4.7 Velocidad de Embutición (V_e).

Por velocidad de embutición se entiende que es la velocidad que tiene el carro de la prensa en el momento de entrar el punzón en contacto con el material, es decir, cuando empieza la operación de embutición. En la Tabla 2.2 se puede observar velocidades óptimas para diversos materiales.

Tabla 2.2 Velocidad de embutición recomendada para diferentes materiales.

(Fuente: ASCAMM)

Material	Velocidad (m/min)
Aluminio	30
Latón	45
Acero inoxidable y aleaciones con alto contenido de níquel	12
Acero	18
Zinc	22

2.4.8 Lubricación.

La lubricación es un parámetro importante que se aplica para reducir (o controlar) la fricción. Un buen lubricante logra mucho más que reducir la fricción, separa las superficies de la matriz y de la pieza de trabajo y evita la adhesión con sus efectos secundarios indeseables sobre la herramienta; además previene el daño de la pieza de trabajo y el desgaste de la matriz, asimismo, controla el acabado superficial de la pieza producida. El lubricante no debe ser tóxico ni alérgico y debe aplicarse y removerse con facilidad; sus residuos no deben interferir con las operaciones subsecuentes o causar corrosión (Schey, 2002).

Los lubricantes deben proporcionar muchos requerimientos para ser usados en operaciones de producción, tales como:

- Viscosidad apropiada en el rango de temperaturas y operaciones de trabajo.
- Compatibilidad química y física con el material de trabajo y el de la matriz.
- De fácil aplicación, removible y a disposición

Los aceites comunes, pueden proveer lubricación, resistencia a la fricción y protección a la corrosión, pero no pueden ser diluidos y no ofrecen una disipación adecuada del calor en algunas aplicaciones. Los aceites

solubles pueden eliminar más calor de la interface de la herramienta/pieza de trabajo y son diluibles. Los lubricantes sintéticos ofrecen óptima compatibilidad post-proceso, ya que permite a los estampadores soldar y pintar partes estampadas sin tener que remover el lubricante (Schey, 2002).

A pesar de esta tendencia general, es necesario que el lubricante sea adecuado a la naturaleza de la chapa, ya que por ejemplo el aluminio tiende a adherirse al acero de las herramientas y por consiguiente puede causar defectos en el material de ensayo.

Tabla 2.3 Lubricantes a usar en la embutición en relación al material a deformar. (Rossi, 1979)

Tipo de trabajo	Tipo de lubricación	Lubricante a usar			
		Aceros al carbono	Aceros inoxidables y aleados	Aluminio	Cobre, latón, bronce
Embutición poco profunda	Hidrosoluble	Pasta de grasa, jabón y polvo lubricante	-	-	Jabón líquido, o pasta de grasa y jabón no pigmentada
	Oleosoluble	Aceite de base clorada	Aceite de base clorada	Aceite de base clorada	Aceite graso sulfurado
Embutición profunda	Hidrosoluble	Polvo granular jabonoso	-	-	Pasta de grasa, jabón y polvo lubricante
	Oleosoluble	Aceite graso	Aceite de base clorada	Aceite de base clorada	Aceite graso sulfurado

2.3.9 Presión del prensa lámina (P).

La función que cumple el prensalámina es básicamente impedir la formación de pliegues en el borde o brida de la chapa primitiva mediante la acción de una presión uniforme en la superficie de la misma. Si la presión es demasiado grande, la chapa podría quedar retenida por el exceso de fricción y consecuentemente podría producirse la rotura del material a embutir y si es muy pequeña puede causar la aparición de pliegues o sinuosidades alrededor de la brida que de igual forma puede ocasionar rotura del material a la altura

del radio de embutición de la matriz (*Wassilieff, 1966*). Teniendo en cuenta estos escenarios se propone un cálculo aproximado de esta variable:

$$p_1 = p \cdot \frac{(D^2 - d_p^2)}{(D_1^2 - d_p^2)} \quad (2.18)$$

p = Presión media (para el aluminio 0.12 Kg / mm²).

D = Diámetro de desarrollo.

d_p = Diámetro del punzón.

2.5 Embutición sin prensalámina.

Con matrices de embutición normales, solamente pueden embutirse sin prensa lámina piezas que tengan poca profundidad de embutición, es decir, con pequeña relación de embutición R_e , como por ejemplo; envases de crema para los zapatos y sus tapas. La altura de pared lateral h que puede conseguirse sin prensa lámina es función del espesor de la chapa t y del diámetro de embutición d , y cumple con la siguiente igualdad empírica (*Oehler-Kaiser, 1977*):

$$h \leq 0.3 \sqrt[3]{d_p^2} \sqrt{t} \quad (2.19)$$

2.6 Fuerza máxima para embutir (F_{max}).

Determinar el valor de la fuerza ejercida por el émbolo en el proceso de embutición resulta siempre como el más difícil y menos convincente. Se pretende exponer una ecuación que ofrezca la posibilidad de determinar fácilmente la fuerza necesaria para embutir un determinado disco de chapa metálica, una estimación aproximada de esta se puede obtener de la ecuación propuesta por *Wassilieff (1966)* donde:

$$F_{maxW} = \pi \cdot t \cdot d_p \cdot S_u \cdot m \quad (2.20)$$

m = Coeficiente dependiente de la relación entre el diámetro del punzón y diámetro de desarrollo.

S_u = Esfuerzo último de tracción del material.

Tabla 2.4 Valores de m en función de d/D (Wassilieff 1966).

D_p/D_b	0,55	0,57	0,6	0,62	0,65	0,67	0,7	0,72	0,75	0,77	0,8
m	1,00	0,93	0,86	0,79	0,72	0,66	0,6	0,55	0,5	0,45	0,4

Otro modelo para determinar la fuerza máxima es el de Groover (1997):

$$F_{maxG} = \pi \cdot d_p \cdot t \cdot S_u \cdot \left(\frac{D}{d_p} - 0.7 \right) \quad (2.21)$$

2.7 Defectos que aparecen al embutir.

Hay una gran cantidad de factores que influyen en el proceso de embutición que pueden ocasionar defectos representativos en el producto terminado. A continuación; se trata de resumir los defectos que aparecen con demasiada frecuencia.

2.7.1 Líneas de fluencia.

Las líneas de fluencia, también denominadas líneas de lüders, aparecen frecuentemente en la zona límite de alargamiento, según la forma de la pieza y el comportamiento anisótropo del material que hace que se inicie la deformación plástica en algunas zonas mientras que en otras todavía no ha aparecido.

2.7.2 Recuperación elástica.

Las diferentes durezas del material dan lugar a un comportamiento distinto durante la operación de embutición. La magnitud de recuperación en el proceso de embutición depende de la resistencia del material, de la relación r_m/t y la reducción de diámetro.

En piezas que son simétricas respecto a un eje, la determinación de este factor es notablemente más sencilla que en piezas no simétricas, como por ejemplo; las de carrocería, en donde las variaciones en las dimensiones originales por el efecto de retroceso elástico son especialmente molestas. Las piezas que al ser embutidas sufren un adelgazamiento de sus paredes no muestran este efecto de retroceso.

2.7.3 Defectos presentados por la chapa metálica.

La aparición de tales defectos ocurre muy raramente en la práctica de este proceso. Se detectan fácilmente en aquellas zonas en donde la pieza ha sufrido relativamente pocas sollicitaciones durante la embutición y a pesar de ello aparece una rotura. Entran en este grupo los defectos originados por la introducción de cuerpos extraños durante el embutido al fluir el material por encima del redondeo de la matriz de embutición.

2.7.4 Chapa de poca calidad.

Naturalmente las chapas de poca calidad no pueden embutirse correctamente aunque las etapas o número de operaciones se hayan determinado correctamente. La señal característica de que la calidad de la chapa no es la adecuada consiste en la formación de fisuras en la dirección de embutición y la aparición de sinuosidades.

2.7.5 Punzón descentrado.

En la figura 2.6 se puede apreciar como el punzón está descentrado en una medida “e” con respecto a la matriz de embutición, de tal forma que las piezas embutidas se rompen por “a”, o sea, en la zona más estrecha del juego de embutición. Este inconveniente puede corregirse rápidamente desplazando la matriz de embutido.

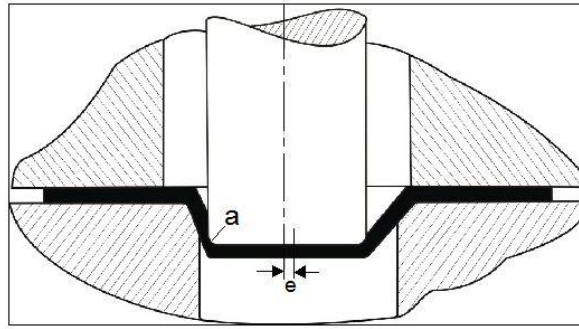


Figura 2.6 Disposición descentrada del eje del punzón con respecto a la matriz de embutición. (Oehler-Kaiser, 1977)

2.7.6 Inclinación del punzón.

Más difícil de reconocer es el desplazamiento debido a la inclinación del punzón con respecto a la matriz de embutición, tal como la figura 2.7, donde se ha exagerado dicha inclinación, incluso los ángulos " ε " muy pequeños dan origen a piezas defectuosas que se rompen por "c". una característica de estas piezas rotas es el abombado de la parte de la pared lateral "d".

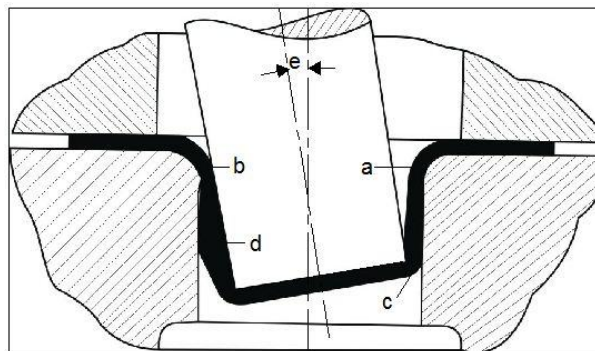


Figura 2.7 Disposición inclinada de eje del punzón con respecto a la matriz de embutido. (Oehler-Kaiser, 1977)

2.7.7 Desgarro del fondo en todo su perímetro.

Las causas que motivan este defecto en piezas embutidas; se deben a una excesiva velocidad de embutición, o bien a una presión excesiva del prensalámina. La figura 2.8 presenta una forma de fisura típica producida por un punzón cuya arista tiene un redondeado excesivamente agudo.



Figura 2.8 Pieza embutida desgarrada en el fondo. (Fuente: ASCAMM).

2.7.8 Formación de flecos en el borde lateral.

Generalmente son tres las causas que motivan u ocasionan conjuntamente la aparición de este defecto. Debido a una presión insuficiente del prensa lamina y a un redondeado demasiado grande de la arista de embutición; se forman pliegues que se aplanan en el interior de la pared lateral, pero que, debido al aumento de espesor no pueden continuar aplastándose hacia el borde superior de la pared, de modo que al finalizar el prensado a través de la matriz de embutición, originan esfuerzos excesivos en la arista de embutición, los cuales a menudo causan daños en los envases.



Figura 2.9 Pieza con flecos alrededor de los bordes superiores (Fuente: ASCAMM).

2.7.9 Formación regular de sinuosidades.

Una señal distintiva que indica que una chapa es poco apta para la embutición, es la formación característica de sinuosidades en el borde de las piezas embutidas de chapas anisótropas. Las sinuosidades presentan cuatro crestas a 90° extendidas por el contorno del borde, debido a esto, en piezas delgadas se recorta posteriormente el borde y en las piezas de pared gruesa se tornea o se rectifica. En la figura 2.10 se puede observar un ejemplo de las sinuosidades regulares que a menudo aparecen en las piezas.



Figura 2.10 Pieza con sinuosidades en el borde superior de embutición (Fuente: ASCAMM).

2.7.10 Formación irregular de sinuosidades.

En los casos que la chapa presenta diferencias de espesor, las sinuosidades aparecen por encima del contorno del borde. Generalmente la formación de sinuosidades sin que se produzca un aumento de altura del borde carece de importancia, puesto que ha menudo la parte superior de los envases se corta para garantizar una línea prolija alrededor del mismo.

2.7.11 Formación de labios en el borde de la pared lateral.

La consecuencia inmediata de un juego de embutición excesivo es la aparición de un labio en el borde superior de la pared lateral, así también como un abombado de la misma como se puede observar en la figura 2.11.



Figura 2.11 Formación de un labio en el borde de una pieza embutida. (Fuente: ASCAMM).

2.7.12 Estrangulamiento en el borde del fondo.

En las piezas embutidas de paredes gruesas y con poco redondeado en el fondo aparece un estrangulamiento alrededor de este, que tiene relación con un pequeño debilitamiento de la pared en dicho lugar. Este defecto se hace más evidente cuando el juego de embutición es mayor de lo normal.

2.8. Punzonado.

El punzonado involucra el corte de una lámina de metal a lo largo de una línea cerrada en un solo paso para separar la pieza del material circundante. La parte que se corta es el producto deseado en la operación y se designa como la parte o pieza deseada.

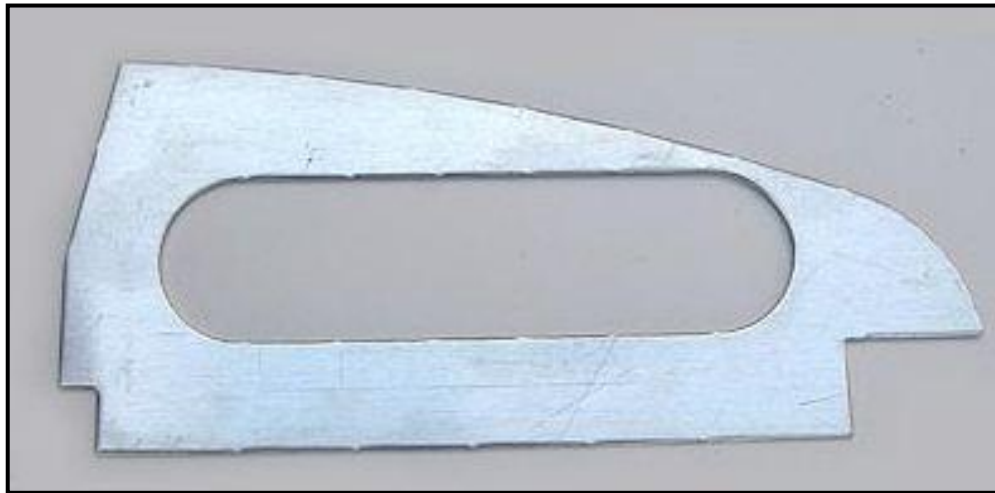


Figura 2.12. Punzonado de aluminio

2.9 Parámetros de diseño en el punzonado.

2.9.1 Claro:

Es la distancia entre el punzón y la matriz, las holguras típicas varían entre 4 y 8% del espesor (t) de la lámina metálica. La holgura correcta depende del tipo de material y de su espesor, esta se puede calcular a partir de la siguiente expresión:

$$c = at \quad (2.22)$$

Donde los valores aproximados de “a” se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 2.5. Tolerancias de corte para distintos grupos de materiales. (Cabello S. 2009).

Grupo metálico	Tolerancia, “a”
Aleaciones de aluminio, todos los temple 1100S y 5052S.	0,045
Aleaciones de aluminio 2024T y 6061ST; latón, todos los temple; acero suave laminado en frio; acero inoxidable en frio.	0,060
Acero laminado en frio, dureza media; acero inoxidable, dureza media y alta	0,075

En general los valores calculados para la holgura se pueden aplicar al punzonado convencional y las operaciones de perforado de agujeros para determinar el tamaño adecuado del punzón y de la matriz.

2.9.2 Dimensión del dispositivo de corte (punzón y matriz):

Debido a la geometría del borde del cizallado, la dimensión exterior de la pieza que se corta será más grande que el tamaño del agujero. Por tanto, el tamaño del punzón y de la matriz para una forma o pieza redonda de diámetro D_b , se determina como sigue:

$$\text{Diametro de la matriz de corte de formas} = D_b \quad (2.23)$$

$$\text{Diametro del punzon de corte de formas} = D_b - 2c \quad (2.24)$$

2.9.3 Estimación de la fuerza teórica de corte:

La importancia de la determinación de la fuerza de corte radica en la selección de la prensa necesaria. La fuerza de corte F en el corte de láminas puede determinarse como:

$$F_c = \tau \cdot L_b \cdot t \quad (2.25)$$

Donde τ es la resistencia al corte de la lámina, t es el espesor del material y L_b es la longitud del borde o el perímetro de la forma que se corta. En general cuando no se tiene información sobre la resistencia al corte del material, se puede estimar como:

$$\tau = 0,7 Su \quad (2.26)$$

Donde Su es la resistencia última a tracción.

Las fuerzas de corte se pueden reducir dando un ángulo de inclinación o de corte a él punzón en el perforado. La fuerza de corte corregida se puede estimar de la siguiente manera:

Primero determinar el trabajo hecho en el punzonado usando la expresión:

$$W_p = F_c \cdot d \quad (2.27)$$

Donde F_c , es la carga de corte calculada a partir de la expresión (D.2) y d , corresponde a la distancia de acción de la carga, que es igual al espesor de la lamina (t) multiplicada fracción de penetración antes de la fractura.

Entonces la fuerza real de corte se reduce por efecto del rebaje al siguiente valor:

$$F_{corregida} = \frac{W}{d+d_c} \quad (2.28)$$

Siendo d_c el rebaje del punzón.

CAPÍTULO 3

Marco Metodológico

Este capítulo comprende los lineamientos y procedimientos para el desarrollo de la investigación aportando aspectos y características en el diseño de los dispositivos a construir y apoyándose en algunos parámetros fundamentales desarrollados por algunos autores, incluye además la descripción del ensamblaje de las partes que conforman el dispositivo así como también una descripción del procedimiento a seguir para realizar los ensayos de embutición y re-embutición. Se plantean una a una las actividades a seguir para cumplir con los objetivos específicos propuestos.

3.1. Diseño y construcción del dispositivo de embutición cilíndrica y de punzonado.

3.1.1 Generalidades.

Para la realización de los dispositivos y ensayos se tomaron las siguientes consideraciones generales:

- **Equipos a utilizar:** Para la ejecución de los ensayos se dispone un equipo universal de ensayos ubicado en el Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, el cual posee una capacidad de trabajo de 20 toneladas, con una velocidad máxima de 20 mm/min, una altura entre cabezales de 500 mm y una apreciación de 0,1 Kgf.

- **Dimensiones del dispositivo de embutido:** Para el diseño del dispositivo de embutido se estableció como dimensión del envase final un diámetro de 45 mm sin ninguna restricción en la altura del envase para garantizar la ejecución del proceso en dos etapas sucesivas.

- **Dimensiones del dispositivo de punzonado:** Para el diseño de este dispositivo se estableció como dimensión del producto final un disco de 90 mm de diámetro, con el cual se definirán las características dimensionales del dispositivo.

- **Material a utilizar:** Para la construcción del dispositivo de embutido y punzonado se utilizaron dos tipos de materiales: el Acero 5115 por tener alta resistencia al desgaste y el Acero 1045 por ser utilizado ampliamente en elementos de maquinas que requieran mediana resistencia mecánica. Para la realización de los ensayos de embutido el material utilizado fue la aleación de aluminio 3003-H14 de 0,3 mm de espesor.

3.1.2. Selección del material para herramientas.

En la selección del material, es necesario considerar que se deben resistir los esfuerzos generados durante el proceso y el desgaste que implique el mismo, en ese sentido se consultó la lista de materiales ofrecidos por la empresa SUMINDU C.A. En la cual se recomienda para este tipo de procedimientos las aleaciones descritas en la tabla 3.1 y 3.2:

Tabla 3.1 Propiedades mecánicas del acero 5115. (www.sumindu.com.ve)

Aleación	Esfuerzo último	Esfuerzo de Fluencia	Dureza	Aplicación	Descripción
Acero 5115	1043 MPa	824 MPa	163 HB	Se aplica en elementos de maquinarias que requieran alta resistencia al desgaste y buena tenacidad en el núcleo.	Es un acero de cementación de baja aleación al Cromo-Níquel. buena tenacidad en el núcleo y Alta resistencia al desgaste superficial

Tabla 3.2 Propiedades mecánicas del acero 1045. (www.sumindu.com.ve).

Aleación	Esfuerzo último	Esfuerzo de Fluencia	Dureza	Aplicación	Descripción
Acero 1045	620 MPa	415 MPa	201 HB	Elementos de maquinas que requieran de medianas propiedades mecánicas a bajo costo. Ejes, pernos, engranajes, cadenas, etc.	Es un acero de construcción de medio carbono utilizado ampliamente en elementos de maquinarias que requieran mediana resistencia mecánica y tenacidad a bajo costo. Buena maquinabilidad. Responde fácilmente al tratamiento térmico.

3.1.3. Parámetros de diseño en el proceso de embutido y re-embutido.

En esta etapa de la metodología fue necesario tener en cuenta que uno de los objetivos substanciales de esta investigación, es el de adicionar una etapa de re-embutido al proceso básico de embutido, en ese sentido a la hora del diseño del proceso se estableció como criterio principal el hecho de que las dimensiones como diámetro de desarrollo y diámetros sucesivos de los envases así como relación de embutición y porcentaje de reducción de área debían consentir la posibilidad de realizar esta segunda etapa. Es por ello que se planteó un dimensionamiento de estas variables de tal forma que superaran los parámetros que en teoría y según algunos autores son los límites para la factibilidad del proceso en una sola etapa.

Dicho esto, un posible dimensionamiento de las variables citadas anteriormente, Diámetro de desarrollo (D) y diámetro final (d), fueron:

- a) *Diámetro de desarrollo = 90 mm*
- b) *Diámetro final = 45 mm*

Cabe destacar en este punto que una de las razones por las que se usaron estas dimensiones, era poder garantizar que el herramental necesario

fuese lo bastante pequeño para facilitar la realización de los ensayos en cuanto a ergonomía del proceso se refiere, ya que a medida que el dispositivo se hace más grande, el montaje del mismo en el equipo universal de ensayos es indudablemente más tedioso. Por otra parte tal dimensionamiento es lo suficientemente grande para poder apreciar de manera efectiva y relevante todo el proceso en cada una de sus fases.

A continuación se calcularon las variables consideradas críticas en el proceso:

a) Relación de Embutido.

De la ecuación 2.4 se sabe que la relación de embutido es:

$$Re = \frac{D}{d} = \frac{90mm}{45mm} = 2$$

Siguiendo lo mencionado en el capítulo II, hay autores que aseveran que un límite superior de la relación de embutición para completar el proceso en una sola etapa es, precisamente un valor de 2, sin embargo no es conveniente en esta investigación tocar estos valores límites, pues por ser de carácter experimental es apropiado dejar cierto trecho entre los mismos.

b) Porcentaje de reducción de área.

Según la ecuación 2.10 el porcentaje de reducción de área en embutido puede calcularse como:

$$\%R = \frac{D - d}{D} \times 100 = \frac{90mm - 45mm}{90mm} \times 100$$

Resultando:

$$\%R = 50\%$$

Comparando este valor con las bases teóricas descritas en el capítulo II que afirman que este porcentaje debe ser menor a 50 %, se hace innegable el hecho de que supera el límite para un proceso de embutición simple. De esta manera ambos resultados respaldan el dimensionamiento de diámetro de

desarrollo y diámetro final al apoyar teóricamente el surgimiento de la etapa adicional de embutido.

Luego de obtener estos resultados se fijó como norte del diseño, obtener un envase de 0,3 mm de espesor y 45 mm de diámetro, partiendo de un diámetro de desarrollo de 90 mm sin restricción alguna para la altura o profundidad del producto.

3.1.3.1. Primera etapa de embutido (Embutido simple).

a) Diámetro del primer envase (d_1).

En la primera etapa se decidió proceder con una relación de embutido igual a 1,5 debido a que este valor es relativamente inferior al límite máximo recomendado teóricamente para esta fase del proceso. Entonces despejando el valor de diámetro final del primer envase (d_1) de la ecuación 2.4 se obtuvo:

$$d_1 = \frac{D}{R_e}$$

Al sustituir el valor de desarrollo (D) y relación de embutición (R_e) establecidos:

$$d_1 = \frac{90mm}{1,5}$$

Entonces el diámetro del envase será:

$$d_1 = 60 \text{ mm}$$

b) Redondeo de la matriz de embutición 1 (r_{m1}).

Utilizando la ecuación 2.16 presentada por (Wassilieff, 1966), se recomienda para aleaciones de aluminio por sus características mecánicas el siguiente valor de redondeo:

$$r_{m1} = 0,9\sqrt{(D - d_1) \times t}$$

Sustituyendo los valores de diámetro de desarrollo (D), diámetro final del primer envase (d_1) y espesor de chapa (t) la ecuación se convierte en:

$$r_{m1} = 0,9\sqrt{(90mm - 60mm) \times 0,3mm}$$

Resultando entonces un valor de redondeo para la matriz de la primera etapa, es el siguiente:

$$r_{m1} = 2,7 \text{ mm}$$

c) Diámetro interno de la matriz de embutición 1 (D_{m1}).

Para los ensayos de esta primera fase fue necesario que la matriz tuviera características similares a las del recipiente, de tal manera que funcionara como molde para lograr las dimensiones deseadas, para tal fin el diámetro de la matriz de la primera etapa fue definido de la siguiente manera:

$$D_{m1} = d_1 \quad (3.1)$$

Es decir, el diámetro de la primera matriz es idéntico al diámetro final del primer envase:

$$D_{m1} = 60mm$$

d) Holgura entre punzón y matriz (W_1).

Para calcular la holgura entre el punzón y la matriz de la primera etapa se utilizó la ecuación 2.11, como sigue:

$$W = t + 0,02\sqrt{10t}$$

Cuando se sustituye el espesor de chapa del material (t) la ecuación se transforma en:

$$W_1 = 0,3 + 0,02\sqrt{10 \times 0,3}$$

Generando:

$$W_1 = 0,33mm$$

e) Diámetro del punzón de la primera etapa (D_{p1}).

El diámetro del punzón de la primera etapa debe considerar la holgura existente entre punzón y matriz para que exista un correcto ensamblaje de todos los elementos del dispositivo y para garantizar el flujo de la chapa sin restricción a lo largo de la matriz durante el ensayo. Ver figura 3.1.

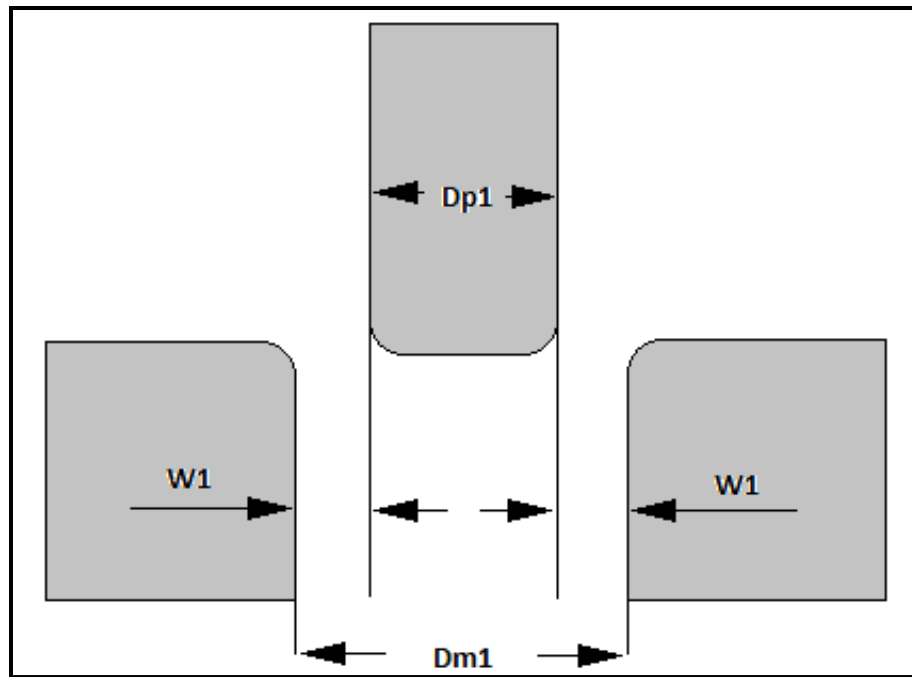


Figura 3.1. Esquema de holgura entre punzón y matriz de la primera etapa (W_1).

Comprendida esta aclaratoria, el diámetro del punzón de la primera etapa (D_{p1}) se calculó por medio de la siguiente ecuación:

$$D_{p1} = D_{m1} - 2(W_1) \quad (3.2)$$

Sustituyendo el valor de la holgura (W_1) y el diámetro de la matriz (D_{m1}) en la ecuación 3.2 se obtiene:

$$D_{p1} = 60 - 2 \times 0,33$$

De manera que el diámetro del punzón de la primera etapa fue:

$$D_{p1} = 59,34 \text{ mm}$$

f) Redondeo del punzón de la primera etapa (r_{p1}).

El redondeo del punzón de la primera etapa debe estar comprendido entre los siguientes límites, según la ecuación 2.17:

$$5 \times t < r_{p1} < 0,3 \times d_1$$

Si se sustituye el espesor de chapa ($t = 0,3 \text{ mm}$) y el diámetro del primer envase ($d_1 = 60 \text{ mm}$) los límites para este parámetro son:

$$1,5 \text{ mm} < r_{p1} < 18 \text{ mm}$$

Se consideró adecuado utilizar un valor por debajo del promedio entre ambos límites (*Valor promedio* = $9,75 \text{ mm}$) ya que si se compara con las medidas de los elementos antes calculados es inapropiado o excesivo, así que se llegó a la decisión de optar por la mitad de este promedio, a demás en este punto es apropiado traer a consideración la recomendación de algunas empresas especializadas en procesos de fabricación de latas cuyo aporte a la investigación fue la aprobación de este redondeo y de otros parámetros del dispositivo. Tal como se ubica en la Figura 3.2

Entonces el redondeo del punzón 1 (r_{p1}) fue:

$$r_{p1} = \frac{\text{Valor promedio}}{2} = \frac{9,75}{2} \text{ mm}$$

$$r_{p1} = 4,5 \text{ mm}$$

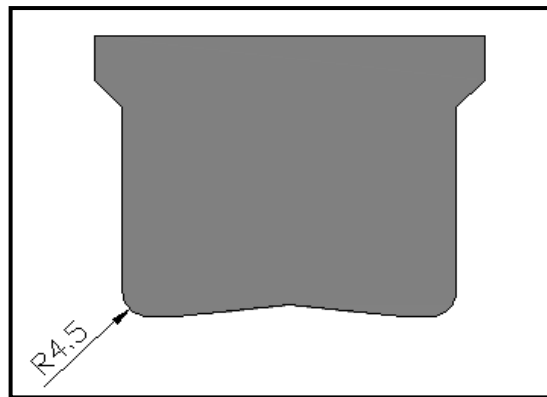


Figura 3.2. Redondeo del punzón.

g) Altura o profundidad de envase en la primera etapa (h_1).

Siguiendo la ecuación 2.3 se tiene:

$$D = \sqrt{d_1^2 + 4d_1h_1}$$

Luego al sustituir los valores pertinentes de desarrollo (D) y diámetro del primer envase (d_1) en la expresión:

$$90mm = \sqrt{(60mm)^2 + 4(60mm)h_1}$$

Despejando la profundidad (h_1):

$$h_1 = 18,75 \text{ mm}$$

h) Fuerza máxima teórica según Wassilieff para la primera etapa (F_{max1W}).

En el cálculo de la carga máxima de embutición con este modelo es necesario resaltar el esfuerzo último que tiene el material de ensayo (Aluminio 3003-H14), el cual según la tabla A-1 del apéndice A es:

$$S_u = 20,29 \text{ Kg}f/mm^2$$

Luego el modelo para calcular esta carga por este método se define según la ecuación 2.20 aplicada a la primera etapa como:

$$F_{max1W} = \pi \cdot t \cdot D_{p1} \cdot S_u \cdot m$$

Y sustituyendo los valores correspondientes de espesor de chapa (t), esfuerzo último (S_u), diámetro de punzón 1 (D_{p1}) y el parámetro m ubicado en la tabla 2.1 resulta la siguiente expresión:

$$F_{max1W} = \pi \times 0,3mm \times 59,34mm \times 0,69 \times 20,29 \frac{Kg}{mm^2}$$

Entonces el valor teórico de la carga máxima según (Wassilieff, 1966):

$$F_{max1W} = 782,97 \text{ Kg}f$$

i) Fuerza máxima teórica según Groover para la primera etapa (F_{max1G}).

La fuerza máxima de embutido según este modelo se define según la ecuación 2.21 como:

$$F_{max1G} = \pi \cdot D_{p1} \cdot t \cdot S_u \cdot \left(\frac{D}{D_{p1}} - 0.7 \right)$$

Al sustituir los valores de diámetro de desarrollo, diámetro del punzón, espesor de chapa y esfuerzo último a tensión, la ecuación se convierte en:

$$F_{max1G} = \pi \cdot 59,34mm \cdot 0,3mm \cdot 20,29 \frac{Kgf}{mm^2} \cdot \left(\frac{60mm}{59,34mm} - 0.7 \right)$$

$$F_{max1G} = 353,05 Kgf$$

Es notable la diferencia entre estos dos modelos, puesto que el valor de la fuerza máxima de embutido según este último autor es aproximadamente la mitad del valor de la fuerza obtenido con la primera relación, más adelante se establecerá según los resultados obtenidos en la práctica cual de los dos modelos se acerca más a la realidad experimental de este caso específico.

3.1.3.2. Segunda etapa de embutido (Re-embutido).

Desarrollado el diseño de la primera etapa del proceso, se procedió en este segmento de la metodología al cálculo de los parámetros teóricos que se necesitan para completar la segunda etapa del procedimiento y evaluar las condiciones de los ensayos que fueron establecidas previamente en los objetivos de la investigación.

Para el desarrollo de esta fase del proceso fue necesario acudir a recomendaciones teóricas desarrolladas por diversos autores ilustrados en el marco teórico de este trabajo. Pues esta etapa no es tan sencilla como la

primera ya que el material esta previamente endurecido por deformación y con características mecánicas totalmente distintas a las iniciales.

No está demás expresar en este momento que el enfoque de este trabajo no es precisamente el de desarrollar experimentalmente, qué parámetros como relación de embutición o porcentaje de reducción de área son los adecuados para el éxito de esta etapa, pues este es un proceso de fabricación cuyas características ya se han estudiado y experimentado en infinidad de investigaciones previas así como en textos académicos e industriales. En ese sentido vale acotar también que el principio fundamental de la investigación es específicamente estudiar y analizar el proceso en distintos escenarios de lubricación.

Dicho esto, este diseño se desarrolló de la siguiente manera:

a) Cálculo del porcentaje de reducción de la segunda etapa (% R_2).

Para el cálculo de este valor se recomienda no exceder el 30% de reducción (Groover, 1997), pero como se mencionó anteriormente en el diseño de la primera etapa, no es conveniente tomar los valores teóricos límites como una medida razonable de manera que el valor de este parámetro se fijó como sigue:

$$\%R_2 = 25 \%$$

Este porcentaje se tomó como información base para el cálculo del resto de los parámetros involucrados en el diseño.

b) Diámetro final del envase a obtener en la segunda etapa (d_2).

Partiendo del diámetro final del primer envase (d_1), que en este caso es el diámetro inicial de esta etapa y adecuándose a la reducción establecida, el diámetro del segundo envase (d_2) según la ecuación 2.10 es:

$$\%R_2 = \frac{d_1 - d_2}{d_1} \cdot 100$$

Sustituyendo los valores correspondientes de diámetro 1 (d_1), porcentaje de reducción 2 ($\%R_2$) y despejando resulta:

$$d_2 = 45mm$$

c) Relación de embutido 2 (R_{e2}).

Según la ecuación la ecuación 2.4 la relación de embutición para esta etapa resultó:

$$R_{e2} = \frac{60mm}{45mm} = 1,33$$

d) Redondeo de la matriz en la segunda etapa (r_{m2}).

Para la segunda etapa el valor del redondeo de la matriz según la ecuación 2.15:

$$r_{m2} = \frac{60mm - 45mm}{2}$$
$$r_{m2} = 7,5mm$$

Según la teoría este valor es un límite superior para este parámetro por lo que se consideró adecuado optar por un redondeo de:

$$r_{m2} = 3 mm$$

e) Diámetro interno de la matriz de re-embutido (D_{m2}).

Usando el mismo criterio de la primera etapa, el diámetro de la matriz de embutición resultó:

$$D_{m2} = 45 mm$$

f) Holgura entre punzón y matriz de la segunda etapa (W_2).

Experimentalmente se ha determinado en investigaciones previas que luego de aplicar la primera etapa de embutido, el espesor de chapa se vuelve poco uniforme en algunas zonas del envase producto de la deformación

sufrida por el mismo durante el proceso, sin embargo estas discrepancias son mínimas por lo que no estaría fuera de la realidad si se asume espesor constante en ambas etapas.

Entonces si se sabe que la holgura entre punzón y matriz según la ecuación 2.11 depende explícitamente del espesor de chapa, el valor del mismo sería idéntico al calculado en la primera etapa:

$$W_2 = 0,3mm + 0,02\sqrt{10 \times 0,3mm}$$

$$W_2 = 0,33mm$$

g) Diámetro del punzón de la segunda etapa (D_{p2}).

De la misma manera en que se calculó para la primera etapa, el diámetro del segundo punzón resultó:

$$D_{p2} = 45mm - 2 \times 0,33mm$$

$$D_{p2} = 44,34 mm$$

h) Redondeo del punzón de la segunda etapa (r_{p2}).

Al igual que para la primera etapa, es decir usando el mismo criterio:

$$5 \times t < r_{p2} < 0,3 \times d_2$$

$$1,5 mm < r_{p2} < 13,5 mm$$

Ya que en esta etapa el material esta endurecido por deformación, el criterio para obtener este parámetro fue el de evitar a toda costa curvaturas o aristas pronunciadas en el troquel que pudiesen generar rotura del material por efecto de esfuerzos cortantes, es decir, mientras más grande sea este redondeo se le hará más fácil al material fluir a lo largo de la matriz durante la realización de los ensayos.

Entonces pensando en esto, el valor de redondeo del punzón en la segunda etapa fue:

$$r_{p2} = 7 mm$$

Aunque está por debajo del promedio de ambos límites, en comparación con la primera etapa es un valor bastante mayor.

i) Altura teórica del segundo envase (h_2).

La altura o profundidad de esta etapa se calculó con la ecuación 2.4 y resulto lo siguiente:

$$D = \sqrt{d^2 + 4dh_2}$$

$$90mm = \sqrt{(45mm)^2 + 4(45mm)h_2}$$

$$h_2 = 33,75 \text{ mm}$$

J) Fuerza teórica necesaria para realizar la segunda etapa según Wassilieff (F_{max2W}).

$$F_{max2W} = \frac{5}{4} \times F_{max1W}$$

$$F_{max2W} = \frac{5}{4} \times 782,97 \text{ Kgf}$$

$$F_{max2W} = 978,71 \text{ Kgf}$$

3.1.4 Parámetros de diseño en el proceso de punzonado del disco de desarrollo.

a) Cálculo del Claro (c).

Sustituyendo los valores de tolerancia (a) y espesor (t) correspondiente en la ecuación 2.22 resulta:

$$c = 0,06 \cdot 0,3$$

$$c = 0,018 \text{ mm}$$

b) Cálculo del diámetro de la matriz de punzonado.

El diámetro de la matriz debe establecer el diámetro requerido en el proceso, Según la ecuación 2.23:

$$\text{Diametro de la matriz} = 90 \text{ mm}$$

c) Cálculo del diámetro del punzón de corte.

Según la ecuación 2.24. El diámetro del punzón es:

$$\text{Diametro del punzon} = 90 - (2 \cdot 0,018)$$

$$\text{Diametro del punzon} = 89,964 \text{ mm}$$

d) Fuerza de corte teórica para realizar el punzonado (F_c).

Utilizando la ecuación 2.26. Y sustituyendo el esfuerzo último del aluminio, la resistencia al corte del material resulta:

$$\tau = 0,7 \cdot \left(199,07 \frac{N}{mm^2} \right)$$

$$\tau = 139,34 \frac{N}{mm^2}$$

Luego calculando la longitud de corte:

$$L_c = 2\pi r = 2 \cdot \pi \cdot 45 \text{ mm}$$

$$L_c = 282,74 \text{ mm}$$

Finalmente la fuerza de corte teórica según la ecuación 2.25. Es:

$$F_c = 139,34 \frac{N}{mm^2} \cdot 282,74 \text{ mm} \cdot 0,3 \text{ mm}$$

$$F_c = \frac{11819,86 \text{ N}}{9,81 \frac{m}{s^2}}$$

$$F_c = 1204,88 \text{ Kgf}$$

3.1.5. Diseño y cálculos resistentes para las piezas del dispositivo de embutido.

Luego de haber definido las dimensiones y geometría de los elementos, se procedió a realizar el estudio resistivo del dispositivo para evitar posibles fallas durante la realización de los ensayos.

a) Cálculos resistentes del punzón de embutido.

Esta pieza se encuentra sometida a esfuerzos de compresión pura, por lo cual el esfuerzo permisible se obtuvo, como sigue:

$$\sigma_1 = \frac{F_{max1W}}{A} \times N$$

Donde “F” es la fuerza a la que se encuentra sometida la pieza, “A” el área transversal de la misma y “N” factor de seguridad igual a 1.5

$$\sigma_1 = \frac{782,97 \text{ Kgf}}{\pi \times (29,67\text{mm})^2} \times 1,5$$

$$\sigma_1 = 0,42 \frac{\text{Kgf}}{\text{mm}^2}$$

b) Cálculos resistentes del punzón de re-embutido.

$$\sigma_2 = \frac{F_{max2W}}{A} \times N$$

$$\sigma_2 = \frac{978,71 \text{ Kgf}}{\pi \times (22,5\text{mm})^2} \times 1,5$$

$$\sigma_2 = 0,92 \frac{\text{Kgf}}{\text{mm}^2}$$

A partir del esfuerzo de fluencia del acero usado para la construcción de los punzones (Acero 5115), que corresponde a $83,99 \text{ Kgf/mm}^2$ y al hacer la comparación con el esfuerzo permisible obtenido para el primer punzón, es de notar que este es superado en gran medida por el primero, por lo tanto se puede afirmar que el punzón soporta los esfuerzos máximos a compresión presentes en el proceso de embutición, es decir:

$$S_y > \sigma_1$$

$$83,99 \frac{\text{Kgf}}{\text{mm}^2} > 0,42 \frac{\text{Kgf}}{\text{mm}^2}$$

De la misma manera si se compara con el esfuerzo permisible obtenido para el segundo punzón resulta:

$$S_y > \sigma_2$$

$$83,99 \frac{Kgf}{mm^2} > 0,92 \frac{Kgf}{mm^2}$$

c) Cálculo Resistente del Conjunto Matriz-Portamatriz.

Se sabe que por el diseño del dispositivo existe un alto esfuerzo de contacto plano entre la matriz de la primera etapa y el portamatriz (Ver figura 3.3) por lo que se utilizó la teoría de Hertz para esfuerzos de contacto con áreas definidas, planteada en (Norton, 1999), en este caso la fuerza a considerar es la necesaria para realizar la segunda etapa de embutido, pues es la mayor entre las dos etapas, como sigue:

$$\sigma_{contacto} = \frac{F_{max}}{A_{contacto}} \times N$$

$$\sigma_{contacto} = \frac{978,71 Kgf}{\pi \times [(90mm)^2 - (70mm)^2]} \times 1,5$$

$$\sigma_{contacto} = 0,14 \frac{Kgf}{mm^2}$$

Este valor de contacto se cumple para ambas matrices de embutición.

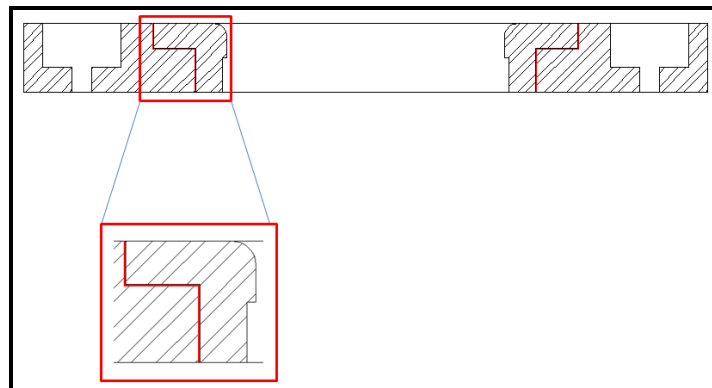


Figura 3.3. Contacto entre matriz y portamatriz.

En el caso de la matriz y porta matriz, el parámetro influyente es el contacto entre ambos al momento de realizar los ensayos, puesto que se debe evitar algún tipo de soldadura entre ellas causada por la presión ejercida. Entonces la dureza del mismo debió ser mayor al esfuerzo de contacto, de la tabla 3.2 se tiene que la dureza del acero AISI 1045 es 201 HB lo que garantiza que el material no falla. Sintetizando:

$$Dureza > \sigma_{contacto} \rightarrow 201 \frac{Kgf}{mm^2} > 0,11 \frac{Kgf}{mm^2}$$

3.1.6. Diseño y cálculos resistentes para las piezas del dispositivo de punzonado.

Ya definidas las dimensiones de las piezas del dispositivo de punzonado se procedió a realizar el estudio resistivo de ellas para evitar posibles fallas durante la realización de los ensayos.

a) Cálculo resistente del punzón de corte.

Esta pieza se encuentra sometida a esfuerzos de compresión pura, por lo cual el esfuerzo permisible que se tiene:

$$\begin{aligned} \sigma_c &= \frac{F_c}{A} \times N \\ \sigma_c &= \frac{1204,88 \text{ Kgf}}{\pi \times (44,982 \text{ mm})^2} \times 1,5 \\ \sigma_c &= 0,28 \frac{Kgf}{mm^2} \end{aligned}$$

Para el caso de este punzón también se utilizó el Acero 5115, que tiene un esfuerzo de fluencia de 83,99 Kgf /mm² y comparándolo con el esfuerzo permisible obtenido, se puede apreciar que este es superado en gran medida por el esfuerzo de fluencia, por lo que se puede afirmar que el punzón soporta los esfuerzos máximos a compresión presentes en el proceso de punzonado, es decir:

$$S_y > \sigma_c$$

$$83,99 \frac{Kgf}{mm^2} > 0,28 \frac{Kgf}{mm^2}$$

3.1.7. Construcción, mecanizado y ensamble de las piezas del dispositivo de embutido.

a) Mecanizado del Punzón de la primera etapa.

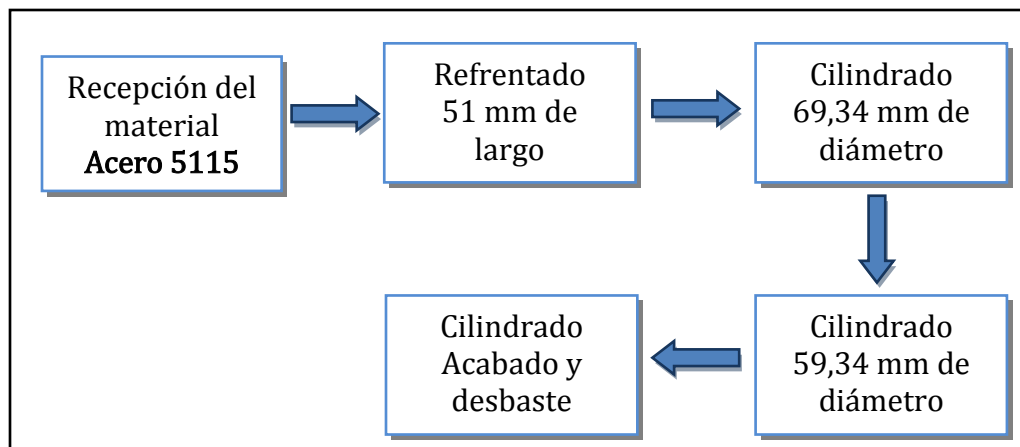


Figura 3.4. Etapas del mecanizado del punzón.

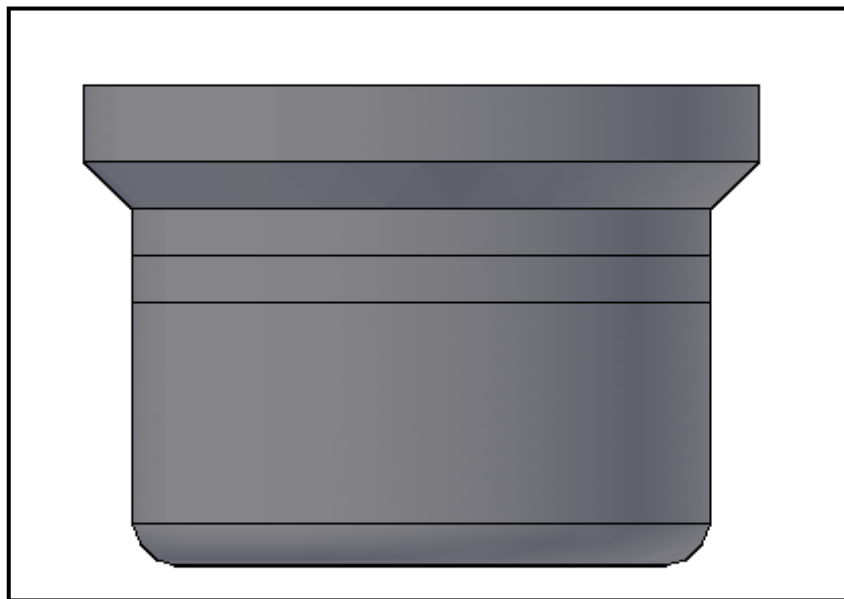


Figura 3.5. Diseño del punzón.

b) Mecanizado del Punzón de re-embutido.

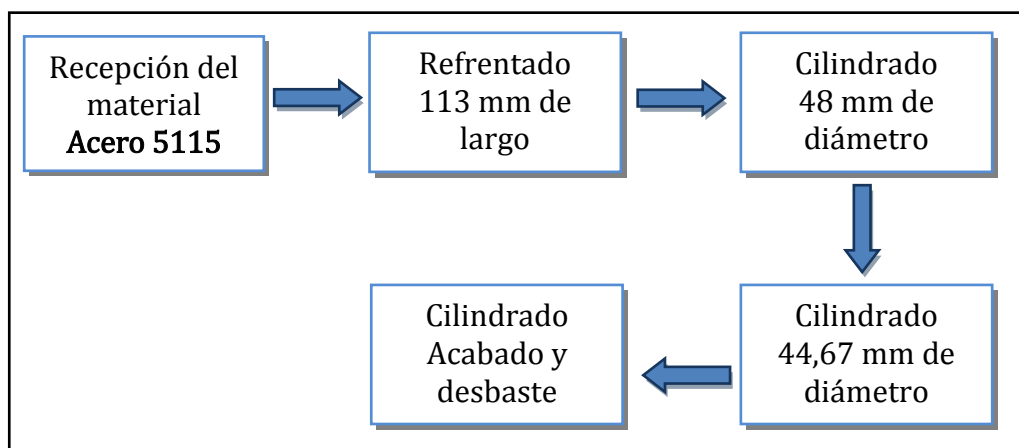


Figura 3.6. Etapas del mecanizado del punzón.

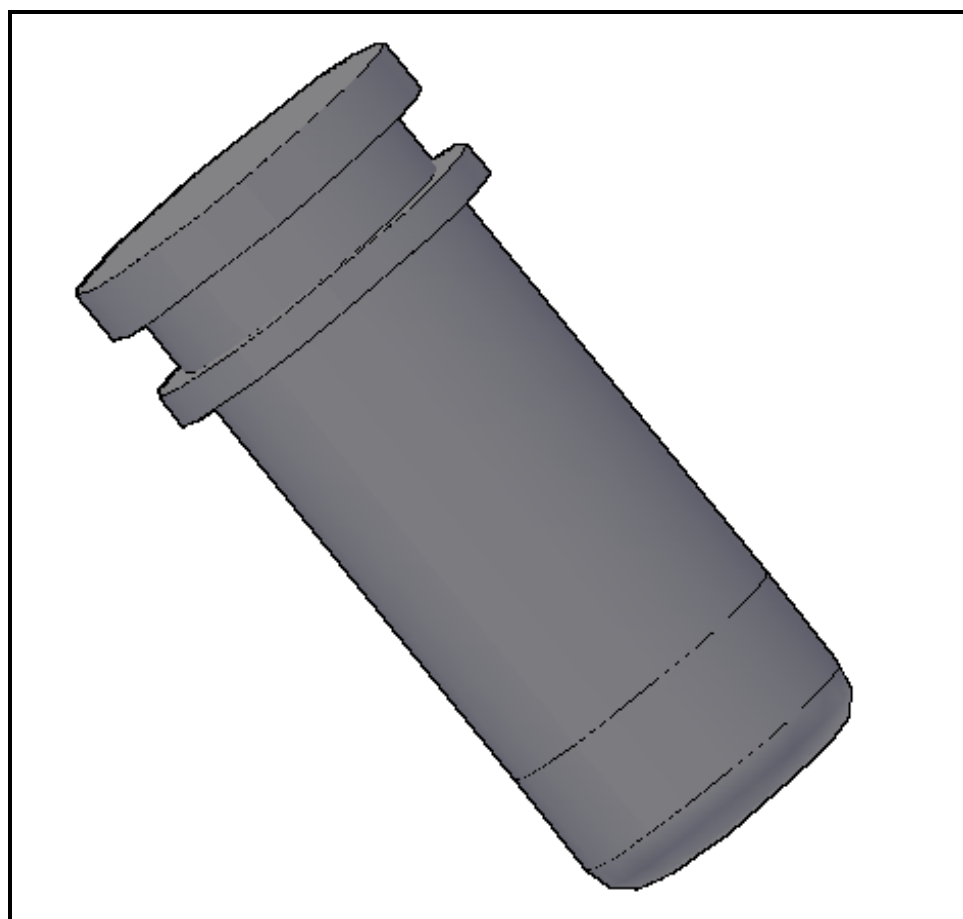


Figura 3.7. Diseño del punzón.

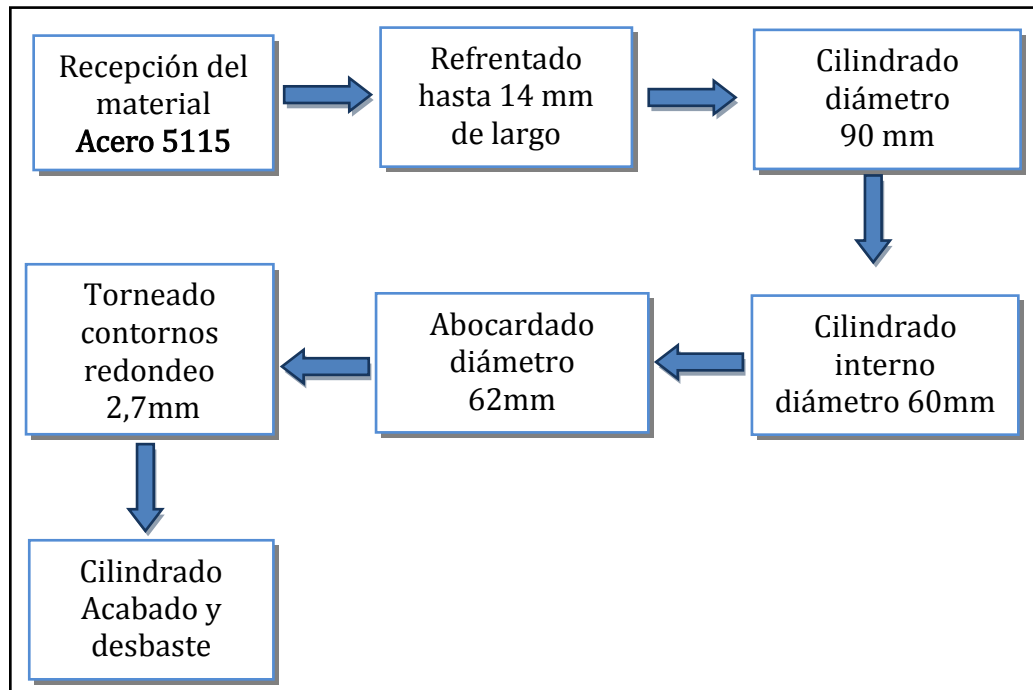
c) Mecanizado de matriz de la primera etapa.

Figura 3.8. Etapas del mecanizado de la matriz.

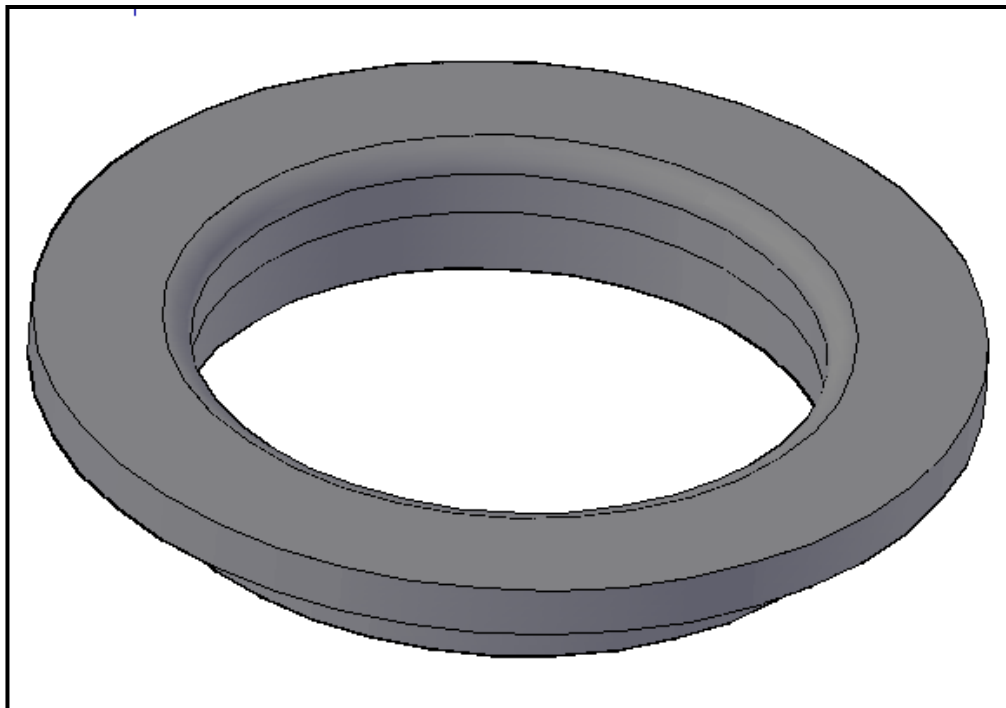


Figura 3.9. Diseño de la matriz.

d) Mecanizado de matriz de re-embutido.

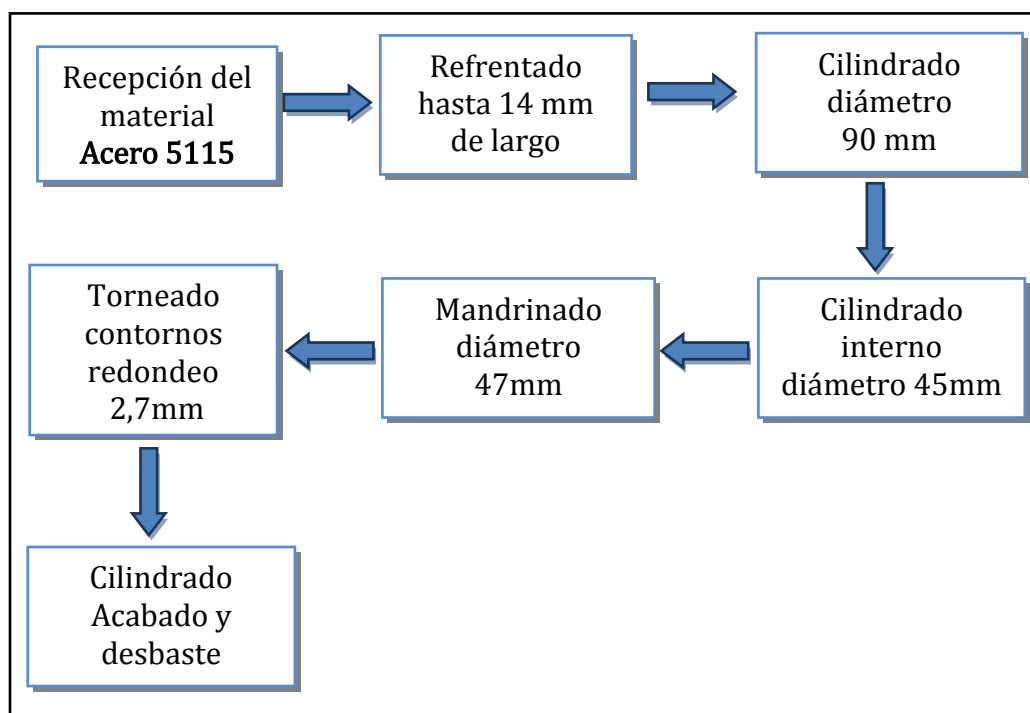


Figura 3.10. Etapas del mecanizado de la matriz.

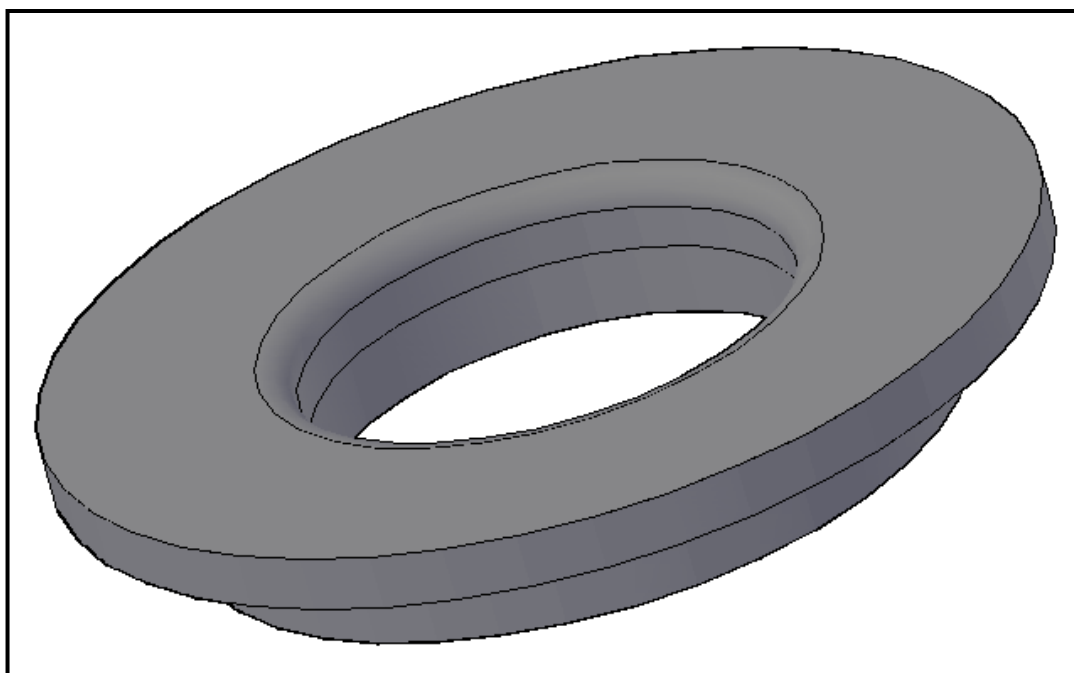


Figura 3.11. Diseño de la matriz.

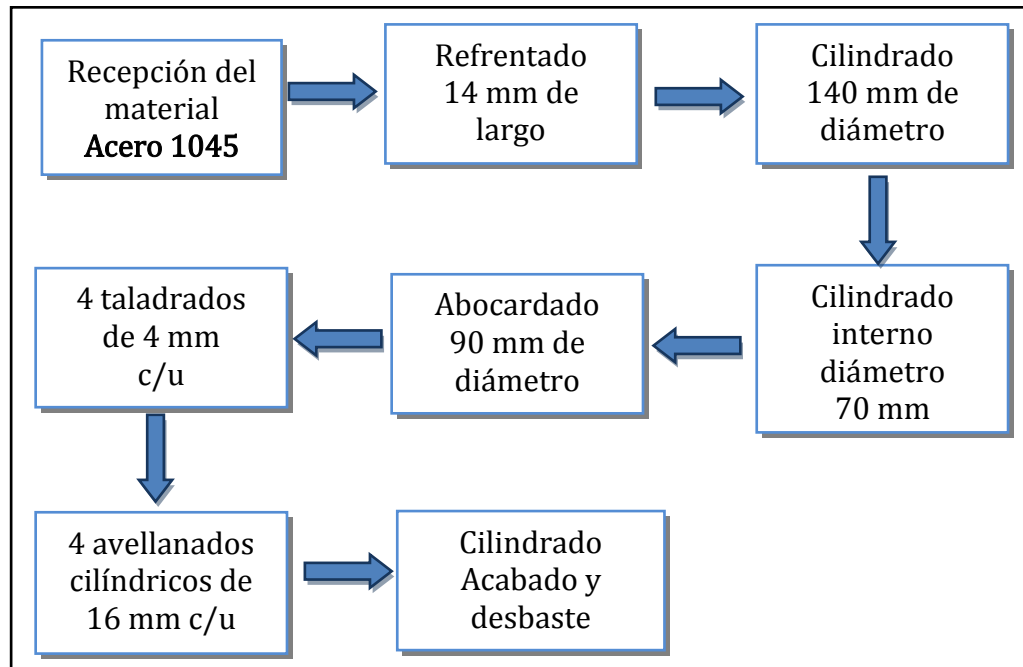
e) Mecanizado del porta matriz.

Figura 3.12. Etapas del mecanizado del porta matriz.

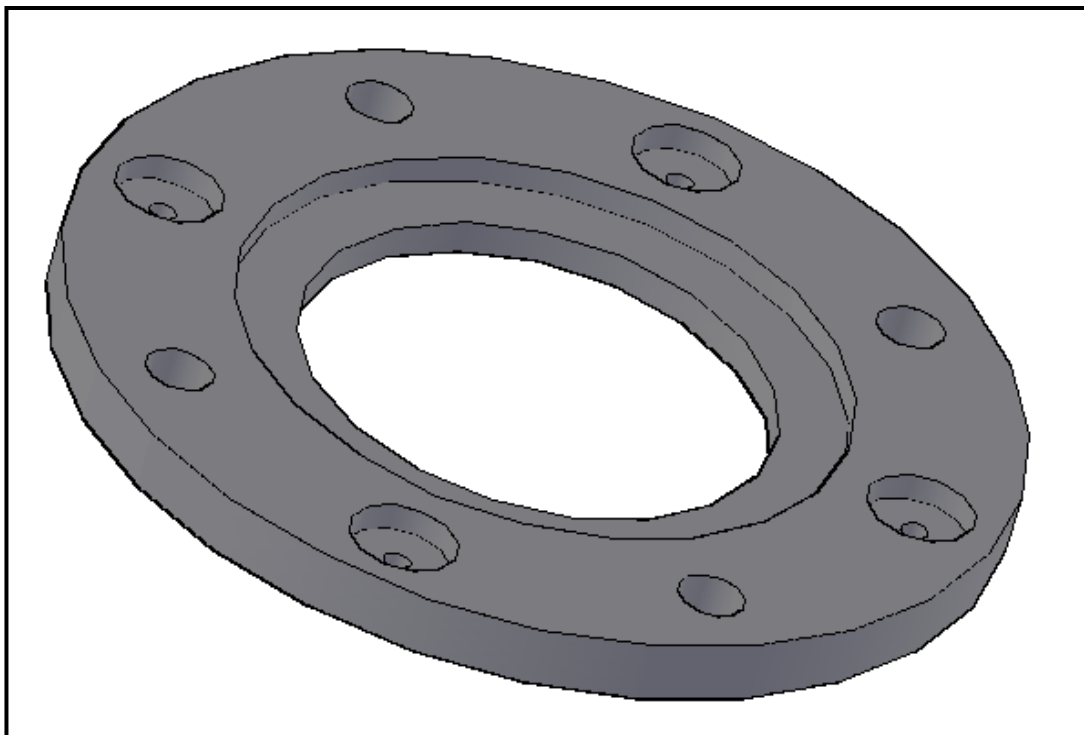


Figura 3.13. Diseño del porta matriz.

f) Mecanizado del prensalámina de la primera etapa.

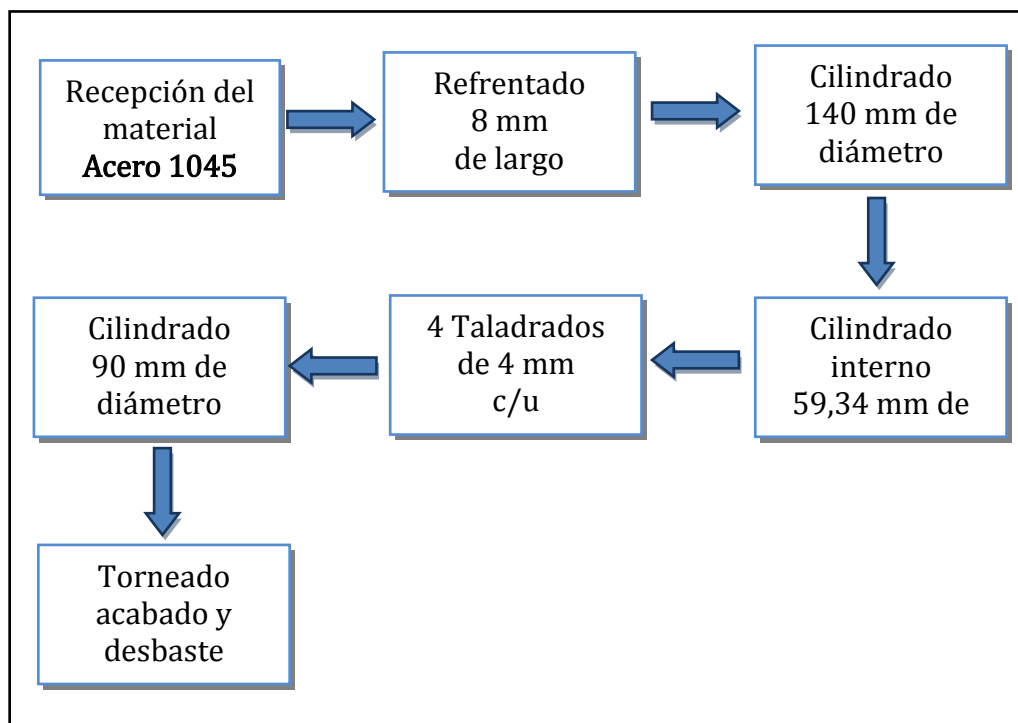


Figura 3.14. Mecanizado del prensalámina.

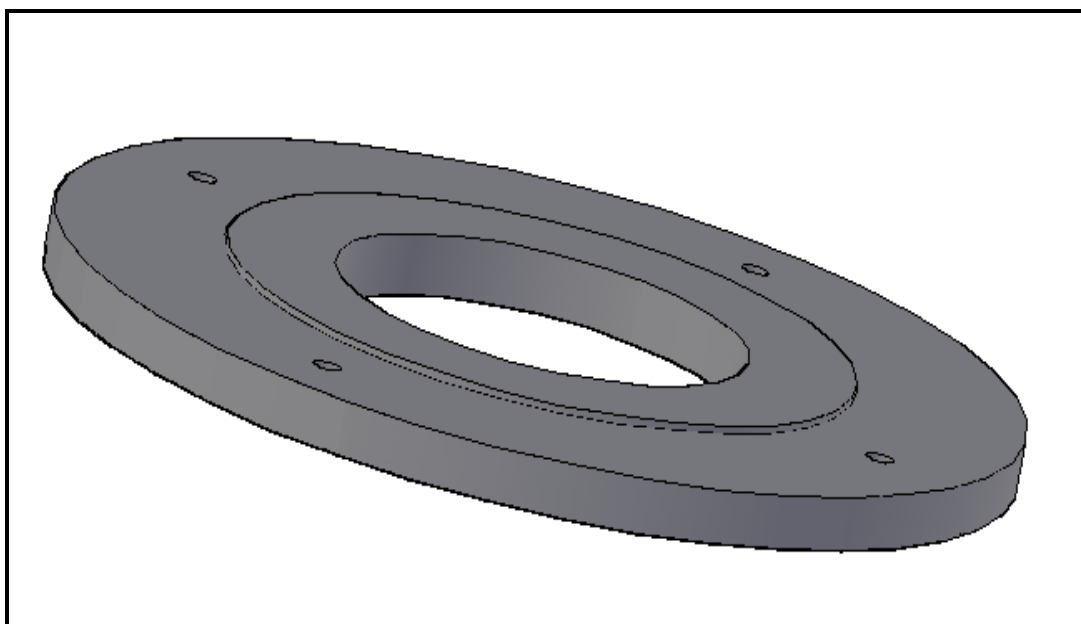


Figura 3.15. Diseño del prensa lamina

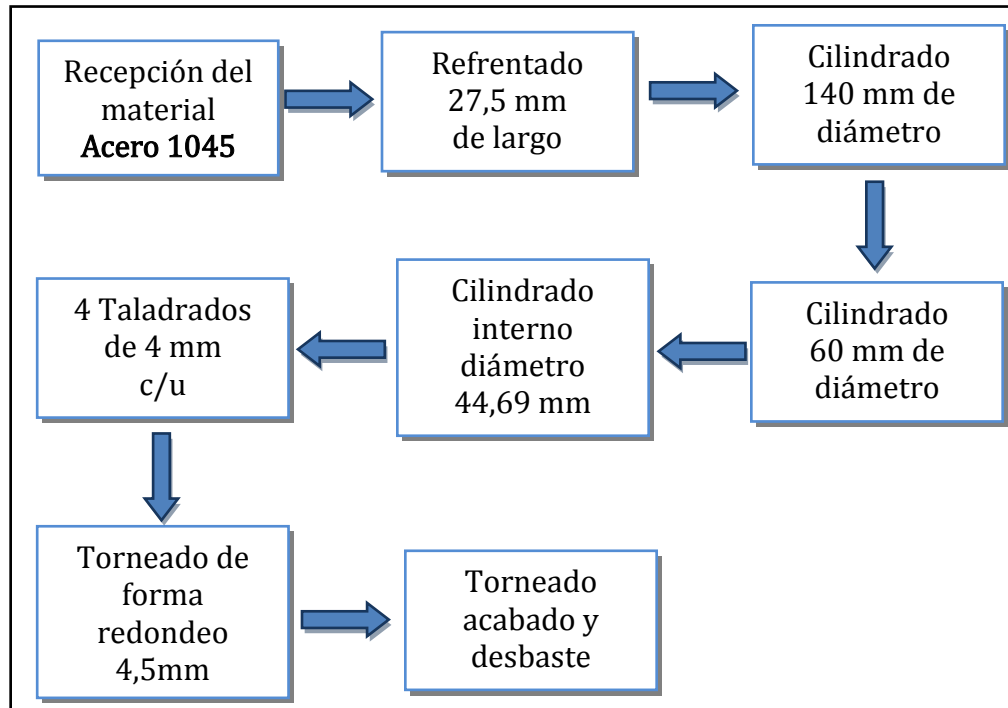
g) Mecanizado del prensalámina para la segunda etapa.

Figura 3.16. Etapas del mecanizado del prensalámina.

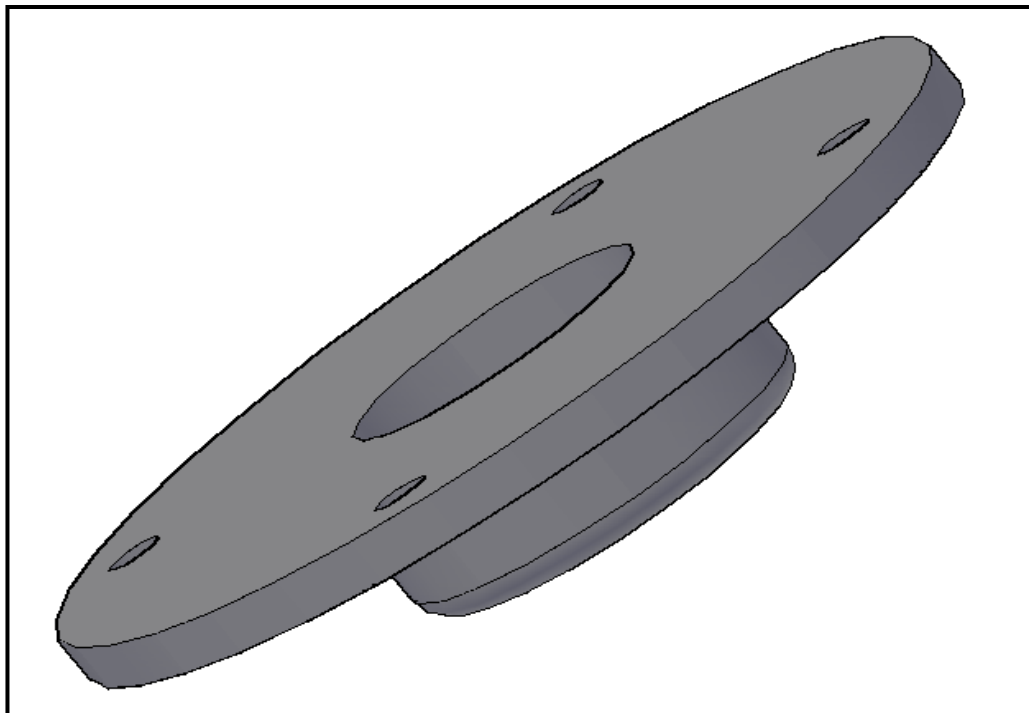


Figura 3.17. Diseño del prensalámina

3.1.8. Construcción, mecanizado y ensamble de las piezas del dispositivo de punzonado.

a) Mecanizado del punzón.

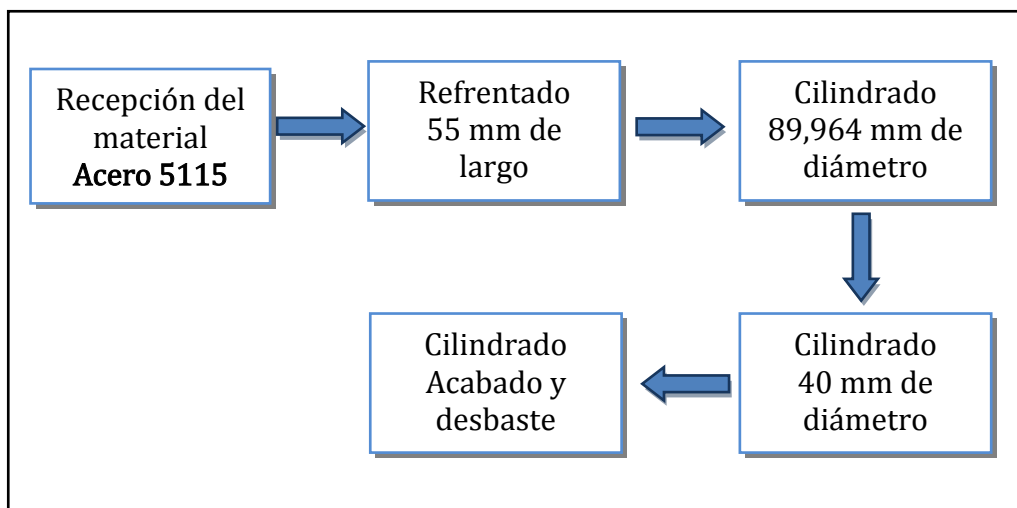


Figura 3.18. Etapas de mecanizado del punzón.

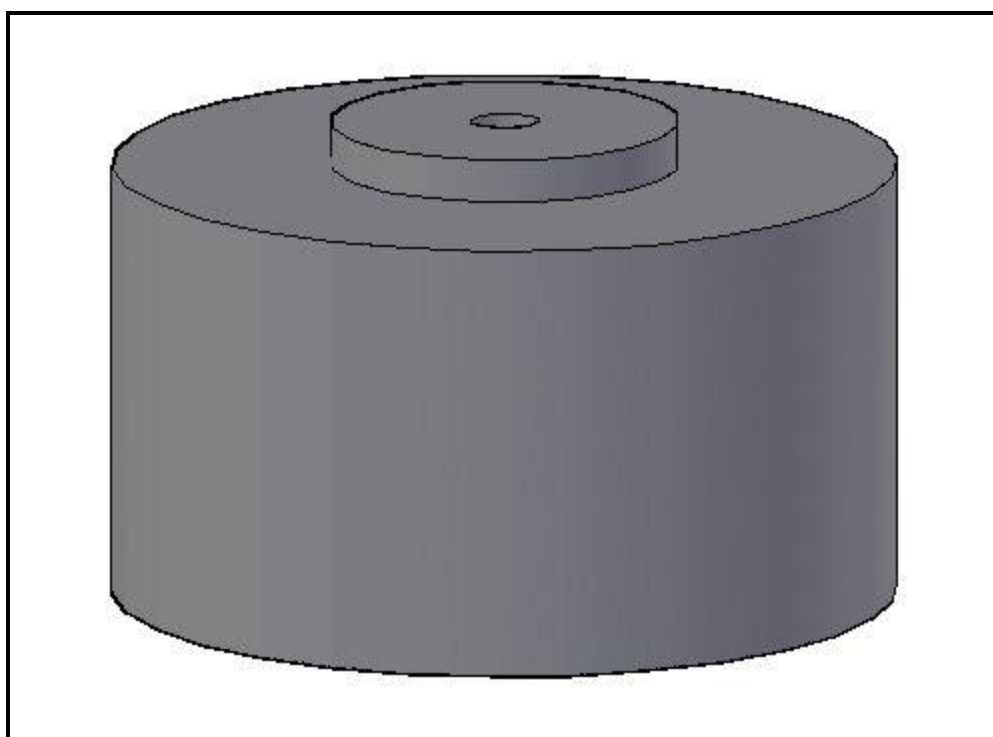


Figura 3.19. Diseño del punzón.

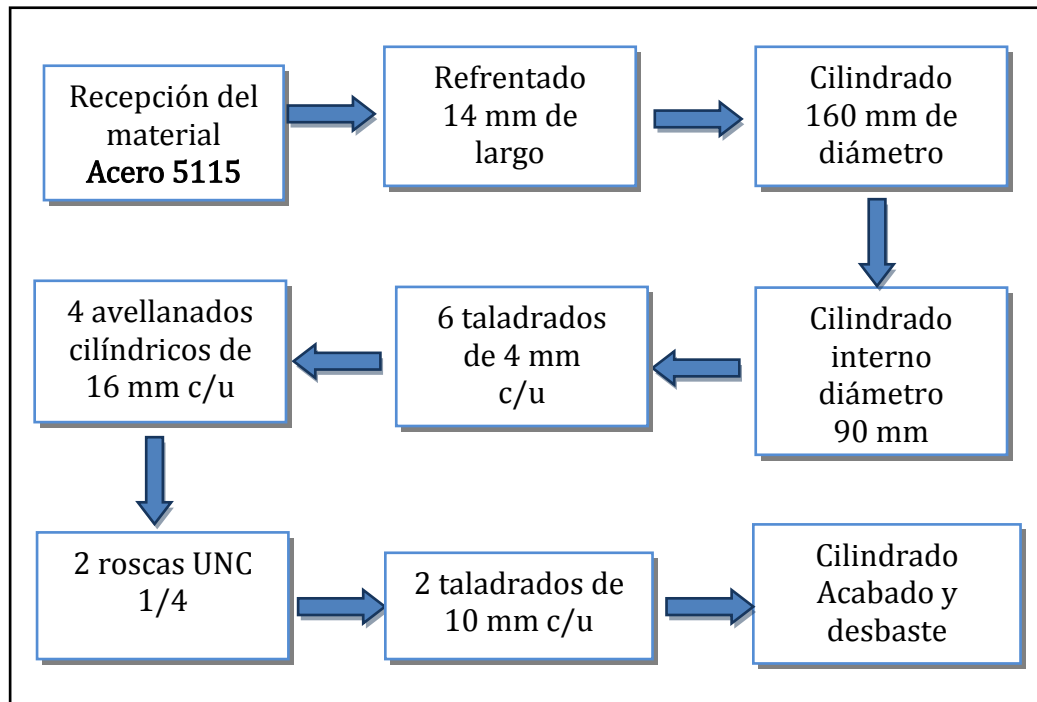
b) Mecanizado de matriz.

Figura 3.20. Etapas de mecanizado del matriz.

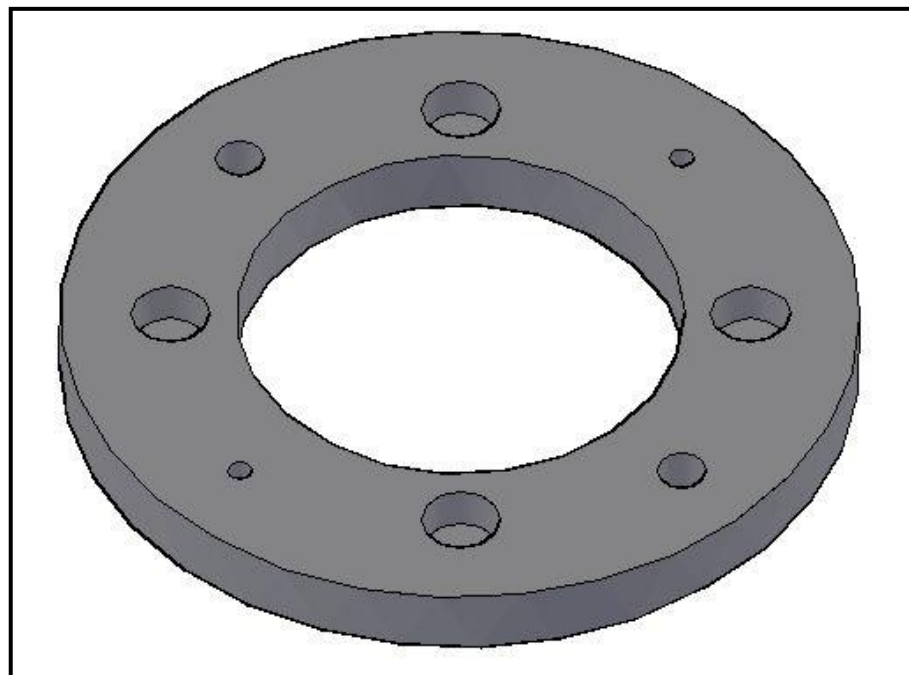


Figura 3.21. Diseño de la matriz.

c) Mecanizado del prensalámina.

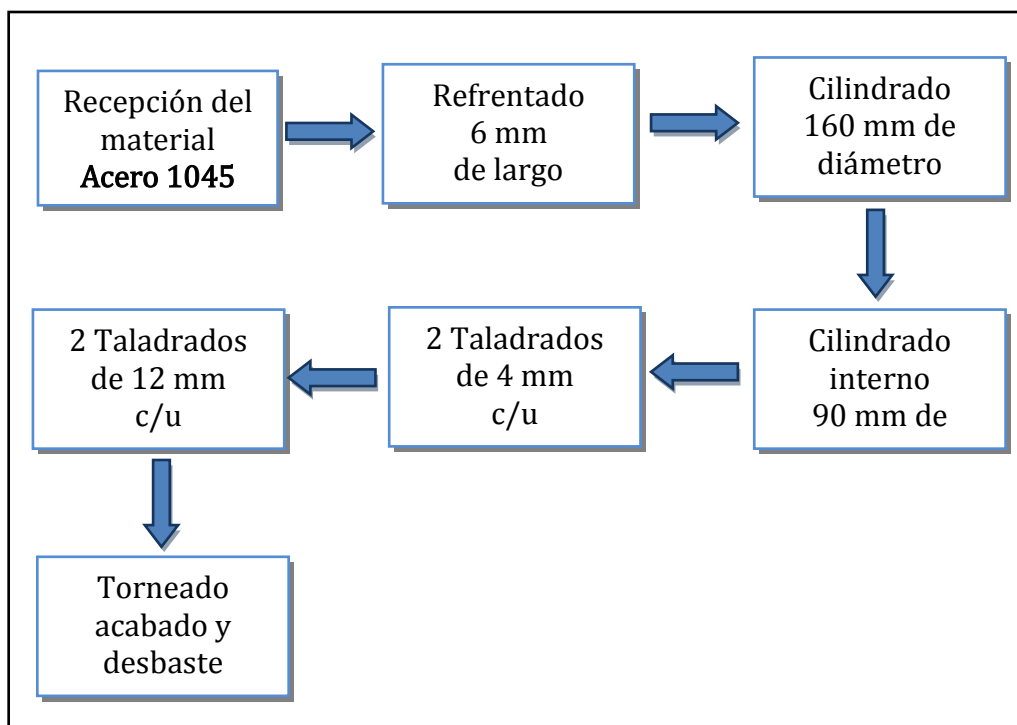


Figura 3.22. Etapas de mecanizado del prensalámina.

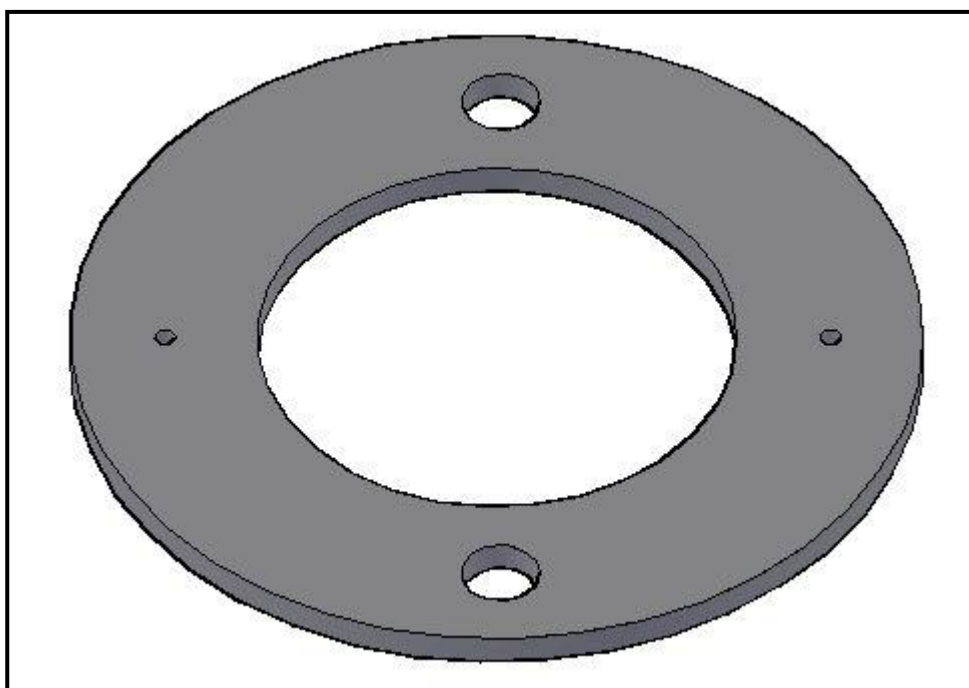


Figura 3.23. Diseño del Prensalámina.

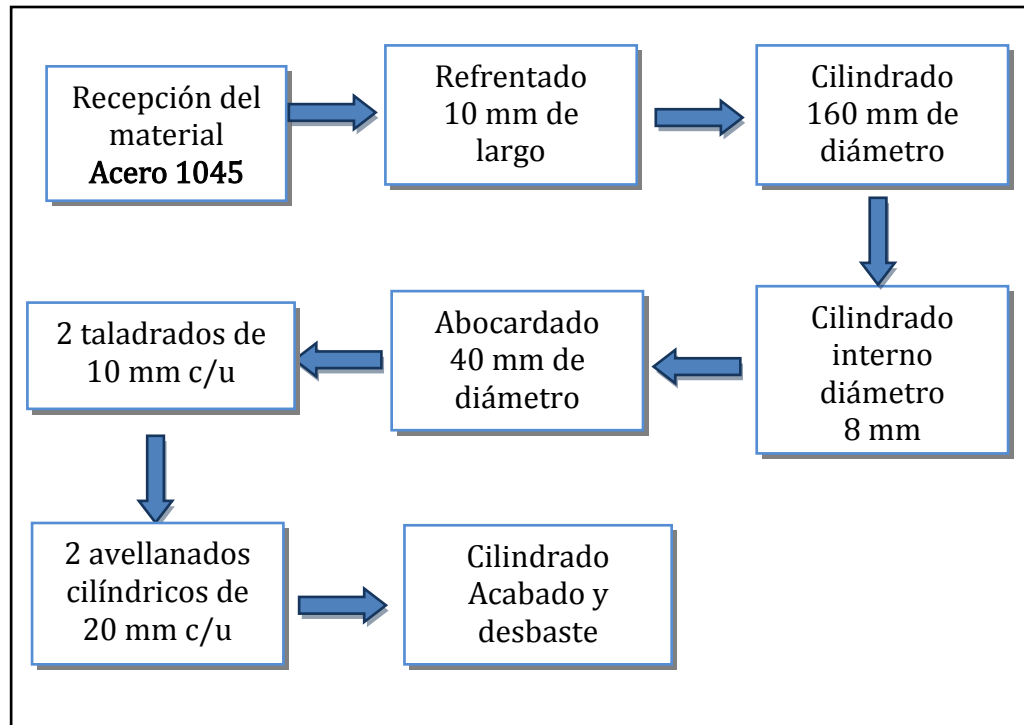
d) Mecanizado de la base del punzón:

Figura 3.24. Etapas de mecanizado base del punzón.

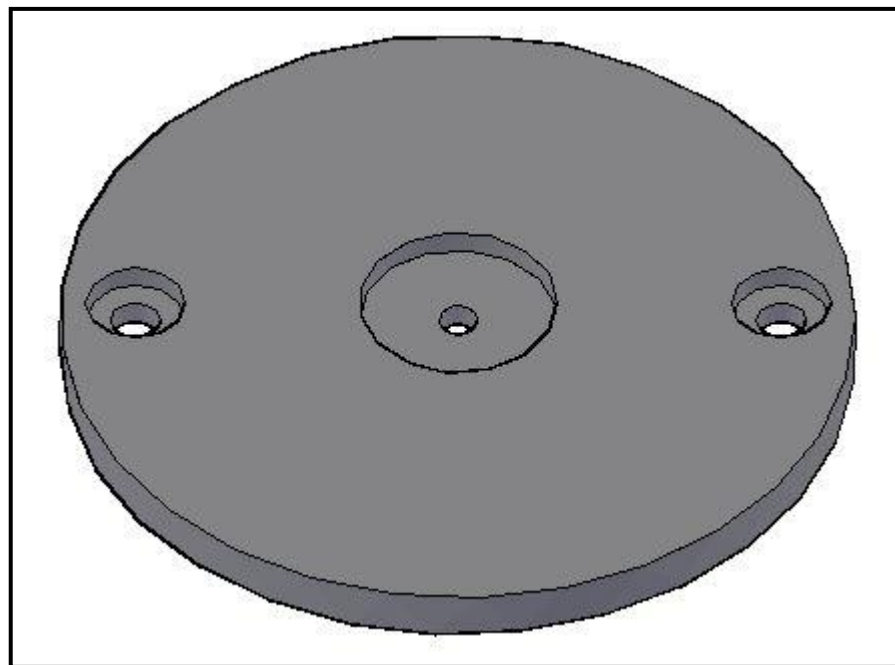


Figura 3.25. Diseño de la base de punzón.

e) Mecanizado de las guías superiores e inferiores.

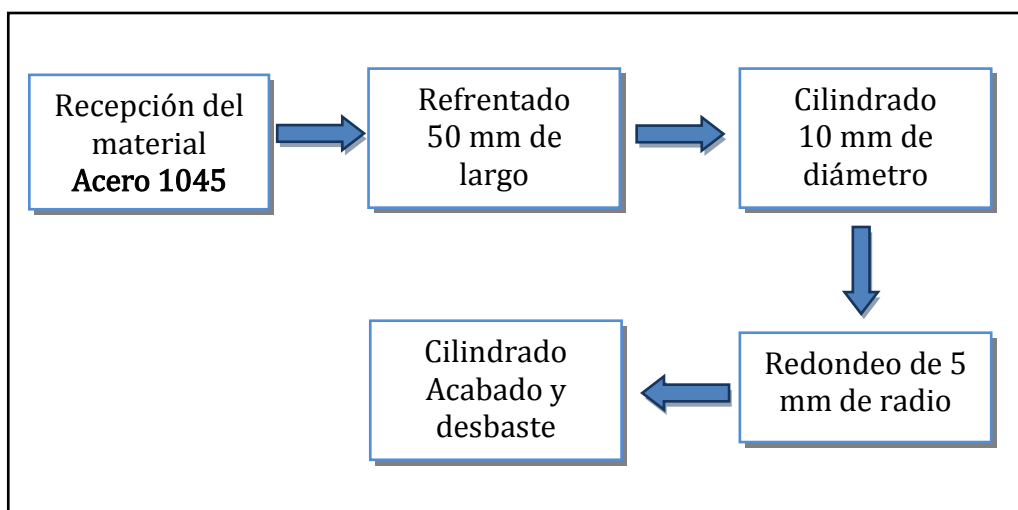


Figura 3.26. Etapas de mecanizado de guías inferiores.

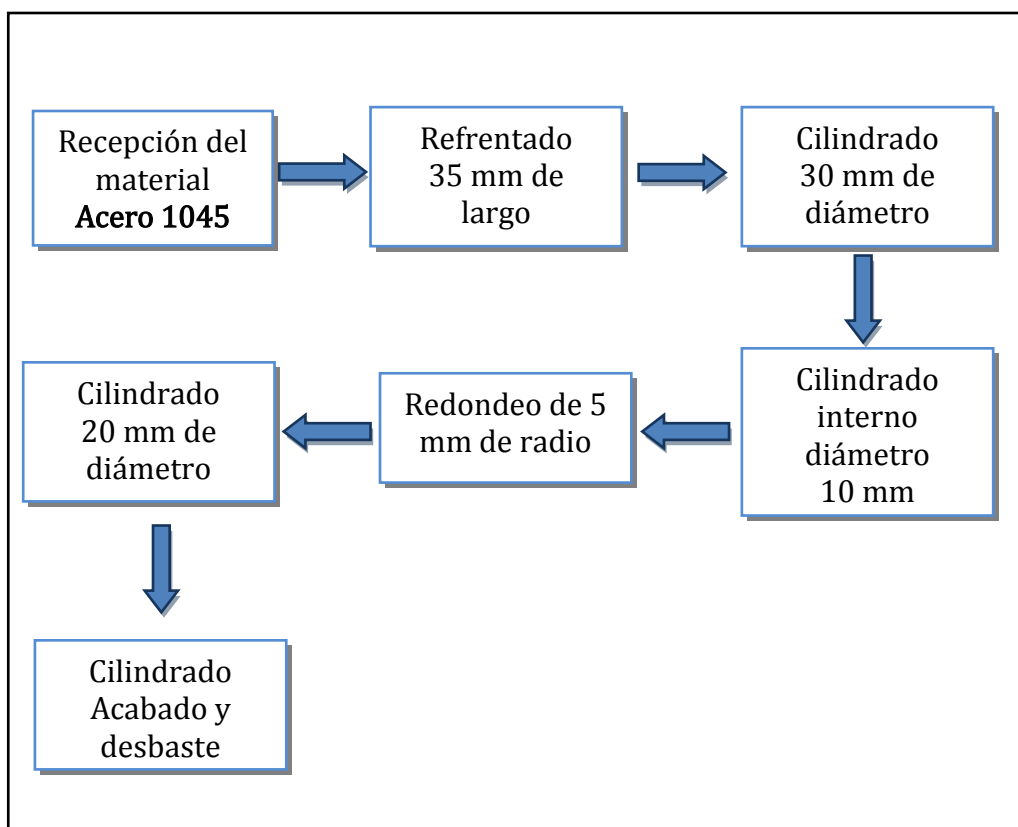


Figura 3.27. Etapas de mecanizado de guías superiores.

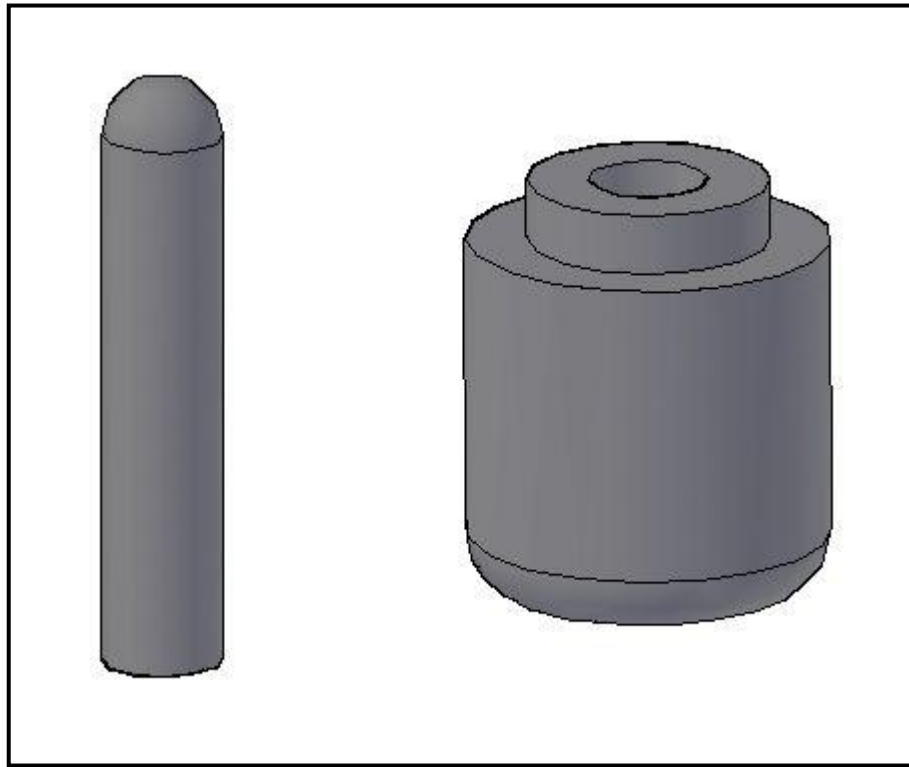


Figura 3.28. Diseño de las guías.

3.2. Ensayos de embutición cilíndrica.

3.2.1 Condiciones de ensayo.

a) Lubricación.

Para transformar una chapa plana en un cuerpo cilíndrico mediante el embutido. El material de la chapa es obligado a extenderse uniformemente en el espacio definido entre el punzón y la matriz, lo que implica una fuerza de fricción muy grande en el proceso, siendo necesario que durante el embutido se lubriquen abundantemente todas las superficies que se encuentran en contacto para así disminuir la fricción, mejorar el acabado superficial y disminuir el desgaste del herramental.

Una lubricación adecuada, no solamente proporciona un trabajo mejor acabado, sino que también aumenta la capacidad de transformación del

material. Es por ello que se seleccionaron cinco tipos de lubricantes, los cuales se detallan a continuación:

- Agua Jabonosa.

La elección del agua jabonosa, se basó en *B. Wassilieff (1966)*, donde se recomienda el uso de este, para valores pequeños de relación de embutición. A continuación en la tabla 3.3 se presentan las propiedades de este lubricante.

Tabla 3.3. Propiedades del lubricante Agua Jabonosa.

Agua Jabonosa	
Porcentaje de tenso-activo anicónico	5,0
Porcentaje de tenso-activo no iónico	1,5
Porcentaje de ingredientes inertes	93,5
PH a 25°C (según norma ASTM D-1172)	6,5
Gravedad específica (según norma ASTM D-891)	1,014

- Aceite de Manzanilla.

El aceite de manzanilla que no es más que una mezcla de varias sustancias químicas biosintetizadas por las plantas se utilizó en este trabajo por ser un lubricante no convencional en este tipo de procesos y por haber sido usado en múltiples investigaciones de conformación de metales.

- Bisulfuro de Molibdeno.

Es aditivo para motores de combustión interna, elegido para esta investigación por tener como principales características reducir la fricción y soportar altas cargas de trabajo (*Baldayo y Bracho, 2009*). En la tabla 3.4 se encuentran sus propiedades.

Tabla 3.4. Propiedades del Bisulfuro de molibdeno.

Bisulfuro de Molibdeno	
Porcentaje de concentración	99,1
PH, cambio de extracto acuoso	1,30
Porcentaje elementos solubles en agua	0,17
Porcentaje de contenido oleoso (acetona)	0,01

- Manteca Vegetal.

La manteca vegetal es un aceite vegetal solidificado, tras ser sometido a un proceso de hidrogenación y es recomendada por expertos en el proceso de conformado de carcasa de compresores de aire acondicionados domésticos. Ver tabla 3.5.

Tabla 3.5. Propiedades de la Manteca vegetal.

Manteca Vegetal	
Densidad	911 kg/m ³
Humedad y materia volátil a 105 °C	0,10% m/m
Impurezas insolubles	0,01% m/m
Punto de Fusión	24°C

- Vaselina.

La vaselina es una mezcla homogénea de hidrocarburos saturados de cadena larga. Se obtienen a partir del refino de una fracción pesada de petróleo. Posee propiedades lubricantes y es por esto que es recomendada por algunos autores para el proceso de conformado del aluminio. La elección de este lubricante, se basó en *B. Wassilieff (1966)*, donde se recomienda para trabajos de conformado en aluminio. Ver tabla 3.6.

Tabla 3.6. Propiedades de la Vaselina.

Vaselina	
Densidad a 25°C	0,867 – 0,88 g/cm ³
Punto de Fusión	44 – 52°C
Punto de Inflamación	196 – 252°C
Punto de Encendido	227 – 225°C
Viscosidad Saybolt a 99°C	52 - 100

3.2.2. Procedencia y preparación del material a ensayar.

El material estudiado fue una lámina de aleación de aluminio 3003-H14 de 2,40 x 1,20 m con un espesor de 0,3 mm, fue adquirida en la empresa INALUM (Bobinas y Laminas de Aluminio Venezolano) y en la empresa C.V.G. ALUCASA C.A. se le realizó un estudio de composición química usando un

espectrómetro de emisión marca SPECTRO que mostró en que porcentaje se encuentran presentes los elementos aleantes del aluminio.

Tabla 3.7 Composición química experimental del aluminio 3003-H14.

Elemento	%	Elemento	%
Si	0,1780	Pb	0,0010
Fe	0,5120	Sn	0,0020
Cu	1,0006	Ti	0,0080
Mg	0,0010	B	0,0004
Zn	0,0007	Ca	0,0001
Ni	0,0020	Li	0,0001
Cr	0,0019	V	0,0080
Bi	0,0010	Al	98,180
Mn	1,0006	Cd	0,0001

A continuación la composición química según la empresa proveedora, que se obtuvo siguiendo las normas COVENIN 288-81/ASTM B557.

Tabla 3.8 Composición química del aluminio 3003-H14, según empresa
 suministradora.

Elemento	% min	Elemento	% min
Si	0,21	Pb	0,005
Fe	0,62	Mn	1,039
Cu	0,1160	Ti	0,006
Mg	0,009	B	0,0006
Zn	0,005	Cr	0,0008
Ni	0,003		

Luego de haber hecho el estudio de la composición química del material se procedió a realizarle 5 ensayos tracción en el laboratorio de materiales de la Universidad de Carabobo, según la norma ASTM E8M (Figura 3.29) para obtener las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio de estudio (3003-H14). En la Tabla 3.9 se visualizan los resultados de los ensayos y en el apéndice B se puede apreciar el comportamiento del material al momento de realizar los ensayos pertinentes.

Seguidamente se procedió a calcular el diámetro de desarrollo de la pieza a embutir que proporcionara como resultado final la aplicación de dos etapas sucesivas de embutido.

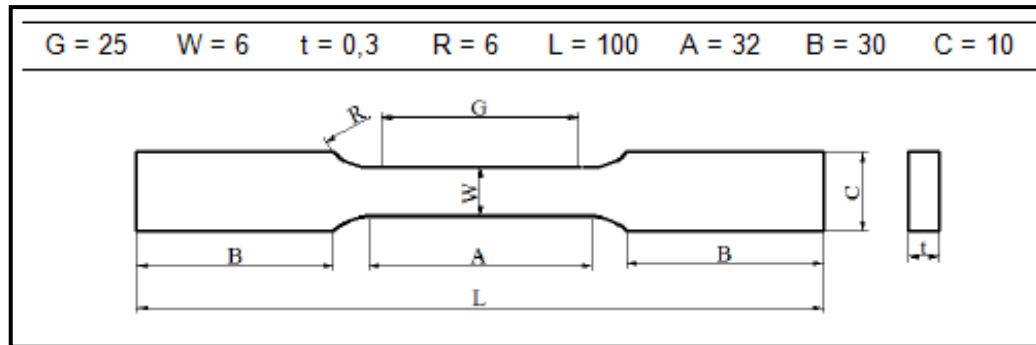


Figura 3.29. Probetas para ensayo de tracción de sección rectangular (mm).

Tabla 3.9. Esfuerzos últimos del aluminio.

N° Probeta	S_u (MPa)
1	213,35
2	196,68
3	204,84
4	198,33
5	182,13
Promedio	199,07
Desviación Estándar	11,52

La lámina de aluminio se cortó en cuadrados de 94 x 94 mm haciendo uso de una cizalla, luego fueron colocados en el dispositivo de punzonado para así poder obtener el disco de desarrollo de 90 mm de diámetro calculado en la sección 3.3 de este capítulo.

Siguiendo este procedimiento se obtuvieron 60 probetas o discos en total de las cuales se ensayaron 40 en el Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Carabobo, con el equipo universal de ensayos GALDABINI. Se utilizaron 5 probetas por cada lubricante a utilizar y por cada etapa. En la tabla 3.10 se puede visualizar dicha distribución.

Tabla 3.10. Cantidad de probetas utilizada para estudiar el proceso.

	Agua Jabonosa	Aceite de Manzanilla	Molibdeno	Manteca Vegetal	Vaselina
1er Etapa	5	5	5	5	5
2da Etapa	-	-	5	5	5
Total	5	5	10	10	10

3.3. Procedimiento para la preparación de los ensayos de embutición y re-embutición cilíndrica.

Como primer paso se procedió a armar el dispositivo de punzonado, tomando como base común la del dispositivo de embutido previo (Plano 14, Apéndice D), luego se centraron en éste los cuadrados de 94 x 94 mm cortados previamente y al mismo tiempo se colocó el prensalámina ajustando los tornillos del mismo para fijar la lámina. Luego se procedió a colocar el punzón de corte con su base respectiva en las guías.

Armado el conjunto se colocó el dispositivo en el equipo universal de ensayos y se dio pie al proceso de punzonado dando como resultado el disco de desarrollo para el proceso de embutido. Luego de haber obtenido las 60 probetas se procedió a desarmar el dispositivo de punzonado y a armar el de embutido (Plano 7, Apéndice D).

Para iniciar el proceso de embutido, se limpió cada disco o desarrollo con algodón y alcohol para extraer cualquier partícula de suciedad o impureza que pudiese intervenir en el acabado superficial del producto terminado, después se esparció aproximadamente un 1 ml de lubricante solo para el aceite de manzanilla, agua jabonosa y bisulfuro de molibdeno, para el caso de la manteca vegetal y vaselina por ser sólidos se esparció uniformemente sobre la superficie del desarrollo cuidando de aplicarlo sólo en la cara en contacto con la matriz de embutido y por toda la superficie de la matriz haciendo énfasis en la curvatura de la misma.

Posteriormente se colocó el disco y prensalámina respectivamente, para luego ir ajustando los 4 tornillos con un torquimetro marca Truper de $\frac{1}{2}$ ", hasta un torque máximo de 2 kg·m, para permitir la fluencia del material por la matriz de embutido sin generar arrugas en el envase final.

Realizado el procedimiento expuesto, se procedió a colocar el dispositivo en el equipo de ensayos y fijar como velocidad de embutido 10 mm/min (usado por Baldayo y Bracho, 2009) e iniciar el proceso de la primera etapa. Se estableció un desplazamiento del punzón de 25 mm para retirar con mayor facilidad el envase adherido al punzón, porque con este avance el mismo queda fuera de la matriz.

Finalmente, después de obtener el envase con la primera etapa concluida se procede a cambiar matriz, punzón y prensalámina (Plano 8, Apéndice D), para dar inicio a la segunda etapa. Igualmente se limpió cada envase con algodón y alcohol. En la misma forma que en la primera etapa se procedió a colocar el prensalámina y ajustarlo con el torquimetro a 1,8 kg·m, valor obtenido luego de varios ensayos previos, realizado esto se vuelve a colocar el dispositivo en el equipo universal de ensayos y se inicia el proceso nuevamente.

3.4. Rugosidad superficial.

Para hacer el análisis del acabado superficial se tomaron los envases completos obtenidos en la primera etapa seleccionando 3 envases al azar por cada lubricante para un total de 9 muestras y se midió la rugosidad aritmética con un rugosimetro marca Mitutoyo modelo SJ 201 en el Laboratorio de Procesos de Fabricación de la Universidad de Carabobo. Se realizaron 4 mediciones por muestra para un total de 12 mediciones por cada lubricante. Puesto que el rugosimetro utilizado mide sobre superficies planas se fijó un recorrido de 0,25x5 mm para obtener un valor medio de los valores absolutos de rugosidad sobre el perfil del envase y dentro del tramo de medición, a demás se calculó la desviación estándar promedio para cada condición.

CAPÍTULO 4

Resultados.

Este capítulo contempla los resultados de todas las actividades que se realizaron para cumplir con los objetivos planteados al inicio de la investigación.

4.1 Piezas obtenidas para el dispositivo de embutido obtenido.

A continuación se presentan los elementos que conforman el dispositivo en el cual se desarrollaron los ensayos de la primera y segunda etapa de embutido con todos los lubricantes establecidos.



Figura 4.1. Punzón de la primera etapa.



Figura 4.2. Matriz de la primera etapa.



Figura 4.3. Prensálámina de la primera etapa.



Figura 4.4. Punzón de la segunda etapa.



Figura 4.5. Matriz de la segunda etapa.

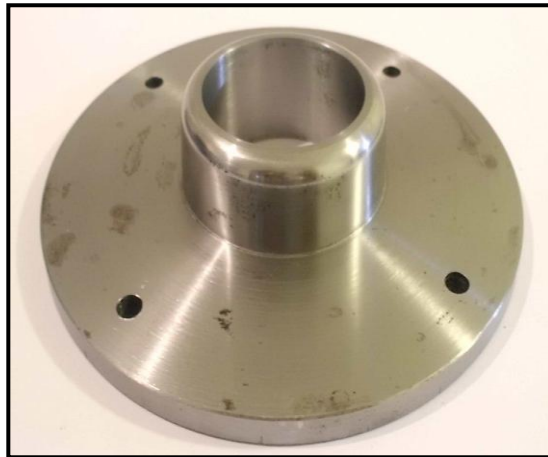


Figura 4.6. Prensálámina de la segunda etapa.



Figura 4.7. Porta-matriz para ambas etapas.

Las piezas en las figuras 4.1 a 4.7 se adaptaron a la base de un dispositivo previo y ensamblados como se muestra en las figuras 4.8 y 4.9.



Figura 4.8. Conjunto de piezas (primera etapa).



Figura 4.9. Conjunto de piezas (segunda etapa).

4.2. Dispositivo de punzonado obtenido.



Figura 4.10. Punzón de corte.



Figura 4.11. Prensálámina.



Figura 4.12. Matriz de corte.

Las piezas de las figuras 4.10 a 4.12 fueron adaptadas a la base de un dispositivo previo y ensambladas como se muestra en la figura 4.13.

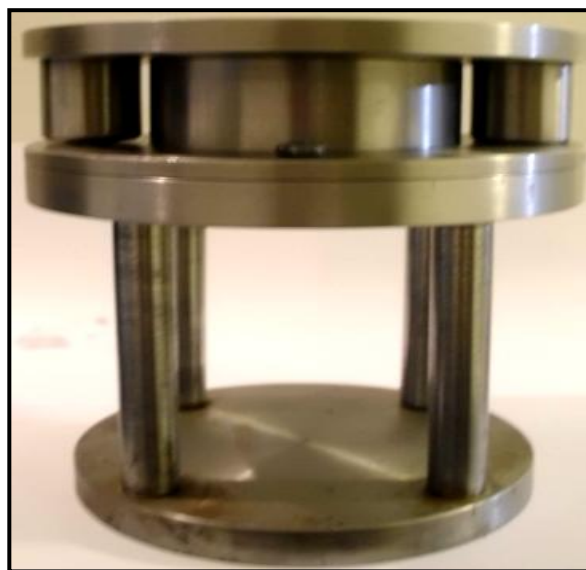


Figura. 4.13 Troquel de punzonado.

4.3. Ensayos experimentales según el tipo de lubricante utilizado.

4.3.1. Comportamiento de la chapa en cada ensayo.

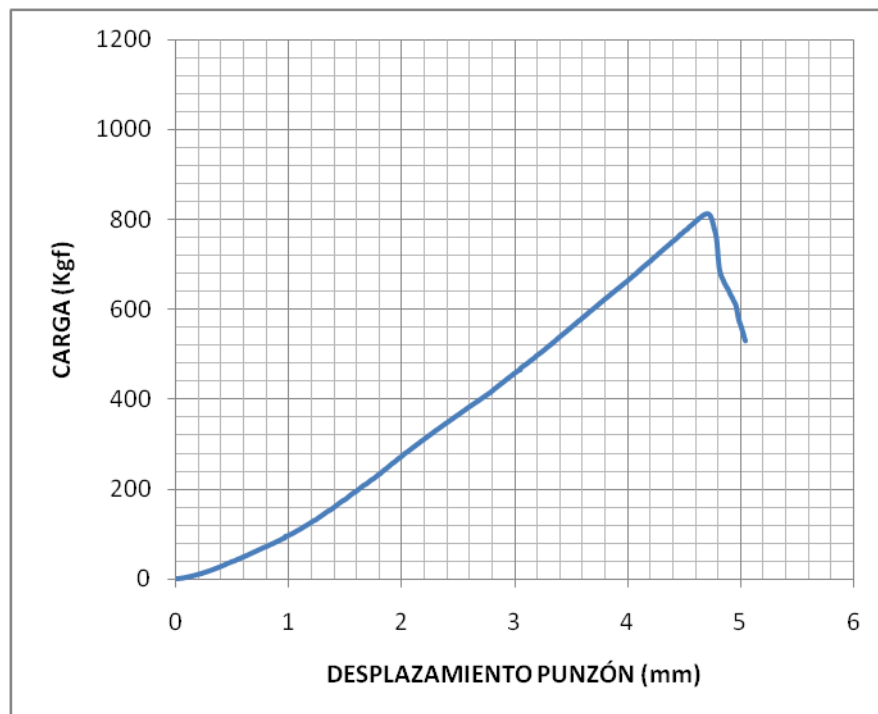
a) Ensayos utilizando agua jabonosa (Primera etapa):



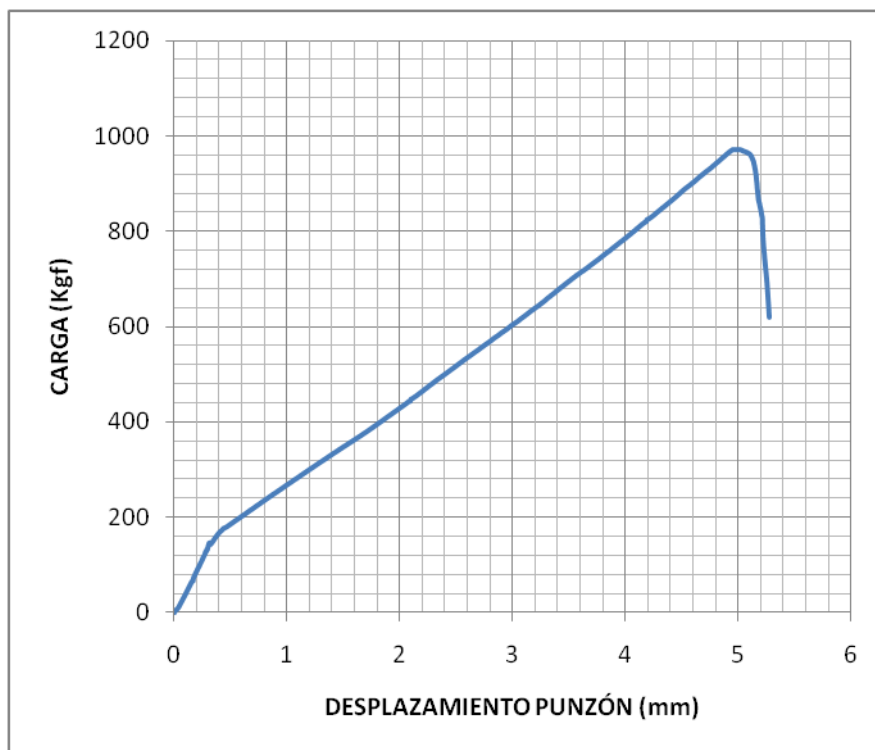
Gráfica 4.1. Carga vs Desplazamiento. Primer ensayo.



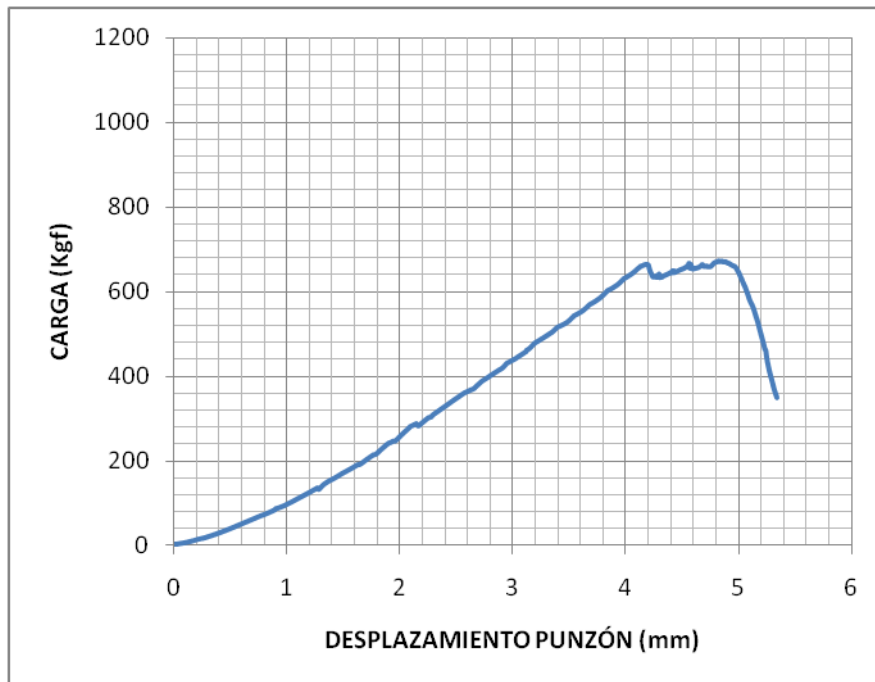
Gráfica 4.2. Carga vs Desplazamiento. Segundo ensayo.



Gráfica 4.3. Carga vs Desplazamiento. Tercer ensayo.

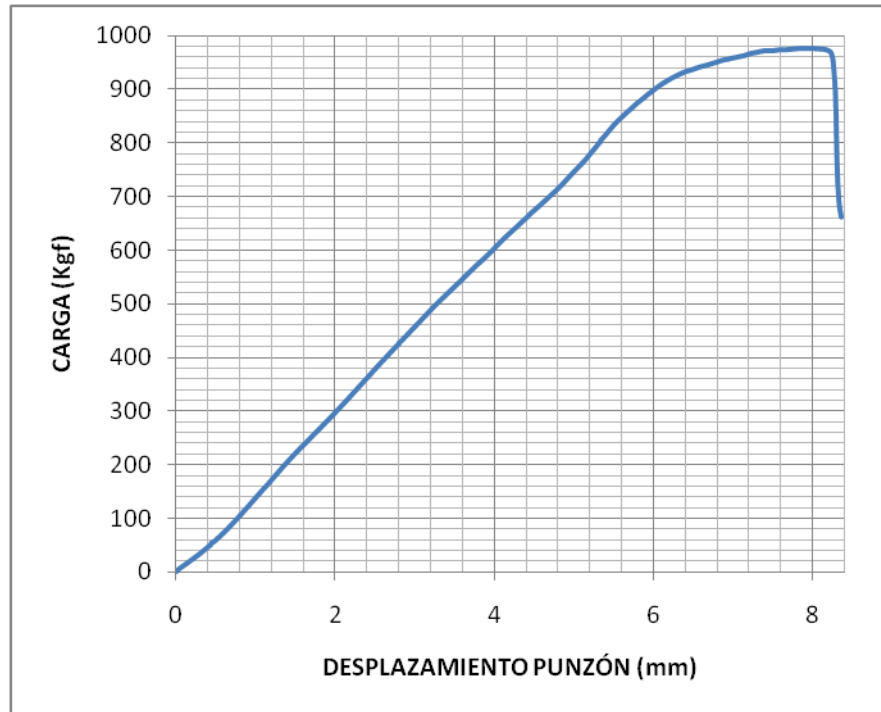


Gráfica 4.4. Carga vs Desplazamiento. Cuarto ensayo.

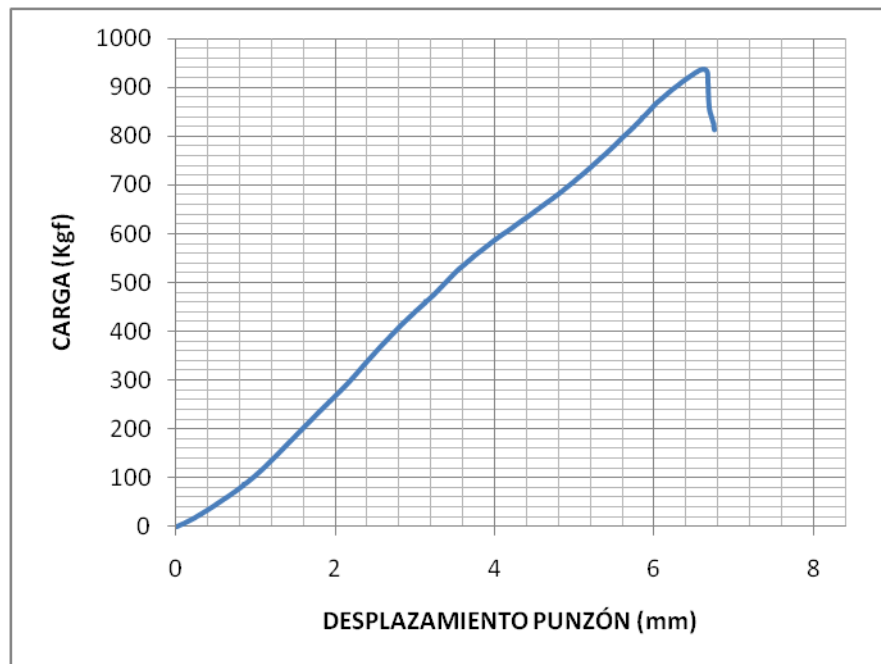


Gráfica 4.5. Carga vs Desplazamiento. Quinto ensayo.

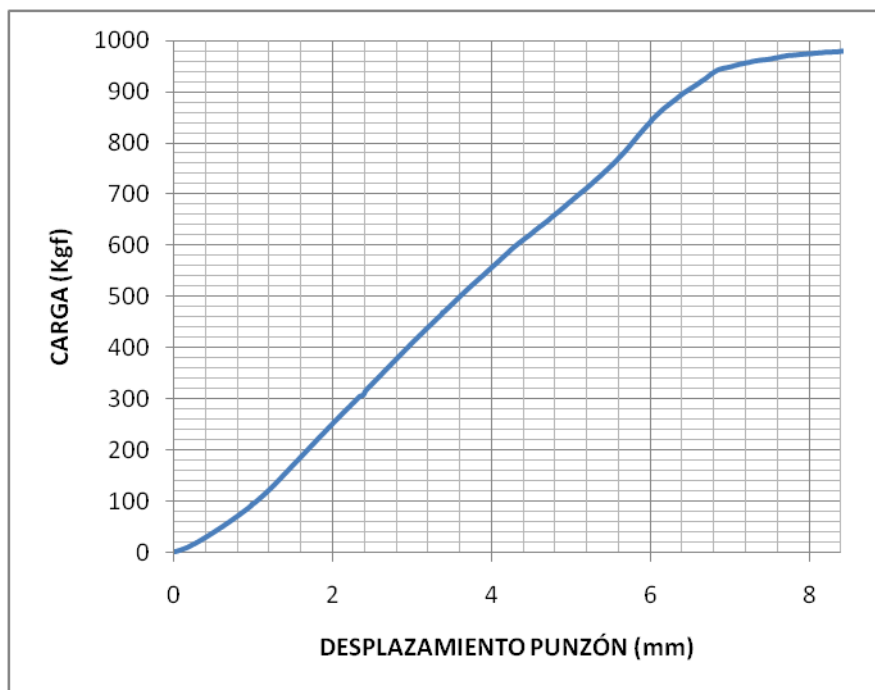
a) Ensayos utilizando aceite de manzanilla (Primera etapa):



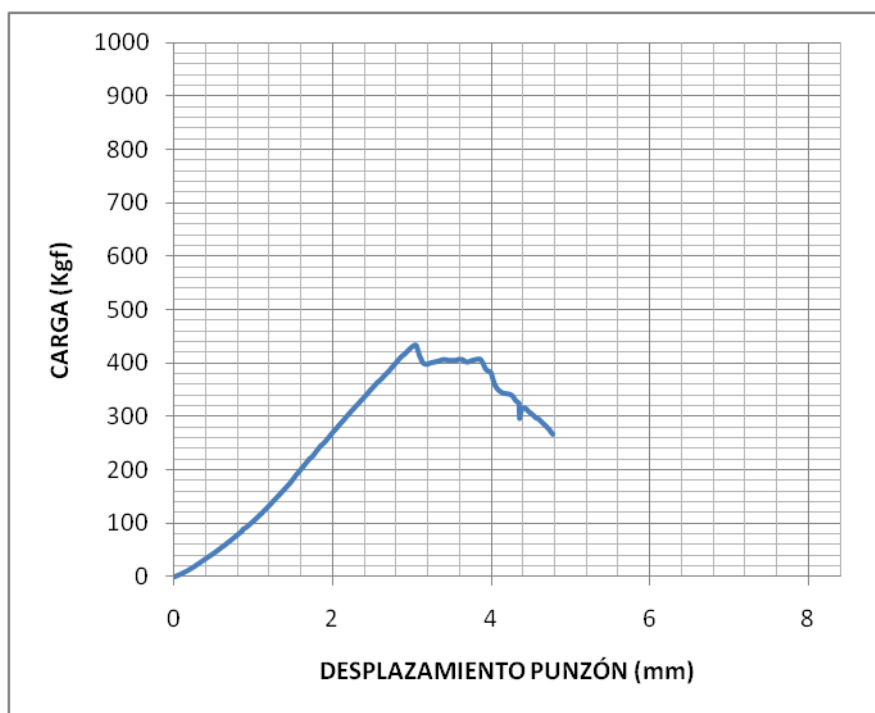
Gráfica 4.6. Carga vs Desplazamiento. Primer ensayo.



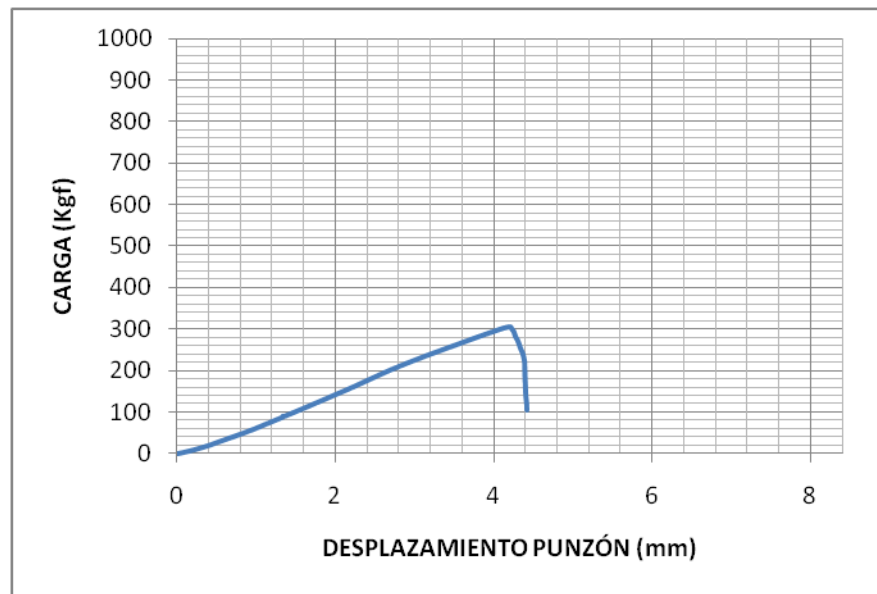
Gráfica 4.7. Carga vs Desplazamiento. Segundo ensayo.



Gráfica 4.8. Carga vs Desplazamiento. Tercer ensayo.



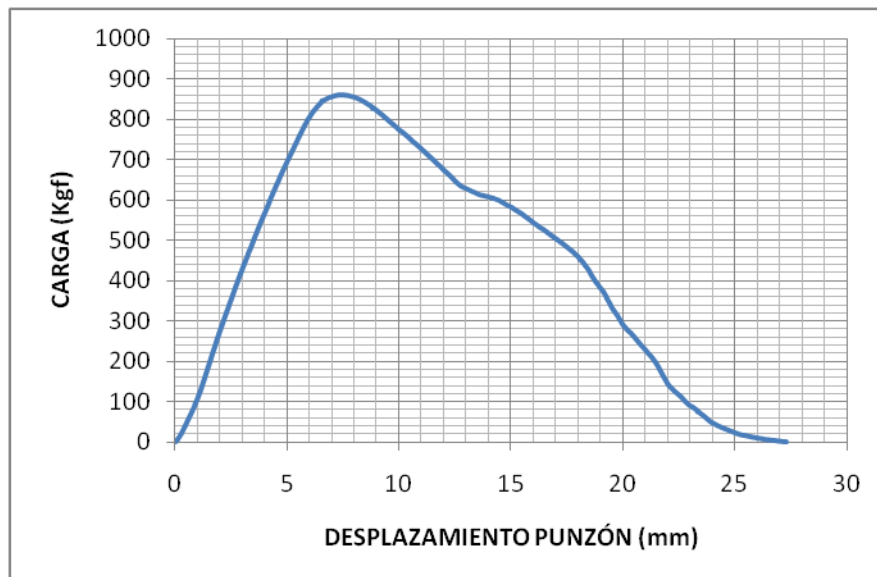
Gráfica 4.9. Carga vs Desplazamiento. Cuarto ensayo.



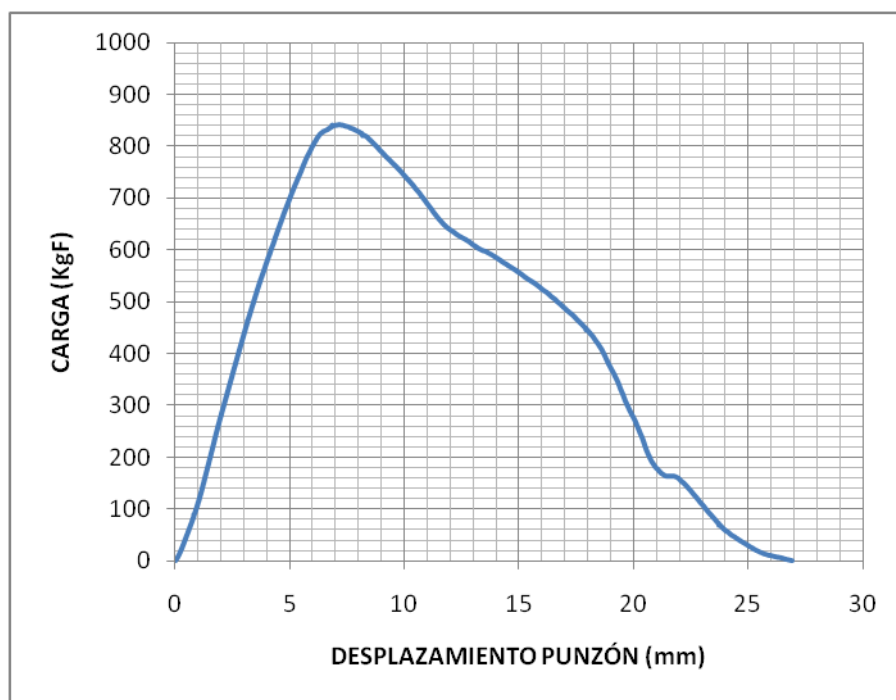
Gráfica 4.10. Carga vs Desplazamiento. Quinto ensayo.

Con la utilización de aceite de manzanilla y agua jabonosa no se logró ejecutar la primera etapa de embutido, por consiguiente no se pudo completar la segunda fase del proceso.

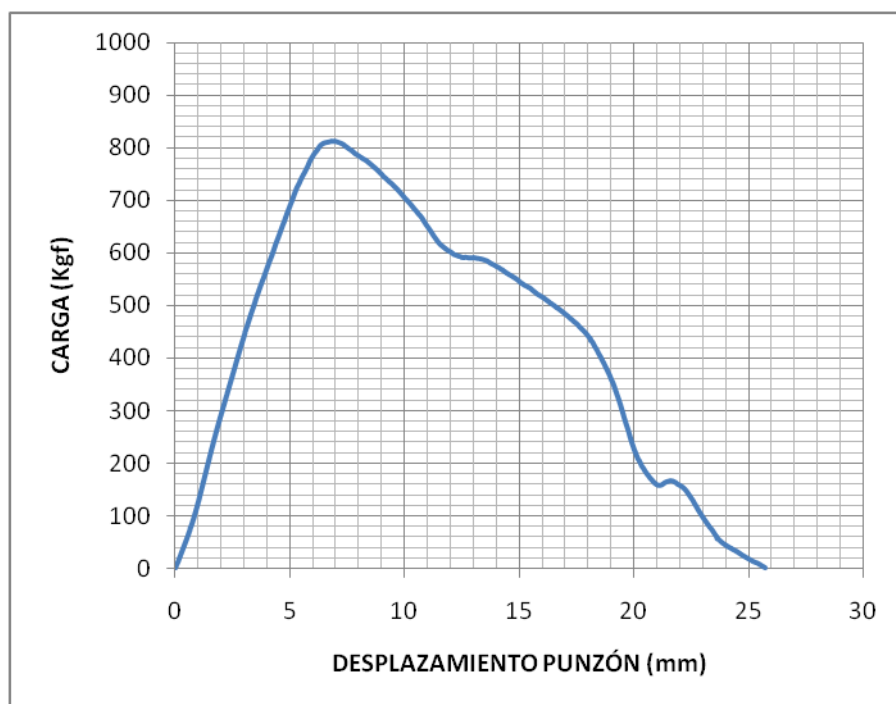
a) Ensayos utilizando bisulfuro de molibdeno (Primera etapa).



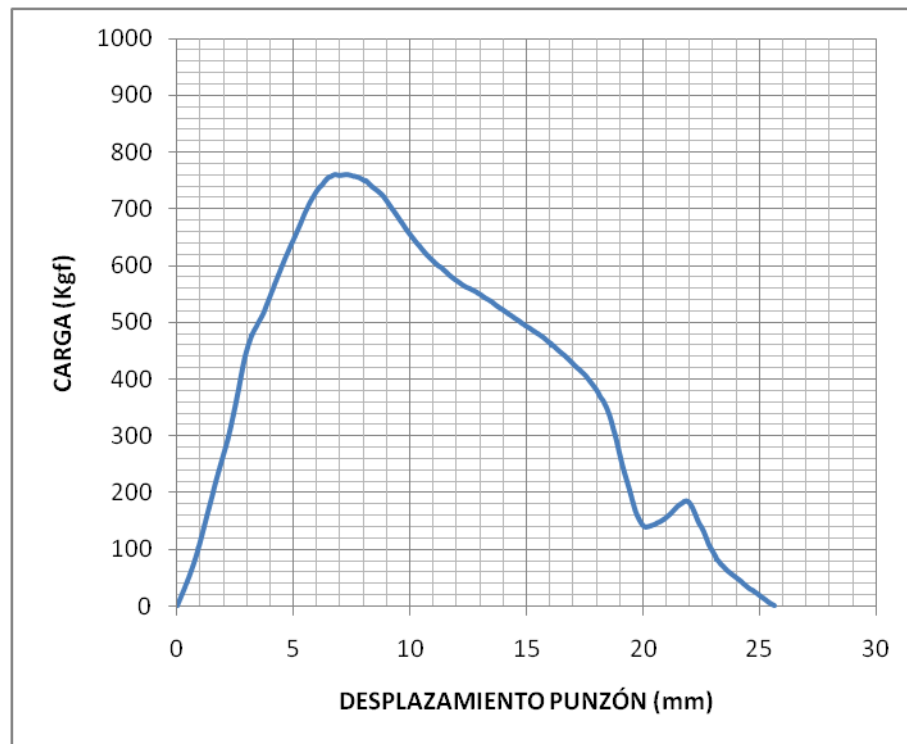
Gráfica 4.11. Carga vs Desplazamiento. Primer ensayo.



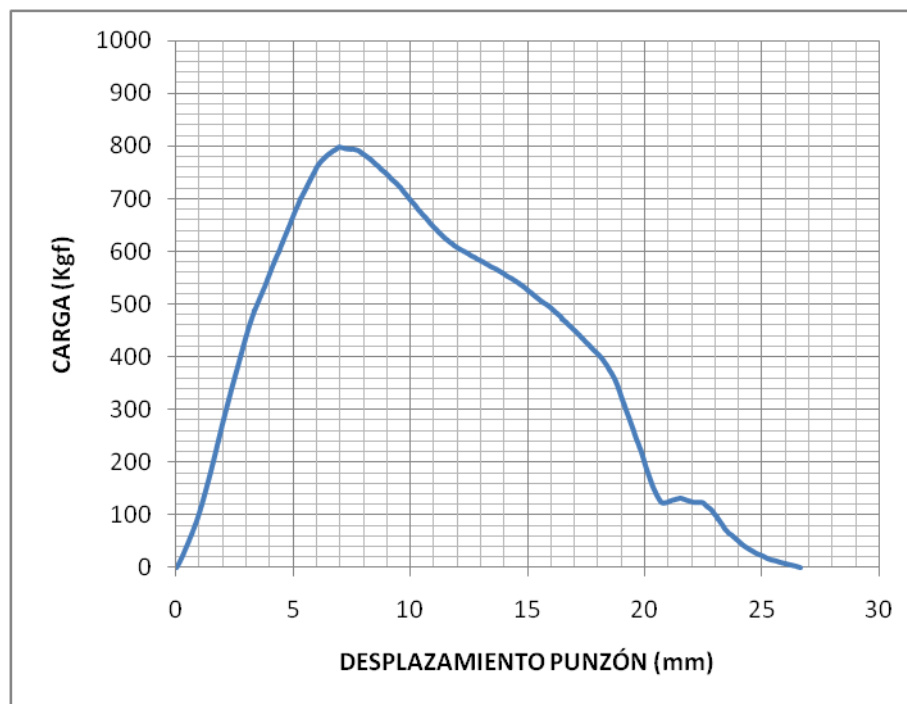
Gráfica 4.12. Carga vs Desplazamiento. Segundo ensayo.



Gráfica 4.13. Carga vs Desplazamiento. Tercer ensayo.

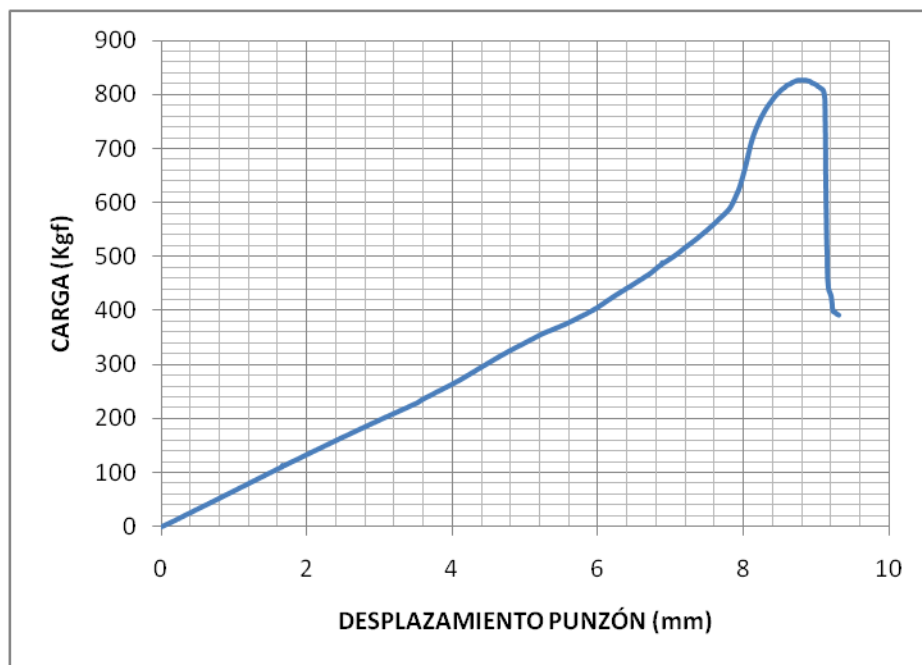


Gráfica 4.14. Carga vs Desplazamiento. Cuarto ensayo.

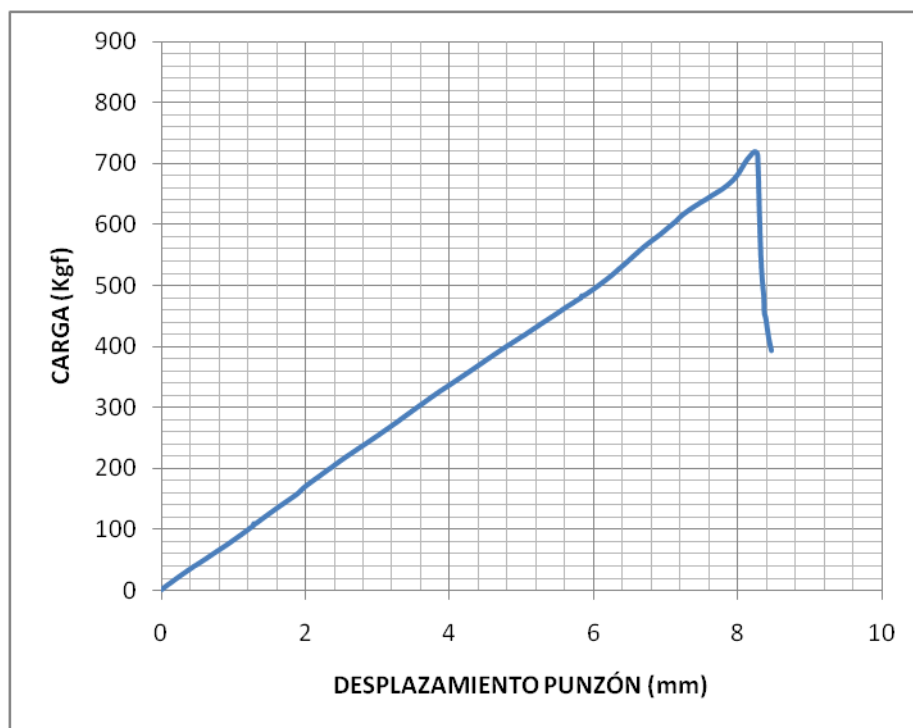


Gráfica 4.15. Carga vs Desplazamiento. Quinto ensayo.

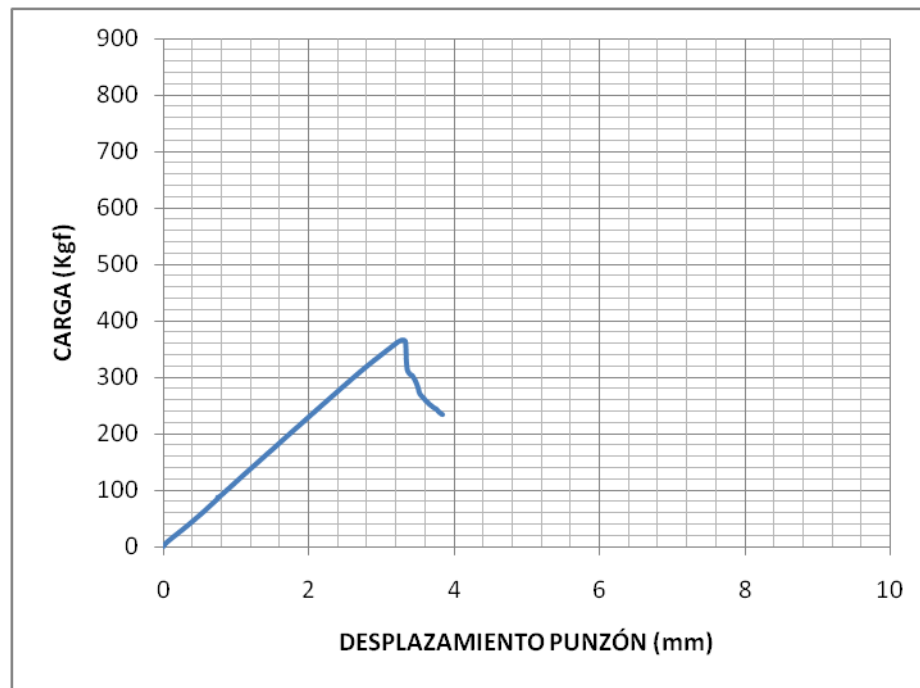
a) Ensayos utilizando bisulfuro de molibdeno (Segunda etapa).



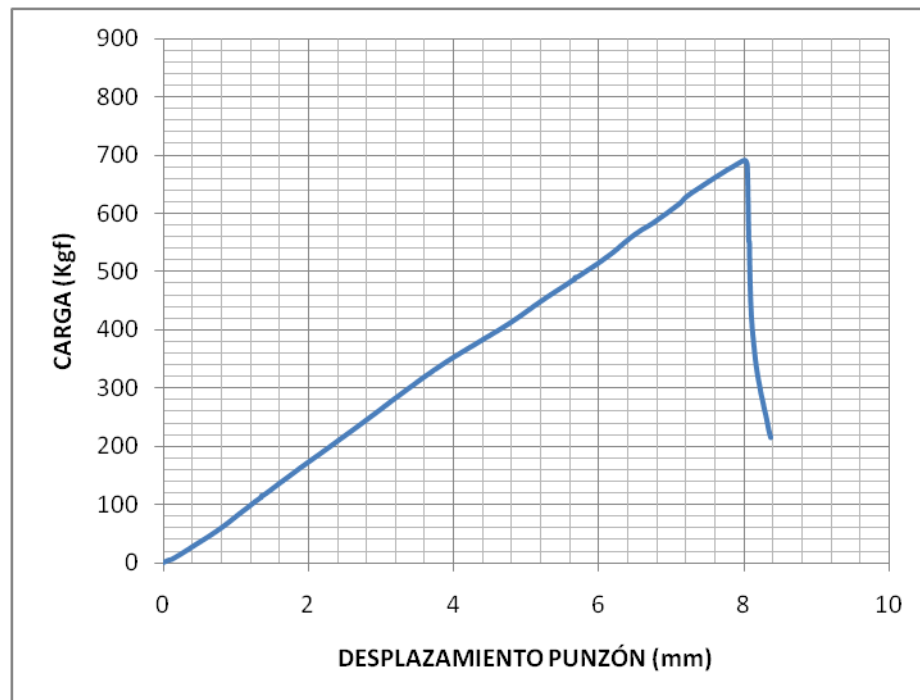
Gráfica 4.16. Carga vs Desplazamiento. Primer ensayo.



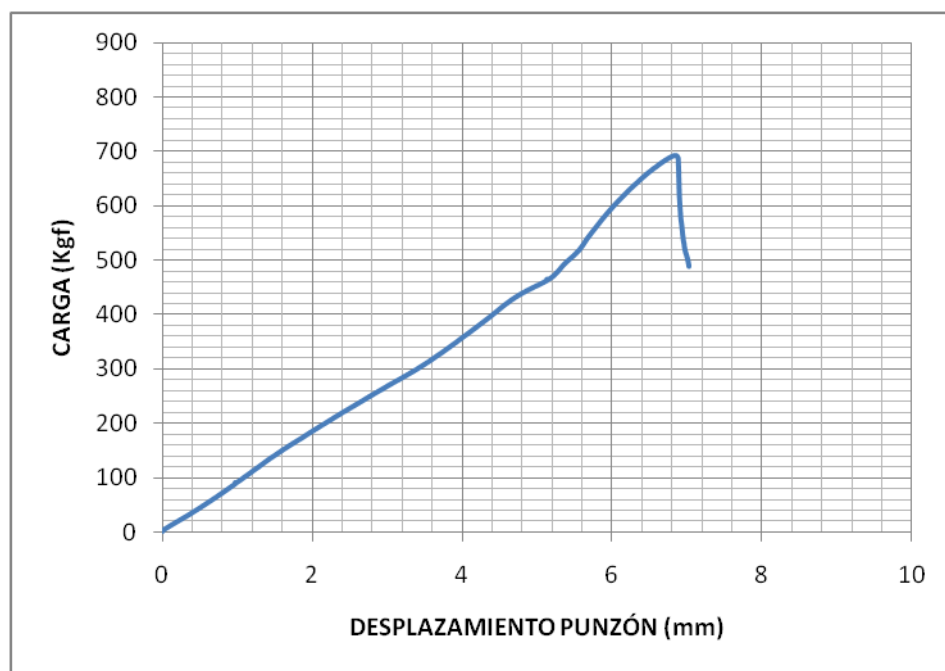
Gráfica 4.17. Carga vs Desplazamiento. Segundo ensayo.



Gráfica 4.18. Carga vs Desplazamiento. Tercer ensayo.

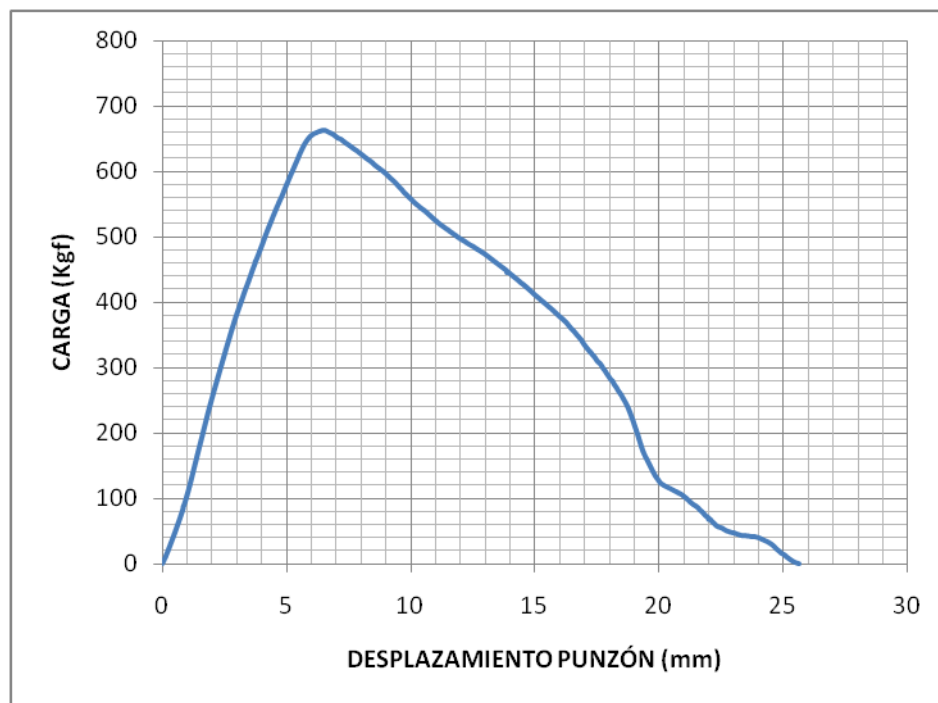


Gráfica 4.19. Carga vs Desplazamiento. Cuarto ensayo.

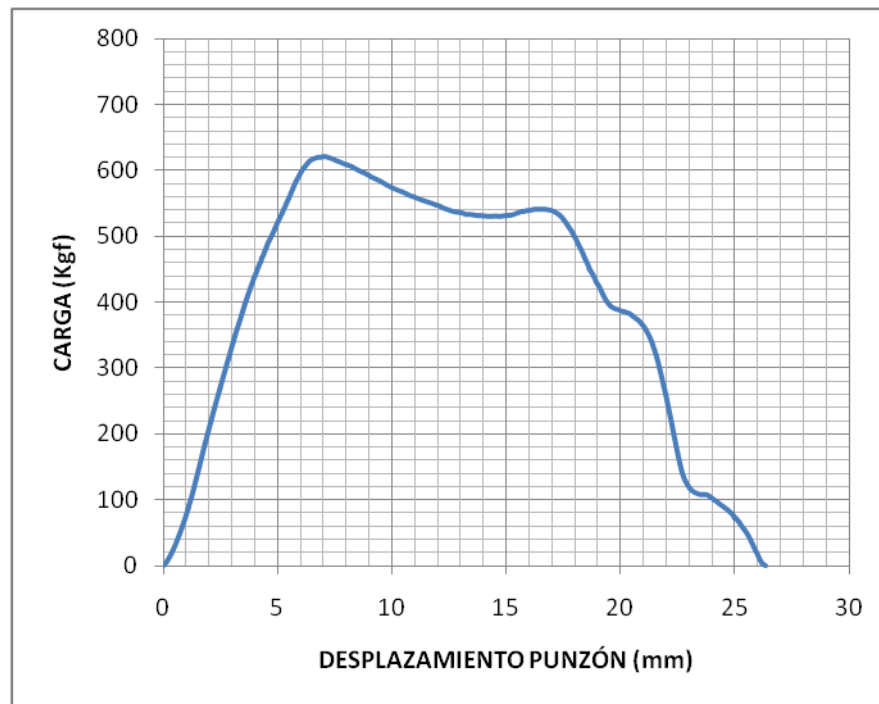


Gráfica 4.20. Carga vs Desplazamiento. Quinto ensayo.

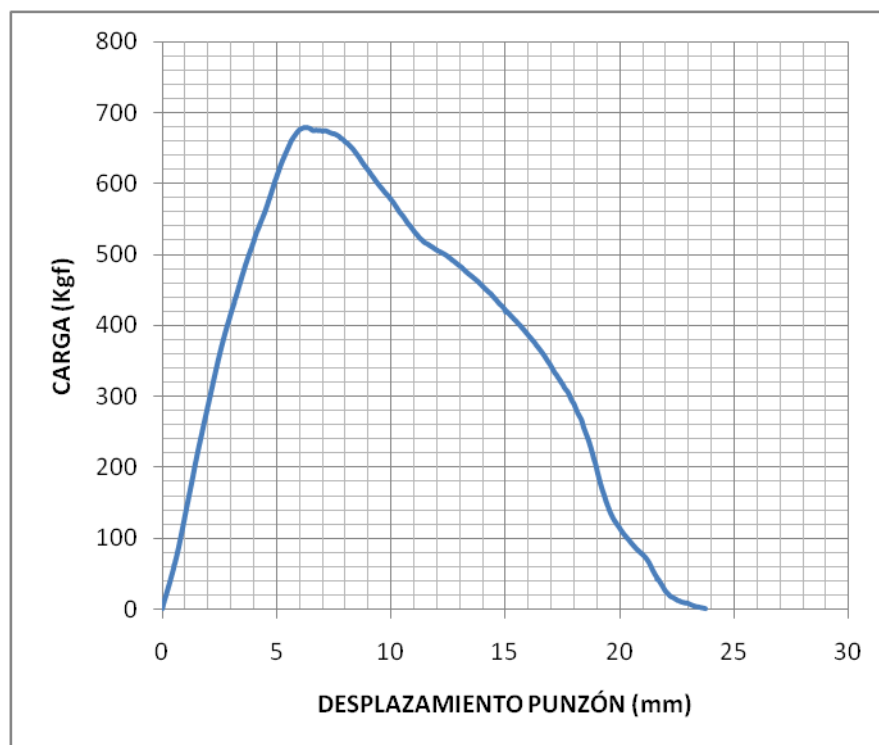
a) Ensayos utilizando manteca vegetal (Primera etapa).



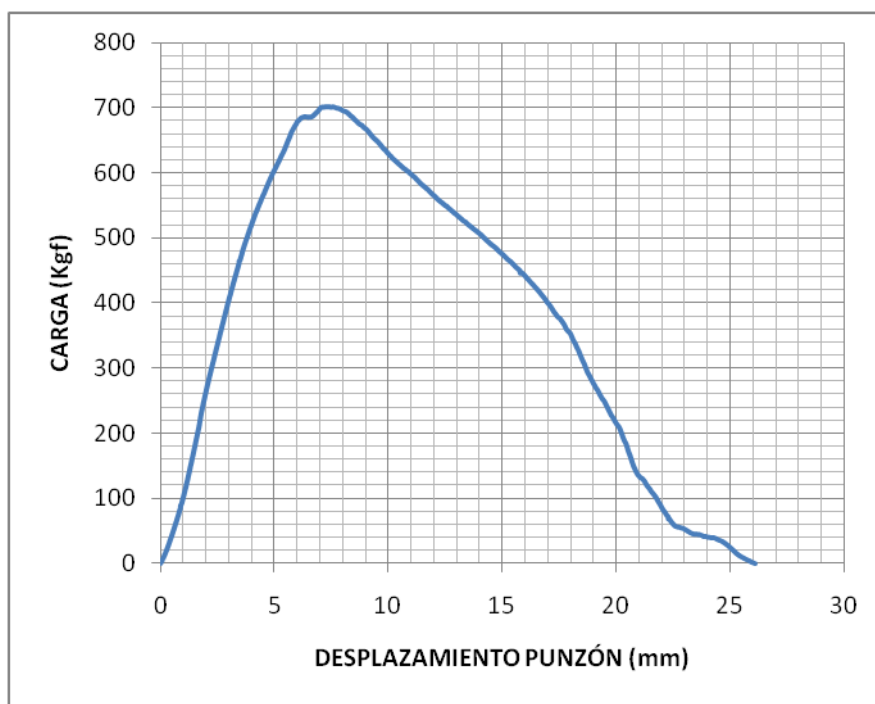
Gráfica 4.21. Carga vs Desplazamiento. Primer ensayo.



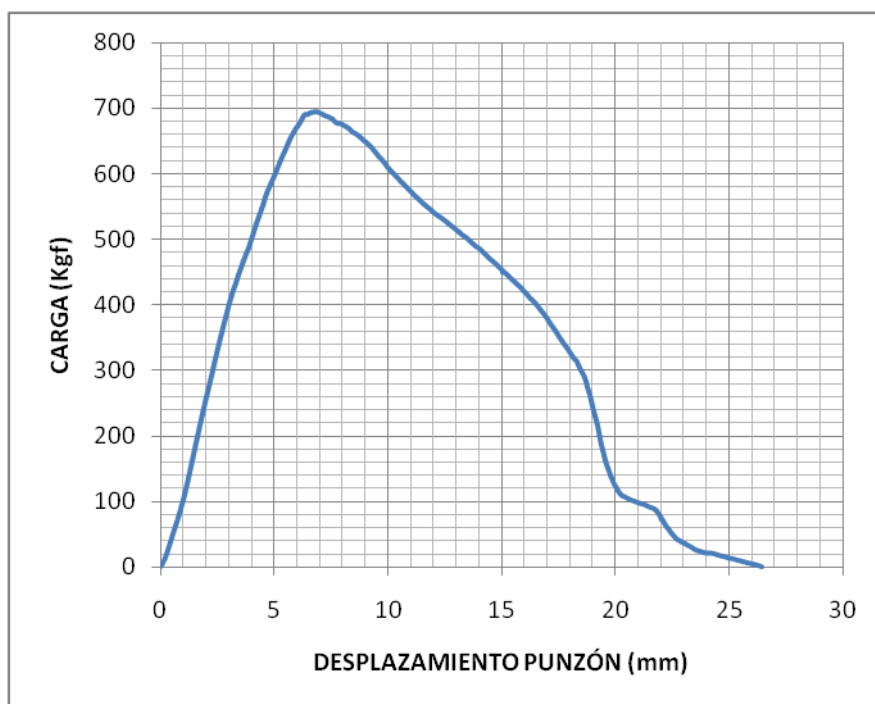
Gráfica 4.22. Carga vs Desplazamiento. Segundo ensayo.



Gráfica 4.23. Carga vs Desplazamiento. Tercer ensayo.

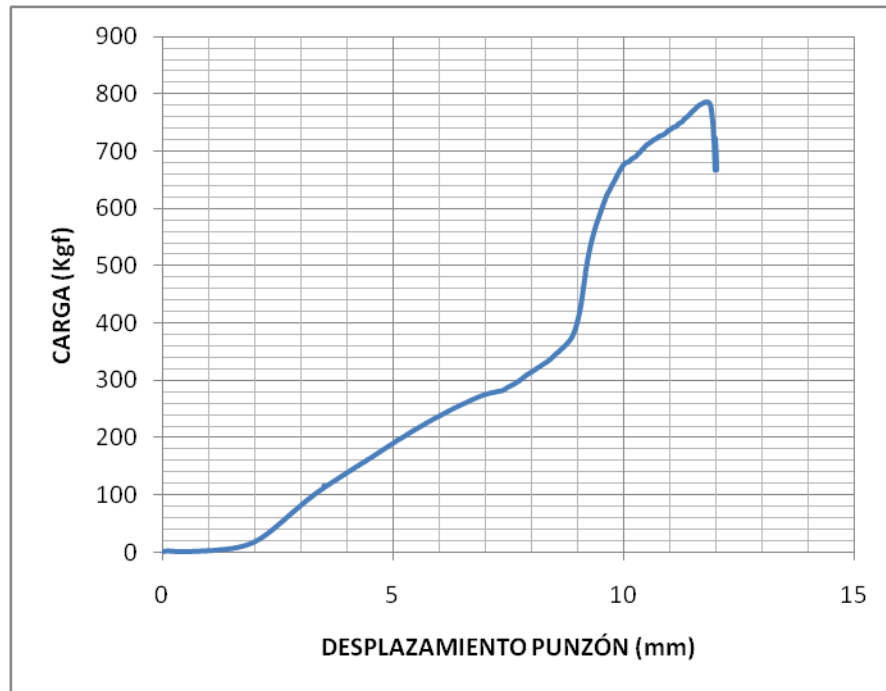


Gráfica 4.24. Carga vs Desplazamiento. Cuarto ensayo.

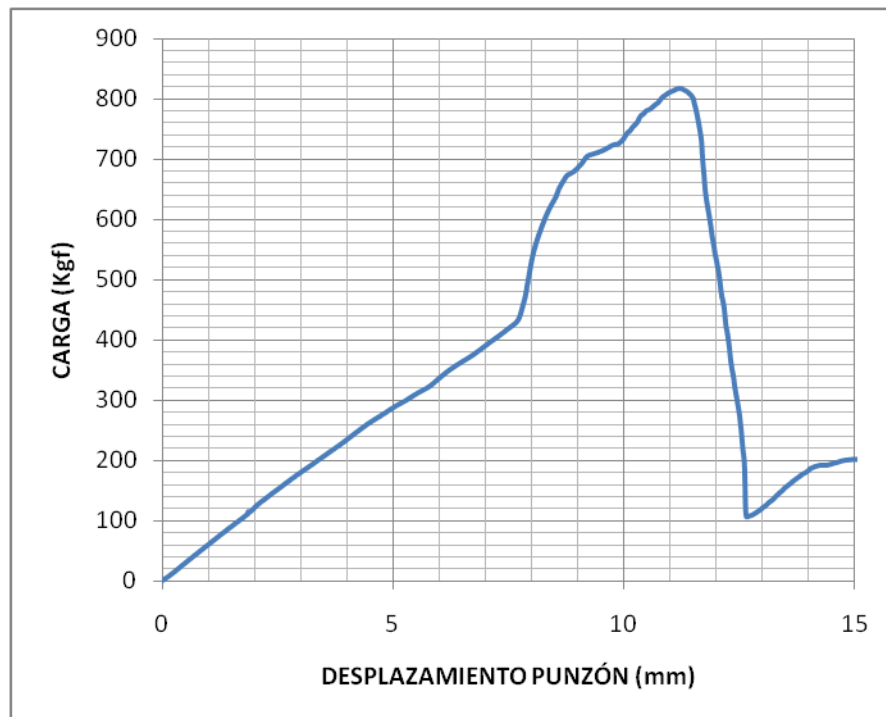


Gráfica 4.25. Carga vs Desplazamiento. Quinto ensayo.

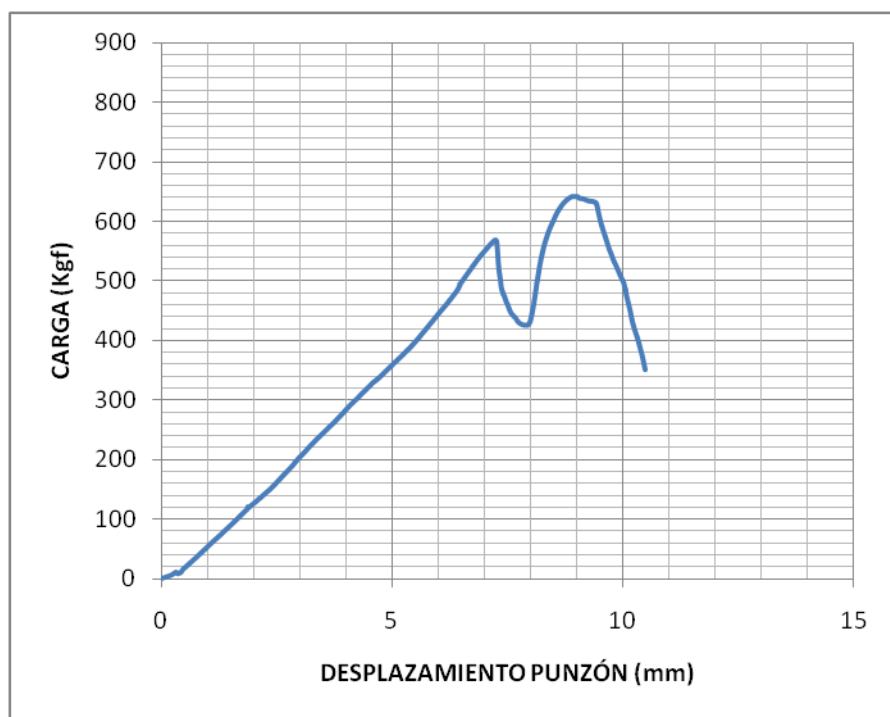
a) Ensayos utilizando manteca vegetal (Segunda etapa).



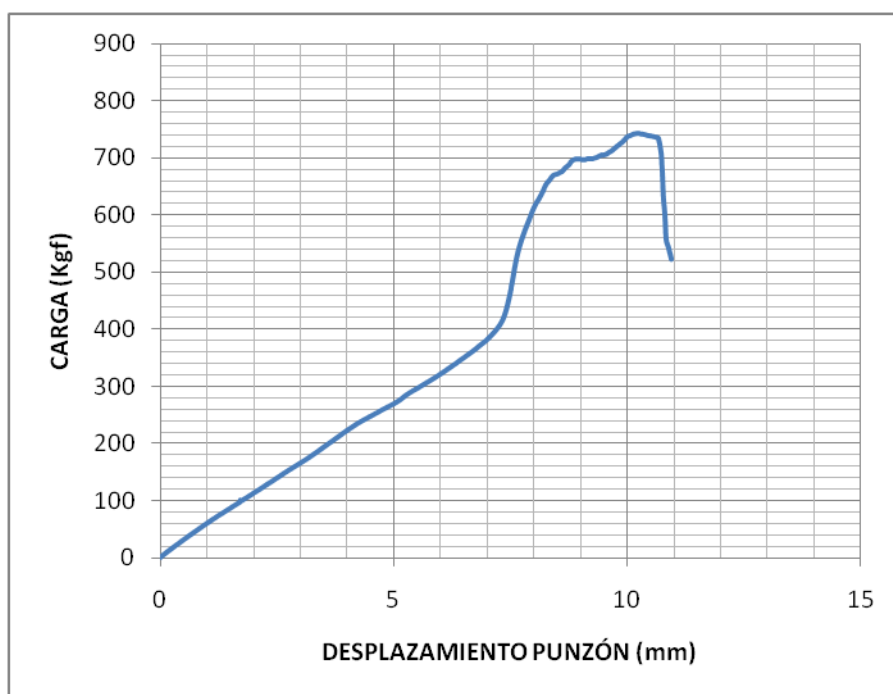
Gráfica 4.26. Carga vs Desplazamiento. Primer ensayo.



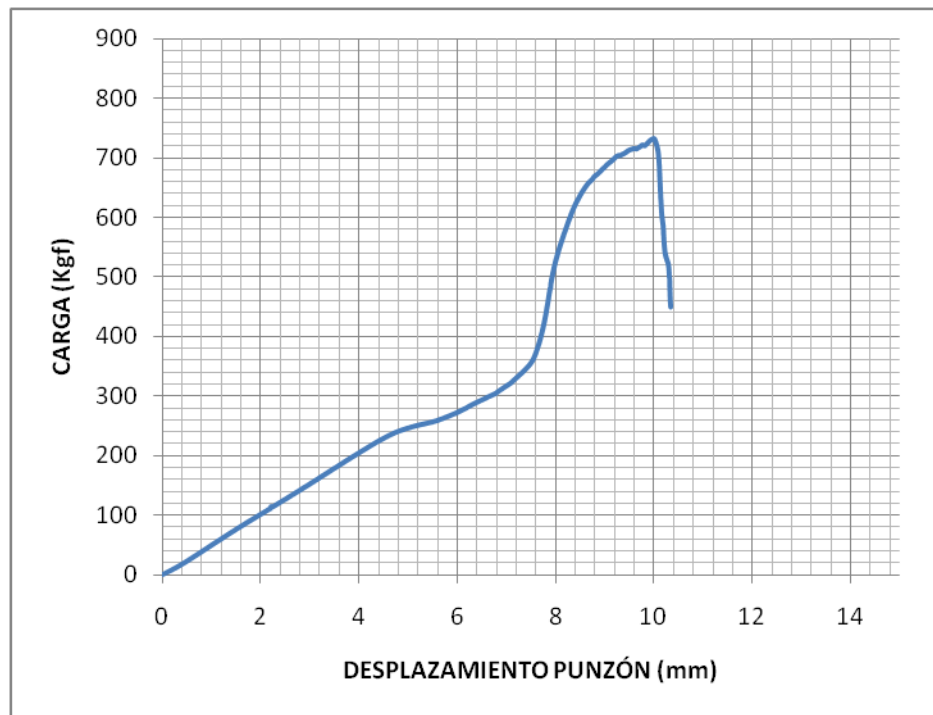
Gráfica 4.27. Carga vs Desplazamiento. Segundo ensayo.



Gráfica 4.28. Carga vs Desplazamiento. Tercer ensayo.

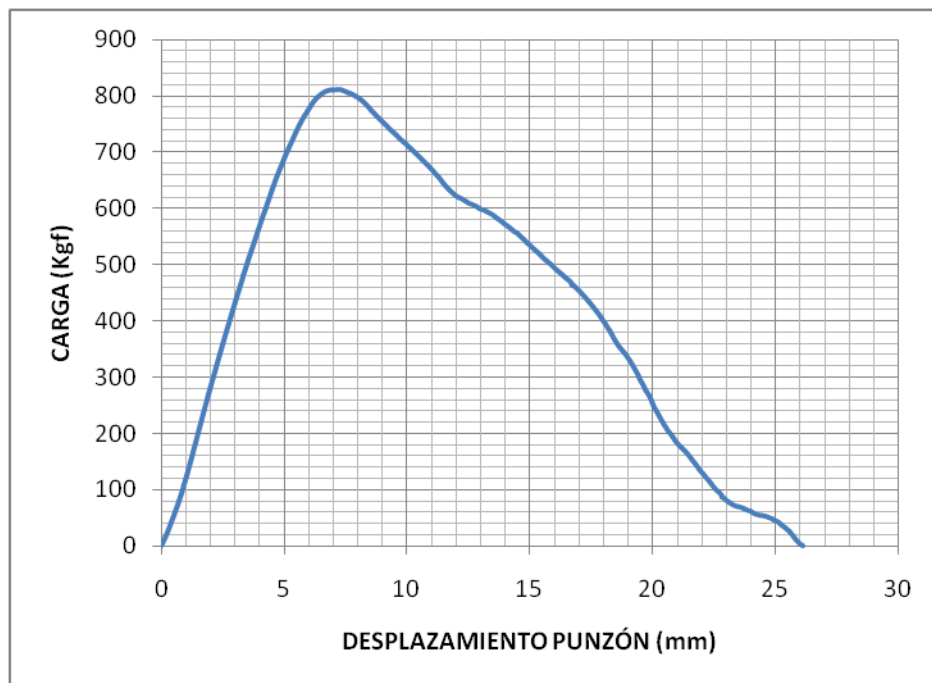


Gráfica 4.29. Carga vs Desplazamiento. Cuarto ensayo.

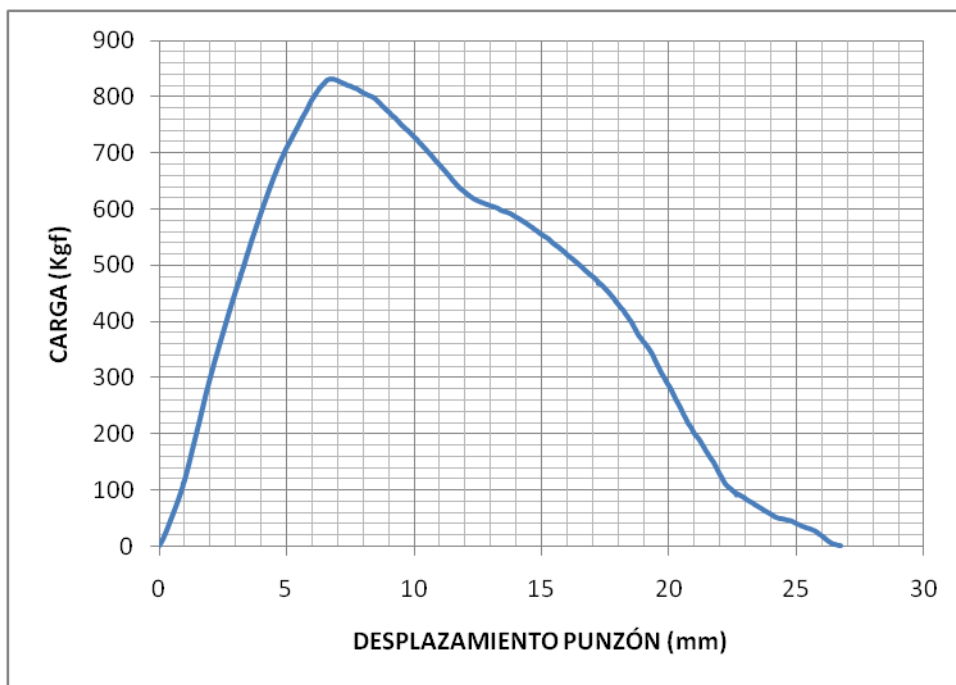


Gráfica 4.30. Carga vs Desplazamiento. Quinto ensayo.

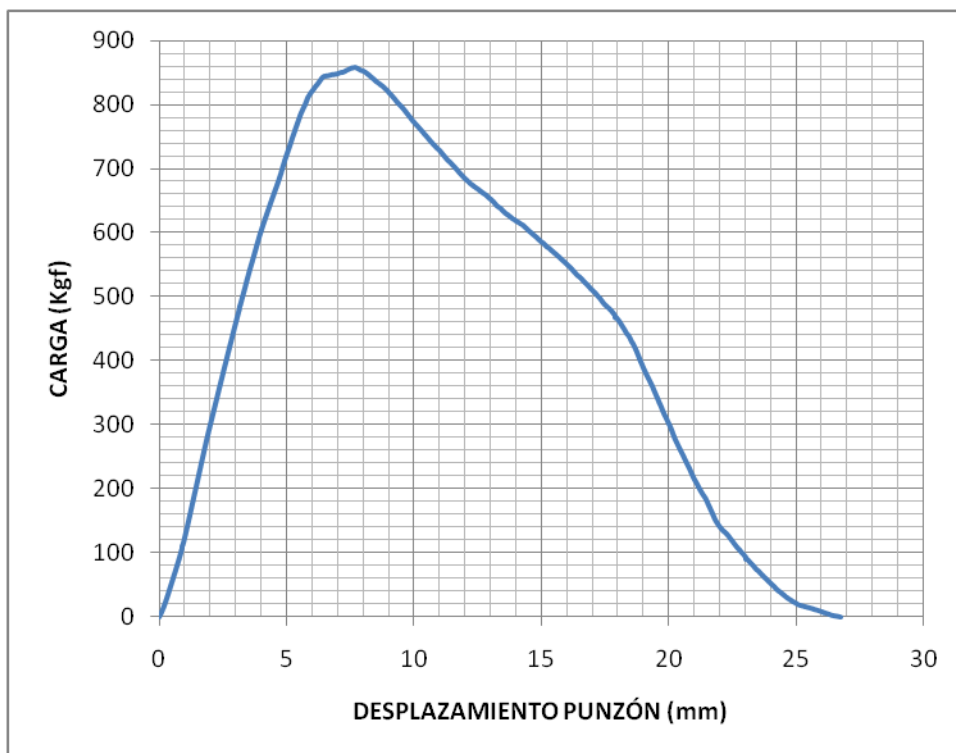
a) Ensayos utilizando vaselina (Primera etapa).



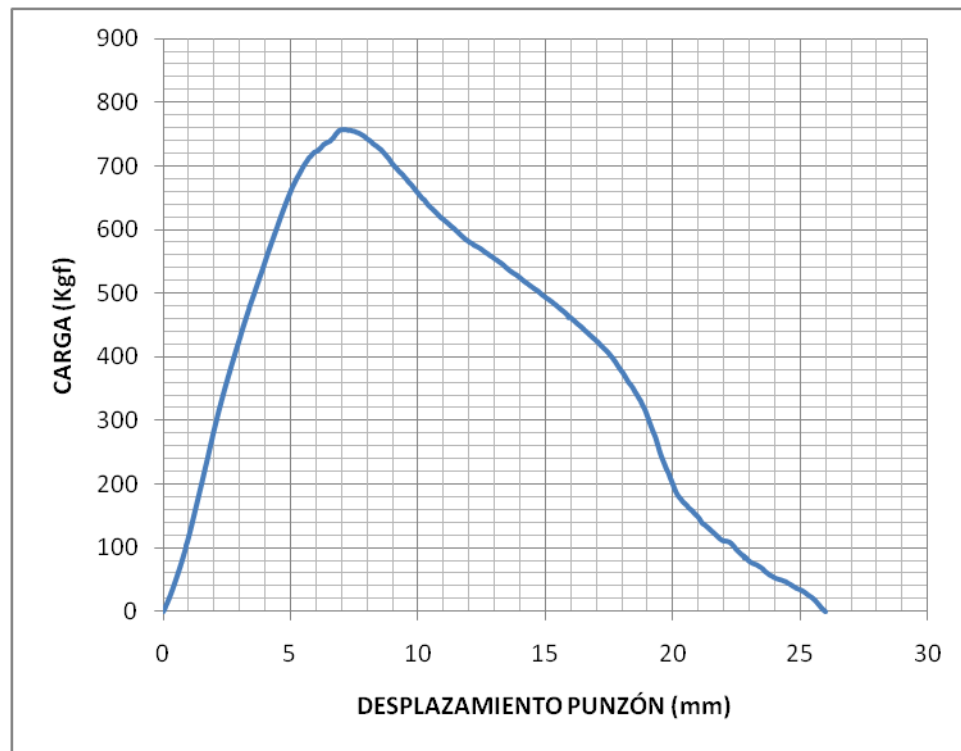
Gráfica 4.31. Carga vs Desplazamiento. Primer ensayo.



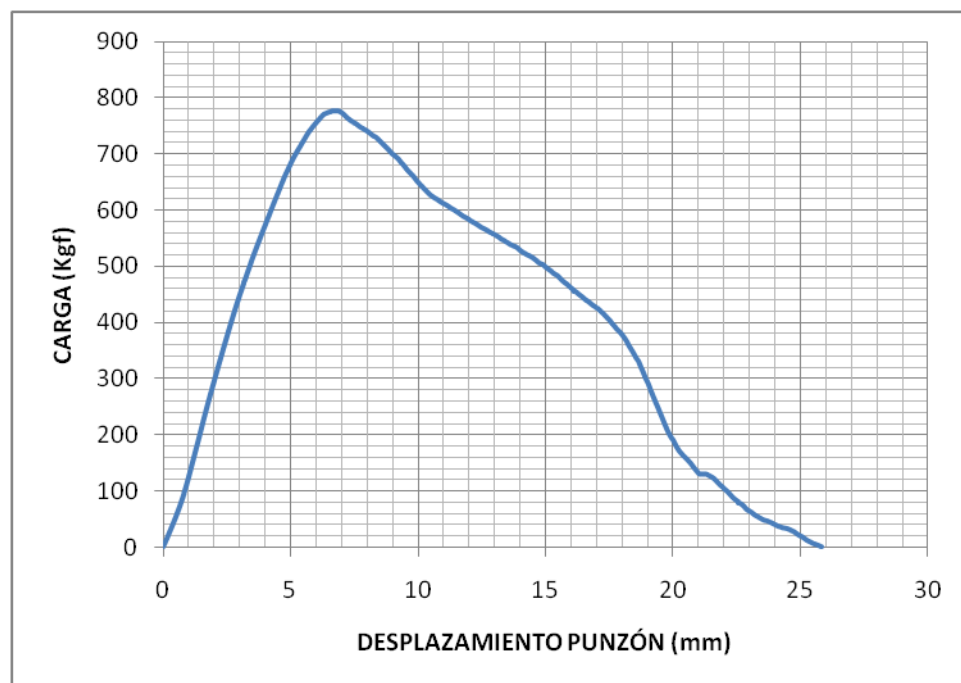
Gráfica 4.32. Carga vs Desplazamiento. Segundo ensayo.



Gráfica 4.33. Carga vs Desplazamiento. Tercer ensayo.

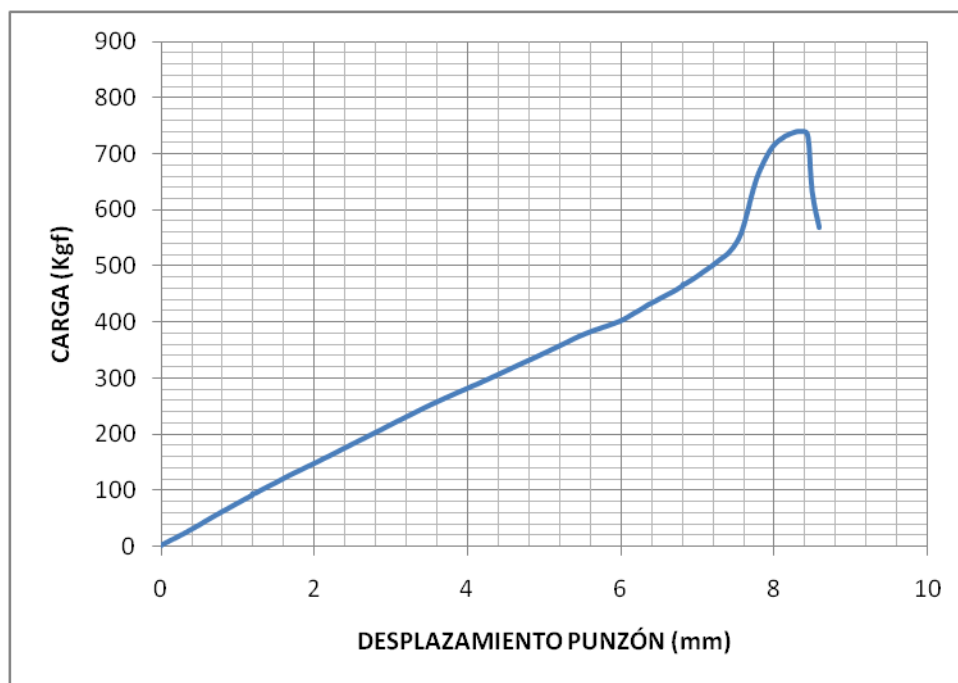


Gráfica 4.34. Carga vs Desplazamiento. Cuarto ensayo.

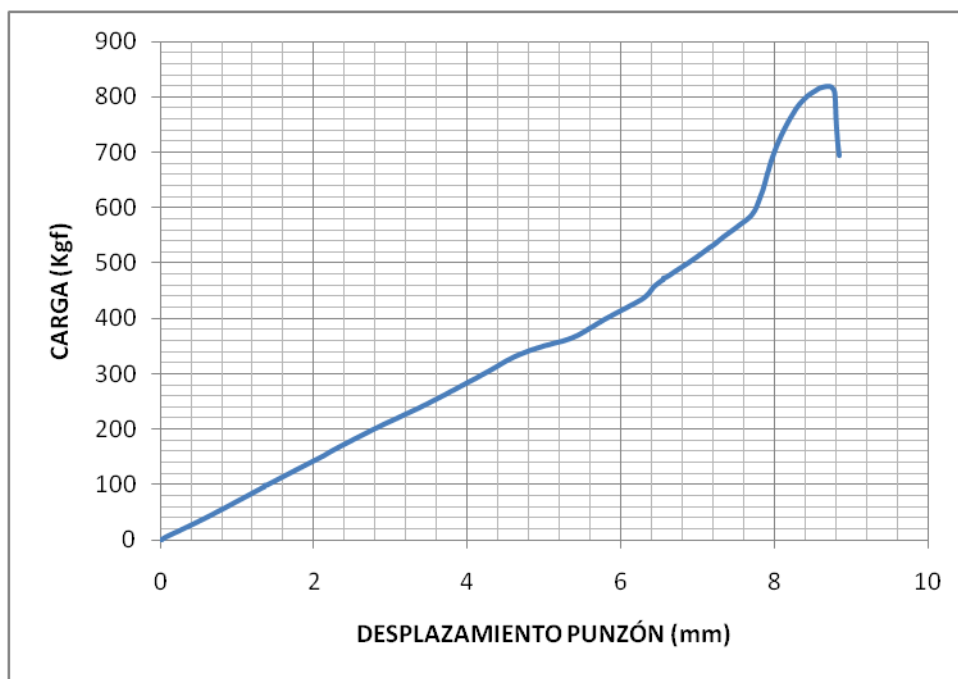


Gráfica 4.35. Carga vs Desplazamiento. Quinto ensayo.

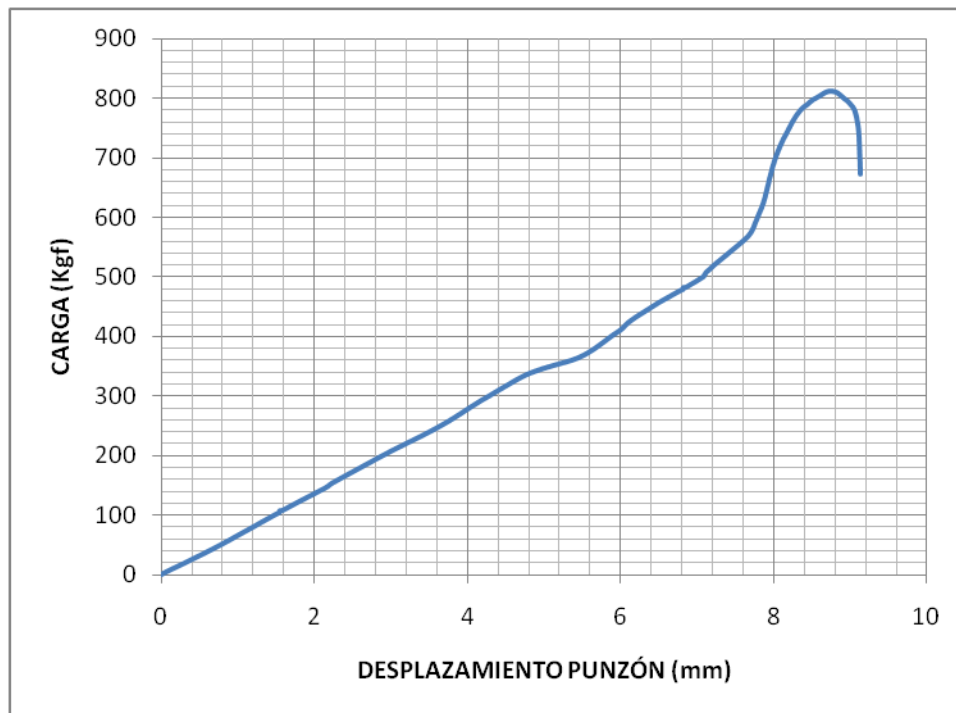
b) Ensayos utilizando vaselina (Segunda etapa).



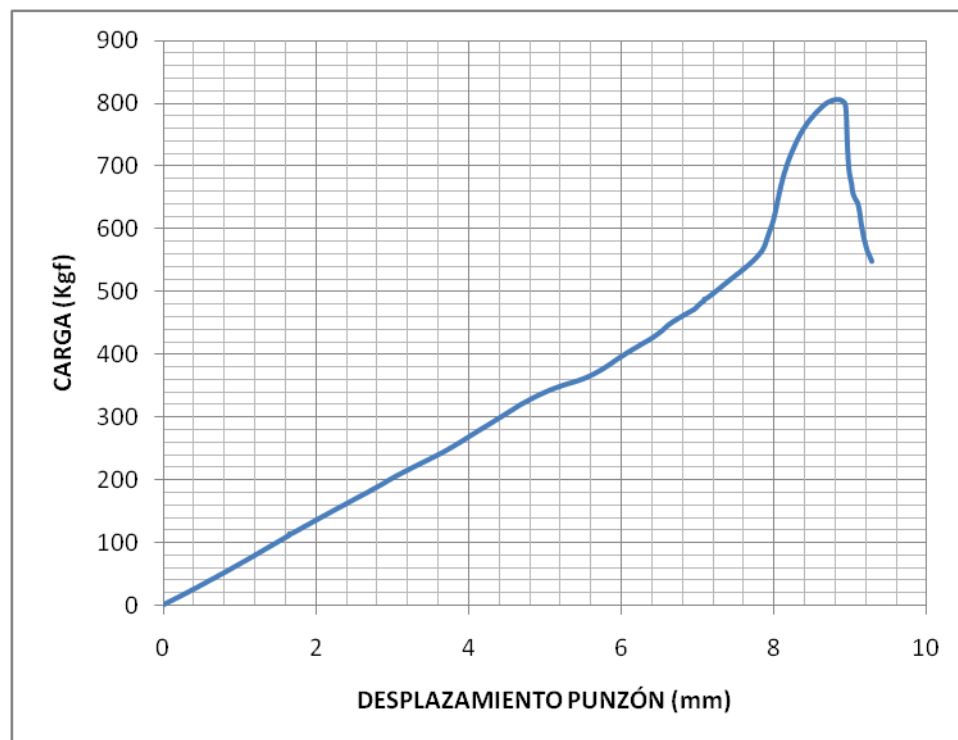
Gráfica 4.36. Carga vs Desplazamiento. Primer ensayo.



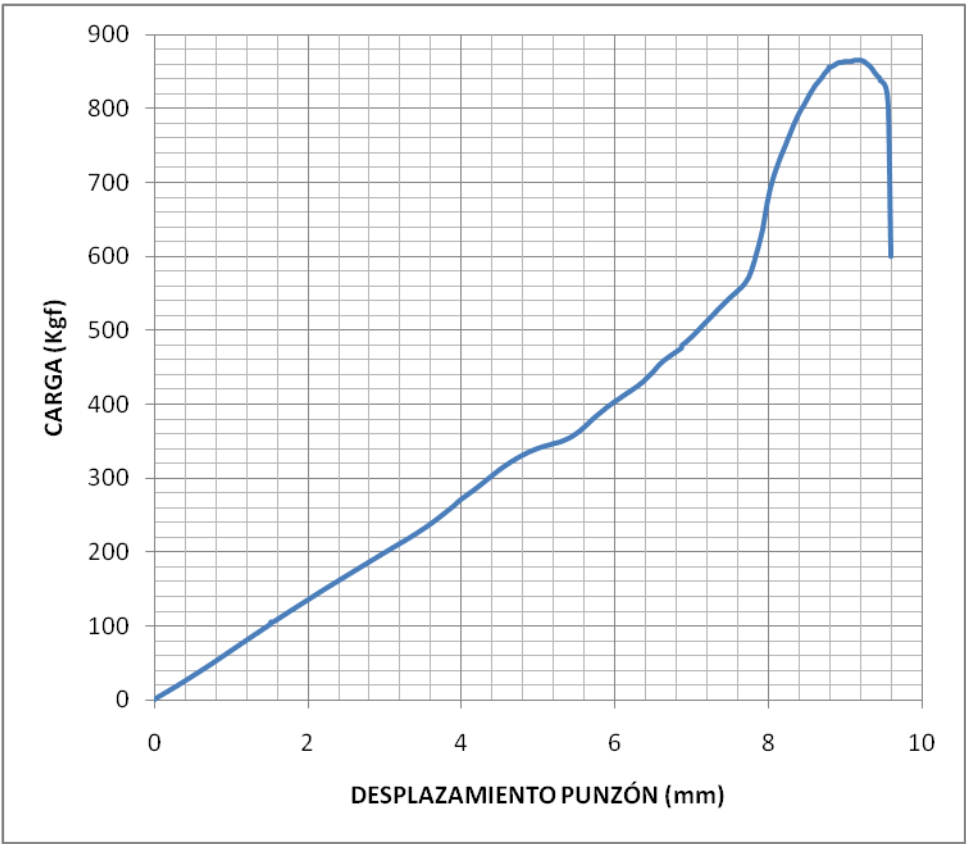
Gráfica 4.37. Carga vs Desplazamiento. Segundo ensayo.



Gráfica 4.38. Carga vs Desplazamiento. Tercer ensayo.



Gráfica 4.39. Carga vs Desplazamiento. Cuarto ensayo.



Gráfica 4.40. Carga vs Desplazamiento. Quinto ensayo.

4.3.2. Descripción de envases obtenidos a través de los distintos ensayos.

Tabla 4.1. Envases obtenidos en la primera etapa con agua jabonosa.

N°	Foto	Descripción
1		Arrugas notables en la brida, y rotura en la base de la misma

Cont. 4.1

2



Leves arrugas alrededor de la brida y ondulación de la misma, fractura alrededor de la copa del envase.

3



Ondulación de la brida, fractura presente desde la base del envase hasta el borde superior del mismo.

4



Presencia de arrugas alrededor de la brida y fractura en el borde superior del envase.

5



Leves arrugas alrededor de la brida y ondulación de la misma, fractura alrededor de la copa del envase.

Como se aprecia en la tabla 4.1, ninguno de los ensayos resultó en un envase completo puesto que se produjeron fracturas en la chapa a la mitad del ensayo, esto hace inverosímil la posibilidad de efectuar la segunda etapa

con este lubricante ya que no concibe la posibilidad de un primer envase que es un requerimiento básico para ejecutar la segunda etapa. Es por esto que no se ejecutó el re-embutido usando este lubricante.

Tabla 4.2. Envases obtenidos en la primera etapa con aceite de manzanilla.

N°	Foto	Descripción
1		Pliegues notables en toda la superficie de la brida y fractura en la pared del envase
2		Pliegues notables en toda la superficie de la brida y fractura en la pared del envase
3		Arrugas notables en toda la superficie de la brida y fractura en la pared del envase

Cont. 4.2

4



Fractura en la pared del envase.

5



Arrugas significativas en la brida y rotura del material en la base del envase.

En la tabla 4.2 se aprecia que no se pudo obtener un envase con las especificaciones planteadas en el diseño por causa de las fracturas ocurridas en la chapa, lo que trae como consecuencia la imposibilidad de efectuar la segunda etapa de embutido con este lubricante.

Tabla 4.3. Envases obtenidos con la primera etapa con bisulfuro de molibdeno.

N°	Foto	Descripción
1		Orejeado y leve fractura en el borde.

Cont. 4.3

2



Orejeado en el borde.

3



Ondulaciones
alrededor de la pared
del envase.

4



Leves arrugas en la
pared del envase.

5



Leves arrugas y
ondulaciones en la
pared del envase.

Tabla 4.4. Envases obtenidos en la segunda etapa con bisulfuro de molibdeno.

N°	Foto	Descripción
6		Presencia de pliegues en la base de la brida, rotura en el borde de la pared.
7		Rotura del envase en la arista entre ambos perfiles.
8		Presencia de pliegues en la base de la brida, rotura en el borde de la pared.
9		Fractura del material en la arista entre ambos perfiles.

Cont. 4.4

10



Fractura en la arista de ambos perfiles.

Tabla 4.5. Envases obtenidos en la primera etapa con manteca vegetal.

Nº	Foto	Descripción
1		Orejeado en el borde superior del envase.
4		Leves marcas de arrugas en la superficie de las paredes del envase.
3		Leves marcas de arrugas en la superficie de las paredes del envase.

Cont. 4.5		
4		Orejeado y una pequeña fractura en el borde superior del envase.
5		Orejeado y leves fracturas en el borde superior del envase.

Tabla 4.6. Envases obtenidos en la segunda etapa con manteca vegetal.

N°	Foto	Descripción
6		Rotura en la arista entre los dos perfiles.
7		Arrugas en la base del primer envase y rotura alrededor de ambos perfiles.

Cont. 4.6

8



Arrugas en la base del primer envase y rotura alrededor de ambos perfiles.

9



Arrugas en la base del primer envase y rotura alrededor de ambos perfiles.

10



Arrugas pronunciadas en la base del primer envase y rotura alrededor de ambos perfiles.

Tabla 4.7. Envases obtenidos en la primera etapa con vaselina.

Nº	Foto	Descripción
1		Orejeado en el borde superior del envase.

Cont. 4.7

2



Leves marcas de arrugas en la superficie de las paredes del envase.

3



Leves marcas de arrugas en la superficie de las paredes del envase.

4



Orejeado y una pequeña fractura en el borde superior del envase.

5



Orejeado y leves fracturas en el borde superior del envase.

Tabla 4.8. Envases obtenidos en la segunda etapa con vaselina.

Nº	Foto	Descripción
6		Rotura en la arista entre los dos perfiles.
7		Arrugas en la base del primer envase y rotura alrededor de ambos perfiles.
8		Arrugas en la base del primer envase y rotura alrededor de ambos perfiles.
9		Arrugas en la base del primer envase y rotura alrededor de ambos perfiles.

Cont. 4.8

10



Arrugas pronunciadas en la base del primer envase y rotura alrededor de ambos perfiles.

4.3.3 Resumen de los resultados obtenidos de carga y rugosidad en cada ensayo.

A continuación se presenta una serie de tablas representativas, en las cuales se establecen los resultados de carga y rugosidad arrojados en los ensayos con cada uno de los lubricantes utilizados en este trabajo de investigación.

Los resultados están acompañados con su respectivo promedio y desviación estándar.

Tabla 4.9. Resultados de fuerza 1era etapa.

Lubricante	Número	Fuerza Máxima (Kgf)	Prom. (Kgf)	Desviación estándar
Agua jabonosa	1	673,60	809,24	94,94
	2	916,62		
	3	875,94		
	4	811,72		
	5	768,30		
Aceite de manzanilla	1	976,45	726,42	329,39
	2	937,21		
	3	979,31		
	4	434,46		

Cont. 4.9	5	304,69		
	1	861,73		
	2	842,96		
Bisulfuro de molibdeno	3	812,75	814,85	39,86
	4	759,59		
	5	797,24		
	1	619,98		
	2	662,18		
Manteca vegetal	3	679,80	671,65	32,57
	4	700,71		
	5	695,61		
	1	778,39		
	2	832,62		
Vaselina	3	858,51	800,49	43,04
	4	776,66		
	5	756,27		

Tabla 4.10. Resultados de fuerza 2da etapa.

Lubricante	Número	Fuerza Máxima (Kgf)	Prom. (Kgf)	Desviación estándar
	6	827,73		
	7	720,61		
Bisulfuro de molibdeno	8	366,73	659,95	173,13
	9	691,32		
	10	693,37		
	6	723,04		

Cont. 4.10	7	818,14		
Manteca vegetal	8	640,98	731,42	63,08
	9	743,53		
	10	731,29		
	6	741,08		
	7	819,27		
Vaselina	8	811,52	808,79	44,73
	9	805,91		
	10	866,16		

Tabla 4.11. Resultados de rugosidad.

Lubricante	Número	Rugosidad (μm)	Prom. (μm)	Desviación estándar
Bisulfuro de molibdeno	1	0,48		
	2	0,46	0,46	0,02
	3	0,44		
Manteca vegetal	1	0,49		
	2	0,30	0,42	0,11
	3	0,49		
Vaselina	1	0,33		
	2	0,49	0,45	0,11
	3	0,54		

En la discusión de resultados del siguiente capítulo se explicará con más detalle el porqué se realizó análisis de rugosidad solo a los ensayos con estos lubricantes.

CAPÍTULO 5

Análisis de resultados

A continuación se analizarán los resultados obtenidos de los ensayos con distintos lubricantes, comparando la carga máxima promedio y la carga teórica según *B. Wassilieff, (1966)* y adicionalmente con la del modelo de *M. Groover, (1997)*, además de una descripción de los defectos ocurridos durante la realización de los ensayos.

5.1. Embutido utilizando agua jabonosa (Primera etapa).

Culminados los ensayos se observó que todas las gráficas tienen relativamente el mismo comportamiento, a medida que el punzón se desplaza y la brida se endurece por deformación la carga aumenta gradualmente hasta alcanzar un valor máximo en el que ocurre la fractura, en promedio esta carga fue de 809,24 *Kgf*.

El resultado de estos ensayos lleva a concluir que este lubricante no es lo suficientemente eficiente para reducir o eliminar la adherencia entre el aluminio y el herramental, pues el coeficiente de fricción entre ellos produjo en cada prueba una fractura prematura del material. En la tabla 4.1 se puede apreciar con mayor detalle tales defectos.

Las cargas teóricas calculadas con los modelos (*B. Wassilieff, 1966*) y (*M. Groover, 1997*) de 782,97 y 353,03 (*Kgf*) respectivamente, no arrojan

resultados concluyentes acerca de su parecido con la realidad de estos ensayos, por ser modelos en los que se considera un proceso de embutido sin anomalías importantes y donde se obtiene un envase completo y sin fractura.

En algunos de los ensayos se apreciaron pliegues u ondulaciones en la brida del producto, posiblemente consecuencia del ajuste hecho a los tornillos uno por uno y en trayectoria circular que generó una mala distribución de presión en el prensalámina. Sin embargo para ensayos posteriores se intentó corregir este desperfecto utilizando una trayectoria de apriete de los tornillos en forma de equis (X).

Es importante resaltar que durante la realización del ensayo el material emitía un sonido de “rechinado” producto del contacto metal – metal, ya que el lubricante no cumplió con la función de disminuir el coeficiente de roce entre el aluminio y el dispositivo.

En estos ensayos no se consideró adecuado efectuar un análisis de rugosidad a la chapa, debido a que no se logró completar el envase sin fractura y consecuentemente no se obtuvo una pared lateral en donde ejecutar las mediciones pertinentes. Ver tabla 4.1.

5.2. Embutido utilizando agua jabonosa (Segunda Etapa).

Con el uso de este lubricante no fue posible la ejecución de una segunda etapa de embutido, puesto que en la primera fase del proceso no pudo concluirse un envase completo (ver tabla 4.1). Éste primer envase es indudablemente necesario para la ejecución de la etapa de re-embutido y el hecho de que no se pudo efectuar el conformado del mismo, reafirma la ineficiencia de este lubricante para ejecutar el proceso en las condiciones dimensionales de este trabajo.

5.3. Embutido utilizando aceite de manzanilla (Primera Etapa).

Al analizar el comportamiento de estos ensayos se observó que en tres de ellos, la curva crece constantemente con pequeños cambios de pendiente

hasta alcanzar una carga máxima de 930 Kgf y un desplazamiento del punzón de 6 mm, luego de llegar a esta carga la pendiente tiende a cero hasta llegar al punto en que se fractura el material. Por otra parte, los últimos dos ensayos no lograron pasar de un desplazamiento del punzón mayor a 5 mm y de 450 Kgf de carga, es posible que tal desviación se deba a una mala distribución de la carga en el prensalámina producto del ajuste hecho a los tornillos.

Debe señalarse, que el lubricante no pudo reducir lo suficiente la fricción entre el material y la matriz, dando como resultado la fractura prematura en la pared del envase e impidiendo así la embutición exitosa del aluminio.

Al analizar el ensayo número 5 de la tabla 4.2 se puede apreciar que el disco de desarrollo tuvo una presión excesiva del prensalámina en una parte específica de la superficie, dando como resultado el desgarró del envase justo al fondo de esa zona.

Similar a los ensayos en los que se usó agua jabonosa, en estos no se pudo alcanzar el conformado de un primer envase de manera que no fue factible realizar un análisis de rugosidad a los mismos.

5.4. Embutido utilizando aceite de manzanilla (Segunda Etapa).

En la ejecución de los ensayos con aceite de manzanilla se logra visualizar según la tabla 4.2 que no se pudo efectuar el conformado de ningún envase en la primera etapa, lo que hizo insostenible la posibilidad de efectuar el re-embutido por la ineficiencia del lubricante a la hora de consumir el proceso con el aluminio 3003-H14.

5.5. Embutido utilizando bisulfuro de molibdeno (Primera Etapa).

Luego de examinar las gráficas de los ensayos en los que se utilizó este lubricante, se puede apreciar que todos tuvieron un comportamiento muy similar; en el que se observa claramente como la carga va aumentando hasta

un valor máximo promedio de 814,85 *Kgf*, producto del endurecimiento por deformación de la brida, de allí en adelante ocurre un descenso consecuente en la misma debido a que el diámetro de la brida va disminuyendo gradualmente. Al mismo tiempo se puede visualizar que luego de un desplazamiento del punzón de 20 mm hay una pequeña elevación de la carga, debido a que en este punto está terminando de pasar el borde engrosado del envase por la matriz de embutición.

Con el uso de este lubricante se lograron obtener cinco envases completos con una carga máxima promedio de 814,85 *Kgf*.

La carga estimada por el modelo teórico (*B. Wassilieff, 1966*) de 782,97 *Kgf* subestima en 4% a la obtenida experimentalmente, es decir, representa un modelo acertado para estimar la carga máxima del proceso bajo las condiciones específicas de estos ensayos.

La carga según *M. Groover (1997)* de 353,05 *Kgf* es un 56% menor a la obtenida de forma experimental y para el caso específico de esta investigación genera una aproximación inexacta de la carga máxima de embutición.

El bisulfuro de molibdeno representó una buena opción de lubricación en el proceso de embutido con el aluminio 3003-H14, debido a que en todos los ensayos realizados se logró obtener un envase sin fractura prematura de la chapa, pues este lubricante pudo disminuir el contacto y la adherencia característica entre el material y el dispositivo.

En cuanto a los envases obtenidos se puede apreciar la presencia de orejado o formación irregular de sinuosidades en la pared lateral, debido a la anisotropía característica de la lámina que hace que sus propiedades mecánicas sean diferentes en distintas direcciones y genere este tipo de irregularidades.

A los envases se le realizó un estudio de acabado superficial con un rugosímetro, aplicando 4 mediciones con una distancia de 0,25x5mm y dando como resultado un valor promedio de rugosidad de 0,46 μm con marcas no visibles a simple vista ni perceptibles al tacto.

5.6. Embutido utilizando bisulfuro de molibdeno (Segunda Etapa).

En la realización de los ensayos de re-embutido con este lubricante hubo un comportamiento similar, a medida que el punzón avanzaba la carga aumentaba gradualmente hasta llegar a un valor máximo en el que ocurría la fractura súbita de la chapa.

Bajo las condiciones dimensionales del dispositivo, donde se ejecutó una reducción de área de 25%, el bisulfuro de molibdeno no resultó del todo eficiente en la ejecución del conformado, puesto que en todos los ensayos ocurrió fractura del material antes de culminar el proceso.

Es viable que adicionalmente a la efectividad del lubricante otra posible causa de este desperfecto sea el porcentaje de reducción área en esta etapa, que aunque menor al valor límite recomendado por (*M. Groover, 1997*) de 30%, pudo haber generado en el caso específico del aluminio 3003-H14 una deformación que no pudo soportar bajo las condiciones de ensayo, provocando fractura prematura de la chapa.

Al observar la tabla 4.4 se aprecia que en todos los ensayos se presenta una fractura en la pared de los envases luego de un desplazamiento del punzón no mayor a 8 mm, a demás en tres de ellos se observan algunas arrugas a nivel de la brida que posiblemente se deban a la magnitud de la zona de contacto plano entre el pisador y la matriz, que fue de 1,18 mm.

No fue factible la aplicación de un análisis de rugosidad a los envases de estos ensayos por existir fractura en la pared lateral de los mismos y no tener una zona regular en la cual efectuar el análisis.

5.7. Embutido utilizando Manteca Vegetal (Primera Etapa).

Visualizando las gráficas de 4.21 a 4.26 se puede notar que el comportamiento del material guarda mucha similitud con el descrito en los ensayos en los que se usó bisulfuro de molibdeno (primera etapa), ya que la carga aumenta gradualmente hasta alcanzar una carga máxima promedio de 690 Kgf y de allí en adelante comienza a descender debido a la disminución del diámetro en la brida.

La manteca vegetal resultó ser una excelente opción de lubricación para el proceso en esta etapa, con aluminio 3003-H14 y bajo las condiciones dimensionales del dispositivo, puesto que se lograron obtener los envases completos en cada ensayo sin anomalías importantes.

Para el caso específico de estos ensayos el modelo teórico (*B. Wassilieff, 1966*) sobreestima el valor real en un 14% y el propuesto por (*M. Groover, 1997*) lo subestima en un 52 %, al igual que con el bisulfuro de molibdeno en la primera etapa, el primer modelo guarda mayor relación con los resultados experimentales.

Como se aprecia en la tabla 4.5 los envases obtenidos tienen formación irregular de sinuosidades, debido a la anisotropía del material. Estas sinuosidades se ven claramente puesto que hay cuatro crestas a 90°.

Se realizó un estudio de acabado superficial con un rugosímetro, tomando 4 mediciones con una distancia de 0,25x5mm dando un valor promedio de rugosidad de 0,42 μm , es decir, un acabado mucho más fino en comparación al obtenido con el bisulfuro de molibdeno, con marcas no visibles ni perceptibles al tacto.

5.8. Embutido utilizando Manteca Vegetal (Segunda Etapa).

En las gráficas 4.27 a 4.32 se observa de manera general un comportamiento similar entre ensayos, donde la carga aumenta a medida que

el punzón avanza hasta alcanzar una carga máxima de 400 Kgf, de allí en adelante comienzan a tener muchas variaciones hasta llegar al punto de fractura del material.

La manteca vegetal no representó un lubricante del todo efectivo en la ejecución de estos ensayos y bajo las condiciones dimensionales del dispositivo, puesto que semejantemente a los ensayos de la segunda etapa con bisulfuro de molibdeno se generaron fracturas en la pared lateral de todos los envases, es posible que tales defectos se deban a las mismas causas que ocasionaron la fractura con el uso del bisulfuro.

5.9. Embutido utilizando Vaselina (Primera Etapa).

Al examinar las gráficas se aprecia un comportamiento en el que se observa claramente como la carga va aumentando hasta un valor máximo de 800,49 Kgf, de allí en adelante ocurre un descenso consecuente en la misma debido a que el diámetro de la brida va disminuyendo gradualmente.

Con el uso de este lubricante se lograron obtener cinco envases completos con una carga máxima promedio de 800,49 Kgf.

La carga estimada por el modelo teórico (*B. Wassilieff, 1966*) de 782,97 Kgf subestima en 2% a la obtenida experimentalmente, es decir, representa un modelo acertado para estimar la carga máxima del proceso bajo las condiciones específicas de estos ensayos.

La carga según *M. Groover (1997)* de 353, 05 Kgf es un 44% menor a la obtenida de forma experimental y para el caso específico de esta investigación genera una aproximación inexacta de la carga máxima de embutición.

La vaselina representó una buena opción de lubricación en el proceso de embutido con el aluminio 3003-H14, debido a que en todos los ensayos realizados se logró obtener un envase sin fractura prematura de la chapa,

pues este lubricante pudo disminuir el contacto y la adherencia característica entre el material y el herramental.

5.10. Embutido utilizando Vaselina (Segunda Etapa).

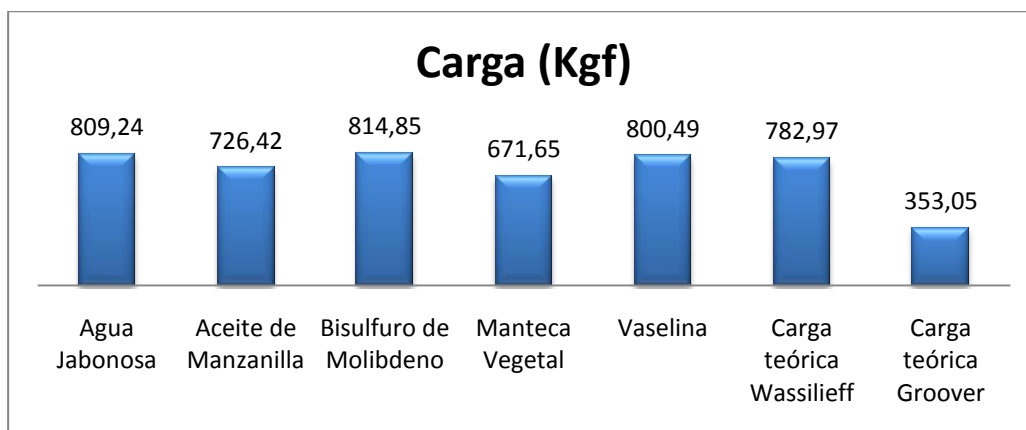
En la realización de los ensayos de re-embutido con este lubricante hubo un comportamiento similar entre sí, a medida que el punzón avanzaba la carga fue aumentando gradualmente hasta llegar a un valor máximo en el que ocurría la fractura súbita de la chapa.

Bajo las condiciones dimensionales del dispositivo, la vaselina no resultó del todo eficiente en la ejecución del conformado en la segunda etapa, puesto que en todos los ensayos ocurrió fractura del material antes de culminar el proceso.

Al observar la tabla 4.8 se aprecia que en todos los ensayos se presenta una fractura en la pared de los envases luego de cierto tiempo desde la aplicación de la carga.

No fue factible la aplicación de un análisis de rugosidad a los envases de estos ensayos por existir fractura en la pared lateral de los mismos y no tener una zona regular en la cual efectuar el análisis.

5.11. Comparación entre resultados obtenidos y estimados teóricos.



Gráfica 5.1. Comparación cargas experimentales con teóricas, 1era etapa.

En la gráfica 5.1 se observa que el lubricante que concibió la menor carga en comparación con todas las demás fue la manteca vegetal, siendo así la opción más efectiva de lubricación en el proceso por disminuir la posibilidad de desgaste excesivo en el herramental, alargando así su vida útil.

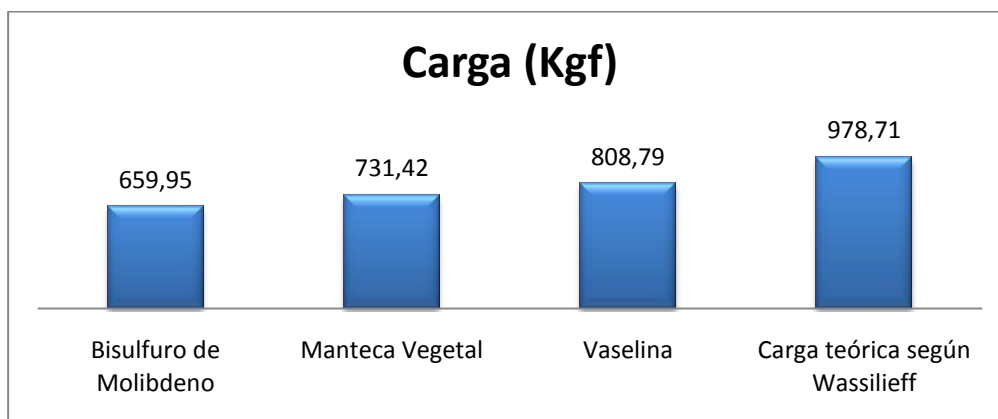
Con el bisulfuro de molibdeno y la vaselina se tienen las mayores cargas en comparación con las demás opciones y son hasta un 17% mayor a la obtenida con manteca vegetal. Con estos lubricantes se generan mayores esfuerzos en el herramental y lo predispone a mayor desgaste, sin embargo fue uno de los lubricantes con el que se pudo completar la etapa satisfactoriamente y se posiciona como la segunda mejor elección de lubricación entre las distintas opciones.

El agua jabonosa generó una carga 17% mayor a la obtenida con manteca vegetal y en el mismo sentido el aceite de manzanilla superó esta carga en un 7%, con ninguno de estos dos lubricantes fue posible la operación de embutido en la primera etapa ya que se fracturó la chapa durante el conformado y por los resultados obtenidos se llega a la conclusión de que no logran disminuir la adherencia característica entre el aluminio y el dispositivo.

Al comparar las cargas teóricas con las experimentales se puede manifestar que el modelo propuesto por (*B. Wassilieff, 1966*), se aproxima hasta en un 4% a estos valores, convirtiéndolo en un modelo bastante asertivo a la hora de predecir las cargas para este proceso de embutido.

Como se aprecia en la gráfica 5.2, solo fue posible realizar los ensayos de la segunda etapa de embutido usando bisulfuro de molibdeno, manteca vegetal y vaselina puesto que fueron los únicos con los que se llegó a obtener los primeros envases necesarios para ejecutar esta etapa, de manera que solo se tienen valores de carga experimental para estos lubricantes.

Así mismo en la gráfica 5.2 se hace referencia solo al modelo teórico propuesto por (*B. Wassilieff, 1966*), puesto que el otro modelo (*M. Groover, 1997*) considera el proceso llevado a cabo en una sola fase y no emite estimados de carga para etapas sucesivas del proceso.



Gráfica 5.2. Comparación de cargas experimentales con teóricas, 2da etapa.

.Al comparar los resultados de carga en esta etapa se puede observar que a diferencia del comportamiento que se tuvo en la primera fase, los valores de carga generados con el uso de bisulfuro de molibdeno y vaselina fueron hasta un 10% menor a los obtenidos con manteca vegetal.

Es posible que esta discrepancia se deba a que en los ensayos con manteca vegetal se obtuvo un desplazamiento del punzón de 11mm, que fue mayor al obtenido en los ensayos con bisulfuro de molibdeno (7mm) y vaselina (8mm), es decir, ya que con la manteca vegetal el material sufrió un mayor endurecimiento por deformación es lógico que se obtuvieran mayores cargas de trabajo antes de ocurrir la fractura.

Por otra parte la carga estimada por el modelo teórico supera a las obtenidas experimentalmente hasta en un 32%, sin embargo no sería adecuado inferir en la exactitud de este modelo en la predicción de la carga puesto que en todos los ensayos ocurrió una fractura prematura del material como se aprecia en las tablas 4.4, 4.6 y 4.8.

En la tabla 5.1. Se hace referencia a las rugosidades encontradas con cada lubricante, donde visualiza que con manteca vegetal se obtuvo la menor rugosidad hasta, un 8% menor que las demás opciones de lubricación.

Tabla 5.1 comparación entre rugosidades encontradas.

Bisulfuro de Molibdeno	Manteca Vegetal	Vaselina
0,46 (μm)	0,42 (μm)	0,45 (μm)

CAPÍTULO 6

Conclusiones y recomendaciones.

Conclusiones

Con los ensayos realizados se hace notar que el uso de la manteca vegetal y el bisulfuro de molibdeno son una excelente opción de lubricación en el proceso de embutición cilíndrica del aluminio 3003-H14, sin embargo no resultan del todo eficientes en la aplicación de una etapa sucesiva de re-embutido bajo los rangos y parámetros dimensionales establecidos en esta investigación.

Los ensayos en los que se usó manteca vegetal arrojaron los menores valores de carga (671,65 Kgf) y la menor rugosidad superficial en las paredes de los envases (0,42 μm), en comparación con los ensayos usando el resto de los lubricantes.

Con el uso del bisulfuro de molibdeno y la vaselina se generan cargas hasta un 17% más elevadas que con el uso de la manteca (814,85 Kgf) y una rugosidad hasta 9% mayor (0,46 μm). Representa una segunda opción a la hora de elegir un lubricante para el proceso de embutido, comparado con el uso de la manteca vegetal.

El aceite de manzanilla y el agua jabonosa no son lubricantes recomendados para la realización de procesos de embutido con aluminio 3003-H14 bajo condiciones de dimensionamiento semejantes a las establecidas en este trabajo de investigación, ambos generan mayor adherencia entre la chapa y las herramientas en comparación con la manteca, el bisulfuro de molibdeno y la vaselina; y promueven la fractura en las paredes del envase.

La carga teórica propuesta por el modelo de *B. Wassilieff (1966)*, refleja valores aproximados a los obtenidos experimentalmente en la primera etapa con un porcentaje de diferencia entre ellos de hasta 4%. Comparación que se hace sólo para los ensayos en los que se obtuvo un envase completo, pues este modelo considera una culminación satisfactoria del proceso.

La aproximación de carga máxima propuesta por *M. Groover (1997)*, no emite valores cercanos a los obtenidos a nivel experimental subestimándolos hasta en un 56%. Es posible que tal diferencia se deba a que el factor de corrección de fricción que considera este modelo no aplique en el caso específico del aluminio 3003-H14. Al igual que en la comparación con el modelo de *Wassilieff*, en ésta solo se toman en cuenta las cargas obtenidas en los ensayos donde se generaron envases sin ningún tipo de fractura, hacerlo con ensayos donde exista rotura del material no arrojaría análisis concluyentes, pues ambos modelos teóricos consideran un proceso llevado a cabo sin ningún tipo de irregularidad.

Culminados los ensayos de re-embutido se logra visualizar que con el uso de ninguno de los lubricantes se llegó a obtener un envase completo. Se presume que a demás de la lubricación otra posible causa de este inconveniente, sean las características dimensionales que posee el dispositivo, características y dimensiones extraídas del rango teórico recomendado por distintos autores para este proceso.

Es posible que con un rediseño del dispositivo de la etapa de re-embutido en el que se garantice generar una reducción de área entre etapas menor a la utilizada en esta investigación ($\%R=25\%$) sin descuidar ningún otro parámetro crítico del proceso, el bisulfuro de molibdeno y la manteca vegetal sigan siendo una excelente opción de lubricación para la aplicación de este proceso en más de una etapa. Ésta suposición se basa en los resultados obtenidos de la primera fase de embutido con el uso de dichos lubricantes, en la que se logró obtener todos los envases sin fractura del material.

Recomendaciones.

Algunas recomendaciones para investigaciones futuras asociadas a este campo son:

Realizar las simulaciones pertinentes del proceso de embutición, haciendo uso de programas computacionales con el fin de corroborar los parámetros de diseño utilizados en esta investigación para verificar y evaluar si el diseño de los troqueles de embutido y re-embutido puede ser mejorado en cuanto a dimensionamiento y características se refiere.

Implementar el uso de distintas aleaciones de aluminio en la ejecución de los ensayos, cumpliendo siempre con las dimensiones de espesor de chapa y diámetro de desarrollo que fueron establecidos en el diseño del proceso de embutido de este trabajo de investigación.

Evaluar y analizar el proceso variando parámetros o criterios como porcentaje de reducción de área y relación de embutido como base para el desarrollo de investigaciones posteriores acerca de este proceso de conformación.

Evaluar y analizar el proceso haciendo uso de nuevos lubricantes que disminuyan la adherencia característica existente entre el aluminio y el herramental para compararlos con los resultados obtenidos en esta investigación.

Rediseñar y fabricar el dispositivo de re-embutición en función al diámetro final de envase, para garantizar una reducción de área entre etapas menor a 25% cuidando siempre los parámetros críticos del proceso y utilizar los lubricantes que generaron los resultados más satisfactorios en esta investigación para certificar que el uso de los mismos es una excelente opción a la hora de ejecutar este tipo de procesos de conformado. Una buena opción para este rediseño es hacer el dispositivo a mayor escala.

Referencias

- Allen, S. y Mahdavian, S. (2007). *The effect of lubrication on die expansion during the deep drawing of axisymmetrical steel cups*. Journal of materials processing technology, 199, (2007), 102-107.
- Baldayo, I y Bracho, C. (2009). Análisis del proceso de embutido cilíndrico en función de la velocidad del punzón y del tipo de lubricante. Trabajo de grado. Valencia. Universidad de Carabobo.
- Cabello, S. (2001). Estudio de una metodología para evaluar la formabilidad de materiales metálicos. Trabajo de grado. Valencia. Universidad de Carabobo.
- Cabello y Ollarves (2008). “Efecto de la geometría de la matriz y la utilización de lubricantes no convencionales en la carga de extrusión directa del estaño”. V Congreso Bolivariano de Ingeniería Mecánica y II Congreso Binacional de Ingeniería Mecánica, 17- 20 Junio, Cúcuta, Colombia.
- Cabello S. (2009). *Tópico sobre conformado de metales*. ISBN: 978-980-12-4100-3. Universidad de Carabobo. Valencia. 235- 248; 269-288.
- Colgan, M., Monaghan, J. (2003). *Deep drawing process: analysis and experiment*. Journal of Materials Processing Technology, 132 (2003) 35 – 41.

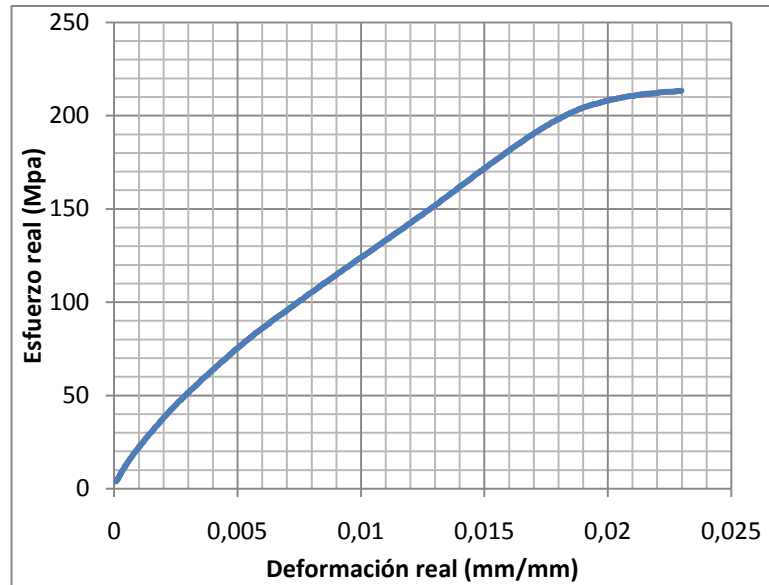
- Fundación ASCAMM (Asociación Catalana de Empresas de Moldes y Matrices)
- Groover M. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna*. 1° Edición. Editorial Prentice-Hall. 513 – 520.
- Industrias Celta, S.A. www.celta.com.ve/shampooocel.pdf
- Kim Hyunok, et al, (2009). *Evaluation of stamping lubricants in forming advanced high strength steels (AHSS) using deep drawing and ironing tests*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 47, (2009), 4122–4133.
- Kuvin, B. (2005). Embutido profundo de la A, a la Z. *Revista Metalforming*, 4-11.
- Lang, L., Danckert, J., Nielsen, K. (2004). *Investigation into hydrodynamic deep drawing assisted by radial pressure part I. Experimental observations of the forming process of aluminum alloy*. Journal of Materials Processing Technology, e148, (2004), 119–131.
- Navarro López T. *Troquelado y Estampado*. Quinta Edición Ampliada, Ed. Gustavo Gili, S.A. Barcelona, 1976.
- Norton R. (1999). *Diseño de Maquinas*. Editorial Prentice Hall. Mexico.
- Oehler-kaiser. *Herramientas de troquelar, estampar y embutir*. Ed. Gustavo Gili, S.A. Barcelona, 1977.
- Rodríguez Julián, et al. (2006). *Procesos industriales para materiales metálicos*. 2° Edición Editorial Visión Libros.
- Rossi Mario. *Estampado en frio de la chapa*. Novena Edición. Ed. Dossat. España, 1979.
- Valdivia, Robles, L., Santana, R. (2006). *Troquel sensorizado para el estudio de las principales fuerzas que intervienen en el proceso de embutición*. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de pinar del Rio. Cuba, 37 – 44.
- Shey J. (2002). *Procesos de manufactura*. 3° Edición. Editorial McGraw-Hill. 422 - 433

- Wassilieff B. (1966). Emboutissage. Ediciones Dunond. Paris, Francia.
- Wick, C., et al, Tool and Manufacturing Engineers Handbook, 4th ed., Vol. II, forming, Society of Manufacturing Engineers, Dearborn, Mich,. 1984.

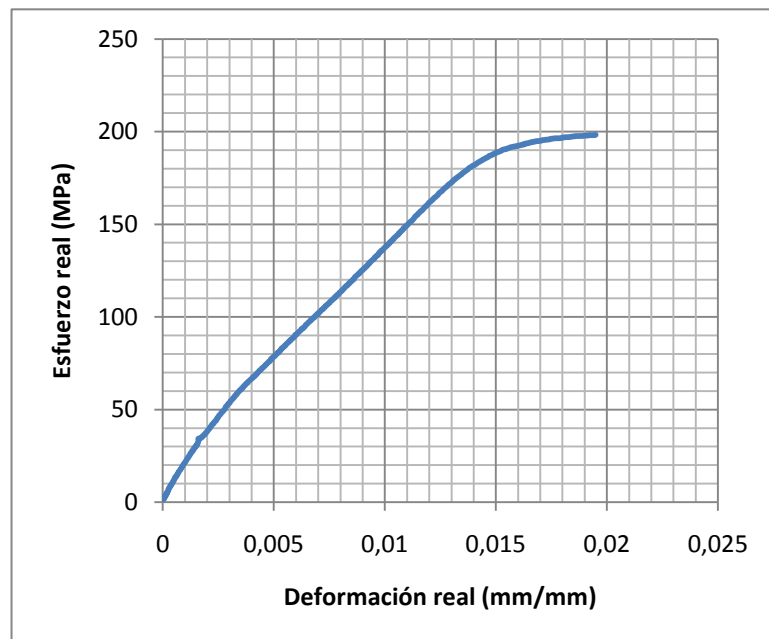
Apéndice A

Comportamiento del material a ensayar.

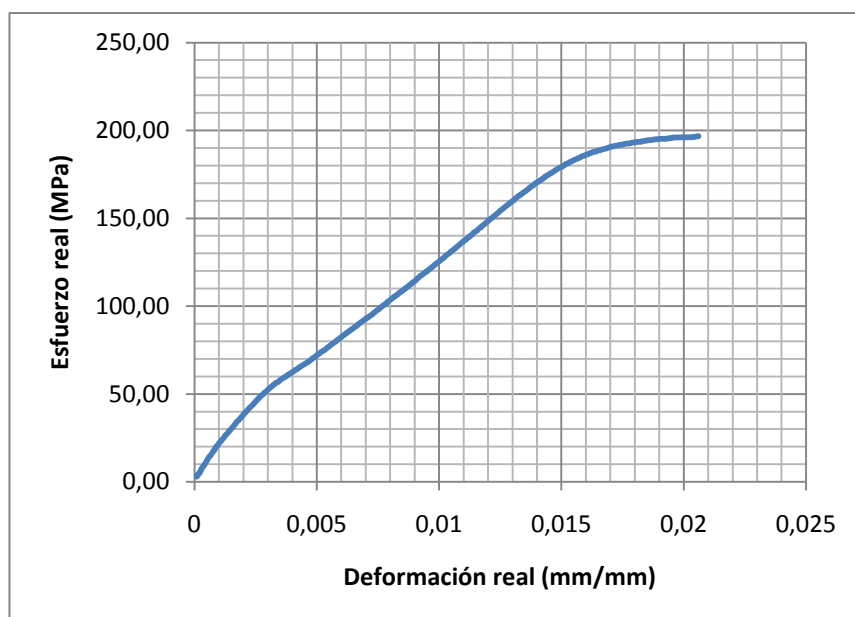
A continuación se presentan los comportamientos del material en cada ensayo:



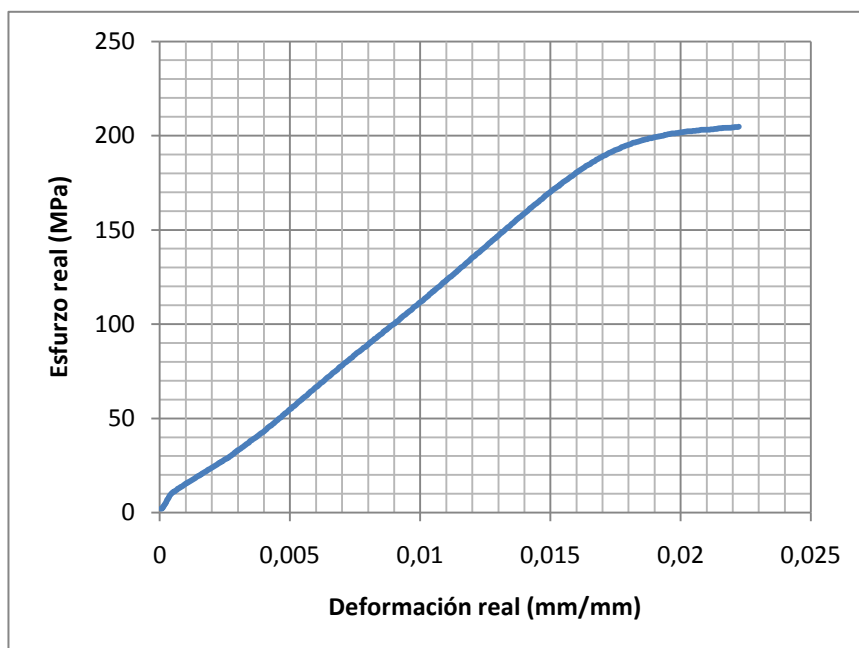
Grafica A-1. Comportamiento esfuerzo vs deformación Probeta 1.



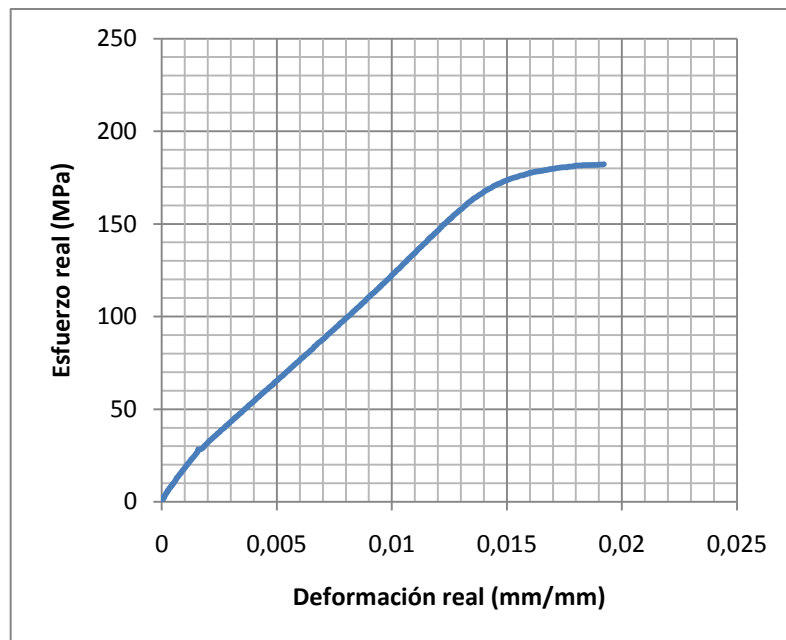
Grafica A-2. Comportamiento esfuerzo vs deformación Probeta 2.



Grafica A-3. Comportamiento esfuerzo vs deformación Probeta 3.



Grafica A-4. Comportamiento esfuerzo vs deformación Probeta 4.



Gráfica A-5. Comportamiento esfuerzo vs deformación Probeta 5.

Como se ha hecho notar, el comportamiento que se presenta es el de Esfuerzo-Deformación Real y al realizar los análisis correspondientes a dichas graficas se obtuvieron los siguientes esfuerzos últimos del material.

Tabla A-1. Esfuerzos últimos del aluminio.

Nº Probeta	Esfuerzo real σ (MPa)
1	213,35
2	196,68
3	204,84
4	198,33
5	182,13
Promedio	199,07
Desviación estándar	11.51

En los ensayos se observa además que el material describe un comportamiento no lineal con endurecimiento por deformación y es descrito según la ley de Hollomon-Ludwik, como sigue:

$$\sigma = K \varepsilon^n$$

Como se ha mencionado anteriormente en el capítulo II, los valores de K y m se obtienen luego de linealizar las curvas Esfuerzo-deformación real y para cada ensayo se obtuvieron los siguientes valores:

Tabla B-2. Valores de K y m de los ensayos.

Probeta	K	m
1	4,11	0,755
2	4,09	0,78
3	4,03	0,77
4	4,03	0,8
5	4,15	0,82
Promedio	4,09	0,785
Desviación estándar	0,04	0,02

Resultando el comportamiento experimental del aluminio:

$$\sigma = 4,09\varepsilon^{0,785}$$

Apéndice B

Valores de parámetros involucrados en el proceso de embutido recomendados por algunos autores y organizaciones.

Tabla B-1. Rango máximo de embutición para materiales comunes. (Brad, F. 2005)

Material	Máximo D/d
Acero CRDQ	2.15
Acero CRDQSK	2.20
Acero HRDQ	2.10
Acero Inoxidable (Tipo 302)	2.20
Latón, Cobre	2.10
Aluminio (Serie 1100)	1.80

Tabla B-2 Valores de coeficiente de reducción (Wassilieff B. 1966)

	Con Prensa lamina		Sin Prensa lamina
Aluminio	m_1	m_n	m
Espesor < 2mm	0,55	0,80	0,9 - 0,93
Espesor > 2mm	0,55	0,83	0,9 - 0,93

Tabla B-3. Velocidades de embutido. (Wassilieff B. 1966)

Material	V
Zinc y Acero Inoxidable	200 mm/s
Acero Dulce	280 mm/s
Aluminio	500 mm/s
Latón	750 mm/s

Tabla B-4 Presión media del prensa lamina según el material. (Wassilieff, 1966)

Material	$p \text{ (kg/mm}^2\text{)}$
Aluminio	0,12
Zinc	0,15
Duraluminio	0,16
Latón	0,20
Acero Inoxidable	0,20
Acero	0,25
Chapa estañada	0,30

Tabla B-5. Redondeo de matriz por medio del espesor de material. (ASCAMM, 2004)

Espesor	r_m
$e < 1mm$	$6 \cdot e \leq r_m \leq 8 \cdot e$
$1mm < e < 3mm$	$4 \cdot e \leq r_m \leq 6 \cdot e$
$1mm < e < 3mm$	$2 \cdot e \leq r_m \leq 4 \cdot e$

Tabla B-6. Juego entre punzón y matriz. (ASCAMM, 2004)

Juego	Material
$w = e + 0,07 \cdot a \cdot \sqrt{10 \cdot e}$	Para Acero
$w = e + 0,02 \cdot a \cdot \sqrt{10 \cdot e}$	Para Aluminio
$w = e + 0,04 \cdot a \cdot \sqrt{10 \cdot e}$	Para metales no ferrosos

Tabla B-6.1 Coeficiente de embutición a .

Material	a
Lamina muy dura	1.2
Lamina dura	1.4
Chapa de media dureza	1.6
Chapa blanda	1.8
Chapa muy dúctil	2

Tabla B-7. Valores de w para diferentes materiales y formas. (ASCAMM, 2004)

Material	w
Latón, aluminio, plata y cobre	$1.1 \cdot e$ ó $1.15 \cdot e$
Acero, hierro y duraluminio	$1.2 \cdot e$
Embuticiones rectangulares: zonas rectas	$1.1 \cdot e$
Embuticiones rectangulares: zonas angulares con radio	$1.2 \cdot e$

Apéndice C

Proceso de fabricación de las piezas del dispositivo de embutición.

Universidad de Carabobo Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Mecánica Dpto. de Materiales y Procesos de Fabricación					Plano de la pieza:		Operador:		Cantidad de piezas: 1		
					Material de la Pieza: AISI 5115						
Nombre de la pieza: Punzón 1, Dispositivo de Embutición					N° de parte:				Fecha: 10/11/2010		
N° Op.	Descripción	Máquina	Herramienta	RPM	Profundidad de pasada (mm)	Avance (mm/rev)	N° Pasadas	Vc (m/min)	Tc (s)	Tm (s)	Total (s)
1	Refrentado	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	4,5	0,5	1	19,2	60	60	90
	Refrentado	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	4,5	0,5	1	19,2	60	60	91
3	Cilindrado (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	420	10,6	0,5	1	22,8	90	90	120
4	Cilindrado (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	420	10,6	0,5	1	22,8	90	90	120
	Cilindrado (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	420	10	0,5	1	22,8	90	90	121
5	torneado de contorno (redondeo)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	420	1,86	0,5	1	22,8	90	90	120
6	Cilindrado (acabado)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	180	0,5	0,3	1	28	90	90	121
Tiempo total (s):									783		
Elaborado por: Deric Paéz				Revisado por: José Castro			Fecha de revisión: 15/12/2010				

Universidad de Carabobo Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Mecánica Dpto. de Materiales y Procesos de Fabricación					Plano de la pieza:		Operador:		Cantidad de piezas: 1		
					Material de la Pieza: AISI 5115						
Nombre de la pieza: Matriz 1, Dispositivo de Embutición					N° de parte:				Fecha: 10/11/2010		
N° Op.	Descripción	Máquina	Herramienta	RPM	Profundidad de pasada (mm)	Avance (mm/rev)	N° Pasadas	Vc (m/min)	Tc (s)	Tm (s)	Total (s)
1	Refrentado	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	420	3	0,5	1	19,2	60	60	90
	Refrentado	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	420	3	0,5	1	19,2	60	60	91
2	Cilindrado (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	420	10	0,5	1	22,8	90	90	120
3	Cilindrado interno (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	15	0,5	1	22,8	90	120	160
	Cilindrado interno (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	15	0,5	1	22,8	90	120	160
	Cilindrado interno (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	15	0,5	1	22,8	90	120	160
	Cilindrado interno (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	15	0,5	1	22,8	90	120	160
4	Abocardado (acabado)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	1	0,5	1	28	90	90	121
5	Torneado de contorno (redondeo)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	420	1,11	0,5	1	28	90	90	120
6	Cilindrado (acabado)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	420	0,1	0,3	1	28	60	70	100
Tiempo total (s):									1282		
Elaborado por: Deric Paéz				Revisado por: José Castro			Fecha de revisión: 15/12/2010				

Universidad de Carabobo Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Mecánica Dpto. de Materiales y Procesos de Fabricación					Plano de la pieza:		Operador:		Cantidad de piezas: 1		
					Material de la Pieza: AISI 5115						
Nombre de la pieza: Matriz 2, Dispositivo de Embutición					N° de parte:				Fecha: 10/11/2010		
N° Op.	Descripción	Máquina	Herramienta	RPM	Profundidad de pasada (mm)	Avance (mm/rev)	N° Pasadas	Vc (m/min)	Tc (s)	Tm (s)	Total (s)
1	Refrentado	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	420	3	0,5	1	19,2	60	60	90
	Refrentado	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	420	3	0,5	1	19,2	60	60	91
2	Cilindrado (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	420	10	0,5	1	22,8	90	90	120
3	Cilindrado interno (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	15	0,5	1	22,8	90	120	160
	Cilindrado interno (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	15	0,5	1	22,8	90	120	160
	Cilindrado interno (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	15	0,5	1	22,8	90	120	160
4	Abocardado (acabado)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	1	0,5	1	28	90	90	121
5	Torneado de contorno (redondeo)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	420	1,11	0,5	1	28	90	90	120
6	Cilindrado (acabado)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	420	0,1	0,3	1	28	60	70	100
Tiempo total (s):									1122		
Elaborado por: Deric Paéz				Revisado por: José Castro			Fecha de revisión: 15/12/2010				

Universidad de Carabobo Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Mecánica Dpto. de Materiales y Procesos de Fabricación					Plano de la pieza:		Operador:		Cantidad de piezas: 1		
					Material de la Pieza: AISI 5115						
Nombre de la pieza: Punzón 2, Dispositivo de Embutición					N° de parte:				Fecha: 10/11/2010		
N° Op.	Descripción	Máquina	Herramienta	RPM	Profundidad de pasada (mm)	Avance (mm/rev)	N° Pasadas	Vc (m/min)	Tc (s)	Tm (s)	Total (s)
1	Refrentado	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	3,5	0,5	1	19,2	60	60	90
	Refrentado	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	3,5	0,5	1	19,2	60	60	91
2	Cilindrado (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	420	12	0,5	1	22,8	90	90	120
	Cilindrado (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	15,3	0,5	1	22,8	90	90	120
3	Torneado de contornos (redondeo)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	420	2,89	0,5	1	28	90	90	121
4	Cilindrado (acabado)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	420	0,5	0,3	1	28	90	90	121
Tiempo total (s):									663		
Elaborado por: Deric Paéz				Revisado por: José Castro			Fecha de revisión: 15/12/2010				

Universidad de Carabobo Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Mecánica Dpto. de Materiales y Procesos de Fabricación					Plano de la pieza:		Operador:		Cantidad de piezas: 1		
					Material de la Pieza: AISI 1045						
Nombre de la pieza: Prensa lamina 1, Dispositivo de Embutición					N° de parte:				Fecha: 10/11/2010		
N° Op.	Descripción	Máquina	Herramienta	RPM	Profundidad de pasada (mm)	Avance (mm/rev)	N° Pasadas	Vc (m/min)	Tc (s)	Tm (s)	Total (s)
1	Refrentado	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	1	0,5	1	19,2	60	60	90
	Refrentado	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	1	0,5	1	19,2	60	60	91
2	Cilindrado (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	420	10	0,5	1	22,8	90	90	120
3	Cilindrado interno (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	15	0,5	1	22,8	90	120	160
	Cilindrado interno (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	15	0,5	1	22,8	90	120	160
	Cilindrado interno (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	15	0,5	1	22,8	90	120	160
	Cilindrado interno (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	14,34	0,5	1	22,8	90	120	160
4	Cilindrado (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	50	0,5	1	28	90	90	121
5	Taladrado	Taladro pedestal	Broca 4 (mm)	180	8	0,1	1	28	90	90	120
	Taladrado	Taladro pedestal	Broca 4 (mm)	180	8	0,1	1	28	90	90	120
	Taladrado	Taladro pedestal	Broca 4 (mm)	180	8	0,1	1	28	90	90	120
	Taladrado	Taladro pedestal	Broca 4 (mm)	180	8	0,1	1	28	90	90	120
6	Cilindrado (acabado)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	420	0,1	0,3	1	28	60	70	100
Tiempo total (s):									1642		
Elaborado por: Deric Paéz				Revisado por: José Castro			Fecha de revisión: 15/12/2010				

Universidad de Carabobo Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Mecánica Dpto. de Materiales y Procesos de Fabricación					Plano de la pieza:		Operador:		Cantidad de piezas: 1		
					Material de la Pieza: AISI 1045						
Nombre de la pieza: Prensa lamina 2, Dispositivo de Embutición					N° de parte:				Fecha: 10/11/2010		
N° Op.	Descripción	Máquina	Herramienta	RPM	Profundidad de pasada (mm)	Avance (mm/rev)	N° Pasadas	Vc (m/min)	Tc (s)	Tm (s)	Total (s)
1	Refrentado	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	6,5	0,5	1	19,2	60	60	90
	Refrentado	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	6	0,5	1	19,2	60	60	91
2	Cilindrado (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	420	10	0,5	1	22,8	90	90	120
	Cilindrado (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	420	15	0,5	1	22,8	90	90	120
	Cilindrado (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	420	15	0,5	1	22,8	90	90	120
	Cilindrado (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	420	15	0,5	1	22,8	90	90	120
	Cilindrado (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	420	15	0,5	1	22,8	90	90	120
	Cilindrado (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	420	20	0,5	1	22,8	90	90	120
3	Cilindrado interno (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	15	0,5	1	22,8	90	120	160
	Cilindrado interno (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	15	0,5	1	22,8	90	120	160
	Cilindrado interno (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	14,69	0,5	1	22,8	90	120	160
4	Taladrado	Taladro pedestal	Broca 4 (mm)	180	8	0,1	1	28	90	90	120
	Taladrado	Taladro pedestal	Broca 4 (mm)	180	8	0,1	1	28	90	90	120
	Taladrado	Taladro pedestal	Broca 4 (mm)	180	8	0,1	1	28	90	90	120
	Taladrado	Taladro pedestal	Broca 4 (mm)	180	8	0,1	1	28	90	90	120
5	Torneado de forma (redondeo)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	420	1,86	0,5	1	28	60	70	100
6	Cilindrado (acabado)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	580	0,1	0,3	1	22,8	70	80	160
Tiempo total (s):									2121		
Elaborado por: Deric Paéz				Revisado por: José Castro			Fecha de revisión: 15/12/2010				

Universidad de Carabobo Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Mecánica Dpto. de Materiales y Procesos de Fabricación					Plano de la pieza:		Operador:		Cantidad de piezas:		
					Material de la Pieza: AISI 1045				1		
Nombre de la pieza: Porta matriz, Dispositivo de Embutición					N° de parte:				Fecha: 10/11/2010		
N° Op.	Descripción	Máquina	Herramienta	RPM	Profundidad de pasada (mm)	Avance (mm/rev)	N° Pasadas	Vc (m/min)	Tc (s)	Tm (s)	Total (s)
1	Refrentado	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	3	0,5	1	19,2	60	60	90
	Refrentado	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	3	0,5	1	19,2	60	60	91
2	Cilindrado (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	420	10	0,5	1	22,8	90	90	120
3	Cilindrado interno (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	15	0,5	1	22,8	90	120	160
	Cilindrado interno (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	15	0,5	1	22,8	90	120	160
	Cilindrado interno (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	15	0,5	1	22,8	90	120	160
	Cilindrado interno (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	15	0,5	1	22,8	90	120	160
	Cilindrado interno (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	10	0,5	1	22,8	90	120	160
4	Cilindrado interno (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	20	0,5	1	22,8	90	120	160
5	Taladrado (Rosca int)	Taladro pedestal	Macho paso (0.5)	180	14	0,5	1	28	90	90	120
	Taladrado (Rosca int)	Taladro pedestal	Macho paso (0.5)	180	14	0,5	1	28	90	90	120
	Taladrado (Rosca int)	Taladro pedestal	Macho paso (0.5)	180	14	0,5	1	28	90	90	120
	Taladrado (Rosca int)	Taladro pedestal	Macho paso (0.5)	180	14	0,5	1	28	90	90	120
6	Taladrado	Taladro pedestal	Broca 16 (mm)	380	14	0,1	1	22	70	80	160
	Taladrado	Taladro pedestal	Broca 16 (mm)	380	14	0,1	1	22	70	80	160
	Taladrado	Taladro pedestal	Broca 16 (mm)	380	14	0,1	1	22	70	80	160
	Taladrado	Taladro pedestal	Broca 16 (mm)	380	14	0,1	1	22	70	80	160
7	Avellanado cilíndrico	Taladro pedestal	Broca 16 (mm)	180	8	0,1	1	25	60	50	140
	Avellanado cilíndrico	Taladro pedestal	Broca 16 (mm)	180	8	0,1	1	25	60	50	140
	Avellanado cilíndrico	Taladro pedestal	Broca 16 (mm)	180	8	0,1	1	25	60	50	140
	Avellanado cilíndrico	Taladro pedestal	Broca 16 (mm)	180	8	0,1	1	25	60	50	140
8	Torneado de forma (redondeo)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	420	1,86	0,5	1	28	60	70	100
9	Cilindrado (acabado)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	580	0,1	0,3	1	22,8	70	80	160
Tiempo total (s):									3201		
Elaborado por: Deric Paéz				Revisado por: José Castro			Fecha de revisión: 15/12/2010				

Universidad de Carabobo Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Mecánica Dpto. de Materiales y Procesos de Fabricación					Plano de la pieza:		Operador:		Cantidad de piezas: 1		
					Material de la Pieza: AISI 5115						
Nombre de la pieza: Punzón de corte					N° de parte:				Fecha: 10/11/2010		
N° Op.	Descripción	Máquina	Herramienta	RPM	Profundidad de pasada (mm)	Avance (mm/rev)	N° Pasadas	Vc (m/min)	Tc (s)	Tm (s)	Total (s)
1	Refrentado	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	4,5	0,5	1	19,2	60	60	90
	Refrentado	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	4,5	0,5	1	19,2	60	60	91
2	Cilindrado (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	420	1	0,5	1	22,8	90	90	120
3	Cilindrado (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	420	51	0,5	1	22,8	90	90	120
4	Cilindrado (acabado)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	180	0,5	0,3	1	28	90	90	121
Tiempo total (s):									542		
Elaborado por: Deric Paéz				Revisado por: José Castro			Fecha de revisión: 15/12/2010				

Universidad de Carabobo Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Mecánica Dpto. de Materiales y Procesos de Fabricación					Plano de la pieza:		Operador:		Cantidad de piezas: 1		
					Material de la Pieza: AISI 5115						
Nombre de la pieza: Matriz de punzonado.					N° de parte:				Fecha: 10/11/2010		
N° Op.	Descripción	Máquina	Herramienta	RPM	Profundidad de pasada (mm)	Avance (mm/rev)	N° Pasadas	Vc (m/min)	Tc (s)	Tm (s)	Total (s)
1	Refrentado	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	3	0,5	1	19,2	60	60	90
	Refrentado	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	3	0,5	1	19,2	60	60	91
2	Cilindrado (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	420	10	0,5	1	22,8	90	90	120
3	Cilindrado interno (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	45	0,5	1	22,8	90	120	160
4	Taladrado (Rosca int)	Taladro pedestal	Macho paso (0.5)	180	14	0,5	1	28	90	90	120
	Taladrado (Rosca int)	Taladro pedestal	Macho paso (0.5)	180	14	0,5	1	28	90	90	120
	Taladrado (Rosca int)	Taladro pedestal	Macho paso (0.5)	180	14	0,5	1	28	90	90	120
	Taladrado (Rosca int)	Taladro pedestal	Macho paso (0.5)	180	14	0,5	1	28	90	90	120
5	Taladrado	Taladro pedestal	Macho paso (0.5)	380	14	0,1	1	22	70	80	160
	Taladrado	Taladro pedestal	Macho paso (0.5)	380	14	0,1	1	22	70	80	160
6	Avellanado cilíndrico	Taladro pedestal	Broca 16 (mm)	180	8	0,1	1	25	60	50	140
	Avellanado cilíndrico	Taladro pedestal	Broca 16 (mm)	180	8	0,1	1	25	60	50	140
	Avellanado cilíndrico	Taladro pedestal	Broca 16 (mm)	180	8	0,1	1	25	60	50	140
	Avellanado cilíndrico	Taladro pedestal	Broca 16 (mm)	180	8	0,1	1	25	60	50	140
7	Cilindrado (acabado)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	580	0,1	0,3	1	22,8	70	80	160
Tiempo total (s):									1981		
Elaborado por: José Castro				Revisado por: Deric Paéz			Fecha de revisión: 15/12/2010				

Universidad de Carabobo Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Mecánica Dpto. de Materiales y Procesos de Fabricación					Plano de la pieza:		Operador:		Cantidad de piezas: 1		
					Material de la Pieza: AISI 1045						
Nombre de la pieza: Prensalámina corte					N° de parte:				Fecha: 10/11/2010		
N° Op.	Descripción	Máquina	Herramienta	RPM	Profundidad de pasada (mm)	Avance (mm/rev)	N° Pasadas	Vc (m/min)	Tc (s)	Tm (s)	Total (s)
1	Refrentado	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	1	0,5	1	19,2	60	60	90
	Refrentado	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	1	0,5	1	19,2	60	60	91
2	Cilindrado (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	420	20	0,5	1	22,8	90	90	120
3	Cilindrado interno (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	45	0,5	1	22,8	90	120	160
4	Taladrado pedestal		Broca (mm) 4	180	8	0,1	1	28	90	90	120
	Taladrado pedestal		Broca (mm) 4	180	8	0,1	1	28	90	90	120
5	Taladrado pedestal		Broca (mm) 5	180	8	0,1	1	28	90	90	120
	Taladrado pedestal		Broca (mm) 5	180	8	0,1	1	28	90	90	120
6	Cilindrado (acabado)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	420	0,1	0,3	1	28	60	70	100
Tiempo total (s):									1041		
Elaborado por: José Castro				Revisado por: Deric Páez			Fecha de revisión: 15/12/2010				

Universidad de Carabobo Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Mecánica Dpto. de Materiales y Procesos de Fabricación					Plano de la pieza:		Operador:		Cantidad de piezas: 1		
					Material de la Pieza: AISI 1045						
Nombre de la pieza: Base de punzón de corte					N° de parte:				Fecha: 10/11/2010		
N° Op.	Descripción	Máquina	Herramienta	RPM	Profundidad de pasada (mm)	Avance (mm/rev)	N° Pasadas	Vc (m/min)	Tc (s)	Tm (s)	Total (s)
1	Refrentado	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	1	0,5	1	19,2	60	60	90
	Refrentado	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	1	0,5	1	19,2	60	60	91
2	Cilindrado (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	420	20	0,5	1	22,8	90	90	120
3	Cilindrado interno (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	10	0,5	1	22,8	90	120	160
4	Abocardao	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	10	0,5	1	22,8	90	120	160
5	Taladrado	Taladro pedestal	Broca 10 (mm)	180	10	0,1	1	28	90	90	120
	Taladrado	Taladro pedestal	Broca 10 (mm)	180	10	0,1	1	28	90	90	120
5	Avellanado	Taladro pedestal	Broca 20 (mm)	180	8	0,1	1	28	90	90	120
	Avellanado	Taladro pedestal	Broca 20 (mm)	180	8	0,1	1	28	90	90	120
6	Cilindrado (acabado)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	420	0,1	0,3	1	28	60	70	100
Tiempo total (s):									1201		
Elaborado por: José Castro				Revisado por: Deric Páez			Fecha de revisión: 15/12/2010				

Universidad de Carabobo Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Mecánica Dpto. de Materiales y Procesos de Fabricación					Plano de la pieza:		Operador:		Cantidad de piezas: 2		
					Material de la Pieza: AISI 1045						
Nombre de la pieza: Guía inf. del troquel de corte					N° de parte:				Fecha: 10/11/2010		
N° Op.	Descripción	Máquina	Herramienta	RPM	Profundidad de pasada (mm)	Avance (mm/rev)	N° Pasadas	Vc (m/min)	Tc (s)	Tm (s)	Total (s)
1	Refrentado	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	4,5	0,5	1	19,2	60	60	90
	Refrentado	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	4,5	0,5	1	19,2	60	60	91
3	Cilindrado (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	420	1	0,5	1	22,8	90	90	15
4	torneado de contorno (redondeo)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	420	7,85	0,5	1	22,8	90	90	120
5	Cilindrado (acabado)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	180	0,5	0,3	1	28	90	90	121
Tiempo total (s):									437		
Elaborado por: José Castro				Revisado por: Deric Páez			Fecha de revisión: 15/12/2010				

Universidad de Carabobo Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Mecánica Dpto. de Materiales y Procesos de Fabricación					Plano de la pieza:		Operador:		Cantidad de piezas: 2		
					Material de la Pieza: AISI 1045						
Nombre de la pieza: Guía sup. del troquel de corte					N° de parte:				Fecha: 10/11/2010		
N° Op.	Descripción	Máquina	Herramienta	RPM	Profundidad de pasada (mm)	Avance (mm/rev)	N° Pasadas	Vc (m/min)	Tc (s)	Tm (s)	Total (s)
1	Refrentado	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	4,5	0,5	1	19,2	60	60	90
	Refrentado	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	380	4,5	0,5	1	19,2	60	60	91
2	Cilindrado (desbaste)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	420	1	0,5	1	22,8	90	90	120
3	Cilindrado interno	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	420	35	0,5	1	22,8	90	90	120
4	torneado de contorno (redondeo)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	420	7,85	0,5	1	22,8	90	90	120
5	Cilindrado (acabado)	Torno	Cuchilla de carburo sinterizado	180	0,5	0,3	1	28	90	90	121
Tiempo total (s):									662		
Elaborado por: José Castro				Revisado por: Deric Páez			Fecha de revisión: 15/12/2010				

Anexo

Propiedades de algunas aleaciones de aluminio

Tabla A-1. Composiciones y propiedades de algunas aleaciones de aluminio.

Composiciones, propiedades mecánicas y aplicaciones típicas de ocho aleaciones de aluminio comunes.										
Numero de la Aluminum	Número UNS	Composición (% en peso) (a)				Condición	Propiedades mecánicas			Aplicaciones típicas
		Cu	Mg	Mn	Otros		Resistencia a la tracción (Mpa)	Límite elástico (Mpa)	Ductilidad (% EL en 2 pulg.)	
Aleaciones Hechurables no tratables térmicamente										
1100	A91100	0,1				Recocido	90	34	35	Planchisteria
3003	A93003	0,1		1,2		Recocido	110	42	30	Utensilios de cocina
5052	A95052		2,5		0,25 Cr	Recocido	195	13	25	Partes de autos y camiones
Aleaciones Hechurables tratables térmicamente										
2014	A92014	4,4	0,5	0,8	0,8 Si	Tratamiento térmico	485	415	13	Estructuras generales
6061	A96061	0,3	1		0,6Si, 0,2 Cr	Tratamiento térmico	310	275	12	Camiones, torres, muebles
7075	A97075	1,6	2,5		5,6Zn, 0,23 Cr	Tratamiento térmico	580	505	11	Partes estructurales de aviones
Aleaciones moldeables, tratables térmicamente										
295	A02950	4,5			1,1 Si	Tratamiento térmico	250	165	5	Cárter de motores, ruedas de avion
356	A03560		0,3		7 Si	Tratamiento térmico	230	165	4	Bloques de cilindros enfriados por

(a) La composición se completa con aluminio

Fuente: Adaptada de *Metals Handbook: Properties and selection: Nonferrous Alloys and Pure Metals*. Vol. 2. 9th edition. H. Baker. Managing Editor. American Society for Metals. 1797

Tabla A-2 Propiedades mecanicas típicas de las aleaciones de aluminio

Propiedades mecanicas típicas y aplicaciones de las aleaciones de aluminio.						
Numero AISI- SAE de la aleación	Composicion quimica % en peso	Tratamiento	Resistencia a la tracción (Mpa)	Resistencia a la fluencia (Mpa)	Elongación %	Aplicaciones típicas
Aluminios al manganeso						
1100	99 Al; 0,12 Cu	Recocido (-O) Semi-endurecido (H-14)	89 124	24 97	25 4	Trabajo de laminación del metal
3003	1,12 Mn	Recocido (-O)	117	34	23	Recipientes a presión, equipamiento quimico
		Semi-endurecido (H-14)	159	159	17	trabajo de laminación del metal
5052	2,5 Mg; 0,25 Cr	Recocido (-O) Semi-endurecido (H-34)	193 262	65 179	18 4	Camiones, autobuses, usos en marina, tubos hidraulicos
2024	4,4 Cu; 1,5 Mg; 0,6 Mn	Recocido (-O) Semi-endurecido (-T6)	220 442	97 345	12 5	Estructuras de aviones
6061	1 Mg; 0,6 Si; 0,27 Cu; 0,2 Cr	Recocido (-O) Semi-endurecido (-T6)	152 290	82 241	16 10	Camiones y estructuras marinas, tuberias, carriles
7075	5,6 Zn; 2,5 Mg; 1,6 Cu; 0,23 Cr	Recocido (-O) Semi-endurecido (-T6)	276 504	145 428	10 8	Aviones y otras estructuras
Aleaciones para fundición						
355	5 Si; 1,2 Cu; 0,5 Mg	Fundición en arena (-T6) Molde permanente (-T6)	220 285	138 ...	2 1,5	Bombas domesticas, accesorios de aviones
356	7Si; 0,3 Mg	Fundición en arena (-T6) Molde permanente (-T6)	207 229	138 152	3 3	Fundiciones de gran complejidad, ejes, ruedas de camiones
332	9,5 Si; 3Cu; 1 Mg	Fundición en arena (-T5)	214	...	...	Pistones de automoviles
413	12 Si; 2Fe	Fundicion en coquilla	297	145	2,5	Fundiciones complicadas

0- Recocido recrystalizado; H14- endurecido por deformación; H34- endurecido por deformación y estabilizado; T5- enfriado desde temperatura elevada, proceso de comformado, luego envejecimiento artificial; T6- tratamiento termico de solución, luego envejecimiento artificialmente

UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
COORDINACIÓN DE PROYECTOS DE GRADO

SINÓPSIS DEL PROYECTO DE GRADO

TÍTULO DEL TRABAJO: ***“Evaluación del Proceso de Embutición y Re-embutición Cilíndrica en Función del Tipo de Lubricante Utilizado”***.

FECHA DE APROVACIÓN DEL TG-II: 26/02/2010
FECHA DE EXPOSICIÓN FINAL: 10/05/2011
FECHA DE EJEMPLARES DEFINITIVOS A DIRECCION DEL ESCUELA: _____

SINOPSIS:

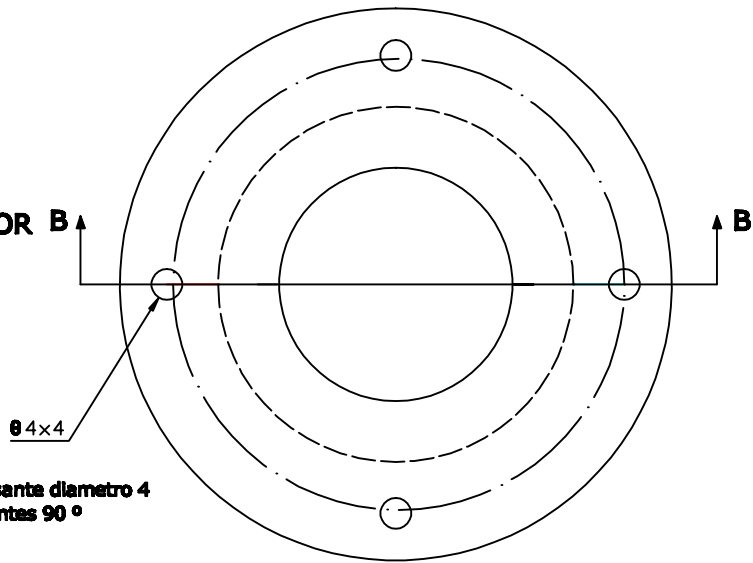
El embutido de chapas es uno de los procesos de fabricación más usados en la actualidad para crear piezas metálicas de forma acopada que van desde envases cilíndricos hasta elementos con diseños en revolución bastante complejos. Por tratarse de la deformación plástica de un material con la intención de llevarlo hasta una forma específica, existen muchas variables que intervienen en el proceso y de las cuales depende la culminación satisfactoria del mismo, entre estos parámetros o variables se encuentran la presión del prensalamina, la fuerza necesaria para la embutición, lubricación, velocidad del punzón, curvaturas en las matrices y punzones, entre otros. Este trabajo está enfocado en evaluar una de estas variables, la lubricación y su efecto en la carga aplicada en un proceso que contemple la aplicación de dos etapas de embutido, adicionalmente se compararon los valores de dichas cargas con las obtenidas teóricamente por medio de los modelos *WASSILIEFF Y GROOVER*, así mismo establece el diseño y construcción de los dispositivos necesarios para aplicar el proceso a una chapa de aluminio 3003 H14 de 0,3mm de espesor, entre estos elementos resaltan el conjunto de piezas para realizar la primera y segunda etapa del procedimiento y un troquel de punzonado para la obtención de los desarrollos necesarios, tales elementos tienen la posibilidad de ser usados con fines didácticos y académicos en la ejecución de prácticas de laboratorio. Cabe destacar que los dispositivos se construyeron considerando principalmente las dimensiones de un troquel de embutido fabricado en una investigación previa (*Baldayo y Bracho, 2009*). Los lubricantes que se usaron fueron aceite de manzanilla, agua jabonosa, bisulfuro de molibdeno, vaselina y como recomendación de algunos expertos en el tema, manteca vegetal solida. Los resultados obtenidos demuestran la importancia de la lubricación en este tipo de procesos arrojando como mejor opción el uso de la manteca vegetal en su aplicación; y muestran además algunas discrepancias entre lo que dicta la teoría y lo que relata práctica en cuanto a valores de carga obtenidos.

AUTORES:	FIRMA:	PROF. GUIA:	FIRMA:
JOSE CASTRO C.I. 17739971	_____	SANDRA CABELLO	_____
DERIC PAEZ C.I. 16405500	_____		

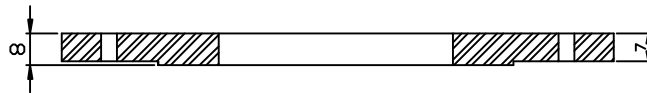
Apéndice D

Planos constructivos de las piezas del dispositivo de embutición y punzonado.

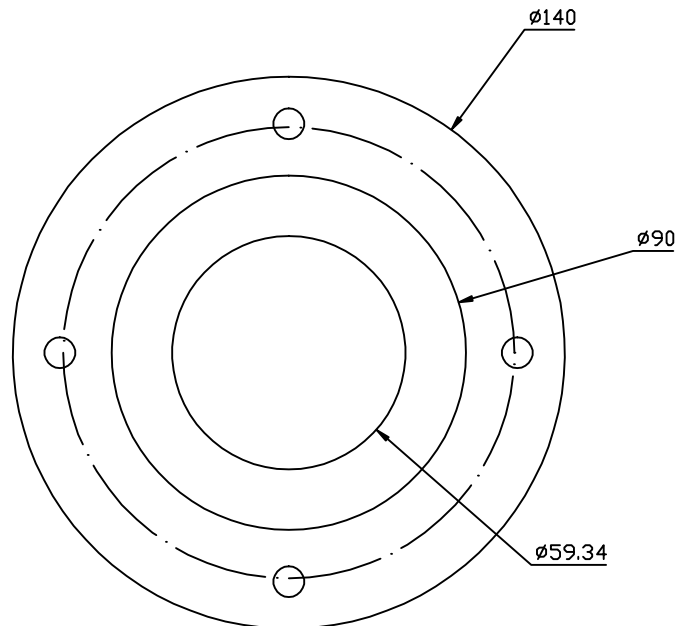
VISTA
SUPERIOR



CORTE
LATERAL
SECCION B-B



VISTA
INFERIOR



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
DPTO. DE PROCESOS DE FABRICACION

NOMBRE DE LA PIEZA
PRENSA LAMINA I

DIBUJADO POR:
DERIC PAEZ

MATERIAL:
ACERO 1045

ESCALA:
S/E

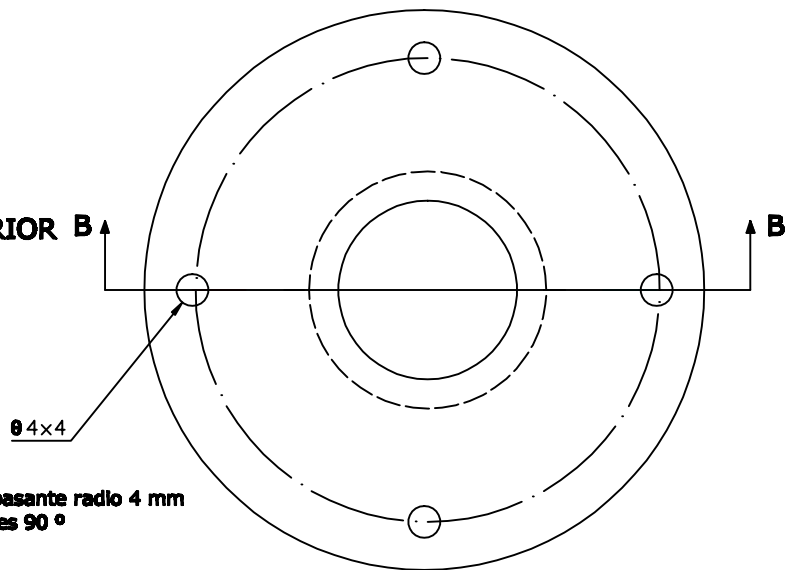
MEDIDAS:
mm

REVISADO POR:
JOSÉ CASTRO

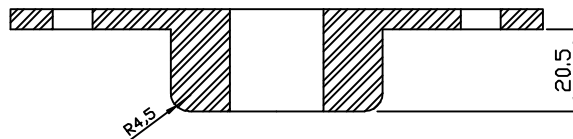
PLANO:
1

FECHA:
20/09/2010

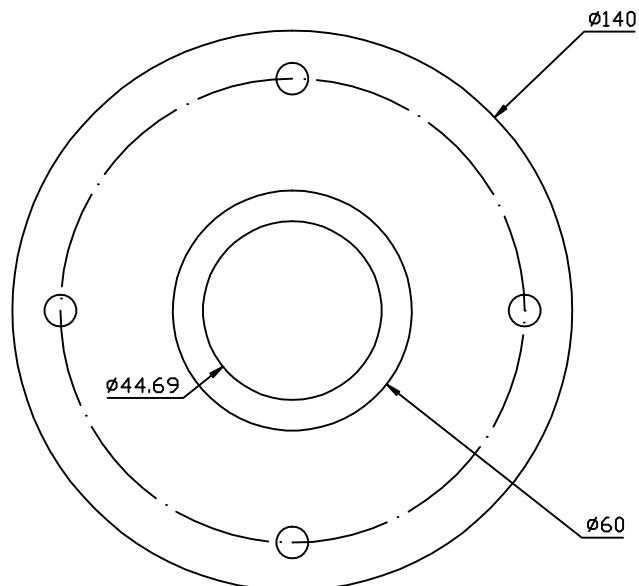
VISTA
SUPERIOR



CORTE
LATERAL
SECCION B-B



VISTA
INFERIOR



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
DPTO. DE PROCESOS DE FABRICACION

NOMBRE DE LA PIEZA
PRENSA LAMINA II

DIBUJADO POR:
DERIC PAEZ

MATERIAL:
ACERO 1045

ESCALA:
S/E

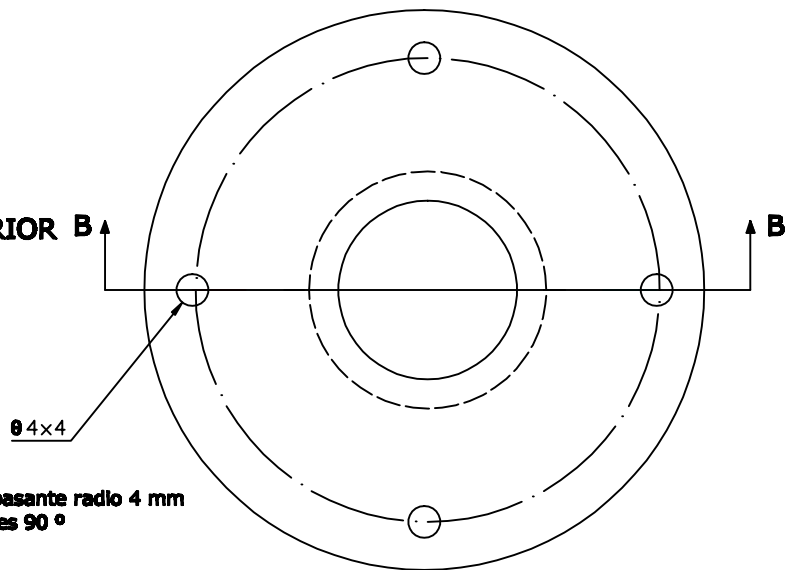
MEDIDAS:
mm

REVISADO POR:
JOSÉ CASTRO

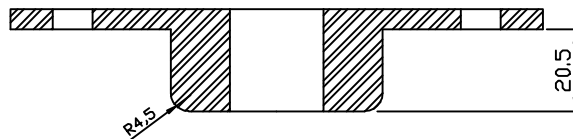
PLANO:
2

FECHA:
20/09/2010

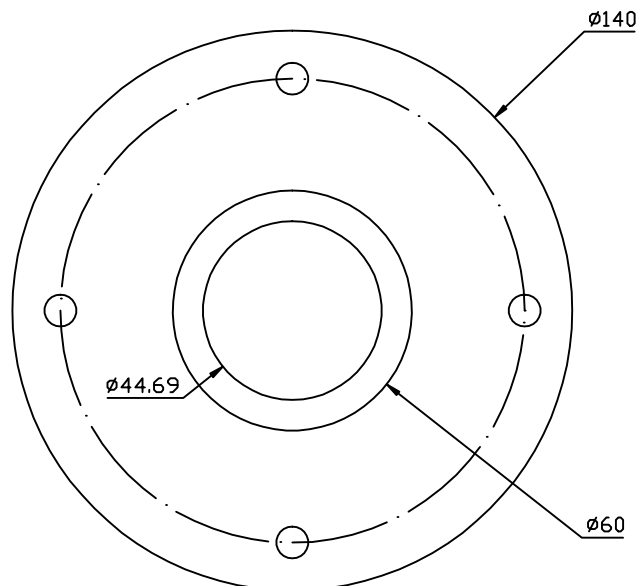
VISTA
SUPERIOR



CORTE
LATERAL
SECCION B-B



VISTA
INFERIOR



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
DPTO. DE PROCESOS DE FABRICACION

NOMBRE DE LA PIEZA
PRENSA LAMINA II

DIBUJADO POR:
DERIC PAEZ

MATERIAL:
ACERO 1045

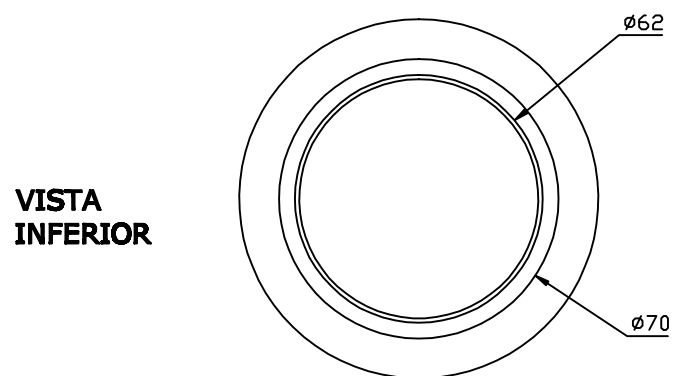
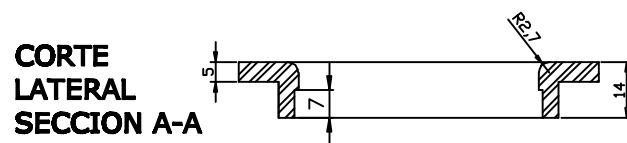
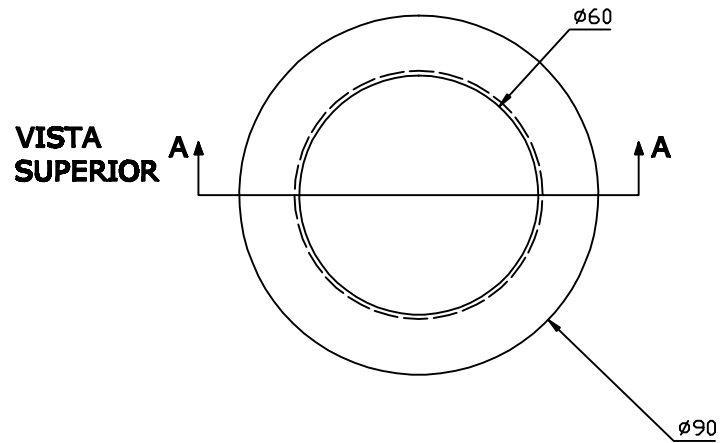
ESCALA:
S/E

MEDIDAS:
mm

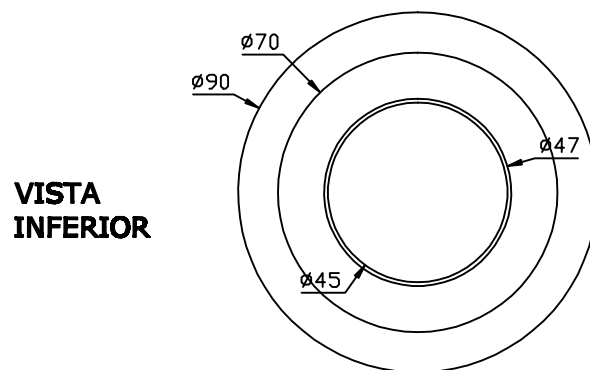
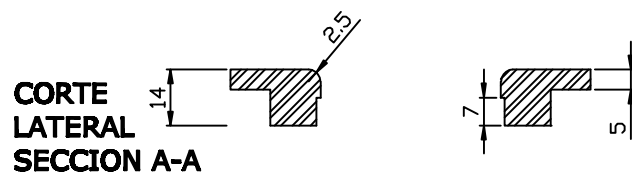
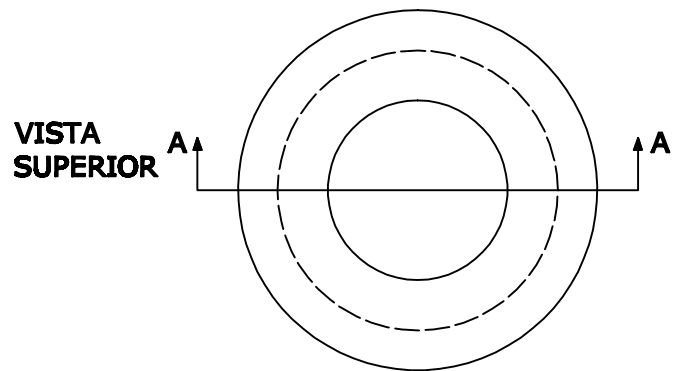
REVISADO POR:
JOSÉ CASTRO

PLANO:
2

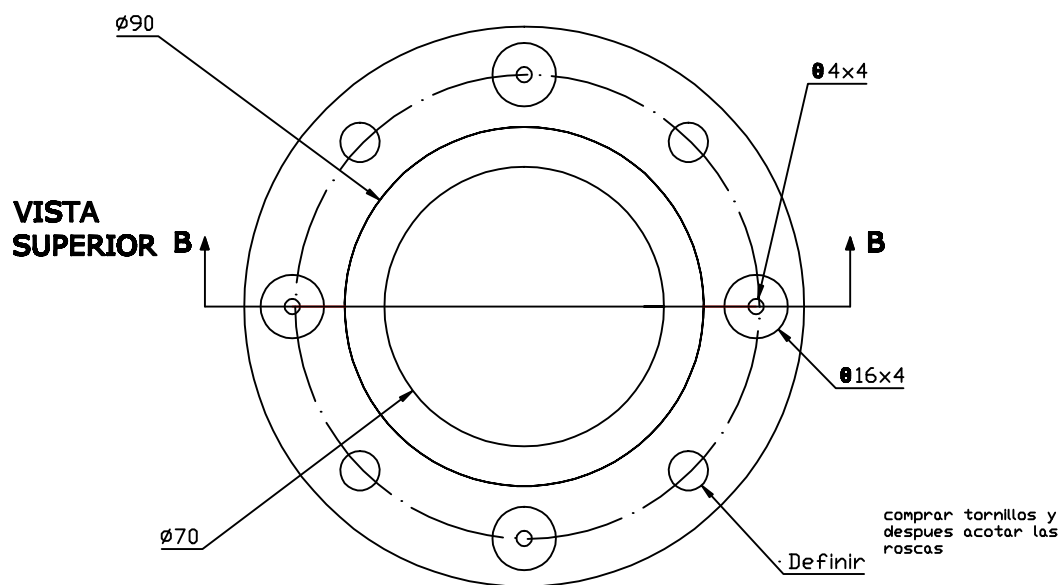
FECHA:
20/09/2010



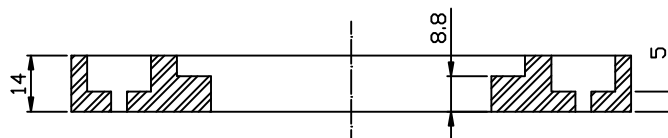
UNIVERSIDAD DE CARABOBO FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA DPTO. DE PROCESOS DE FABRICACION		NOMBRE DE LA PIEZA MATRIZ DE EMBUTICION I	
DIBUJADO POR: DERIC PAEZ	MATERIAL: ACERO 5115	ESCALA: S/E	MEDIDAS: mm
REVISADO POR: JOSÉ CASTRO	PLANO: 3	FECHA: 20/09/2010	



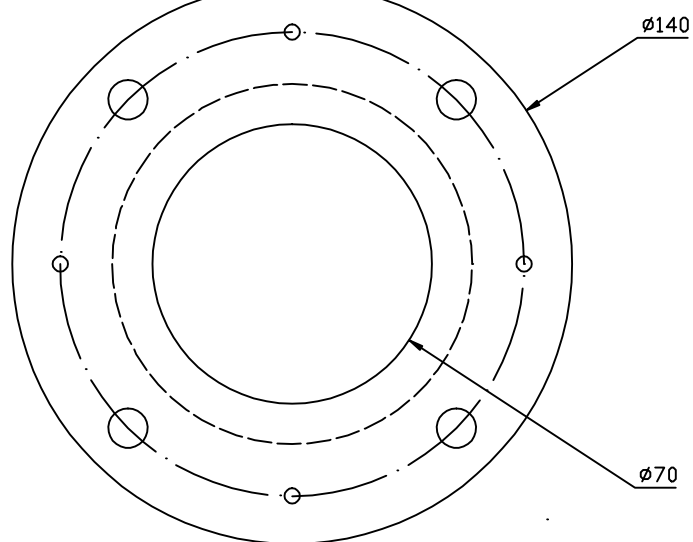
UNIVERSIDAD DE CARABOBO FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA DPTO. DE PROCESOS DE FABRICACION		NOMBRE DE LA PIEZA MATRIZ DE EMBUTICION II	
DIBUJADO POR: DERIC PAEZ	MATERIAL: ACERO 5115	ESCALA: S/E	MEDIDAS: mm
REVISADO POR: JOSÉ CASTRO	PLANO: 4	FECHA: 20/09/2010	



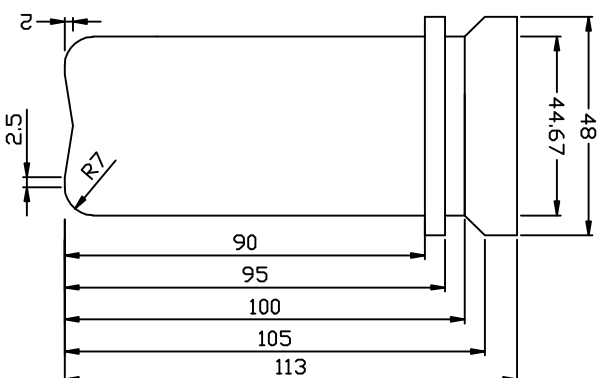
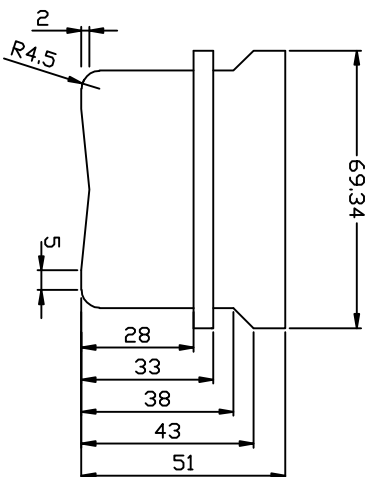
CORTE LATERAL
SECCION B-B



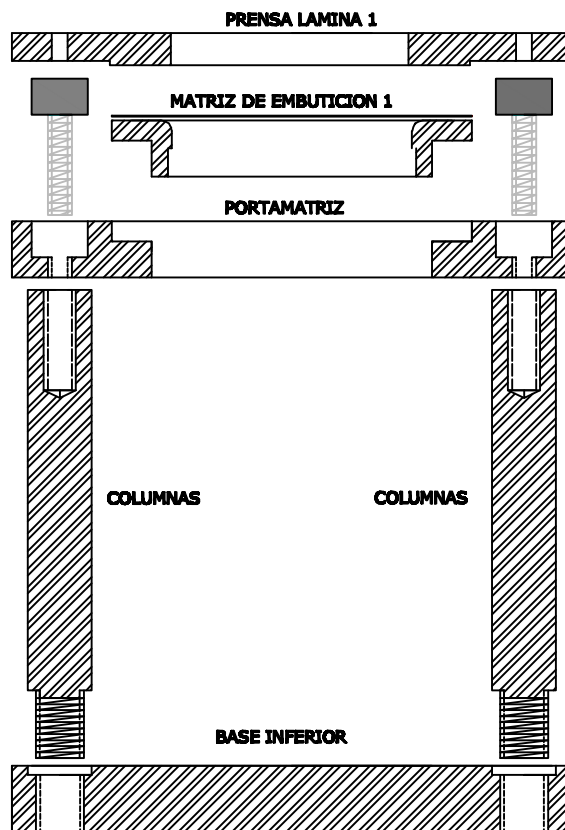
VISTA INFERIOR



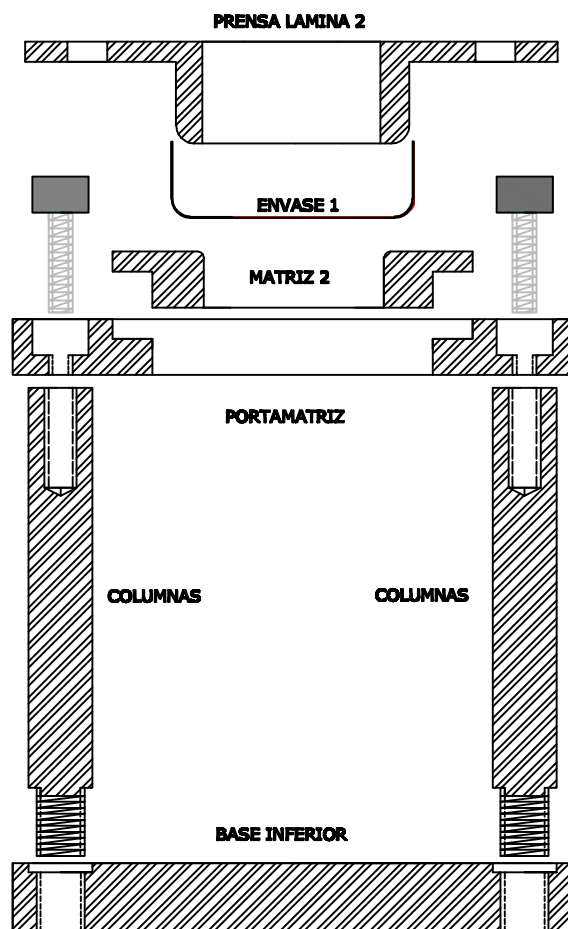
UNIVERSIDAD DE CARABOBO FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA DPTO. DE PROCESOS DE FABRICACION		NOMBRE DE LA PIEZA BASE PARA MATRIZ	
DIBUJADO POR: DERIC PAEZ	MATERIAL: ACERO 1045	ESCALA: 1:1	MEDIDAS: mm
REVISADO POR: JOSÉ CASTRO	PLANO: 5	FECHA: 20/09/2010	



UNIVERSIDAD DE CARABOBO			NOMBRE DE LA PIEZA	
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA			FUNCION	
DPTO. DE PROCESOS DE FABRICACION			MEDIDAS:	
DISEÑADO POR:	MATERIAL:	ACERO S115	1:1	mm
REVISADO POR:	PLANO:	6	FECHA:	
JOSÉ CASTRO				



UNIVERSIDAD DE CARABOBO FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA DPTO. DE PROCESOS DE FABRICACION		NOMBRE DE LA PIEZA EMBUTIDOR DE LAMINAS DE ALUMINIO (PRIMERA ETAPA)	
DIBUJADO POR: DERIC PAEZ	MATERIAL: ACERO 5115 / ACERO 1045	ESCALA: S/E	MEDIDAS: mm
REVISADO POR: JOSÉ CASTRO	PLANO: 7	FECHA: 20/09/2010	



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
DPTO. DE PROCESOS DE FABRICACION

NOMBRE DE LA PIEZA
EMBUTIDOR DE LAMINAS DE
ALUMINIO (SEGUNDA ETAPA)

DIBUJADO POR:
DERIC PAEZ

MATERIAL:
ACERO 5115 / ACERO 1045

ESCALA:
S/E

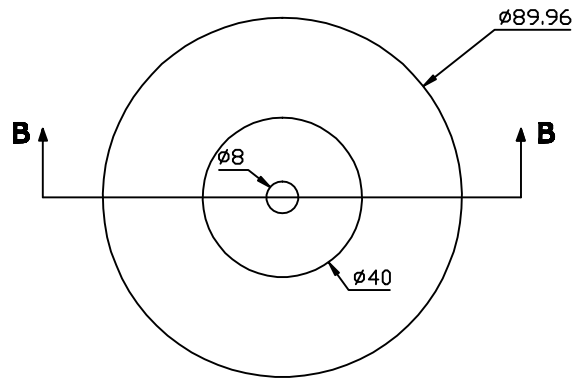
MEDIDAS:
mm

REVISADO POR:
JOSÉ CASTRO

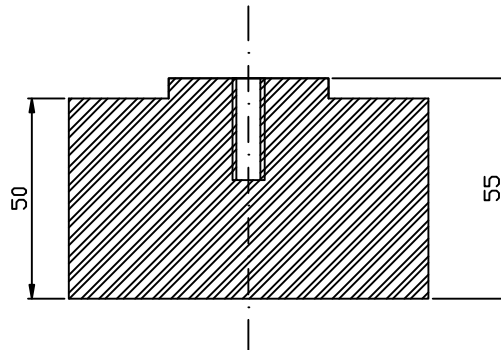
PLANO:
8

FECHA:
20/09/2010

**VISTA
SUPERIOR**



**CORTE
LATERAL
SECCION B-B**



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
DPTO. DE PROCESOS DE FABRICACION

NOMBRE DE LA PIEZA
PUNZON DE CORTE

DIBUJADO POR:
DERIC PAEZ

MATERIAL:
ACERO 1045

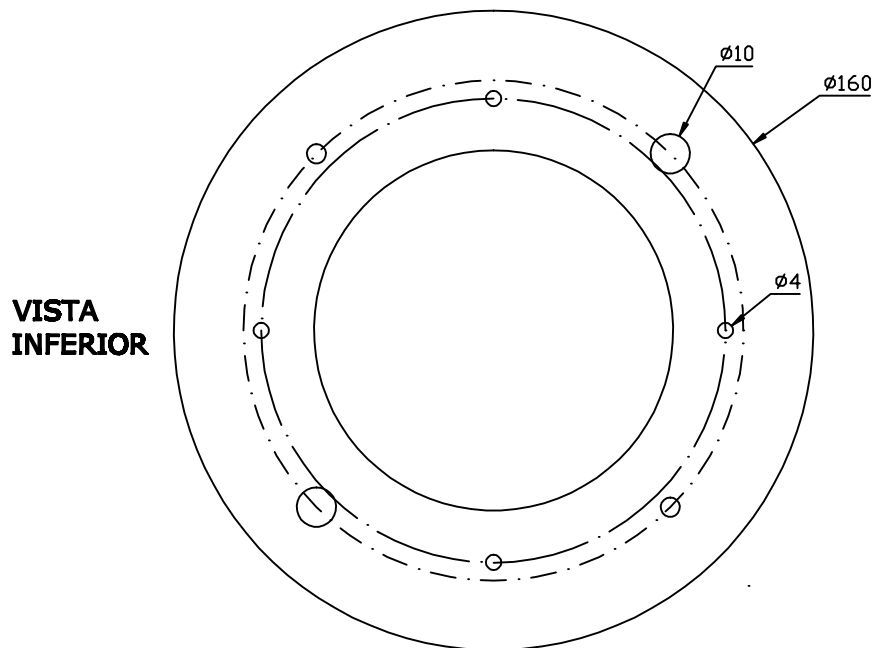
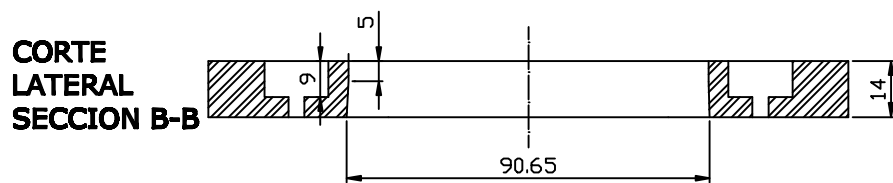
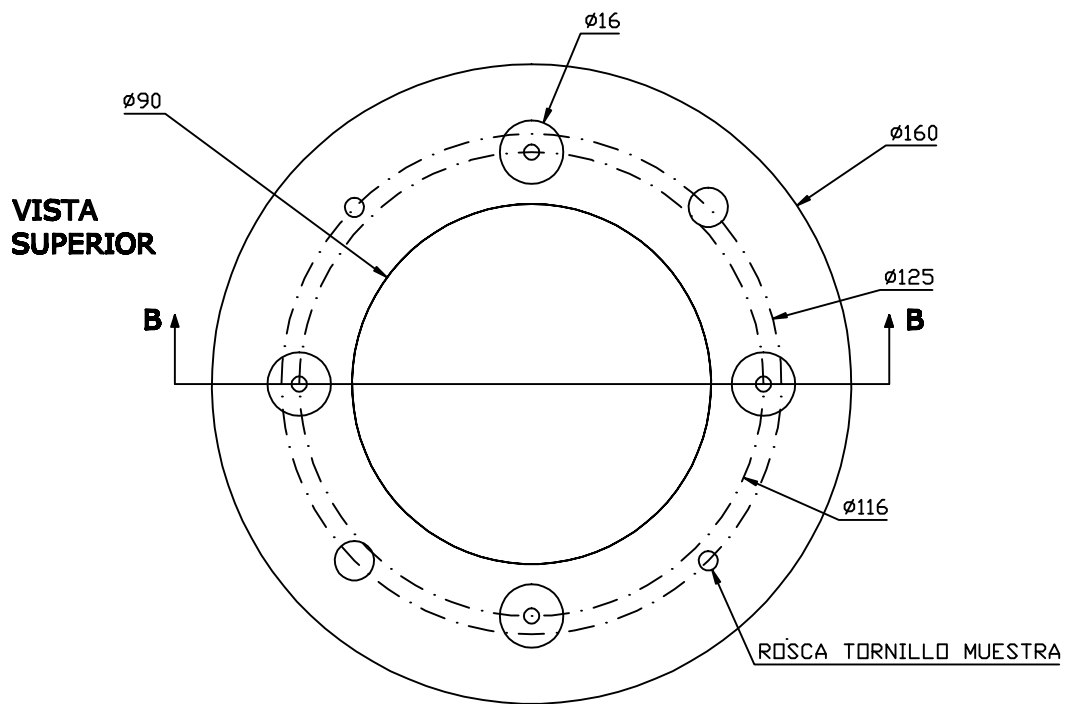
ESCALA:
S/E

MEDIDAS:
mm

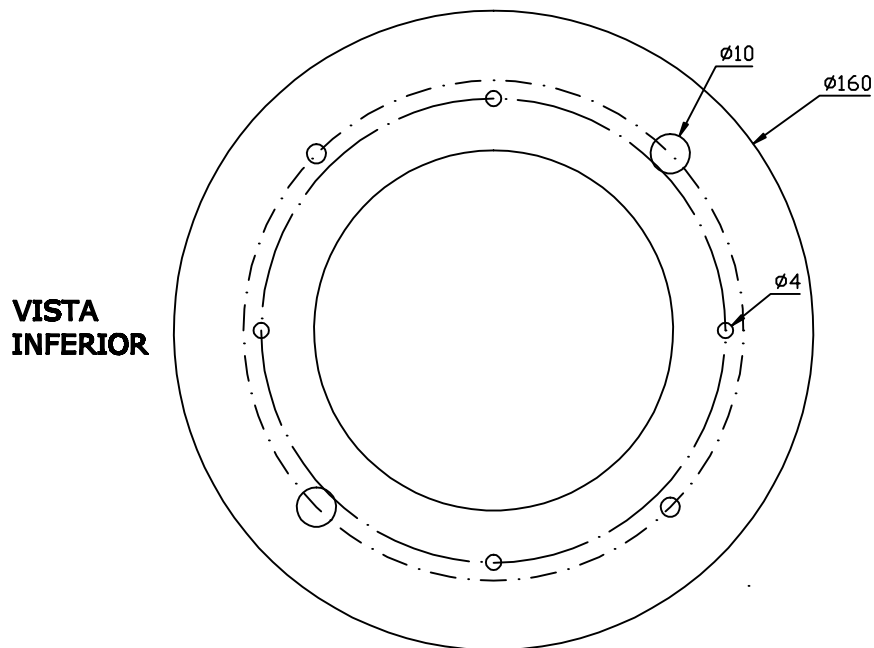
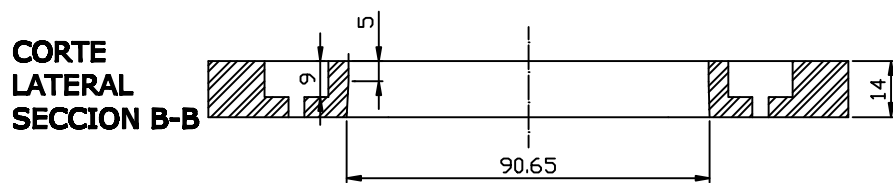
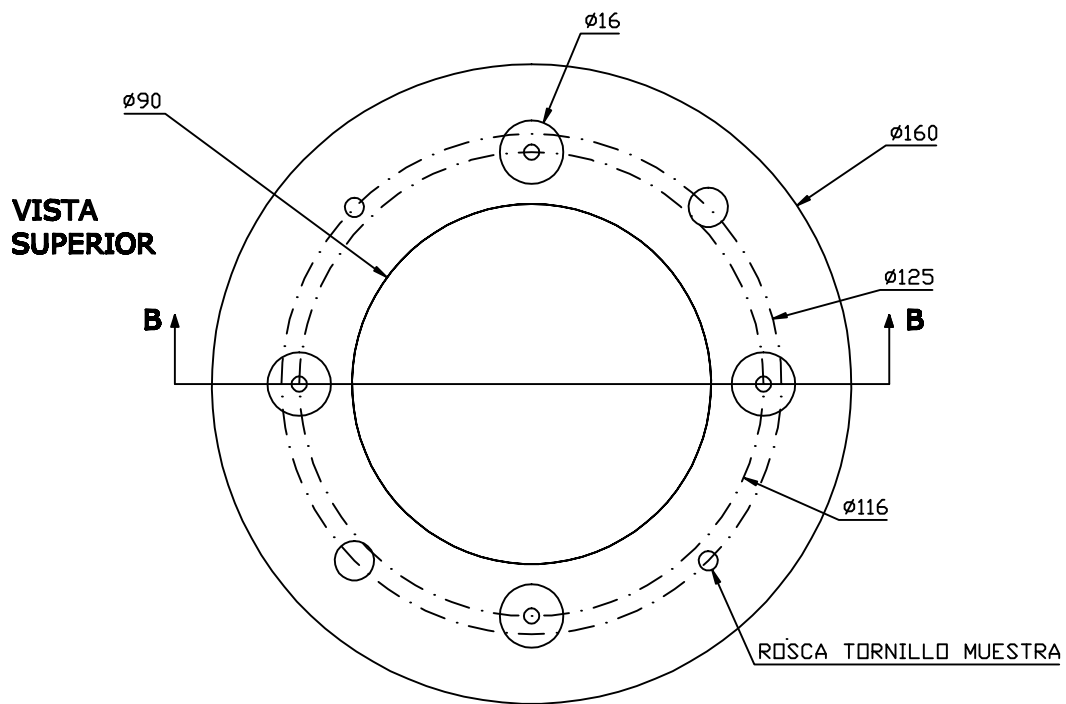
REVISADO POR:
JOSÉ CASTRO

PLANO:
9

FECHA:
20/09/2010

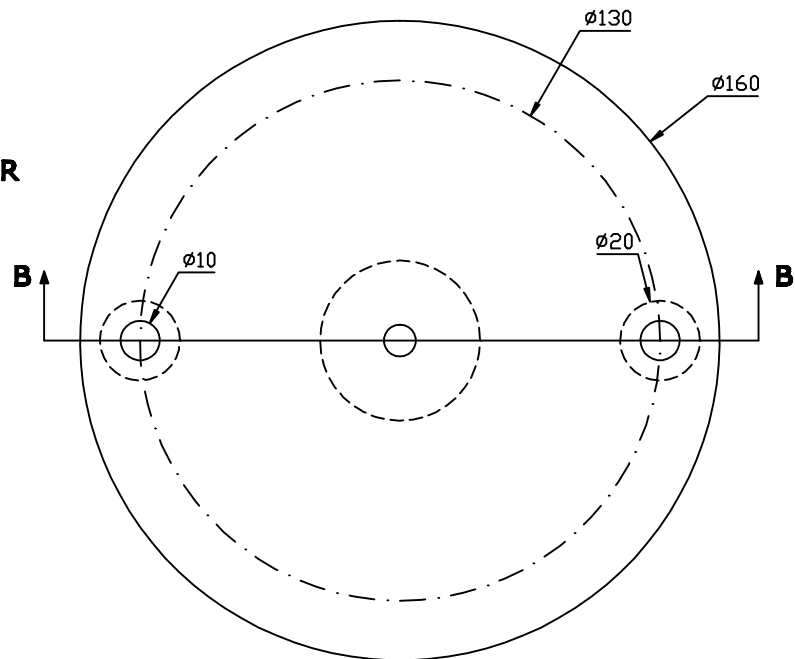


UNIVERSIDAD DE CARABOBO FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA DPTO. DE PROCESOS DE FABRICACION		NOMBRE DE LA PIEZA MATRIZ PUNZONADO	
DIBUJADO POR: DERIC PAEZ	MATERIAL: ACERO 5115	ESCALA: S/E	MEDIDAS: mm
REVISADO POR: JOSE CASTRO	PLANO: 10	FECHA: 20/09/2010	

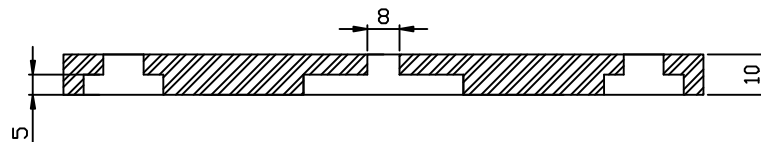


UNIVERSIDAD DE CARABOBO FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA DPTO. DE PROCESOS DE FABRICACION		NOMBRE DE LA PIEZA MATRIZ PUNZONADO	
DIBUJADO POR: DERIC PAEZ	MATERIAL: ACERO 5115	ESCALA: S/E	MEDIDAS: mm
REVISADO POR: JOSE CASTRO	PLANO: 10	FECHA: 20/09/2010	

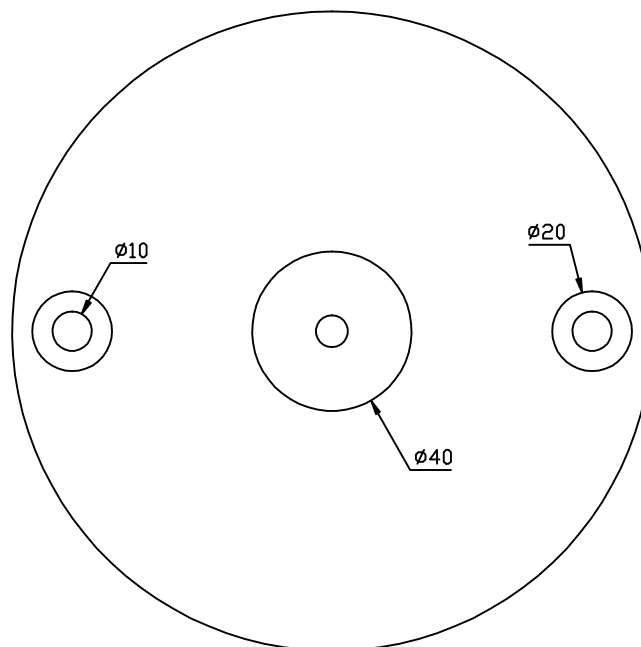
**VISTA
SUPERIOR**



**CORTE
LATERAL
SECCION B-B**

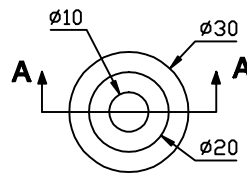


**VISTA
INFERIOR**

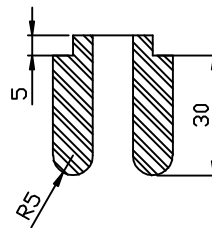


UNIVERSIDAD DE CARABOBO FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA DPTO. DE PROCESOS DE FABRICACION		NOMBRE DE LA PIEZA BASE DE PUNZÓN DE CORTE	
DIBUJADO POR: DERIC PAEZ	MATERIAL: ACERO 1045	ESCALA: S/E	MEDIDAS: mm
REVISADO POR: JOSÉ CASTRO	PLANO: 12	FECHA: 20/09/2010	

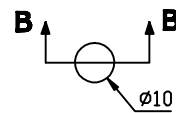
**VISTA
SUPERIOR**



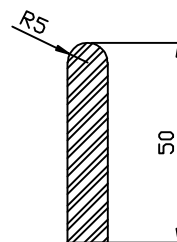
**CORTE
LATERAL
SECCION A-A**



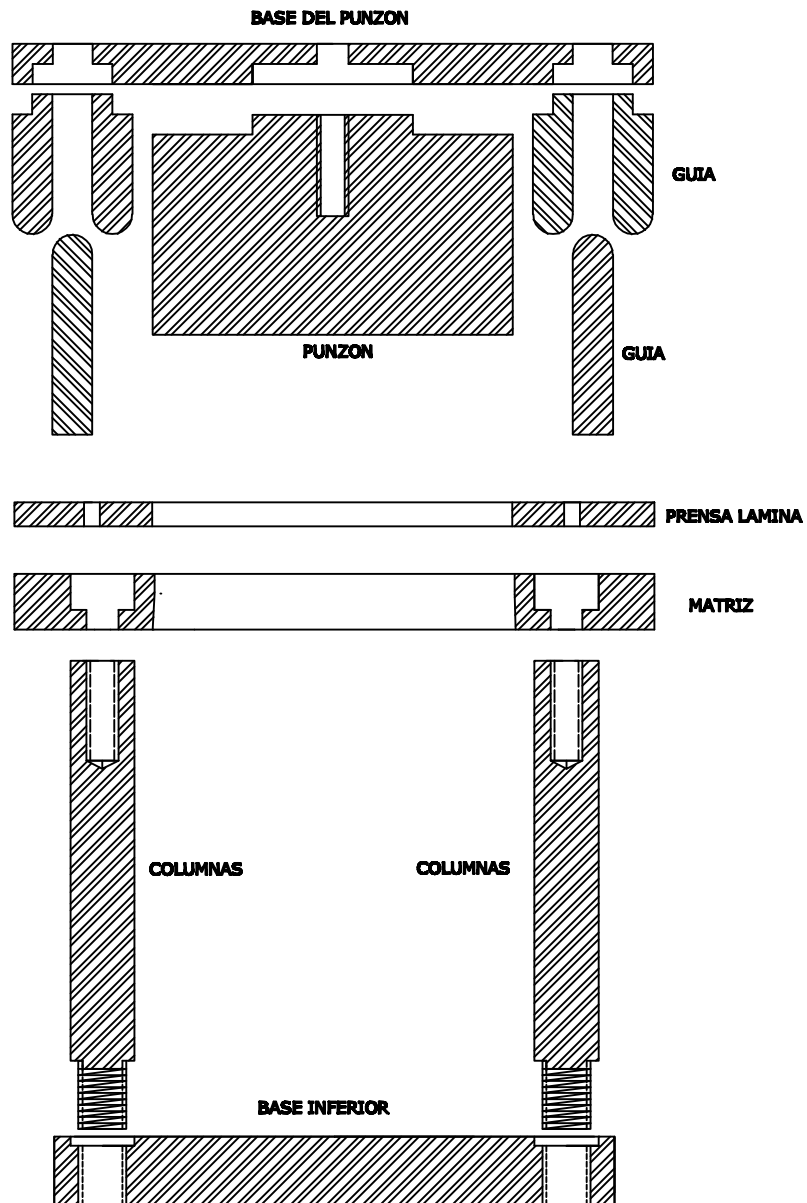
**VISTA
SUPERIOR**



**CORTE
LATERAL
SECCION B-B**



UNIVERSIDAD DE CARABOBO FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA DPTO. DE PROCESOS DE FABRICACION		NOMBRE DE LA PIEZA GUÍAS DEL TROQUEL DE CORTE	
DIBUJADO POR: DERIC PAEZ	MATERIAL: ACERO 1045	ESCALA: S/E	MEDIDAS: mm
REVISADO POR: JOSÉ CASTRO	PLANO: 13	FECHA: 20/09/2010	



UNIVERSIDAD DE CARABOBO
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA
DPTO. DE PROCESOS DE FABRICACION

NOMBRE DE LA PIEZA
TROQUEL DE
PUNZONADO

DIBUJADO POR:
DERIC PAEZ

MATERIAL:
ACERO 1045

ESCALA:
S/E

MEDIDAS:
mm

REVISADO POR:
JOSÉ CASTRO

PLANO:
14

FECHA:
20/09/2010