

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE INGENIERÍA

ANÁLISIS DEL PROCESO DE EMBUTICIÓN PROFUNDA PARA LA ELABORACIÓN DE RECIPIENTES CILÍNDRICOS DE PARED DELGADA POR MEDIO DEL SOFTWARE STAMPACK

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
MECÁNICO**

**LENIN SANTIAGO CARATE CAGUANA
DARWIN STALIN GALLARDO PARRA**

DIRECTOR: Ing. IVÁN ZAMBRANO

Quito, Julio 2007

DECLARACIÓN

Nosotros, Lenin Santiago Carate Caguana, y Darwin Stalin Gallardo Parra, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Lenin Carate C.

Darwin Gallardo P.

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por Lenin Carate C. y Darwin Gallardo P., bajo mi supervisión.

Ing. Iván Zambrano
DIRECTOR DEL PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

A nuestros padres, por habernos brindado la fuerza necesaria para la culminación de esta etapa en nuestras vidas.

A la Carrera de Ingeniería Mecánica, por la formación profesional y personal que hemos recibido en sus aulas.

Al Ing. Iván Zambrano por una dirección enfocada al desarrollo del conocimiento.

A los profesores y amigos que han contribuido con un granito de arena para la elaboración de este proyecto.

A María del Carmen, quien nos brindó una mano amiga en los buenos y malos momentos.

Lenin Carate.
Darwin Gallardo.

DEDICATORIA

Este trabajo dedico a Dios y mi Virgen del Cisne, que me guían por un buen camino. A mis papitos Gonzalo e Hilda por el enorme sacrificio y esfuerzo que han hecho por darme siempre lo mejor y enseñarme a ser una mejor persona. A mis ñañitos Marlene y Roberto que con su cariño me han demostrado que puedo contar con ellos en todo momento, y me han empujado a seguir adelante.

A mi linda Marita, una gran mujer, esposa y amiga, quien ha soportado los últimos pasos de mi carrera, ofreciéndome todo su cariño y su apoyo en los buenos y malos momentos, dándome un motivo para seguir adelante.

A mis amigos Ishpapuros la mejor promoción de mi hermosa facultad, con quienes he pasado muchos y muy buenos momentos. A mis amigos que conocí desde el inicio de mi carrera Charly, Adrilin, Dar, Carleins, Jane,..., quienes han estado cuando más los necesitaba.

Lenin Carate.

Deseo dedicar el presente proyecto a todas las personas que de una u otra forma han influenciado en mi vida.

A mis padres, Jorge y Gladis, que me han entregado todo su amor, cariño y comprensión; y han inculcado en mí los valores necesarios para enfrentar la vida. A mi ñaño Javier, su esposa, Rosi y mis sobrinos: Andrew, Brandon e Isabelita, a los que no veo con mucha continuidad pero que siempre los tengo presentes en el pensamiento y en mi corazón.

A mi gordita Gabi y su preciosa nena Carito, con las que hemos disfrutado de buenos y malos momentos.

Y finalmente a todos los amigos que conocí durante este periodo de aprendizaje en las aulas de la mejor facultad del mundo.

Darwin

CONTENIDO

RESUMEN	xviii
PRESENTACIÓN	xx
CAPÍTULO 1 El Proceso de Embutición	1
1.1 Definición del Proceso de Embutición	1
1.1.1 Procedimiento de Sachs	4
1.1.2 Procedimiento Ericksen	5
1.1.3 Procedimiento Pomp.....	5
1.2 Determinación de los desarrollos	6
1.2.1 Obtención del desarrollo para piezas de embutición circulares	6
1.3 Fuerza ejercida por el émbolo para embutir	7
1.3.1 Redondeado de la arista de embutición.....	9
1.3.2 Redondeado de la arista del émbolo.	10
1.3.3 Holgura de embutición.....	10
1.3.4 Velocidad de embutición.....	11
1.3.5 Lubricación	11
1.3.6 Revenido y decapado	12
1.4 Presión del pisador de sujeción o prensachapas	13
1.5 Embutición en varias fases de piezas cilíndricas.....	15
1.6 Embutición sin prensachapas.....	17
1.7 Otros procedimientos de embutición	17
1.7.1 Embutición por estirado	17
1.7.2 Procedimiento de ensanchado o abombado.....	18
1.8 Defectos que aparecen al embutir	18
1.8.1 Líneas de fluencia.....	19
1.8.2 Relación de límites de resistencia a la tracción desfavorable.....	19
1.8.3 Retroceso elástico y formación de arrugas	19
1.8.4 Defectos presentados por la chapa metálica	20
1.8.5 Gradación excesiva en la elección de las fases de embutición	20
1.8.6 Corrosión en piezas de latón	20
1.8.7 Chapa de poca calidad	21
1.8.8 Émbolo descentrado.....	21
1.8.9 Inclinación del émbolo	21
1.8.10 Desgarro del fondo en todo su perímetro	22

1.8.11 Formación de flecos en el borde lateral	22
1.8.12 Formación regular de sinuosidades	23
1.8.13 Formación irregular de sinuosidades	24
1.8.14 Desgarros producidos debajo de la brida de la chapa	24
1.8.15 Juego excesivamente grande y formación de labios en el borde de la pared lateral	24
1.8.16 Estrangulamiento en el borde del fondo	25
CAPÍTULO 2 Deformación plástica de los materiales	26
2.1 Deformación plástica	26
2.1.1 Cambios de forma y concepto de deformación.....	26
2.1.2 Sistemas de deslizamiento en los metales y deformabilidad	27
2.1.3 Curva de esfuerzo-deformación ingenieril	27
2.2.4 Curva de esfuerzo verdadero-deformación verdadera.....	28
2.2 Criterios de fluencia.....	29
2.2.1 Criterio de la energía máxima de distorsión.....	30
2.3 Límites de deformación	31
2.3.1 Curva límite de deformación (FLC)	32
2.3.2 Diagrama límite de deformación (FLD)	32
2.4 Procesos de deformación	33
2.4.1 Trabajado en frío.....	34
2.4.2 Reforzamiento por el trabajado en frío.....	34
2.5 Propiedades de las láminas para una buena formabilidad	35
2.5.1 Propiedades para una buena embutibilidad.....	35
CAPÍTULO 3 Método de los elementos finitos	38
3.1 Análisis mediante el empleo del método de los elementos finitos.....	41
3.2 El método de los elementos finitos en el software stampack.....	43
CAPÍTULO 4 Análisis del proceso de embutición con el software Stampack ..	44
4.1 Definición del problema	45
4.2 Pre-proceso	46
4.2.1 Preparación de la geometría.....	46
4.2.1.1 Cálculo del desarrollo	47

4.2.1.2 Dimensionamiento de las herramientas para los diferentes procesos	47
4.2.1.3 Elaboración de la Geometría.....	48
4.2.1.4 Creación de las superficies para la chapa y las herramientas	51
4.2.1.5 Verificar la orientación de las normales.....	53
4.2.1.6 Importación de la geometría.....	55
4.2.2 Elaboración de la malla.....	55
4.2.3 Declarar el tipo de problema	58
4.2.3.1 Definición de características generales.....	58
4.2.3.2 Asignación del material para la chapa.....	59
4.2.3.3 Definición de operaciones	66
4.3 Post-procesamiento.....	75
4.3.1 Análisis de resultados obtenidos.....	76
4.3.1.1 Forma Final	76
4.3.1.2 Desplazamientos totales	76
4.3.1.3 Espesor relativo.....	77
4.3.1.4 Zona de curvaturas	77
4.3.1.5 Mayor deformación principal	78
4.3.1.6 Mapa FLD	79
4.3.1.7 Calidad de Conformado	79
4.3.1.8 Zonas de seguridad.....	80
4.3.1.9 Marcas en la chapa	81
4.3.1.10 Análisis e interpretación de curvas obtenidas	82
4.3.2 Resultados obtenidos para los procesos de embutición	85
4.3.2.1 Desplazamientos totales en el proceso inicial de embutición	86
4.3.2.2 Espesor relativo en el proceso inicial de embutición.....	86
4.3.2.3 Zona de curvaturas en el proceso inicial de embutición..	87
4.3.2.4 Mayor deformación principal en el proceso inicial de embutición	87
4.3.2.5 Mapa FLD en el proceso inicial de embutición	88

4.3.2.6 Zonas de conformado en el proceso inicial de embutición	88
4.3.2.7 Zonas de seguridad en el proceso inicial de embutición .	89
4.3.2.8 Marcas en las herramientas en el proceso inicial de embutición	89
4.3.2.9 Presión del prensachapas en el proceso inicial de embutición	90
4.3.2.10 Análisis e interpretación de curvas obtenidas en el proceso inicial de embutición	90
4.3.2.11 Desplazamientos totales en el segundo proceso de embutición.....	93
4.3.2.12 Espesor relativo en el segundo proceso de embutición	94
4.3.2.13 Mayor deformación principal en el segundo proceso de embutición	94
4.3.2.14 Mapa FLD en el segundo proceso de embutición	95
4.3.2.15 Zonas de conformado en el segundo proceso de embutición.....	95
4.3.2.16 Zonas de seguridad en el segundo proceso de embutición.....	96
4.3.2.17 Análisis e interpretación de curvas obtenidas en el segundo proceso de embutición.....	96
4.3.3 Resultados obtenidos para el proceso de abombado	97
4.3.3.1 Desplazamientos totales en el proceso de abombado	98
4.3.3.2 Espesor relativo en el proceso de abombado	98
4.3.3.3 Mayor deformación principal en el proceso de abombado	99
4.3.3.4 Mapa FLD en el proceso de abombado	99
4.3.3.5 Zonas de conformado en el proceso de abombado	100
4.3.3.6 Zonas seguras en el proceso de abombado	100
4.3.4 Resultados obtenidos para el proceso de formación del cuello ..	101
CAPÍTULO 5 Conclusiones y Recomendaciones.....	103
5.1 Conclusiones.....	103

5.2 Recomendaciones.....	104
BIBLIOGRAFÍA	106
ANEXOS	108
ANEXO 1 Procedimientos de prueba para la chapa metálica en el proceso de embutición	109
ANEXO 2 Elementos de superficie para el cálculo del desarrollo.....	112
ANEXO 3 Defectos encontrados en la chapa metálica durante el proceso de embutición.....	117
ANEXO 4 Tratamiento de la chapa.....	120
ANEXO 5 Propiedades de la aleación de aluminio AA 3104-H14	122
ANEXO 6 Herramientas del proceso de embutición profunda.....	125

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1	Proceso de embutición de piezas cilíndricas.....	1
Figura 1.2	Ejemplo de embutición de piezas metálicas.....	2
Figura 1.3	Transformación de fibras de un elemento plano sometido a embutición.....	3
Figura 1.4	Probeta de embutición, indicada especialmente para trabajar con pisador de sujeción.....	4
Figura 1.5	Ensayo Ericksen.....	5
Figura 1.6	Recipiente cilíndrico.	6
Figura 1.7	Gráfico de la fuerza de embutición en función de la holgura.....	8
Figura 1.8	Secuencia de operaciones necesarias para la construcción de piezas según sea la relación de la profundidad de embutición con el diámetro.....	15
Figura 1.9	Embutición por estirado.....	17
Figura 1.10	Diferentes procedimientos de abombado.....	18
Figura 1.11	Formación de arrugas en una pieza embutida.	19
Figura 1.12	Rotura originada por una gradación de embutición demasiado grande.....	20
Figura 1.13	Disposición descentrada del eje del émbolo con respecto al aro de embutición.	21
Figura 1.14	Disposición inclinada del eje del émbolo con respecto al aro de embutición.	22
Figura 1.15	Pieza embutida desgarrada en el fondo.....	22
Figura 1.16	Pieza con flecos en los bordes.....	23
Figura 1.17	Pieza con sinuosidades en el borde de embutición.....	23
Figura 1.18	Formación de un labio en el borde de una pieza embutida.....	24
Figura 2.1	Curva esfuerzo-deformación ingenieril.....	28
Figura 2.2	Comparación de la curva de esfuerzo verdadero-deformación verdadera $\sigma-\epsilon$ con la curva esfuerzo-deformación ingenieril $s-e$..	28
Figura 2.3	Zona de fluencia basada en la energía de distorsión máxima.	30
Figura 2.4	Diagrama Límite de Deformación (FLD), y sus diferentes zonas de conformado.....	32
Figura 2.5	Formas de productos principales de la deformación primaria de palanquillas, tochos y planchas en una planta acerera integrada. .	33
Figura 2.6	a) Deformaciones permanentes y elásticas después de la aplicación de esfuerzos. b) Deformación convencional o con desplazamiento.....	34
Figura 2.7	Estado de los esfuerzos en la embutición.....	35
Figura 2.8	Curvas representativas de la variación de la velocidad de deformación plástica con la dirección de ensayo en lámina de acero de bajo carbono.....	37
Figura 3.1	Sistemas discretos: a) Sistema Estructural, b) Sistema Eléctrico, ..	39
Figura 3.2	Sistemas continuos: a) Túneles, b) Puentes, c) Placas.	39
Figura 3.3	Elementos finitos a) unidimensionales, b) bidimensionales, c) tridimensionales.....	40
Figura 3.4	Viga discretizada con Elementos Finitos Unidimensionales.....	40
Figura 3.5	Viga discretizada con Elementos Finitos Bidimensionales.....	40
Figura 3.6	Viga discretizada con Elementos Finitos Tridimensionales.....	41

Figura 3.7 Discretización de un dominio bidimensional en elementos triangulares de tres nodos.	43
Figura 4.1 Etapas de formado para la obtención de un envase para bebidas.	44
Figura 4.2 Geometría y dimensiones del envase.	45
Figura 4.3 Geometría realizada en AutoCad para la exportación a Stampack.	49
Figura 4.4 Ingreso al menú de Preferencias de Importación en Stampack.	49
Figura 4.5 Importación de la geometría en Stampack.	50
Figura 4.6 Geometría importada en sus correspondientes Layers.	50
Figura 4.7 Ventana Copy.	51
Figura 4.8 Creación de la superficie de la chapa.	52
Figura 4.9 Dimensiones y superficie desarrollada del émbolo.	52
Figura 4.10 Normal de la superficie orientada en el eje z.	53
Figura 4.11 Normales de las herramientas en diferente orientación.	54
Figura 4.12 Normales con sus orientaciones correctas.	54
Figura 4.13 Geometría importada para la simulación.	55
Figura 4.14 Parámetros para el mallado por error cordal.	56
Figura 4.15 Herramienta mallada con error cordal.	56
Figura 4.16 Mallado de la chapa.	57
Figura 4.17 Generación de la malla.	57
Figura 4.18 Ventana Define problem opción Process type.	58
Figura 4.19 Ventana Define problem opción General.	58
Figura 4.20 Ventana Define problem opción Symmetries.	59
Figura 4.21 Ventana Define Tools.	60
Figura 4.22 Ventana Define Blank zone.	60
Figura 4.23 Ventana Define Sheet properties.	61
Figura 4.24 Ventana para asignar el nombre a la chapa.	61
Figura 4.25 Propiedades del Aluminio AA3104-H14.	62
Figura 4.26 Visualización del material asignado a la chapa.	62
Figura 4.27 Ventana Add a new tool.	63
Figura 4.28 Ingreso de la fuerza de pisado.	64
Figura 4.29 Caracterización de la herramienta émbolo.	64
Figura 4.30 Ventana para caracterizar una herramienta de corte.	65
Figura 4.31 Ventana Select node for cutting 3D.	65
Figura 4.32 Ventana Define detailed history.	66
Figura 4.33 Ventana Add a new operation.	67
Figura 4.34 Elección de herramientas en la opción Tools.	67
Figura 4.35 Caracterización de la etapa Holding.	68
Figura 4.36 Caracterización de la etapa Forming.	68
Figura 4.37 Caracterización del menú Contact.	69
Figura 4.38 Caracterización del menú Special Output.	69
Figura 4.39 Creación de una operación de Positioning.	70
Figura 4.40 Definición de una operación de Positioning.	71
Figura 4.41 Ventana Positioning parameters.	71
Figura 4.42 Ventana Define Positioning properties.	72
Figura 4.43 Creación de una operación Ironing.	73
Figura 4.44 Caracterización de una operación tipo Ironing.	73
Figura 4.45 Caracterización de una operación tipo Doming.	74
Figura 4.46 Caracterización de una operación tipo Necking.	74
Figura 4.47 Ventana Calculate the simulation.	75
Figura 4.48 Forma final del envase.	76

Figura 4.49 Desplazamiento total en el eje X.....	76
Figura 4.50 Espesor relativo.....	77
Figura 4.51 Zonas de curvatura.	78
Figura 4.52 Mayor deformación principal	78
Figura 4.53 Mapa FLD	79
Figura 4.54 Calidad de conformado	80
Figura 4.55 Zonas Seguras	81
Figura 4.56 Marcas en la chapa	81
Figura 4.57 Ventana Load history information.....	82
Figura 4.58 Caracterización para obtener la fuerza total de contacto	83
Figura 4.59 Gráfica de la Fuerza Total de Contacto en el proceso de formación del cuello.....	83
Figura 4.60 Selección de un nodo para analizar la velocidad del émbolo.....	84
Figura 4.61 Gráfico de la velocidad del émbolo	84
Figura 4.62 Herramientas que intervienen en el proceso inicial de embutición.....	85
Figura 4.63 Desplazamientos totales en el proceso inicial de embutición.....	86
Figura 4.64 Espesor relativo en el proceso inicial de embutición.....	86
Figura 4.65 Zonas de curvatura en el proceso inicial de embutición.....	87
Figura 4.66 Mayor deformación principal en el proceso inicial de embutición..	87
Figura 4.67 Mapa FLD en el proceso inicial de embutición.....	88
Figura 4.68 Zonas de conformado en el proceso inicial de embutición.....	88
Figura 4.69 Zonas seguras en el proceso inicial de embutición.....	89
Figura 4.70 Marcas en las herramientas en el proceso inicial de embutición. .	89
Figura 4.71 Presión del pensachapas.....	90
Figura 4.72 Selección de un nodo para analizar su desplazamiento	91
Figura 4.73 Gráfica Desplazamiento vs. Tiempo.....	91
Figura 4.74 Gráfica Espesor relativo vs. Tiempo.....	92
Figura 4.75 Fuerza total de contacto del émbolo en el proceso inicial de embutición.....	92
Figura 4.76 Herramientas utilizadas en el segundo proceso de embutición ...	93
Figura 4.77 Desplazamientos totales en el segundo proceso de embutición...	93
Figura 4.78 Espesor relativo en el segundo proceso de embutición	94
Figura 4.79 Mayor deformación principal en el segundo proceso de embutición.....	94
Figura 4.80 Mapa FLD en el segundo proceso de embutición	95
Figura 4.81 Zonas de conformado en el segundo proceso de embutición	95
Figura 4.82 Zonas seguras en el segundo proceso de embutición	96
Figura 4.83 Selección de un nodo en el segundo proceso de embutición	96
Figura 4.84 Espesor relativo en el segundo proceso de embutición	97
Figura 4.85 Forma final del envase después de aplicar el proceso de abombado.	97
Figura 4.86 Desplazamientos totales en el proceso de abombado	98
Figura 4.87 Espesor relativo en el proceso de abombado	98
Figura 4.88 Mayor deformación principal en el proceso de abombado.....	99
Figura 4.89 Mapa FLD en el proceso de abombado	99
Figura 4.90 Zonas de conformado en el proceso de abombado	100
Figura 4.91 Zonas seguras en el proceso de abombado.....	100
Figura 4.92 Forma inicial del material para realizar la formación del cuello...	101
Figura 4.93 Herramientas utilizadas en el proceso de formación del cuello...	101

Figura 4.94 Forma del envase finalizada la primera etapa.....	102
Figura 4.95 Forma del envase finalizada, a) la séptima etapa, b) la quinceava etapa	102

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Velocidad de embutición recomendada para diferentes materiales.	11
Tabla 1.2 Lubricantes a usar en la embutición en relación al material a deformar.	12
Tabla 1.3 Datos para el revenido de la chapa de embutir.	13
Tabla 1.4 Relaciones de embutido para piezas cilíndricas.	16
Tabla 2.1 Criterios de fluencia utilizados en el programa Stampack.	31
Tabla 4.1 Medidas y desplazamientos de las herramientas.	48

SIMBOLOGÍA

D :	Diámetro de la chapa metálica
d :	Diámetro del émbolo
r_M :	Radio de la arista de embutición.
D' :	Diámetro final del recipiente cilíndrico
h :	Segmento de chapa metálica que se transforma en la altura del recipiente
S :	Superficie del disco de la chapa metálica
S' :	Superficie final de la chapa metálica después de la embutición
h' :	Altura del recipiente
P_c :	Carga de compresión
P_t :	Carga de tracción
R :	Radio del disco de la chapa metálica
r :	Radio del vaso embutido
P_d :	Presión necesaria para el proceso de embutición en [Kg]
s :	Espesor de la chapa
k_m :	Resistencia media al cambio de forma en [Kg/mm ²]
β :	Relación de embutición
β_{100} :	Relación de embutición máxima admisible o relación de gradación
d_1 :	Diámetro después de la primera embutición
d_2 :	Diámetro después de la segunda embutición
u :	Holgura de embutición
f :	Superficie del émbolo
F :	Superficie sometida a esfuerzo
p_n :	Presión inicial de pisador de sujeción
C :	Coeficiente de compresión (0.2 – 0.3)
σ_B :	Resistencia de la chapa
P_n :	Fuerza total del prensachapas
d_m :	Diámetro del aro de embutición
n :	Número de operaciones necesarias
m :	Número de diámetros

σ_s	Límite de elasticidad.
T_r	Temperatura de recristalización
T_f	Temperatura del punto de fusión
ϵ_L	Deformación por tracción
ϵ_w	Deformación lateral
ν	Razón de Poisson
L	Dimensión original perpendicular a la fuerza de tracción
w	Dimensión original paralelo a la fuerza de tracción
σ	Esfuerzo verdadero
ϵ	Deformación verdadera
s	Esfuerzo ingenieril
e	Deformación ingenieril
K	Coeficiente de endurecimiento por deformación
n	Índice de endurecimiento por deformación
σ_1	Mayor esfuerzo principal
σ_2	Esfuerzo principal
σ_3	Menor esfuerzo principal
σ_{yp}	Esfuerzo de fluencia del material
σ_{eq}	Esfuerzo equivalente
r_0	Velocidad de deformación paralelo a la dirección de laminación
r_{45}	Velocidad de deformación a 45° respecto a la dirección de laminación
r_{90}	Velocidad de deformación transversal a la dirección de laminación
r	Velocidad de deformación de anisotropía plástica
ϵ_a	Deformación verdadera de la anchura de la chapa
ϵ_e	Deformación verdadera del espesor de la chapa
Δr	Anisotropía planar

RESUMEN

El presente proyecto de titulación realiza un análisis al proceso de embutición profunda mediante un claro ejemplo de aplicación, como es la elaboración de recipientes cilíndricos de pared delgada. El proceso físicamente requiere de una serie de etapas necesarias para la creación de dichos envases. Etapas que son simuladas en el Software Stampack para la obtención de una solución que nos ayude a predecir el comportamiento del proceso y evitar la mayor cantidad de fallas que puedan ocurrir en la reproducción física del envase.

El primer capítulo define el proceso de embutición, así como los pasos a seguir, y los parámetros que se debe conocer y tener en cuenta para comprender su funcionamiento. Además, indica las herramientas que se utilizan, así como las posibles fallas que pueden producirse en alguna etapa del proceso de embutición.

El segundo capítulo muestra un compendio sobre deformación plástica de los materiales, en el cual se revisa conceptos de esfuerzo-deformación, procesos de deformación y sus límites. Conceptos muy importantes para conocer el comportamiento del material durante el proceso de embutición en sus diferentes etapas.

El tercer capítulo especifica conceptualmente el método de los elementos finitos, realizando un análisis sobre la manera de abordar un fenómeno por medio de esta herramienta matemática. Además, la función que desempeña el método de los elementos finitos como la herramienta que el software utiliza para resolver problemas de estampado.

El cuarto capítulo pormenoriza cada etapa que se desarrolla para lograr una simulación adecuada. Es decir, el capítulo muestra paso por paso la manera de elaborar envases mediante la utilización del software Stampack, además, se indica los parámetros necesarios que se debe introducir y que pueden variar

conforme se vayan obteniendo resultados mas adecuados a las condiciones deseadas del lector.

El proyecto finaliza con un análisis del proceso de simulación realizado, mediante una serie de conclusiones y recomendaciones que permite indicar la potencialidad que posee el software, así como de ciertos aspectos que se deben tener en cuenta para realizar un proceso de simulación adecuado.

PRESENTACIÓN

El proceso de embutición profunda es muy común en países desarrollados y ciertos países de América Latina cuyo mercado de consumo permite el uso de envases de aluminio (enlatados) para conservar cierto tipo de alimentos. Sin embargo, a pesar de tener en el mercado alimentos enlatados, la industria ecuatoriana no posee la tecnología necesaria para generar estos envases. Por lo tanto, si se desea entrar a generar este tipo de producto, es necesario obtener la tecnología adecuada en maquinaria y programas de computación que facilite la elaboración de este tipo de productos. Es así como el método de los elementos finitos en conjunto con herramientas computacionales aparecen como una respuesta de alta tecnología para realizar simulaciones para procesos de manufactura como el proceso de embutición profunda.

Ese tipo de simulaciones nos proyecta a la culminación de un producto, obteniendo resultados con un alto grado de precisión sin necesidad de realizar una serie de pruebas físicas que nos lleve a un desperdicio de material, así como, a una pérdida de tiempo en la realización de los mismos. Este tipo de programas computacionales que usan el método de los elementos finitos como herramienta de cálculo, facilita a la industria la manipulación de su producto mediante la variación de ciertos parámetros necesarios para su elaboración, con el fin de obtener las mejores opciones de respuesta que serán analizadas posteriormente para poder llegar a la creación física de un producto con un mínimo de errores posibles y con la mas alta calidad.

El presente proyecto pretende ser un documento de apoyo dirigido a estudiantes y profesionales que pretenden incursionar en procesos de embutición profunda, mediante una descripción detallada de las etapas que deben seguirse, así como de los conceptos básicos y parámetros necesarios para la simulación en la elaboración de envases para bebidas mediante el software Stampack.

CAPÍTULO 1

EL PROCESO DE EMBUTICIÓN

1.1 DEFINICIÓN DEL PROCESO DE 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 operaciones¹. El proceso de embutición se expone de manera gráfica en la figura 1.1 en donde se obtiene una pieza embutida de forma cilíndrica.

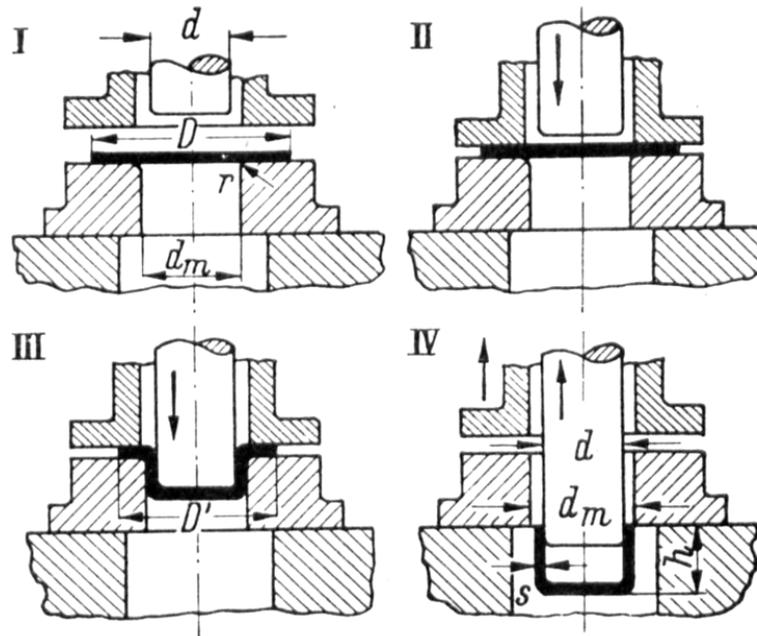


Figura 1.1 Proceso de embutición de piezas cilíndricas.²

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

¹ FUENTE: TROQUELADO Y ESTAMPACIÓN, Tomás López Navarro, pág. 117

² FUENTE: HERRAMIENTAS DE TROQUELAR, ESTAMPAR Y EMBUTIR, Oehler-Kaiser, pág. 305

- III. El émbolo de diámetro d establece contacto con la chapa y presionando la embute a través de la abertura del aro embutidor, 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 el aro para embutir y el pisador de sujeción se denomina brida o pestaña de chapa, esta disminuye de diámetro a medida que el émbolo continúa 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 émbolo alcanzado su posición más baja, este y el pisador de sujeción vuelven a subir.



Figura 1.2 Ejemplo de embutición de piezas metálicas.³

Con el simple proceso de embutición, el espesor del material laminado no debe variar, de lo cual se deriva que la superficie de la pieza debe ser, teóricamente, igual a la de la misma superficie desarrollada; sin embargo en la práctica esto no sucede con exactitud.

Es interesante examinar en principio como se comportan las fibras del material cuando este se encuentra sometido al proceso de embutición. Al observar la figura 1.3A, se distingue que un disco de diámetro D ha sido sometido al

³ FUENTE: TEORÍA DE LA EMBUTICIÓN, Fundación Ascamm, pág 5

proceso de deformación para obtener un recipiente cilíndrico de diámetro D' y altura h . Si en el patrón plano trazamos el diámetro D' de la base del recipiente que se quiere obtener y determinamos una superficie S o sector trapecial, en el cual se han trazado una serie de radios que forman una serie de líneas convergentes-divergentes, y en estas condiciones sometemos el patrón a la embutición, estos trazos formarán una serie de líneas paralelas, tal como lo indica la figura 1.3B; es decir la superficie S ha sufrido una variación durante el proceso transformándose en la rectangular S' . Como consecuencia de tal fenómeno se deduce que el elemento durante la embutición ha sido solicitado por dos esfuerzos, uno radial de tracción y otro tangencial de compresión. Debido a tal cambio, la dimensión h del elemento desarrollado se ha transformado en una h' mayor debido al alargamiento producido en las fibras por el efecto tracción-compresión a que han estado sometidas.

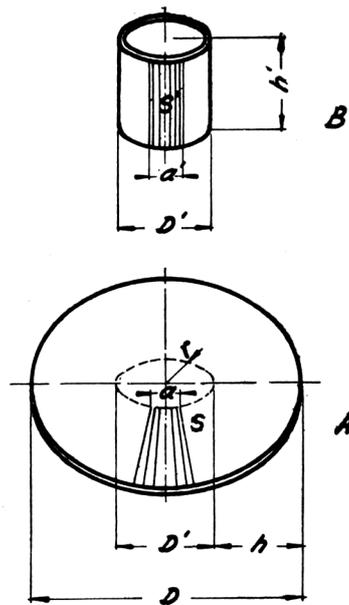


Figura 1. 3 Transformación de fibras de un elemento plano sometido a embutición.⁴

Como consecuencia de que las condiciones de la embutición, especialmente cuando se trabaja con prensachapas, son muy diferentes de las que se dan en la prueba corriente de tracción, es conveniente encontrar un procedimiento sencillo que determine con exactitud las condiciones de un material sometido a embutición.

⁴ FUENTE: TROQUELADO Y ESTAMPACIÓN, Tomás López Navarro, pág. 117

A continuación se exponen tres procedimientos, los cuales permiten obtener las diferentes condiciones de los materiales a embutir y en el Anexo 1 se enumeran en su totalidad los procedimientos de prueba para el proceso de embutición.

1.1.1 PROCEDIMIENTO DE SACHS

Este procedimiento también denominado “embutición por cuña” simula con gran fidelidad las condiciones reales en que se halla el material ensayado cuando se encuentra sometido a procesos de trabajo. La base de este procedimiento es el segmento de disco que se presenta en la figura 1.4A, este segmento es cortado a troquel y es puesto en un útil especial de ensayo que se observa en la figura 1.4B. En este útil la probeta queda fijada de tal manera entre dos placas que reproducen los fenómenos que suceden cuando el material está sometido al proceso de embutición; una vez situada la probeta se tira de ella hasta que es arrancada del útil, de tal manera es posible obtener directamente el grado que se puede estirar al material antes de su rotura; esta medida directa indica el grado de embutición que puede soportar el material.

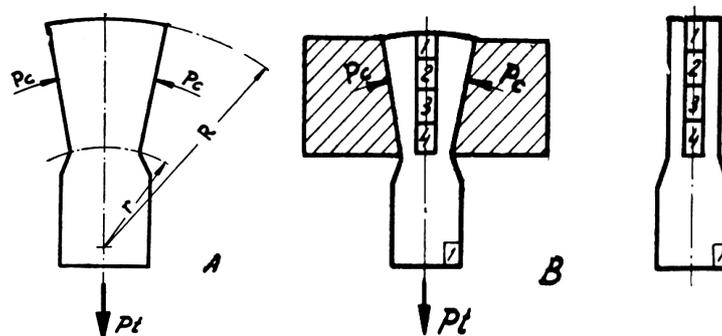


Figura 1. 4 Probeta de embutición, indicada especialmente para trabajar con pisador de sujeción. P_c = carga de compresión; P_t = carga de tracción.⁵

Este límite puede expresarse como la relación entre el radio del disco original R y el radio del vaso embutido r .

Otros procedimientos para determinar las características de materiales sometidos a embutición, especialmente para embutidos de vaso corto, son el llamado procedimiento Ericksen y el método Pomp.

⁵ FUENTE: TROQUELADO Y ESTAMPACIÓN, Tomás López Navarro, pág 117

1.1.2 PROCEDIMIENTO ERICKSEN

Del material a ensayar se corta un disco que se fija enérgicamente entre dos grapas circulares, las cuales dejan libre la parte central del material de prueba. Una vez efectuado esto, se hace avanzar por medio de un husillo un émbolo de acero de 20 mm de diámetro.

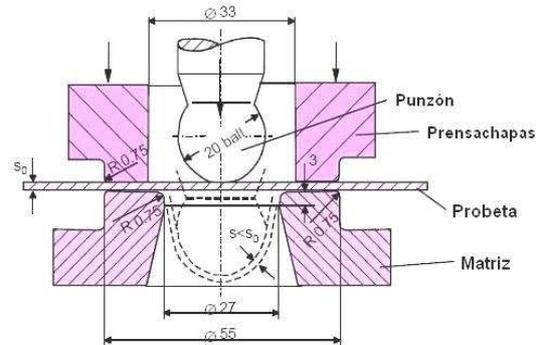


Figura 1. 5 Ensayo Ericksen.⁶

La presión ejercida por este émbolo va deformando lentamente la muestra de ensayo, que forma una embutición de forma esférica; dicha presión se va ejerciendo hasta el instante en que el material presenta la primera grieta o fisura, en este instante se mide la profundidad de la embutición y se registra la carga correspondiente, si se traza una malla sobre la probeta se puede examinar la magnitud y el progreso de los alargamientos locales.

1.1.3 PROCEDIMIENTO POMP

Este procedimiento difiere del anterior por la forma dada a la pieza sometida a ensayo. Para ello se corta un disco con un agujero central, de diámetro conveniente y se sujeta en la máquina-útil del mismo modo que en el caso anterior, otra diferencia consiste en la forma del émbolo, este en vez de ser esférico es cilíndrico con sus bordes redondeados y un pivote central.

Cuando el émbolo ataca la pieza está se embute convenientemente, aumentando el diámetro del agujero del disco de prueba, al finalizar el ensayo los datos a registrar son; el aumento porcentual del agujero y la carga total aplicada.

⁶ FUENTE: TALAT. Training in Aluminium Application Technologies, pág 19

1.2 DETERMINACIÓN DE LOS DESARROLLOS

Uno de los problemas más importantes que se presentan en el embutido es el de determinar las dimensiones de la chapa de la cual se ha de obtener el objeto deseado con el empleo del menor material posible.

1.2.1 OBTENCIÓN DEL DESARROLLO PARA PIEZAS DE EMBUTICIÓN CIRCULARES

Las embuticiones de formas circulares son las más numerosas. Un método elemental para efectuar el cálculo de un desarrollo es considerar este como una superficie equivalente de la pieza desarrollada y no como un valor lineal de la misma.

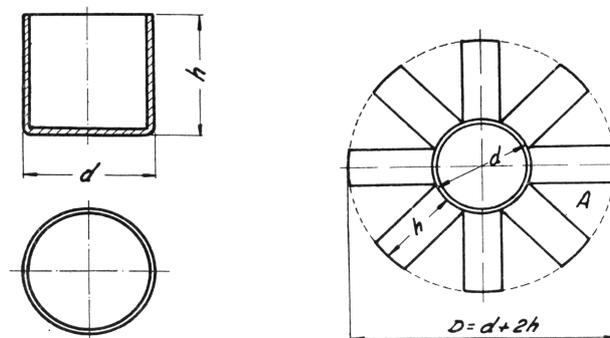


Figura 1. 6 Recipiente cilíndrico.⁷

Supongamos que se trata de determinar el desarrollo para la construcción de un recipiente cilíndrico tal como el de la figura 1.6, a primera vista parece que al diámetro d se le debe agregar dos veces la altura h para obtener el diámetro D del desarrollo, al realizar esto incurriríamos en un error y la cifra hallada sería notablemente superior a la real. Aplicando el método de superficies equivalentes obtendremos:

Superficie del disco desarrollado:

$$S = \frac{\pi D^2}{4}$$

Superficie exterior del cilindro:

$$S = \frac{\pi d^2}{4} + \pi d h$$

⁷ FUENTE: TROQUELADO Y ESTAMPACIÓN, Tomás López Navarro, pág. 128

Al igualar las dos superficies obtendremos:

$$\pi D^2 = \pi d^2 + 4\pi d h$$

$$D^2 = d^2 + 4 d h$$

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

Para realizar el cálculo del desarrollo necesario para obtener cuerpos de forma cilíndrica se recomienda una división de estos cuerpos en elementos independientes; en el Anexo 2 se observan 17 elementos de superficie característicos más conocidos.

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 de referencia de la primera pieza. Una vez trazada la segunda cuadrícula se somete nuevamente a embutición y observando el resultado obtenido se llega a conseguir el desarrollo real de la pieza.

1.3 FUERZA EJERCIDA POR EL ÉMBOLO PARA EMBUTIR

Determinar el valor de la fuerza ejercida por el émbolo en el proceso de embutición resulta siempre como el más dificultoso y el menos convincente. Se pretende exponer una fórmula que ofrezca la posibilidad de determinar fácilmente la fuerza necesaria para embutir un determinado disco de chapa metálica:⁸

$$P_d = \pi d s k_m \ln \frac{D}{d} \quad (1.1)$$

8 FUENTE: HERRAMIENTAS DE TROQUELAR, ESTAMPAR Y EMBUTIR, Oehler Gerhard, pág. 317

$$P_d = \pi d s k_m \ln \beta \quad (1.2)$$

Donde:

P_d = Presión necesaria para el proceso de embutición en kg.

d = Diámetro del émbolo de embutición en mm.

s = Espesor de la chapa en mm.

k_m = Resistencia media al cambio de forma en $\frac{kg}{mm^2}$.

D = Diámetro del recorte en mm.

d = Diámetro del émbolo de embutición en mm.

β = Relación de embutición.

Como se observa en la ecuación 1.2, la fuerza ejercida por el émbolo depende principalmente; de la resistencia media a los cambios de forma, del diámetro del émbolo, de las dimensiones del recorte y del espesor del material.

Al observar la figura 1.7II muy a menudo, cuando se inicia el embutido, aparecen de un modo brusco solicitaciones y esfuerzos muy elevados que a veces sobrepasan la altura del diagrama de trabajo de embutición, este tipo de fenómenos se presentan exclusivamente en trabajos realizados en chapas de acero.

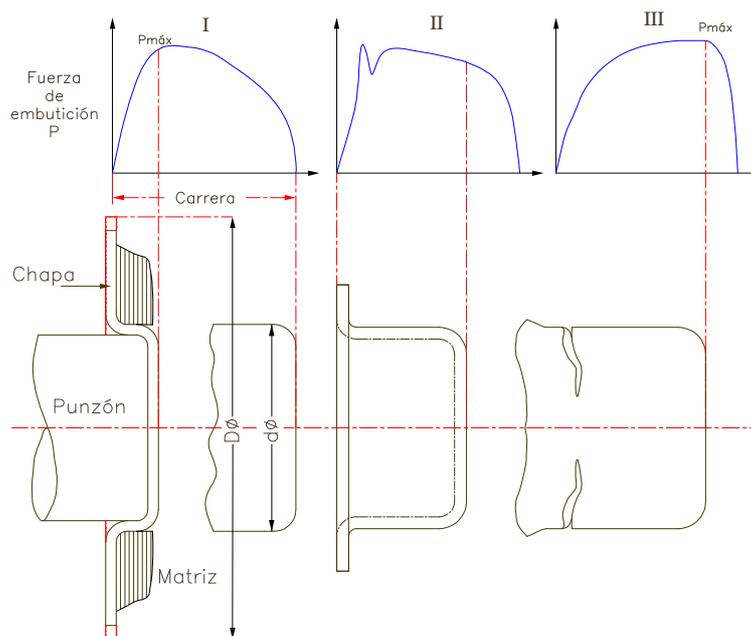


Figura 1. 7 Gráfico de la fuerza de embutición en función de la holgura.

La fuerza del émbolo crece con bastante rapidez al iniciarse la carrera del émbolo y alcanza su valor máximo cuando este queda introducido hasta una profundidad determinada, la misma que corresponde a la suma del radio de la arista con el radio de curvatura del émbolo.

Cuando se trata de obtener receptáculos cilíndricos por medio de percusiones sucesivas, para el cálculo de la fuerza de embutición sirve la misma ecuación 1.2; solamente se dispone, en lugar de $\beta = D/d_1$, un valor $\beta = d_1/d_2$ o bien $\beta = d_2/d_3$, etcétera. Según algunas pruebas, se estima que, debido a la inversión de sentido de la fuerza que se ha empleado en la fase de embutición precedente, ha de añadirse la mitad de está fuerza en calidad de componente de flexión y de cambio de forma, de tal manera que la embutición en fases sucesivas queda como sigue:⁹

$$P_d = 0.5 P_{d1} + \pi d_2 s k_m \ln \frac{d_1}{d_2} \quad (1.3)$$

1.3.1 REDONDEADO DE LA ARISTA DE EMBUTICIÓN.

Un radio de redondeado demasiado pequeño en la arista de embutición produce roturas en el fondo, puesto que la matriz de embutir trabaja como si se tratara de una matriz de corte. Los radios demasiado grandes en la arista de embutición facilitan la formación de pliegues. El radio de redondeado r_M en la arista de embutición puede calcularse aplicando la siguiente ecuación:¹⁰

$$r_M = \frac{0.04 D}{d \beta_{100}} [50 + (D - d)] \sqrt{s} \quad (1.4)$$

Donde:

r_M = Radio de redondeo en mm.

D = Diámetro del recorte en mm.

d = Diámetro del émbolo de embutir en mm.

β_{100} = Relación de embutición máxima admisible o relación de gradación.

9 FUENTE: HERRAMIENTAS DE TROQUELAR, ESTAMPAR Y EMBUTIR, Oehler Gerhard, pág. 319
10 FUENTE: HERRAMIENTAS DE TROQUELAR, ESTAMPAR Y EMBUTIR, Oehler Gerhard, pág. 330

En aquellos casos en que la profundidad de embutición sea muy pequeña, puede suceder que el pisador de sujeción de la chapa no tenga suficiente superficie para ejercer presión, debido a que el radio de redondeado obtenido mediante la ecuación 1.4 resulta excesivamente grande. En los casos especiales en los que la relación de diámetros $\beta = D/d \leq 1.2$ pueden tomarse, sin ningún tipo de reparos, menores radios de redondeo de la arista de embutición, puesto que, con tal relación de diámetros, se ha reducido ya el esfuerzo de embutición, pero el radio r_M nunca debe ser menor que $0.6 s$.

1.3.2 REDONDEADO DE LA ARISTA DEL ÉMBOLO.

Bajo ningún concepto, el redondeado de la arista inferior del émbolo puede ser menor que el redondeado correspondiente de la arista de embutición puesto que en tal caso el émbolo cortarían el material. Un redondeado del émbolo que resulta ventajoso y que lógicamente ha de tenerse en cuenta ya desde el principio cuando se realiza el diseño de la pieza que se desea embutir, ha de ser de 3 a 5 veces mayor que el redondeado de la arista de embutición.¹¹

1.3.3 HOLGURA DE EMBUTICIÓN.

Por holgura de embutición se entiende la separación entre el émbolo y el aro de embutición. La holgura de embutición idónea ha de ser igual a 1.4 veces el espesor de la chapa que debe embutirse, pero esta sencilla fórmula sirve solamente para un limitado número de casos; por lo general, la holgura u se calcula partiendo del espesor de la chapa s en mm. y de un coeficiente a según las siguientes fórmulas empíricas:¹²

$$u = s + 0.07 a \sqrt{10 s} \quad \text{para chapa de acero} \quad (1.5)$$

$$u = s + 0.02 a \sqrt{10 s} \quad \text{para chapa de aluminio blanda} \quad (1.6)$$

$$u = s + 0.04 a \sqrt{10 s} \quad \text{para chapa de materiales no férreos} \quad (1.7)$$

$$u = s + 0.2 a \sqrt{10 s} \quad \text{para chapas de aleaciones resistentes a} \quad (1.8)$$

altas temperaturas

11 FUENTE: HERRAMIENTAS DE TROQUELAR, ESTAMPAR Y EMBUTIR, Oehler Gerhard, pág. 333

12 FUENTE: HERRAMIENTAS DE TROQUELAR, ESTAMPAR Y EMBUTIR, Oehler Gerhard, pág. 334

Para embuticiones cilíndricas se cumple:

$$a = \beta_{100} \frac{d}{D} \quad (1.9)$$

En piezas de sección no cilíndrica, en lugar de la relación d/D se introduce la raíz cuadrada de la correspondiente relación de superficies $\sqrt{f/F}$ donde f es la superficie del émbolo y F es la superficie sometida a esfuerzo.

1.3.4 VELOCIDAD DE EMBUTICIÓN.

Por velocidad de embutición se entiende la velocidad que tiene el carro de la prensa en el momento de entrar el émbolo en contacto con el material, es decir, cuando empieza la operación de embutición.

En la tabla 1.1 se recomiendan algunas velocidades de embutición para diferentes tipos de materiales.

Material	Velocidad (m/min)
Chapa de aluminio	30
Chapa de latón	45
Chapa de acero inoxidable y chapa de aleaciones con alto contenido de níquel	12
Chapa de acero	18
Chapa de zinc	22

Tabla 1. 1 Velocidad de embutición recomendada para diferentes materiales.¹³

1.3.5 LUBRICACIÓN

Para transformar una chapa plana en un cuerpo cilíndrico mediante el embutido, se ha de proceder con una fuerza axial que altera, entre ciertos límites las fibras del material. El material de la chapa es obligado a extenderse uniformemente en el espacio definido entre el émbolo y la matriz; en otros términos se modifica la disposición interna de las fibras de la chapa.

Para hacer más fácil esta labor y reducir las posibilidades de romper las fibras del material, es necesario que durante el embutido se lubriquen abundantemente todas las superficies que se encuentran en contacto. En la tabla 1.2 se indican diversos productos para distintos tipos de procesos.

¹³ FUENTE: TEORÍA DE LA EMBUTICIÓN, Fundación Ascamm, pág. 22

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

Tabla 1. 2 Lubricantes a usar en la embutición en relación al material a deformar.¹⁴

Una lubricación adecuada, no solamente proporciona un trabajo mejor acabado, sino que también aumenta la capacidad de transformación del material, del tipo de trabajo a desarrollar depende también la clase de lubricación.

1.3.6 REVENIDO Y DECAPADO

Siendo muy frecuente efectuar varios procesos de embutición para obtener una pieza, entre cada proceso el material debe ser normalizado para eliminar la dureza adquirida.

Es evidente que, si se introducen en un horno las piezas cubiertas del producto lubricante, este se quemará y dejará las superficies ennegrecidas con una capa dura y resistente; por lo tanto, se recomienda que las piezas sean desengrasadas antes del revenido. Los productos empleados suelen ser sales desengrasantes potásicas o sódicas. Es conveniente eliminar de la pieza, restos de sales desengrasantes, pues es frecuente que estos productos ataquen por corrosión los metales.

Las temperaturas de revenido para conservar la capacidad de embutición en operaciones profundas se indican en la tabla 1.3.

¹⁴ FUENTE: ESTAMPADO EN FRÍO DE LA CHAPA, Mario Rossi, pág. 73

Material	Temperatura de revenido °C	Tiempo de revenido min.	Observaciones
Chapa de acero de embutir (0.15% C)	650° – 700°	4 – 6	Enfriamiento al aire
Chapa de Acero (0.3% C)	680° – 720°	4 – 6	Enfriamiento al aire
Chapa de acero al níquel (0.4% C + 3 a 4 % Ni)	650° – 680°	4 – 6	Enfriamiento al aire o en agua
Cobre	600° – 650°	30 a 60	Enfriamiento en agua
Bronce	550° – 600°	30 a 60	Enfriamiento en agua
Latón	550° – 580°	30 a 60	Duración de 2 horas
Aluminio	330° – 380°	30 a 60	Calentamiento en el horno y enfriamiento natural al aire
Duraluminio	350° – 400°	100 a 200	Calentamiento en el horno y enfriamiento natural al aire

Tabla 1. 3 Datos para el revenido de la chapa de embutir.¹⁵

Los objetos revenidos no deben llevarse a la matriz tal como salen del horno. Es frecuente que la atmósfera en que se ha efectuado el revenido sea oxidante, dejando como consecuencia una capa de óxido y residuos quemados, que actuarán como un abrasivo sobre la matriz.

Para evitar tal defecto, las piezas una vez frías, deben someterse a un proceso de decapado, el cual consiste en sumergir las piezas en un baño ácido por un tiempo mínimo suficiente para obtener el pulido.

1.4 PRESIÓN DEL PISADOR DE SUJECCIÓN O PRENSACHAPAS

Es preciso atribuir una gran importancia a la presión ejercida por el pisador de sujeción conocido también como prensachapas durante el proceso de embutición. Una presión insuficiente provoca una disposición desordenada de la chapa durante su introducción en el agujero de la matriz, produciendo pliegues y arrugas, en cambio, una presión excesiva provoca el alargamiento y la rotura del material.

La fuerza del pisador de sujeción P_n se calcula partiendo de una presión inicial del mismo p_n que son valores obtenidos empíricamente, algunos valores de p_n

15 FUENTE: ESTAMPADO EN FRÍO DE LA CHAPA, Mario Rossi, pág. 173

se los puede obtener en el Anexo 3. Según otros autores la presión inicial p_n del pisador de sujeción se la puede elaborar con la siguiente expresión:¹⁶

$$p_n = C \left[(\beta - 1)^2 + 0.5 \frac{d}{100 s} \right] \sigma_B \quad (1.10)$$

Donde:

p_n = Presión inicial del pisador de sujeción en $\frac{kg}{mm^2}$.

C = Coeficiente comprendido entre 0.2 y 0.3.

β = Relación de embutición.

d = Diámetro del émbolo en mm.

s = Espesor de la chapa en mm.

σ_B = Resistencia de la chapa en $\frac{kg}{mm^2}$.

Al obtener la presión inicial p_n la fuerza P_n se obtiene de la siguiente ecuación:¹⁷

$$P_n = p_n \frac{\pi}{4} \left[D^2 - (d_m + 2 r_M)^2 \right] \quad (1.11)$$

Donde:

P_n = Fuerza del pisador de sujeción en Kg.

p_n = Presión inicial del pisador de sujeción en $\frac{kg}{mm^2}$.

D = Diámetro del desarrollo en mm.

d_m = Diámetro del aro de embutición en mm.

r_M = Radio de la arista de embutición en mm.

Cuando la presión del pisador de sujeción se obtiene por medio de un colchón neumático o hidráulico, puede leerse esta en un manómetro, pero, en el caso de que la presión del pisador se obtenga por medio de un resorte, solamente puede estimarse o calcularse.

16 FUENTE: HERRAMIENTAS DE TROQUELAR, ESTAMPAR Y EMBUTIR, Oehler Gerhard, pág. 338

17 FUENTE: HERRAMIENTAS DE TROQUELAR, ESTAMPAR Y EMBUTIR, Oehler Gerhard, pág. 339

1.5 EMBUTICIÓN EN VARIAS FASES DE PIEZAS CILÍNDRICAS

Como se describió anteriormente la operación de embutición nos permite obtener un cuerpo cilíndrico de altura h y diámetro interior d ; de un disco de chapa metálica de diámetro D . La relación $\beta = D/d$ es siempre mayor que 1, pero tiene un límite superior, puesto que, con un valor β demasiado elevado, el borde del fondo se rompe debido a esfuerzos demasiado elevados de tracción. Es por ello que las piezas de gran profundidad solamente pueden embutirse en varias fases, de tal manera que en la primera fase se embute un cilindro de diámetro mayor y seguidamente en las embuticiones sucesivas van obteniéndose cilindros de diámetro cada vez menor, hasta conseguir la pieza con sus dimensiones definitivas.

No es tarea fácil establecer con exactitud el límite de la profundidad que se puede alcanzar con una sola operación de embutido; las dificultades consiguientes surgen al tener que establecer, a cada momento la relación exacta entre el diámetro y la profundidad del recipiente a obtener.

Se puede llegar a conseguir de un modo aproximado y en una sola operación una profundidad de embutido igual a la mitad del diámetro para piezas pequeñas y de un tercio de diámetro para las piezas grandes. Si se desean profundidades mayores, serán necesarias tantas operaciones por cuantas veces la profundidad sea mayor que el límite máximo anteriormente señalado

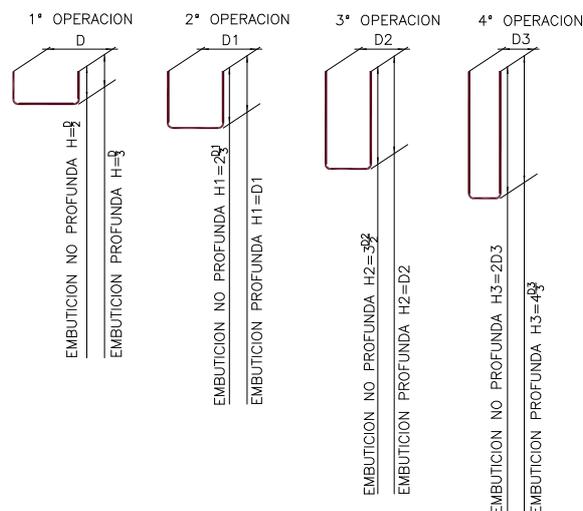


Figura 1. 8 Secuencia de operaciones necesarias para la construcción de piezas según sea la relación de la profundidad de embutición con el diámetro.

La figura 1.8 indica una secuencia de operaciones para un objeto cilíndrico. El número de operaciones necesarias para obtener un recipiente, se expresa por:¹⁸

$$n = \frac{h}{\varepsilon d} = \frac{m d}{\varepsilon d} = \frac{m}{\varepsilon} \quad (1.12)$$

Donde:

n = Número de operaciones necesarias.

m = Número de los diámetros, incluso en fracciones contenidos en una profundidad (por ejemplo: $m = \frac{h}{d} = \frac{2d_3}{d_3} = 2$ en el caso de la Fig.1.8 caso 4).

d = Diámetro medio del recipiente.

ε = 1/2 para piezas pequeñas y 1/3 para piezas grandes.

La tabla 1.4 nos ofrece en una rápida consulta, para determinar si un disco de chapa de diámetro D puede embutirse en una sola o en varias pasadas, con un émbolo de diámetro d y para una profundidad h . Utilizando la relación $u = \frac{d}{D}$ y conociendo el material a embutir; establecemos si este valor se encuentra en la tabla.

Material	Primera Pasada		Pasadas siguientes
	$u = \frac{d}{D}$	$\frac{h}{d}$	$\frac{d_1}{d} = \frac{d_2}{d_1} = \frac{d_3}{d_2}$
Chapa de acero de embutir	0.6 – 0.65	0.34 – 0.44	0.8
Chapa de acero para embutidos profundos	0.55 – 0.6	0.44 – 0.57	0.75 – 0.8
Chapa para carrocería	0.52 – 0.58	0.49 – 0.67	0.75 – 0.8
Chapa de acero inoxidable	0.5 – 0.55	0.57 – 0.75	0.8 – 0.85
Chapa de aluminio dulce	0.53 – 0.6	0.44 – 0.65	0.8
Chapa de cobre	0.55 – 0.6	0.44 – 0.57	0.85
Chapa de latón	0.5 – 0.55	0.57 – 0.75	0.75 – 0.8
Chapa de zinc	0.65 – 0.7	0.25 – 0.34	0.85 – 0.9

Esta tabla esta determinada si se emplea un sujetador elástico. Al emplear un sujetador rígido las relaciones de embutido u deben aumentarse del 5 al 10 % y las relaciones h/d disminuirse en el mismo porcentaje.

Tabla 1. 4 Relaciones de embutido para piezas cilíndricas.¹⁹

18 FUENTE: TROQUELADO Y ESTAMPACIÓN, Tomás López Navarro, pág. 135

19 FUENTE: TROQUELADO Y ESTAMPACIÓN, Tomás López Navarro, pág. 120

1.6 EMBUTICIÓN SIN PRENSACHAPAS

Con matrices de embutir normales, solamente pueden embutirse sin prensachapas piezas que tengan poca profundidad de embutición, es decir, con pequeña relación de embutición β , como, por ejemplo; botes de crema para los zapatos y sus tapas. La altura de pared lateral h que puede conseguirse sin prensachapas es función del espesor de la chapa s y del diámetro de embutición d , y cumple con la siguiente igualdad empírica:²⁰

$$h \leq 0.3 \sqrt[3]{d^2} \sqrt{s} \quad (1.13)$$

Donde:

h = Altura de la pared lateral en mm.

d = Diámetro del émbolo en mm.

s = Espesor de la chapa en mm.

1.7 OTROS PROCEDIMIENTOS DE EMBUTICIÓN

1.7.1 EMBUTICIÓN POR ESTIRADO

La operación de embutido por estirado consiste en disminuir el espesor de la pared cilíndrica de un recipiente previamente embutido mediante sucesivas operaciones a fin de conseguir las dimensiones deseadas. En esta operación que se realiza en frío, se obliga al material a pasar a través de una corona circular para salir deformado permanentemente después de haber adquirido una sección circular mas pequeña y una longitud mayor.

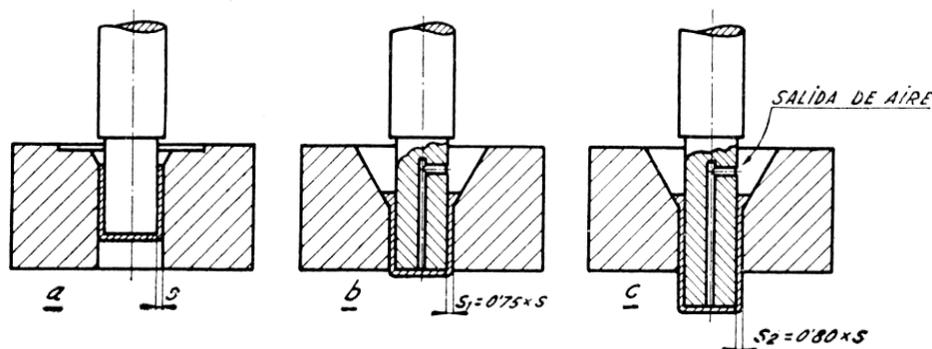


Figura 1. 9 Embutición por estirado.²¹

20 FUENTE: HERRAMIENTAS DE TROQUELAR, ESTAMPAR Y EMBUTIR, Oehler Gerhard, pág. 344

21 FUENTE: TROQUELADO Y ESTAMPACIÓN, Tomás López Navarro, pág 141

El porcentaje de reducción del espesor depende de la calidad del material y de su ductilidad; para las mejores calidades de acero se pueden conseguir reducciones máximas de espesor de un 35%, pero si los recipientes deben someterse a grandes fuerzas se aconseja reducir lentamente el espesor.

1.7.2 PROCEDIMIENTO DE ENSANCHADO O ABOMBADO

Todas las piezas embutidas presentan la tendencia a abombarse debido a los esfuerzos de tracción que se superponen en la parte inferior de la pared lateral. Esta tendencia a la convexidad no puede medirse en las piezas embutidas por el procedimiento de embutición por estirado y en las embuticiones de cuerpos cilíndricos realizadas con un estrecho juego de embutición.

En la figura 1.10 se representan esquemáticamente diez procedimientos distintos para abombar piezas de chapa embutidas, siendo los cuatro primeros del tipo denominado húmedo.

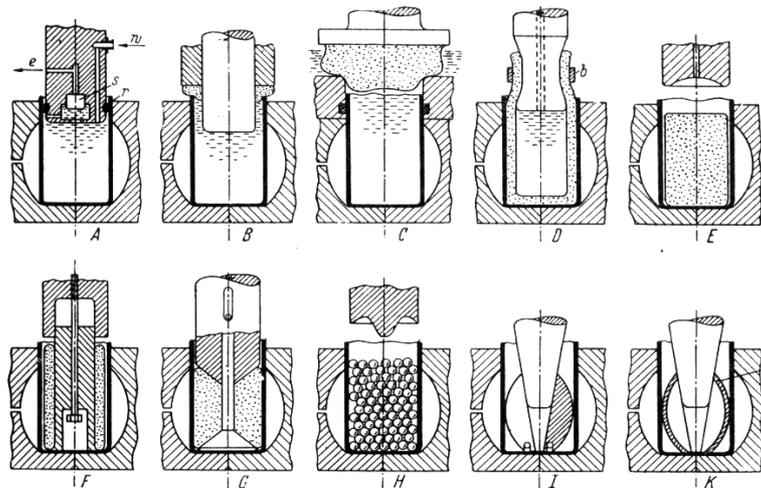


Figura 1. 10 Diferentes procedimientos de abombado.²²

1.8 DEFECTOS QUE APARECEN AL EMBUTIR

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

²² FUENTE: HERRAMIENTAS DE TROQUELAR, ESTAMPAR Y EMBUTIR, Oehler-Kaiser, pág 503

1.8.1 LÍNEAS DE FLUENCIA

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

1.8.2 RELACIÓN DE LÍMITES DE RESISTENCIA A LA TRACCIÓN DESFAVORABLE

Si el esfuerzo correspondiente al límite de elasticidad σ_s se aproxima demasiado al límite de rotura σ_B , la diferencia que queda para que tenga lugar la compensación de esfuerzos es insuficiente para una deformación mediante embutición. La relación del límite de resistencia a la tracción debe ser lo menor posible, es decir $\sigma_s/\sigma_B < 0.85$.²³

1.8.3 RETROCESO ELÁSTICO Y FORMACIÓN DE ARRUGAS

Las diferentes durezas del material dan lugar a un comportamiento distinto durante la operación de embutición. La magnitud de retroceso en el proceso de embutición depende de la resistencia del material, de la relación r_M/s y de una tercera magnitud correspondiente a reducción del diámetro.



Figura 1. 11 Formación de arrugas en una pieza embutida.²⁴

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;

²³ FUENTE: HERRAMIENTAS DE TROQUELAR, ESTAMPAR Y EMBUTIR, Oehler-Kaiser, pág 409

²⁴ FUENTE: DEFECTOS EN PIEZAS MATRIZADAS, Fundación Ascamm, pág. 35

las de carrocería, en donde las variaciones en las dimensiones originadas 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.

1.8.4 DEFECTOS PRESENTADOS POR LA CHAPA METÁLICA

La aparición de tales defectos ocurre muy raramente. Se detectan fácilmente en aquellas zonas en donde la pieza ha sufrido relativamente pocas solicitaciones 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 de la arista de embutición.

1.8.5 GRADACIÓN EXCESIVA EN LA ELECCIÓN DE LAS FASES DE EMBUTICIÓN

El escalonado de embutición excesivamente grande en relación con la facilidad de embutición de un material, es frecuentemente un motivo de aparición de roturas en las piezas embutidas



Figura 1. 12 Rotura originada por una gradación de embutición demasiado grande.²⁵

1.8.6 CORROSIÓN EN PIEZAS DE LATÓN

Las piezas embutidas de latón y las de latón con un elevado contenido de zinc, parecen correctas una vez terminada la operación, pero, posteriormente se rompen por el borde. El origen de este fenómeno, se debe a la fuerte deformación en frío; la cual ha originado esfuerzos interiores y exteriores cuya

25 FUENTE: DEFECTOS EN PIEZAS MATRIZADAS, Fundación Ascamm, pág. 51

acción nociva se pone de manifiesto en virtud del efecto corrosivo de los agentes atacantes. Las roturas no tienen forma definida y exponen un aspecto quebradizo. El revenido de las piezas elimina los esfuerzos internos a tal grado que se puede excluir la posibilidad de rotura posterior.

1.8.7 CHAPA DE POCA CALIDAD

Naturalmente las chapas de poca calidad no pueden embutirse correctamente aunque la gradación se haya 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.

1.8.8 ÉMBOLO DESCENTRADO

En la figura 1.13 el émbolo está descentrado en una mediada e con respecto al aro de embutición, de tal forma que las piezas embutidas se rompen por a , o sea, en la zona más estrecha del huelgo de embutición. Este inconveniente puede corregirse rápidamente desplazando el aro de embutición.

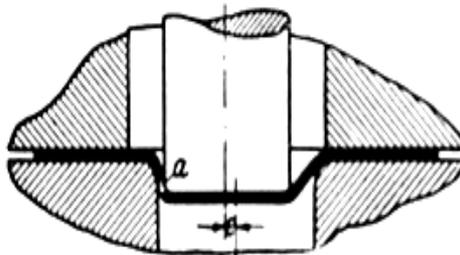


Figura 1. 13 Disposición descentrada del eje del émbolo con respecto al aro de embutición.²⁶

1.8.9 INCLINACIÓN DEL ÉMBOLO

Más difícil de reconocer es el desplazamiento debido a la inclinación del émbolo con respecto al aro de embutición, tal como muestra la figura 1.14, 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 .

26 FUENTE: HERRAMIENTAS DE TROQUELAR, ESTAMPAR Y EMBUTIR, pág. 417

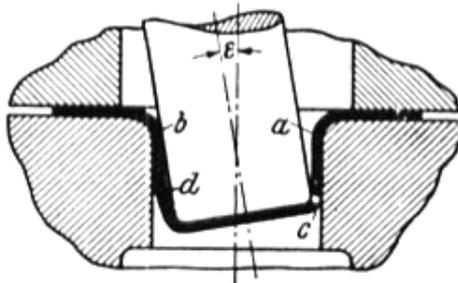


Figura 1. 14 Disposición inclinada del eje del émbolo con respecto al aro de embutición.²⁷

1.8.10 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 prensachapas. La figura 1.15 presenta una forma de fisura típica producida por un émbolo cuya arista tiene un redondeado excesivamente agudo.



Figura 1. 15 Pieza embutida desgarrada en el fondo.²⁸

1.8.11 FORMACIÓN DE FLECOS EN EL BORDE LATERAL

Generalmente son tres las causas que motivan conjuntamente la aparición del defecto. Debido a una presión insuficiente del prensachapas 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 del aro de embutición, originan esfuerzos excesivos en la arista de embutición, los cuales a menudo causan daños.

²⁷ FUENTE: HERRAMIENTAS DE TROQUELAR, ESTAMPAR Y EMBUTIR, pág. 417

²⁸ FUENTE: DEFECTOS EN PIEZAS MATRIZADAS, Fundación Ascamm, pág. 42



Figura 1. 16 Pieza con flecos en los bordes.²⁹

1.8.12 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. La sinuosidad presenta cuatro crestas a 90° extendidas por el contorno del borde, debido a esto, en pieza delgadas se recorta posteriormente el borde y en las piezas de pared gruesa se tornea o se rectifica.



Figura 1. 17 Pieza con sinuosidades en el borde de embutición.³⁰

29 FUENTE: DEFECTOS EN PIEZAS MATRIZADAS, Fundación Ascamm, págs. 43

30 FUENTE: DEFECTOS EN PIEZAS MATRIZADAS, Fundación Ascamm, pág. 48

1.8.13 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 la altura del borde carece de importancia, puesto que han de recortarse las piezas después de la embutición.

1.8.14 DESGARROS PRODUCIDOS DEBAJO DE LA BRIDA DE LA CHAPA

Este tipo de desgarros no se presenta muy frecuentemente puesto que, en la mayoría de los casos, las roturas se producen en las proximidades del borde del fondo. Estos inconvenientes se presentan en aquellas piezas de embutición, en las que al diseñarse la matriz no se tuvo en cuenta que ha de dejarse para el material comprimido un huelgo de embutición mayor en las esquinas que en los costados de la pieza.

1.8.15 JUEGO EXCESIVAMENTE GRANDE Y 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.



Figura 1. 18 Formación de un labio en el borde de una pieza embutida.³¹

31 FUENTE: DEFECTOS EN PIEZAS MATRIZADAS, Fundación Ascamm, pág. 44

1.8.16 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.

En el Anexo 3 se encuentra un resumen de los defectos anteriormente expuestos, sus causas y que medidas hay que tomar para evitar su aparición.

CAPÍTULO 2

DEFORMACIÓN PLÁSTICA DE LOS MATERIALES

2.1 DEFORMACIÓN PLÁSTICA

La deformación plástica es aquella que excede el límite de fluencia de un material y produce una deformación permanente en este, si consideramos a la deformación plástica como el proceso de dar forma al material, es uno de los procesos tecnológicos más importantes en la producción de numerosos artículos de consumo. El material se puede trabajar en caliente o en frío, dependiendo de si la deformación plástica se la lleva a cabo a una temperatura por encima o por debajo de lo que se conoce como temperatura de recristalización T_r .³²

$$T_r = \frac{T_f}{2} \quad (2.1)$$

Donde:

T_r = Temperatura de recristalización en K.

T_f = Temperatura del punto de fusión en K.

2.1.1 CAMBIOS DE FORMA Y CONCEPTO DE DEFORMACIÓN

Un material se deforma (cambia de forma) de acuerdo con el estado de esfuerzos que estén actuando sobre él, un esfuerzo de tracción induce al material a alargarse en dirección paralela a esta fuerza, y a contraerse lateralmente a lo largo de una dirección perpendicular a la misma. Las cantidades normalizadas se conocen como deformaciones, a la deformación paralela a la fuerza se denomina deformación longitudinal o por tracción, en tanto que, a la deformación perpendicular recibe el nombre de deformación lateral. Por tanto:

$$\epsilon_L = \frac{\Delta L}{L} \quad (2.2)$$

³² FUENTE: CIENCIA DE MATERIALES: Pat Mangonon, pág, 270

$$\epsilon_w = \frac{\Delta w}{w} \quad (2.3)$$

Donde:

ϵ_L = Deformación por tracción.

ϵ_w = Deformación lateral.

L = Dimensión original paralela a la fuerza de tracción.

w = Dimensión original perpendicular a la fuerza de tracción.

La razón entre la deformación lateral y la deformación longitudinal se define como la razón de Poisson.³³

$$\nu \equiv -\frac{\epsilon_w}{\epsilon_L} \quad (2.4)$$

2.1.2 SISTEMAS DE DESLIZAMIENTO EN LOS METALES Y DEFORMABILIDAD

La deformación de los materiales se produce por deslizamiento sobre planos preferentes a lo largo de ciertas direcciones preferentes, a estos se les llama planos de deslizamiento y direcciones de deslizamiento respectivamente; una combinación de un plano de deslizamiento con una dirección de deslizamiento se denomina sistema de deslizamiento.

Dentro de una estructura cristalina existen diferentes imperfecciones o defectos en la disposición de los átomos, estos defectos pueden ser del tipo puntual, lineal y planar.

Los defectos lineales en una estructura cristalina se denominan dislocaciones, estas mediante su desplazamiento en un sistema de deslizamiento, permiten al material deformarse plásticamente y a la vez le otorgan ductilidad.

2.1.3 CURVA DE ESFUERZO-DEFORMACIÓN INGENIERIL

La curva esfuerzo-deformación ingenieril es un diagrama convencional que explica el comportamiento de los materiales cuando son sometidos a un determinado esfuerzo. La curva $s - e$ muestra tres partes características: 1) una

33 FUENTE: CIENCIA DE MATERIALES: Pat Mangonon, pág, 129

porción lineal inicial que se conoce como la región elástica, 2) una porción cuya pendiente disminuye continuamente a medida que el esfuerzo aumenta hasta que la pendiente se hace cero (conocida como la región de endurecimiento por deformación), y, 3) una porción donde el esfuerzo se reduce y donde la probeta se adelgaza y exhibe deformación no uniforme hasta que se rompe.

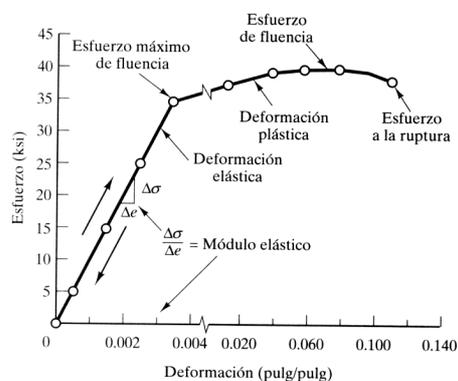


Figura 2. 1 Curva esfuerzo-deformación ingenieril.³⁴

2.2.4 CURVA DE ESFUERZO VERDADERO-DEFORMACIÓN VERDADERA

La curva de esfuerzo-deformación ingenieril no representa una indicación precisa de los esfuerzos verdaderos y deformaciones verdaderas del material, debido a que se basa en las dimensiones originales de la probeta. Estas dimensiones cambian continuamente en el curso del ensayo y el esfuerzo real o verdadero en un momento dado es mucho mayor que el representado por la curva $s - e$.

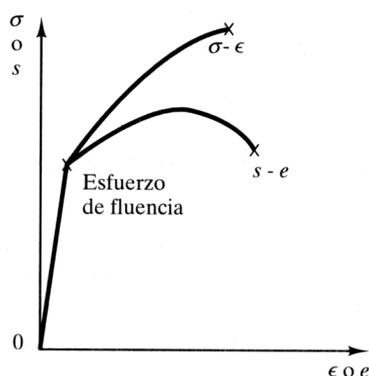


Figura 2. 2 Comparación de la curva de esfuerzo verdadero-deformación verdadera $\sigma - \epsilon$ con la curva esfuerzo-deformación ingenieril $s - e$.³⁵

34 FUENTE: CIENCIA DE MATERIALES: Pat Mangonon, pág, 142

35 FUENTE: CIENCIA DE MATERIALES: Pat Mangonon, pág, 145

Si bien la curva $s-e$ es suficiente para el diseño debido a que subestima la capacidad real del material, la curva de esfuerzo verdadero-deformación verdadera $\sigma-\epsilon$ es la propiedad más importante en las operaciones de formado o manufactura porque describe la necesidad de carga real del material para la ulterior deformación o flujo de los elementos sólidos. Por esta razón a la curva $\sigma-\epsilon$ se le suele llamar curva de esfuerzo de fluencia.

Debido a la importancia del esfuerzo de fluencia en las operaciones de metalistería, se han realizado numerosos esfuerzos para ajustar una ecuación matemática a la curva $\sigma-\epsilon$. La ecuación que mejor se ajusta a la región de deformación plástica hasta la carga máxima es:³⁶

$$\sigma = K \epsilon^n \quad (2.5)$$

Donde:

σ = Esfuerzo verdadero.

ϵ = Deformación verdadera.

K = Coeficiente de endurecimiento por deformación.

n = Índice de endurecimiento por deformación.

2.2 CRITERIOS DE FLUENCIA

En numerosos problemas técnicos, el estado de esfuerzo y deformación en puntos críticos puede ser muy complejo, se dispone de procedimientos matemáticos idealizados para determinar esos estados. Sin embargo, la respuesta precisa de los materiales reales a tales esfuerzos y deformaciones se resiste a formulaciones exactas.

Sólo la idealización clásica de los criterios de fluencia de los materiales ayuda a resolver estos problemas. El criterio de fluencia más ampliamente aceptado para la aparición del comportamiento inelástico (fluencia) en materiales dúctiles bajo esfuerzos combinados es el de la Energía Máxima de Distorsión.

36 FUENTE: CIENCIA DE MATERIALES: Pat Mangonon, pág, 145

2.2.1 CRITERIO DE LA ENERGÍA MÁXIMA DE DISTORSIÓN

El criterio de la Energía Máxima de Distorsión, es el criterio de fluencia para materiales isótropos dúctiles más utilizado, conocido también como el criterio de Von Mises, se basa en los conceptos de energía y de los esfuerzos principales.³⁷

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_{yp}^2 \quad (2.6)$$

Donde:

σ_1 = Es el mayor esfuerzo en una de las direcciones principales (x, y, z).

σ_2 = Es el menor esfuerzo en una de las direcciones principales.

σ_3 = Es el esfuerzo en la restante dirección principal.

σ_{yp} = Esfuerzo de fluencia del material.

Para el esfuerzo plano $\sigma_3 = 0$ y la ecuación anterior escrita en forma adimensional:

$$\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{yp}}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{yp}} - \frac{\sigma_2}{\sigma_{yp}}\right) + \left(\frac{\sigma_2}{\sigma_{yp}}\right)^2 = 1 \quad (2.7)$$

Esta es la ecuación de una elipse cuya gráfica se muestra en la siguiente figura y es conocida como la superficie de fluencia basada en la Energía Máxima de Distorsión.

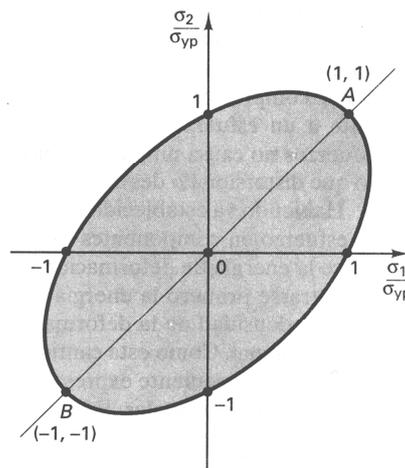


Figura 2. 3 Zona de fluencia basada en la energía de distorsión máxima.³⁸

37 FUENTE: POPOV P. Mecánica de Sólidos, pág. 523

38 FUENTE: POPOV P. Mecánica de Sólidos, pág. 526

Cualquier esfuerzo que cae dentro de la elipse indica que el material se comporta elásticamente, mientras que los puntos sobre la elipse indican que el material está fluyendo. La tabla 2.1 indica los criterios de fluencia que utiliza el programa Stampack.

Criterio	Esfuerzo Equivalente
Hill 48	$\sigma_{eq} = \left[\sigma_{11}^2 + \frac{r_0(1+r_{90})}{r_{90}(1+r_0)} \sigma_{22}^2 - 2 \frac{r_0}{1+r_0} \sigma_{11} \sigma_{22} + \frac{(1+2r_{45})(r_0+r_{90})}{r_{90}(1+r_0)} \sigma_{12}^2 \right]^{1/2}$
Hill 79	$\sigma_{eq} = \left[\frac{1}{2(1+r)} \sigma_{11} + \sigma_{22} ^m + \frac{1+2r}{2(1+r)} \left((\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + 4\sigma_{12}^2 \right)^{m/2} \right]^{1/m}$

Tabla 2. 1 Criterios de fluencia utilizados en el programa Stampack.³⁹

En los modelos de Hill los parámetros del material r_0 , r_{45} y r_{90} son conocidos como los coeficientes de Lankford y determinan la anisotropía del material, mientras r en el modelo de Hill 79 es considerado un promedio entre los coeficientes de Lankford que se obtiene de la siguiente manera:⁴⁰

$$\bar{r} = \frac{(r_0 + 2r_{45} + r_{90})}{4}.$$

2.3 LÍMITES DE DEFORMACIÓN

Para que una operación de estampado tenga éxito, se deben controlar las siguientes variables: las características del material, la geometría de las herramientas y la lubricación; de estas variables dependerá el éxito de cualquier proceso de conformado.

En los procesos de conformado de materiales la deformación ocurre de diversas maneras y en distintas zonas del material, un método práctico y el más utilizado en los procesos de embutición es el de generar la curva límite de deformación del material a utilizar.

³⁹ FUENTE: STAMPACK BASICS CONCEPTS, pág. 79

⁴⁰ FUENTE: CIENCIA DE MATERIALES: Pat Mangonon, pág. 288

2.3.1 CURVA LÍMITE DE DEFORMACIÓN (FLC)

Esta curva representa el límite de deformación máxima admisible para un material, si los valores de deformación sobrepasan esta curva, el material falla y si están bajo la curva el material se encuentra en una zona segura. Esta técnica se basa en la determinación de las deformaciones máximas (ϵ_1, ϵ_2) admitidas por el material en los diversos estados de esfuerzos.

2.3.2 DIAGRAMA LÍMITE DE DEFORMACIÓN (FLD)

Este diagrama representa el estado mecánico de conformado de un material indicando las deformaciones que están presentes y su nivel de seguridad, un conjunto de puntos es representado en este diagrama, cada uno de los cuales corresponde a un nodo de la malla en la chapa. Generalmente se dibuja en conjunto con la curva FLC (Forming Limit Curve), y dependiendo de la ubicación de la nube de puntos con respecto a esta curva, se obtiene la información del estado de deformaciones de la chapa, en la siguiente figura se observa las diferentes zonas de deformación en un diagrama FLD.

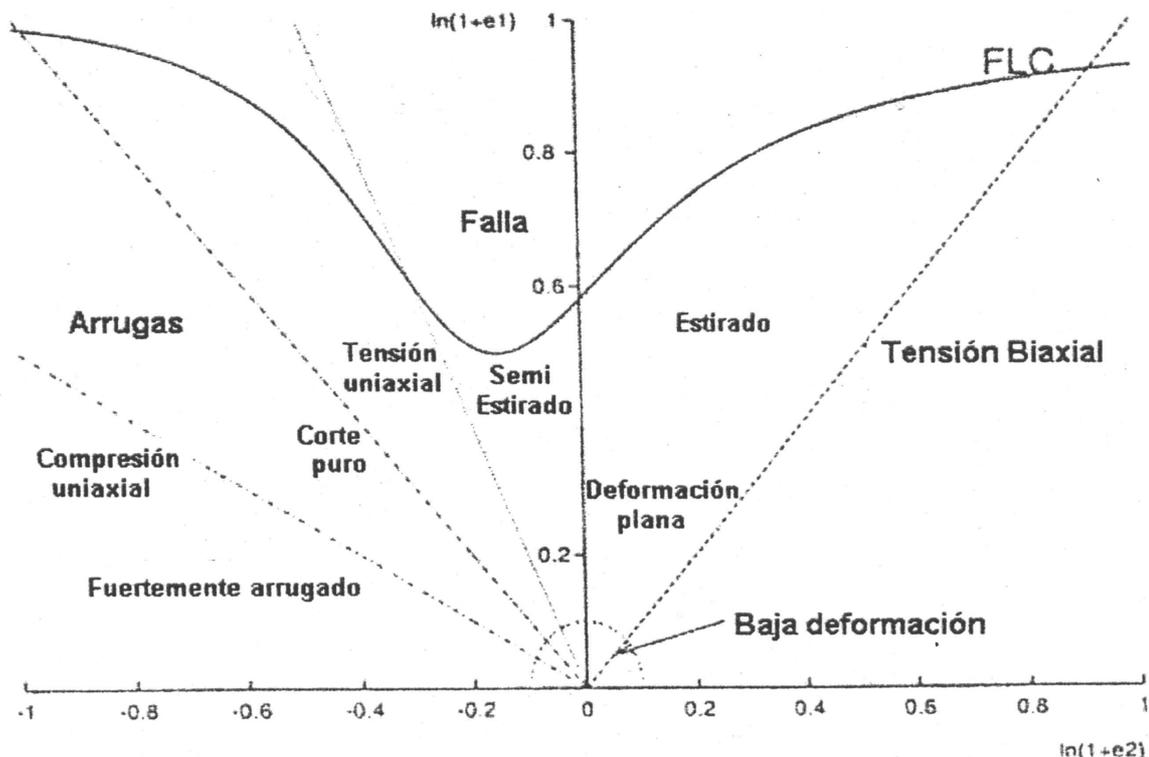


Figura 2. 4 Diagrama Límite de Deformación (FLD), y sus diferentes zonas de conformado.⁴¹

41 FUENTE: STAMPACK BASICS CONCEPTS, pág 108

2.4 PROCESOS DE DEFORMACIÓN

Los procesos de deformación se clasifican en términos generales en dos categorías. Procesos primarios que se llevan a cabo en las instalaciones de los productores y proveedores de metal, y, en general comprenden las operaciones de trabajado en caliente, como la división de los lingotes en planchas, palanquillas o tochos y la posterior conformación en caliente para obtener diversas formas estructurales, barras y productos planos como se puede apreciar en la figura 2.5.

Algunos productos de los procesos primarios se utilizan en los procedimientos secundarios o procesos de fabricación como: estirado, forjado, estampado, soldado, maquinado, punzonado y corte.

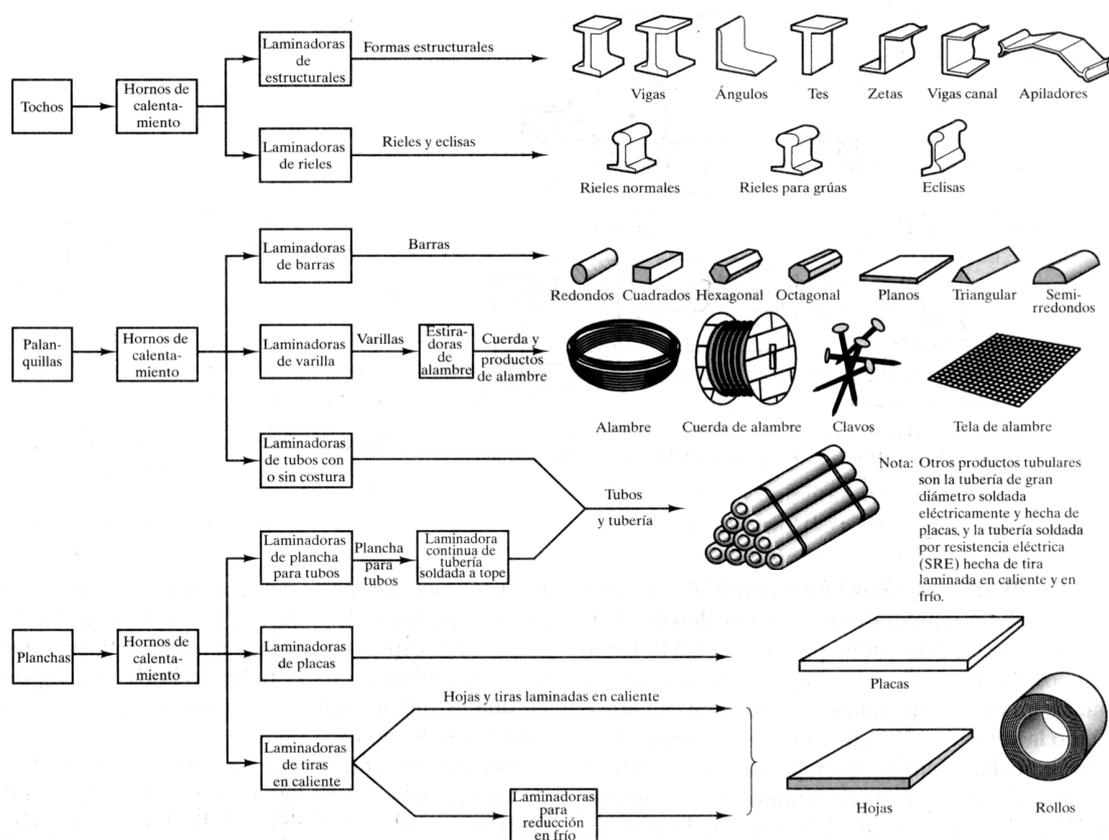


Figura 2. 5 Formas de productos principales de la deformación primaria de palanquillas, tochos y planchas en una planta acerera integrada.⁴²

2.4.1 TRABAJADO EN FRÍO

En la serie de operaciones de manufactura, esta es habitualmente la última operación y se conoce como el acabado en frío de las piezas y productos. Originalmente, las operaciones de acabado en frío se empleaban solamente para obtener tolerancia dimensional y buen acabado superficial, a medida que se produjeron más productos trabajados en frío fue difícil no advertir el considerable reforzamiento producido en el material por el acabado en frío.

2.4.2 REFORZAMIENTO POR EL TRABAJADO EN FRÍO

El trabajado en frío o endurecimiento por deformación nos indica que el esfuerzo de fluencia de los materiales aumenta si la deformación inicial sobrepasa la resistencia al esfuerzo de fluencia del material. Sin embargo este aumento de resistencia se da acompañado de una pérdida de ductilidad.

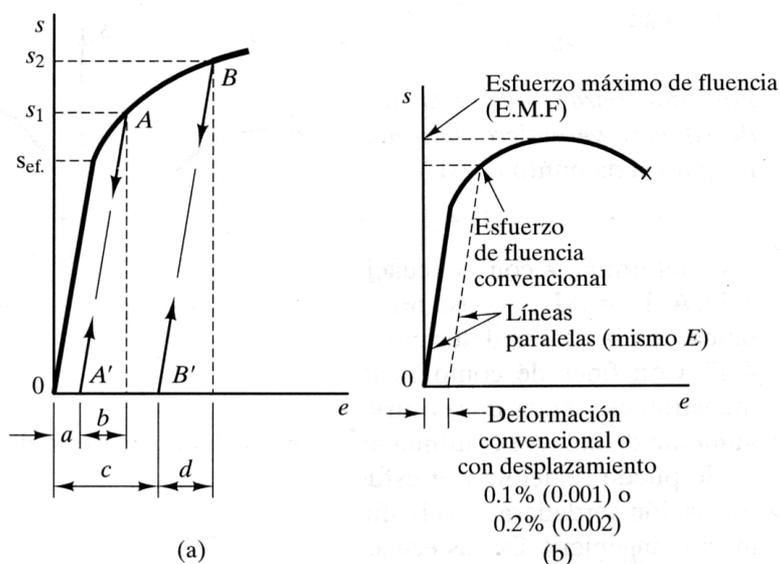


Figura 2. 6 a) Deformaciones permanentes y elásticas después de la aplicación de esfuerzos.
b) Deformación convencional o con desplazamiento.⁴³

En términos de los procesos de deformación secundarios, el fenómeno de trabajado en frío en la curva de esfuerzo-deformación significa que existe un límite para el trabajado en frío, después del cual el material se fractura por pérdida de ductilidad, también significa que un material endurecido por deformación requiere de mayores esfuerzos para formar las piezas y mayor capacidad de la maquinaria.

2.5 PROPIEDADES DE LAS LÁMINAS PARA UNA BUENA FORMABILIDAD

El conformado de láminas es una industria sumamente vital en una economía industrializada. Es indispensable en la manufactura de automóviles, aviones, latas de bebidas, cartuchos y un sinnúmero de aparatos. Esta actividad explica el gran consumo de productos laminados primarios de acero, aluminio, latón, cobre y otros materiales.

2.5.1 PROPIEDADES PARA UNA BUENA EMBUTIBILIDAD

En un proceso de embutición la chapa se encuentra sometida a un sistema de esfuerzos muy complejo, la pestaña superior del vaso esta sometida a un estado de esfuerzo biaxial, a compresión tangencial en el plano de la chapa y a tracción radial hacia el interior de la pared lateral del vaso.

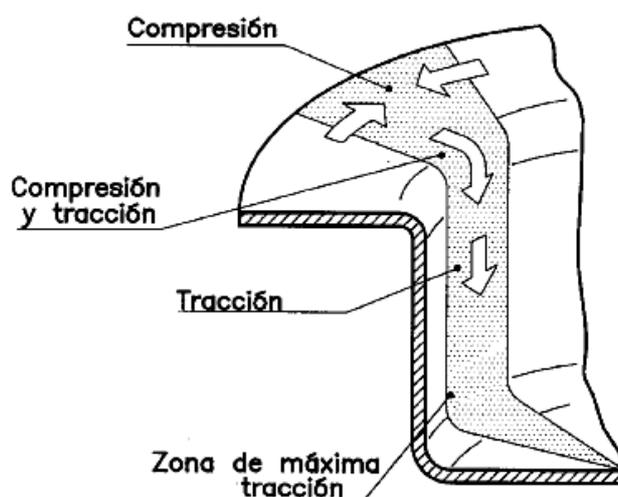


Figura 2. 7 Estado de los esfuerzos en la embutición.⁴⁴

El éxito de la operación de embutición depende de las propiedades del material, la primera propiedad exige que el material presente poca resistencia al flujo en todas las direcciones del plano de la chapa y la segunda que el material presente alta resistencia al flujo en la dirección del espesor para que no se adelgace.

44 FUENTE: TEORÍA DE LA EMBUTICIÓN, Fundación Ascamm, pág. 8

Es evidente la dificultad para determinar directamente la resistencia de la chapa al flujo en la dirección del espesor, sin embargo, la resistencia al flujo en la dirección del espesor o la resistencia al adelgazamiento de la chapa se obtiene de manera indirecta a través de la velocidad de las deformaciones verdaderas en las direcciones de la anchura y el espesor cuando se practica el ensayo de tracción a la chapa.

Esta velocidad se conoce como velocidad de deformación de anisotropía plástica r , debido a que su valor cambia con las diferentes direcciones en el plano de la chapa, esta velocidad se expresa como:⁴⁵

$$r = \frac{\epsilon_a}{\epsilon_e} \quad (2.8)$$

Donde:

ϵ_a = Deformación verdadera de la anchura de la chapa.

ϵ_e = Deformación verdadera del espesor de la chapa.

Debido a la anisotropía propia del material, los valores medidos son diferentes para los especímenes tomados en sentidos paralelo, transversal y 45° respecto a la dirección de laminación. El promedio de estos valores se conoce como la velocidad de deformación media \bar{r} :

$$r = \frac{(r_0 + 2r_{45} + r_{90})}{4} \quad (2.9)$$

Donde:

r_0 = velocidad de deformación paralelo a la dirección de laminación.

r_{45} = velocidad de deformación a 45° respecto a la dirección de laminación.

r_{90} = velocidad de deformación transversal a la dirección de laminación.

La ecuación anterior indica la proporción de la resistencia media al flujo de la chapa respecto a la normal de la chapa y se denomina anisotropía normal. Un valor de $\bar{r} = 1$ indica igual resistencia al flujo en las direcciones del plano y del espesor de la chapa. Cuando $\bar{r} > 1$ la resistencia media en la dirección del

espesor es mayor que la resistencia media en las diferentes direcciones del plano de la chapa, en este caso la chapa es resistente al adelgazamiento, la figura 2.8 indica la relación de este parámetro con la embutibilidad.

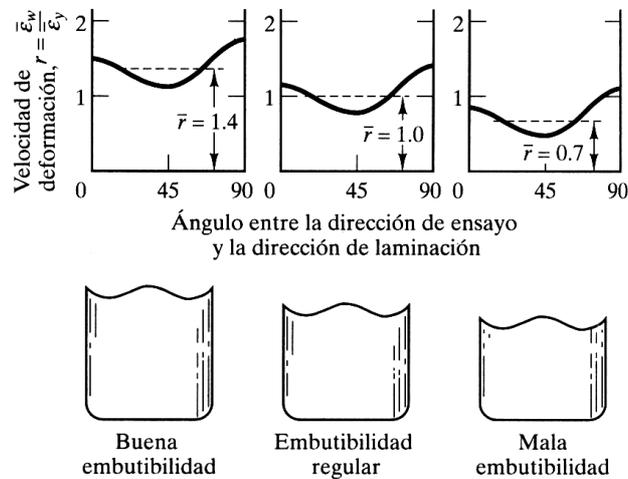


Figura 2. 8 Curvas representativas de la variación de la velocidad de deformación plástica con la dirección de ensayo en lámina de acero de bajo carbono.⁴⁶

Además de la anisotropía normal, también pueden existir variaciones de la velocidad de deformación en diferentes direcciones del plano de la chapa. Esta variación Δr se conoce como anisotropía planar y se expresa como:⁴⁷

$$\Delta r = \frac{(r_0 + r_{90} - 2r_{45^\circ})}{2} \quad (2.10)$$

Un valor de Δr diferente de cero indica la falta de uniformidad en las extensiones del material en ciertas direcciones y origina un defecto en la pieza formada que se conoce como la formación de “orejas”.

Δr y r constituyen las propiedades principales que indican la anisotropía de un material laminado, en un material totalmente isotrópico \bar{r} es igual a 1 y Δr es igual a cero. Las propiedades necesarias par una buena embutibilidad son $\bar{r} > 1$ y $\Delta r = 0$.

46 FUENTE: CIENCIA DE MATERIALES, Pat Mangonon, pág. 288

47 FUENTE: CIENCIA DE MATERIALES, Pat Mangonon, pág. 288

CAPÍTULO 3

MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

El ingeniero habitualmente encuentra problemas que deben expresarse matemáticamente para poder encontrar una solución que satisfaga las necesidades del fenómeno que se este tratando. Estas expresiones generalmente llevan una solución larga, tediosa, y en algunos casos imposibles de resolver con las herramientas de cálculo habitual. Por tal motivo, es necesario encontrar un procedimiento de solución adecuado, que acorte el proceso de cálculo y llegue a una solución satisfactoria.

Un procedimiento de solución adecuado, resulta en dividir al fenómeno a un grupo de sistemas matemáticos bien definidos, de los que se pueda conocer y comprender su comportamiento, sin dificultad y sin perder las propiedades del fenómeno original. Una vez resuelto cada división se agrupa nuevamente a su sistema inicial para obtener resultados satisfactorios a partir de la solución de dichas divisiones.

La división de un modelo matemático, puede realizarse de dos maneras posibles: Con un número finito de divisiones, que pueden ser apreciadas claramente así como las uniones entre estas, a tal división se la denomina “sistema discreto” (Fig. 3.1). En cambio, si se realiza un número de divisiones infinito, estas no pueden ser observadas con claridad y necesitan ser tratadas de una manera infinitesimal, a esta división en cambio se la denomina “sistema continuo” (Fig. 3.2).

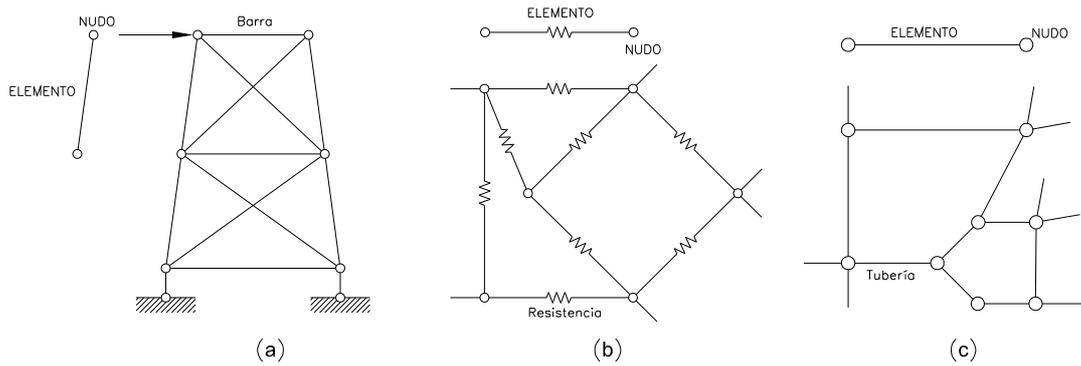


Figura 3. 1 Sistemas discretos: a) Sistema Estructural, b) Sistema Eléctrico, c) Sistema Hidráulico.

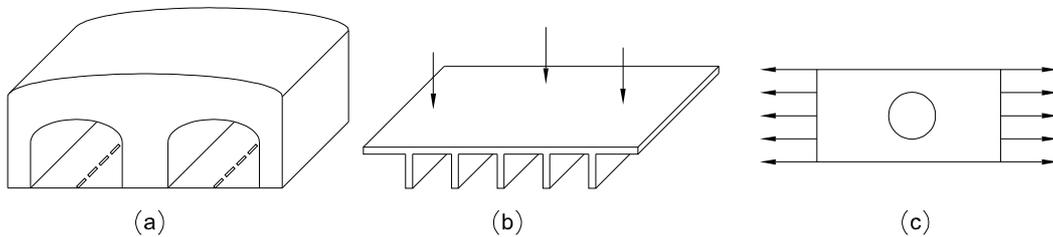


Figura 3. 2 Sistemas continuos: a) Túneles, b) Puentes⁴⁸, c) Placas⁴⁹.

La resolución de problemas discretos, generan ecuaciones diferenciales lineales de fácil resolución. En cambio, la división infinita de un sistema continuo genera ecuaciones diferenciales de derivadas parciales cuya solución resulta imposible o muy laboriosa. Por tal motivo, es necesario buscar un método que reduzca el infinito número de variables.

Debido a esta necesidad, el “Método de los Elementos Finitos” aparece como una solución para resolver problemas continuos, mediante el uso del método que se aplica para resolver sistemas discretos. Este tipo de discretización, aproxima lo más posible al comportamiento real del fenómeno, por lo que es de esperar una solución también próxima a la solución continua verdadera. Es decir, mientras más aumente el número de divisiones discretas, más exactos serán sus resultados.

48 FUENTE: INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS, Eugenio Oñate, pág 15

49 FUENTE: INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS, Eugenio Oñate, pág 220

La manera de discretización de un sistema continuo se da por medio de ciertos elementos que se usan de acuerdo al campo de acción en el cual se está efectuando el fenómeno (Fig. 3.3).

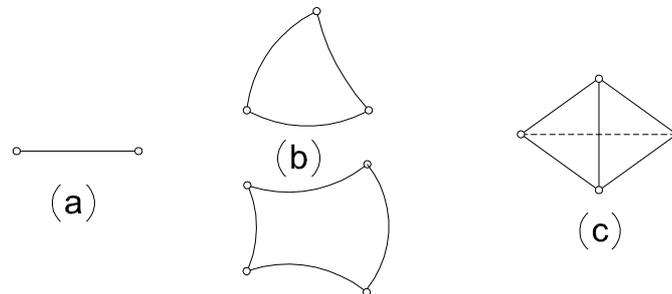


Figura 3. 3 Elementos finitos a) unidimensionales, b) bidimensionales, c) tridimensionales.⁵⁰

Como vimos anteriormente, existen elementos que nos permiten discretizar un sistema continuo de manera unidimensional, bidimensional y tridimensional, de acuerdo al requerimiento del fenómeno a ser resuelto. Sin embargo, aunque la mayoría de sistemas continuos son de carácter tridimensional, es posible mediante un adecuado modelo matemático realizar un análisis unidimensional o bidimensional.

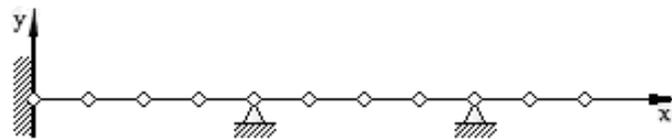


Figura 3. 4 Viga discretizada con Elementos Finitos Unidimensionales.⁵¹

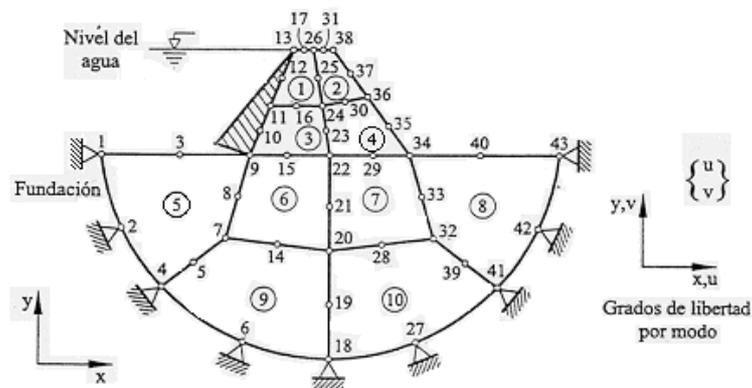


Figura 3. 5 Viga discretizada con Elementos Finitos Bidimensionales.⁵²

50 FUENTE: INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS, Eugenio Oñate, pág 3

51 FUENTE: INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS, Eugenio Oñate, pág 4

52 FUENTE: INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS, Eugenio Oñate, pág 4

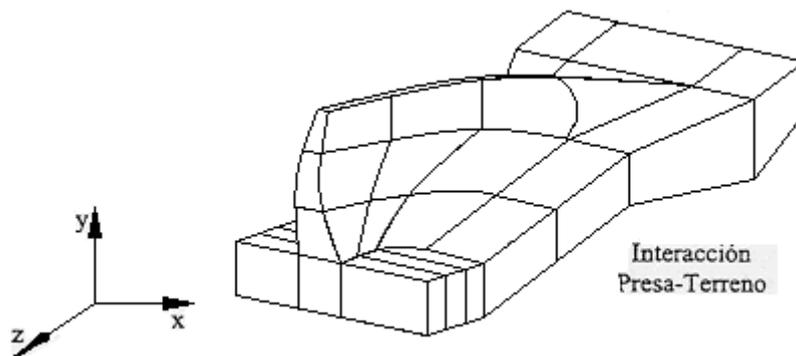


Figura 3. 6 Viga discretizada con Elementos Finitos Tridimensionales.⁵³

El método de elementos finitos puede ser aplicado tanto para ingeniería como para la matemática y la física siempre y cuando se aplique a tres áreas:

1. Problemas de equilibrio en los que el sistema no varía con el tiempo.
2. Problemas de autovalores en los que se determinan a ciertos parámetros un valor crítico.
3. Problemas de propagación en los que el fenómeno resulta dependiente del tiempo.

El método de los elementos finitos es muy beneficioso debido a la posibilidad de abordar una gran variedad de problemas de tipo discreto y continuo, a más de generar un proceso general de cálculo y tener un mejor entendimiento del problema.

3.1 ANÁLISIS MEDIANTE EL EMPLEO DEL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS.

Como se mencionó, para obtener una respuesta lo más cercana posible a la solución continua verdadera, es necesario aumentar el número de variables discretas. Sin embargo, es necesario tener un procedimiento de análisis adecuado para evitar errores en la solución del fenómeno. A continuación presentamos las etapas básicas de dicho análisis.

⁵³ FUENTE: INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS, Eugenio Oñate, pág 4

- Seleccionar un modelo matemático adecuado que describa correctamente el comportamiento del fenómeno a estudiar teniendo sus apoyos y la carga que actúan sobre él.
- Discretizar el sistema en porciones que no se intersecan entre sí, dentro de estas porciones se interpolan las variables principales en función de sus valores en una serie de puntos discretos de los elementos denominados “nodos”.
- Obtención de las matrices de rigidez y del vector de carga para cada elemento.
- Se procede al ensamblaje de las matrices de rigidez y el vector de carga elementales en la matriz de rigidez global de toda la malla de elementos finitos y el vector de carga sobre los nodos.
- El sistema de ecuaciones resultante “ $Ka = f$ ” se resuelve para calcular las variables incógnitas (movimiento de todos los nodos de la malla) “a”, utilizando cualquiera de los métodos conocidos para solución de ecuaciones algebraicas simultaneas lineales.
- Una vez calculados los movimientos nodales “a” se pueden calcular las deformaciones y, seguidamente, los esfuerzos en cada elemento, así como las reacciones en los nodos con movimientos prescritos.

Para obtener las soluciones de las matrices generadas por la discretización del sistema es necesario utilizar un software que maneje el método de los elementos finitos ya sea de manera generalizada resolviendo solamente la parte matemática sin obtener interpretación del fenómeno, o de una manera más particular que maneje y estudie un fenómeno en concreto obteniendo soluciones más particulares y de una interpretación más factible.

Una correcta solución y una adecuada interpretación nos ayudan a entender claramente el fenómeno, incluso facilitan las modificaciones en cualquiera de las etapas del proceso de solución, ya sean las modificaciones del fenómeno, la discretización del sistema cambiando la malla de elementos finitos o elevando el número de subdivisiones, incluso es posible cambiar la teoría de cálculo si es que el original no satisface las expectativas de solución.

La interpretación de las soluciones puede tener un mejor entendimiento si el software empleado tiene la capacidad de emitir graficas de deformaciones, animaciones dinámicas del comportamiento del elemento, representaciones de temperaturas mediante un código de colores entre otros.

3.2 EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS EN EL SOFTWARE STAMPACK.

El software STAMPACK es una herramienta que utiliza el método de elementos finitos para solucionar problemas de todo proceso de estampado. Y como un software, el proceso de cálculo se genera internamente observándose únicamente su solución a manera de representaciones gráficas de colores y animaciones. El tipo de discretización empleado es unidimensional, bidimensional (Fig. 3.7) y tridimensional dependiendo de la gráfica que se realice en el software, su comportamiento interno se encuentra definido en sus puntos nodales además de interpolaciones que dependen del elemento, y son estos nodos e interpolaciones los que definen los desplazamientos que ocurren en el proceso.

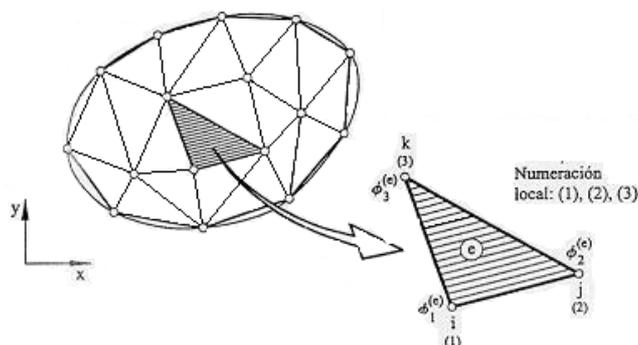


Figura 3. 7 Discretización de un dominio bidimensional en elementos triangulares de tres nodos.⁵⁴

El cálculo se realiza cuando el campo de desplazamientos es evaluado por lo que es necesario que los materiales empleados tanto los que se encuentran en el listado del software como los que se adhieren deben de estar expresados en términos de fuerza interna.

⁵⁴ FUENTE: INTRODUCCIÓN AL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS, Eugenio Oñate, pág 119

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DEL PROCESO DE EMBUTICIÓN CON EL SOFTWARE STAMPACK

Dentro de los procesos de manufactura más empleado en la industria se encuentra el de embutición profunda, la industria que utiliza con mayor frecuencia este proceso es la de fabricación de envases metálicos.

El presente capítulo muestra la utilidad del Software Stampack para la simulación del proceso de elaboración de envases (Packaging), permitiendo obtener resultados como: la forma final en cada etapa del proceso, zonas en donde existe máxima deformación del material, defectos en la chapa entre otros.

La figura 4.1 indica las etapas que se utilizan sobre el material para la obtención de un envase de aluminio.



Figura 4.1 Etapas de formado para la obtención de un envase para bebidas.⁵⁵

Para una correcta simulación en el software Stampack se requiere cumplir los pasos expuestos a continuación.

4.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

La industria ecuatoriana no dispone de la infraestructura y los medios adecuados para la implantación e introducción de nuevos procesos de manufactura: debido a esto, el uso de un software que contribuya con la simulación de estos procesos, permite una correcta elección del material y el dimensionamiento adecuado de las herramientas.

La figura 4.2 presenta la geometría y dimensiones del envase a desarrollar, de acuerdo a esto, se dimensionan las diferentes herramientas que se utilizarán en la simulación.

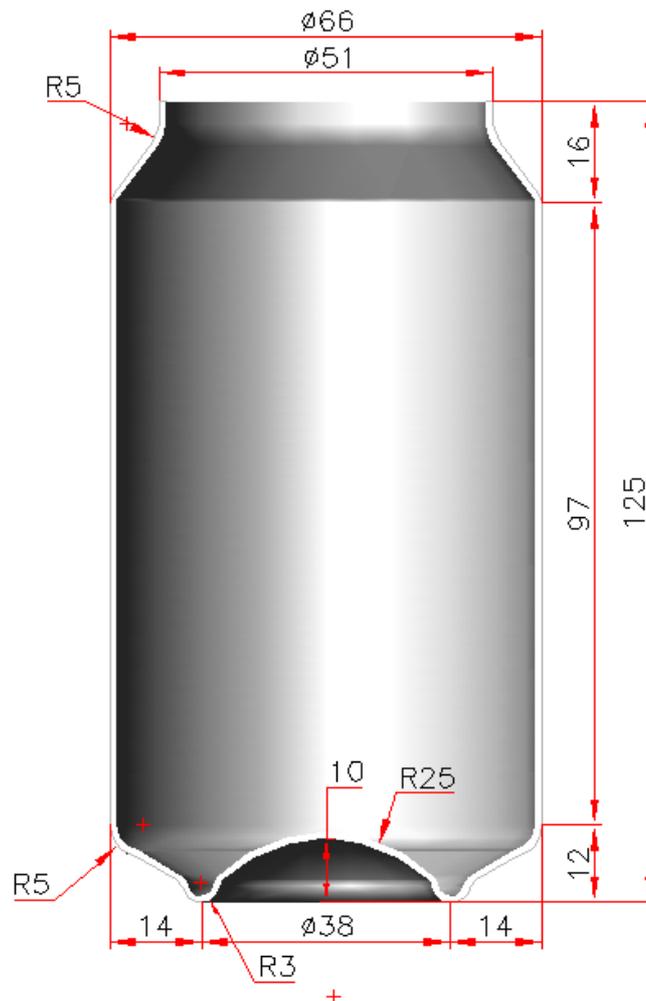


Figura 4. 2 Geometría y dimensiones del envase.

Conforme con el “*Handbook of Non-Ferrous Metals & Metallurgy*” de la JIS (*Japanese Standards Association*), el material adecuado para la manufactura de envases es la aleación de Aluminio AA3104-H14 (AlMnMg), cuya composición química y propiedades mecánicas se indican en el Anexo 5 y se resumen a continuación.

Módulo de Young:	70 Gpa.
Relación de Poisson:	0.3
Densidad:	2700 Kg./m ³
Límite elástico:	226 MPa
Espesor	1 mm.

Definido la geometría, herramientas y material a utilizar, se procede a realizar la simulación indicando paso a paso cada uno de los procesos establecidos para la fabricación de envases.

4.2 PRE-PROCESO

Una chapa metálica al ser sometida al proceso de embutición soporta solicitaciones o esfuerzos idénticos en todo su contorno, por tal razón la simulación se realiza en tres dimensiones, logrando con esto, disminuir los tiempos de cálculo y prevenir los cambios que sufre el material.

4.2.1 PREPARACIÓN DE LA GEOMETRÍA

Stampack brinda la posibilidad de elaborar la geometría en su propio entorno o importarla desde otros programas en formatos convenientes.

Debido a la cantidad de herramientas que se utilizan en el proceso de embutición, resulta beneficioso realizar la geometría en un programa CAD que nos permita colocarlas en sus posiciones adecuadas y asegurar su correcto desempeño.

4.2.1.1 Cálculo del desarrollo

Para encontrar la dimensión adecuada del desarrollo se dispone de la siguiente ecuación:⁵⁶

$$D = \sqrt{d^2 + (d^2 - d_i^2) \frac{h}{s}}$$

$$D = \sqrt{66^2 + (66^2 - 65^2) \frac{140}{1}}$$

$$D = 160 \text{ mm.}$$

Dado que la relación de gradación $\beta = D/d = 160/80 = 2$ es demasiado elevada, la embutición no se puede realizar en una sola fase debido a que el material sufre esfuerzos exageradamente elevados lo que conlleva a que se produzca fallas en el. De acuerdo con la tabla 1.3 se debe realizar dos embuticiones para que el material resista y se tenga éxito en el proceso.

4.2.1.2 Dimensionamiento de las herramientas para los diferentes procesos

Para el cálculo de la geometría perteneciente a la matriz y el émbolo en los procesos de embutición, se utiliza la ecuación 1.4 y la recomendación proporcionada en la sección 1.3.2 respectivamente; el valor de la relación de gradación β_{100} para los dos procesos se obtienen del Anexo 4.

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

$$r_M = \frac{0.04 (160)}{80 (1.95)} [50 + (160 - 80)] \sqrt{1}$$

$$r_M = 5 \text{ mm.}$$

La Tabla 4.1 proporciona las medidas de las herramientas para cada proceso de embutición.

⁵⁶ FUENTE: TROQUELADO Y ESTAMPACIÓN: Tomás López Navarro, pág. 142

	Primera Embutición	Segunda Embutición
Radio de la matriz r_M	5 mm.	9 mm.
Radio del émbolo	15 mm.	27 mm.
Desplazamiento del émbolo	70 mm.	120 mm.

Tabla 4. 1 Medidas y desplazamientos de las herramientas.

Para el proceso de estirado (*Ironing*), que consiste en adelgazar el material y lograr una altura adecuada, se utiliza una matriz conveniente para este tipo de proceso y un émbolo con un diámetro semejante al empleado en la última operación de embutido con la diferencia en su desplazamiento, que para esta operación se desplace 140 mm.

En la operación de abombado (*Doming*) se utiliza una matriz y un émbolo, que para la geometría de nuestro ejemplo posee un desplazamiento de 10 mm., esta operación le confiere al envase su forma inferior, la cual le otorga una mejor estabilidad.

Previamente a la formación del cuello, el material debe ser recortado en la parte superior eliminando cualquier defecto que posea, en una simulación 3D Stampack representa a una herramienta de corte con una línea continua que debe atravesar el objeto a cortar.

Una vez realizado el corte se inicia la formación del cuello (*Necking*) para lo cual se utiliza quince matrices y quince émbolos de acuerdo a la forma final del envase, todos los émbolos utilizados en las operaciones de necking tiene un desplazamiento de 25 mm.

4.2.1.3 Elaboración de la Geometría

Con las herramientas correctamente dimensionadas, se procede a esquematizarlas en AutoCad para posteriormente guardar el archivo con terminación *.dxf, lo que permitirá su posterior importación a Stampack.

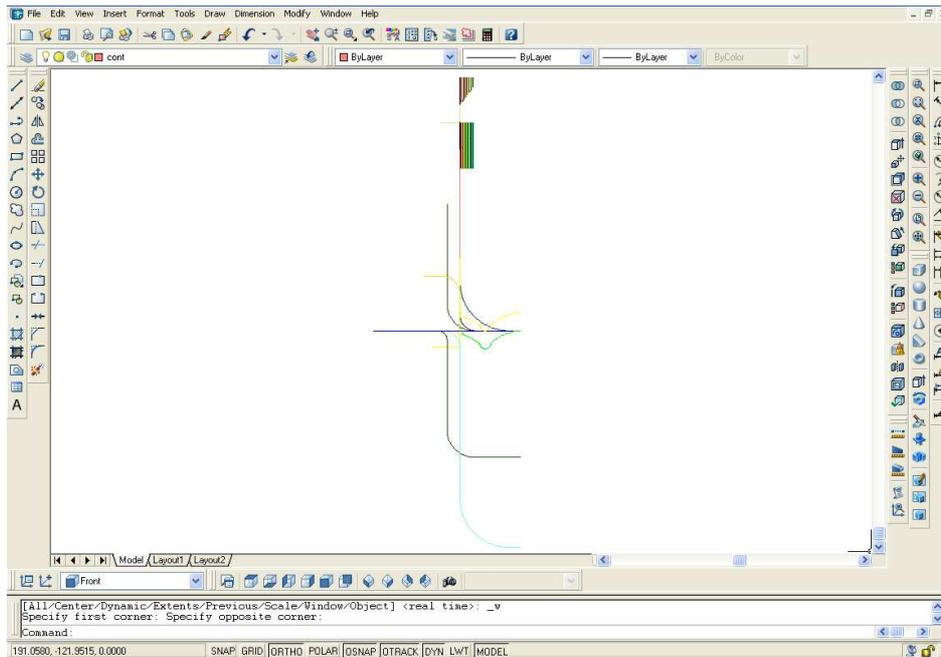


Figura 4. 3 Geometría realizada en AutoCad para la exportación a Stampack.

Para importar la geometría en Stampack se realiza lo siguiente:

- Al ingresar en el menú *Utilites>Preferences*, se activa la ventana *Preferences*, la cual permite modificar la forma en la que se importa la geometría, al desactivar la casilla de verificación *Automatic collapse after import* (Colapsar automáticamente después de importar) y seleccionar *Each layer separately* (Cada layer separadamente), Stampack importa la geometría en su correspondiente layer sin colapsarla.

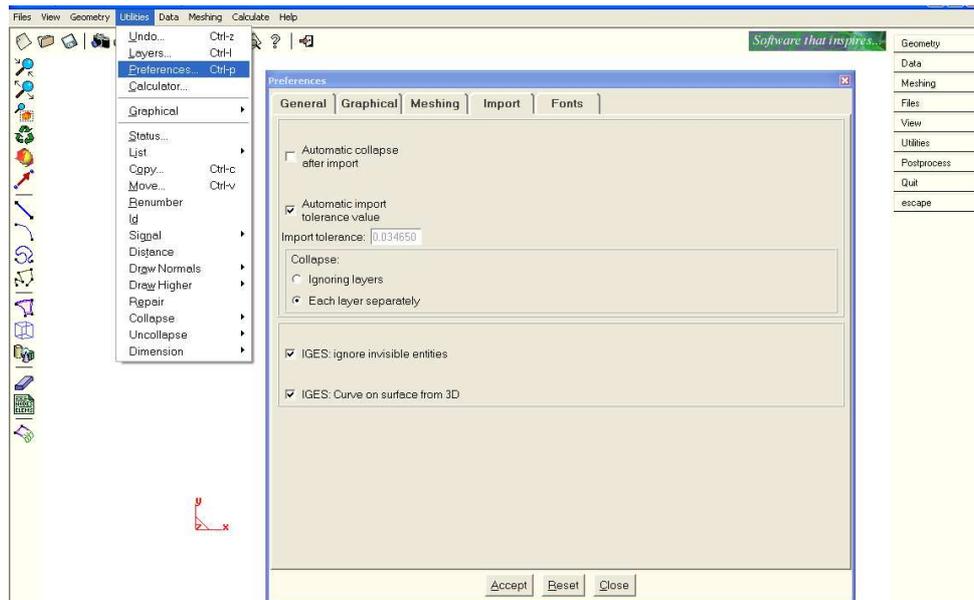


Figura 4. 4 Ingreso al menú de Preferencias de Importación en Stampack.

- o Una vez creada las condiciones para la importación se ingresa en el menú *Files>Impot>DXF...*, en donde se selecciona el nombre del archivo que se grabó anteriormente y se presiona *Open*.

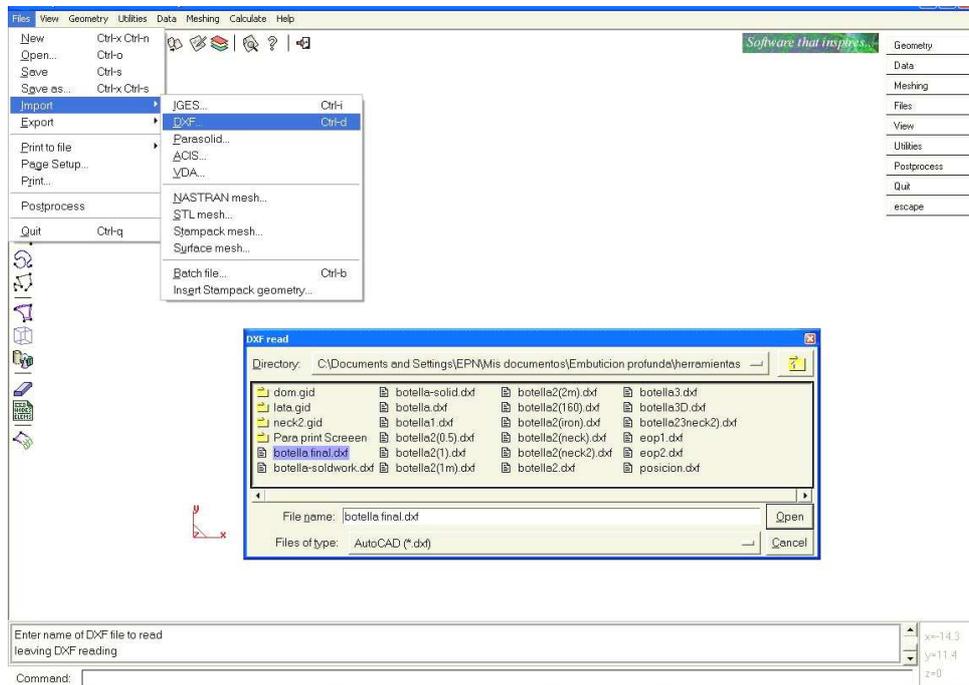


Figura 4. 5 Importación de la geometría en Stampack.

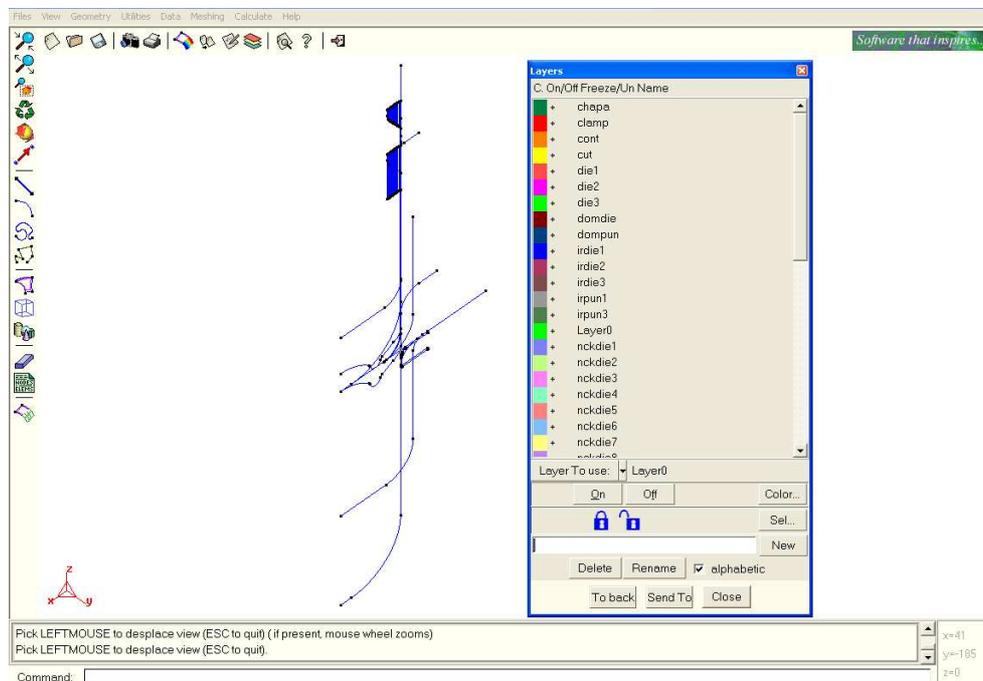


Figura 4. 6 Geometría importada en sus correspondientes Layers.

La geometría importada debe ubicarse en una dirección conveniente para el embutido, en una simulación 3D esta dirección es la del eje z.

4.2.1.4 Creación de las superficies para la chapa y las herramientas

Una vez importada la geometría es necesario crear las superficies que corresponde a la chapa y herramientas a utilizar. Para la creación de la chapa, en la ventana *Layers* se desactivan todos los layers excluyendo el perteneciente a la chapa, lo que permite observar únicamente la línea o entidad, que servirá para generar la superficie de la chapa, una vez realizado esto, se ingresa al menú *Utilites>Copy*.

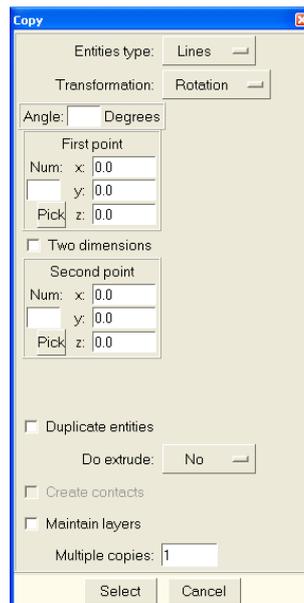


Figura 4. 7 Ventana Copy.

Esta ventana permite al usuario crear superficies de revolución a partir de diferentes entidades, para conseguir esto se realizan los siguientes pasos:

- En la pestaña correspondiente a *Entitties type* se selecciona la entidad con la que se desea operar en nuestro caso se elige *Lines*.
- La sección *Transformation* permite seleccionar el tipo de operación que se desea realizar con cada entidad; estas operaciones son del tipo: *Traslation*, la cual permite trasladar cada entidad anteriormente seleccionada, *Rotation* operación que rota cada entidad los grados que el usuario desee con respecto a un eje o punto de referencia, *Mirror* permite copiar una entidad con un eje de referencia, *Escale* copia una entidad aumentando o disminuyendo su dimensión, *Offset* crea entidades paralelas a la original con un distancia establecida anteriormente y

finalmente *Sweet* la cual permite copiar entidades a lo largo de un eje de referencia. Para nuestro caso se selecciona la operación *Rotation* con un ángulo de 180 grados con un punto de referencia $(0,0,0)$.

- A continuación, se activa la casilla de verificación *Two dimensions* lo que proporciona que la rotación solo se de en el plano, y en *Do extrude* se selecciona *Surfaces* con lo cual finalmente se obtiene la superficie de revolución al seleccionar la línea de la chapa.

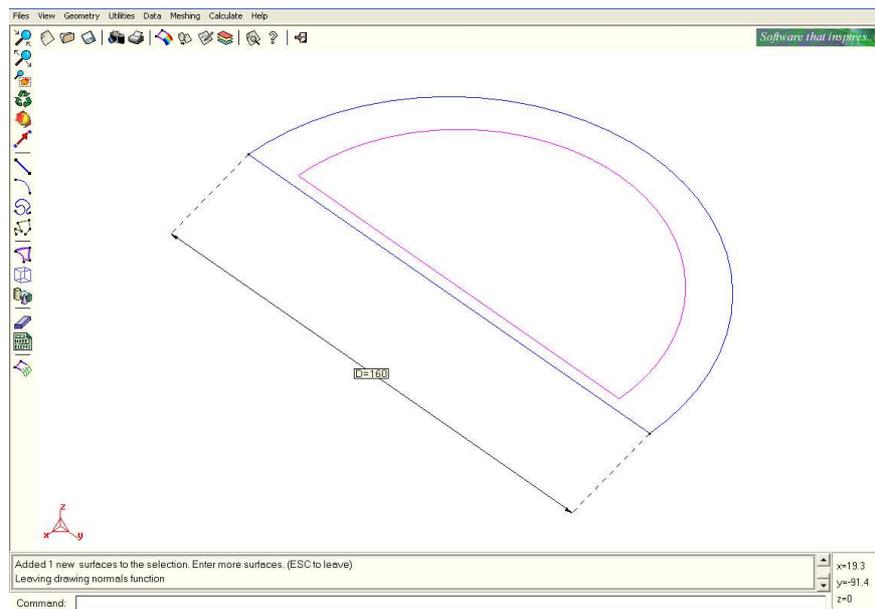


Figura 4. 8 Creación de la superficie de la chapa.

De la misma forma, se realiza lo anteriormente descrito para la elaboración de todas las herramientas, la figura 4.9 muestra la superficie desarrollada de un émbolo que se utiliza en el proceso de embutición, en el Anexo 6 se encuentran todas las herramientas que se emplean en la simulación.

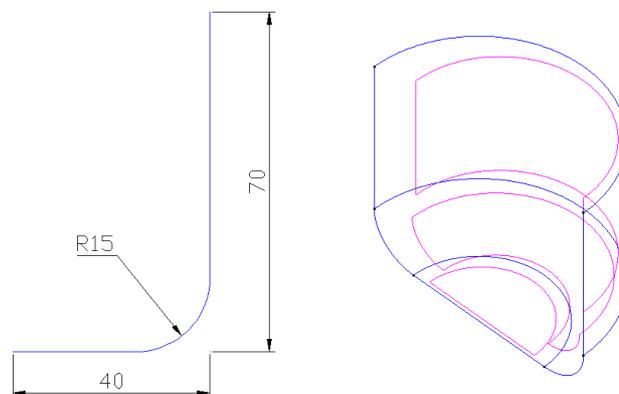


Figura 4. 9 Dimensiones y superficie desarrollada del émbolo.

4.2.1.5 Verificar la orientación de las normales

Una vez creadas todas las superficies de las herramientas y de la chapa, se procede a verificar la orientación de la normal correspondiente a cada superficie.

Para verificar la orientación de la superficie de la chapa, se ingresa a *Utilites>DrawNormals>Surfaces* y se selecciona la superficie a examinar, la normal de la chapa debe estar orientada con el eje z que es la dirección de embutición, La figura 4.10 muestra que la orientación de la normal es la correcta.

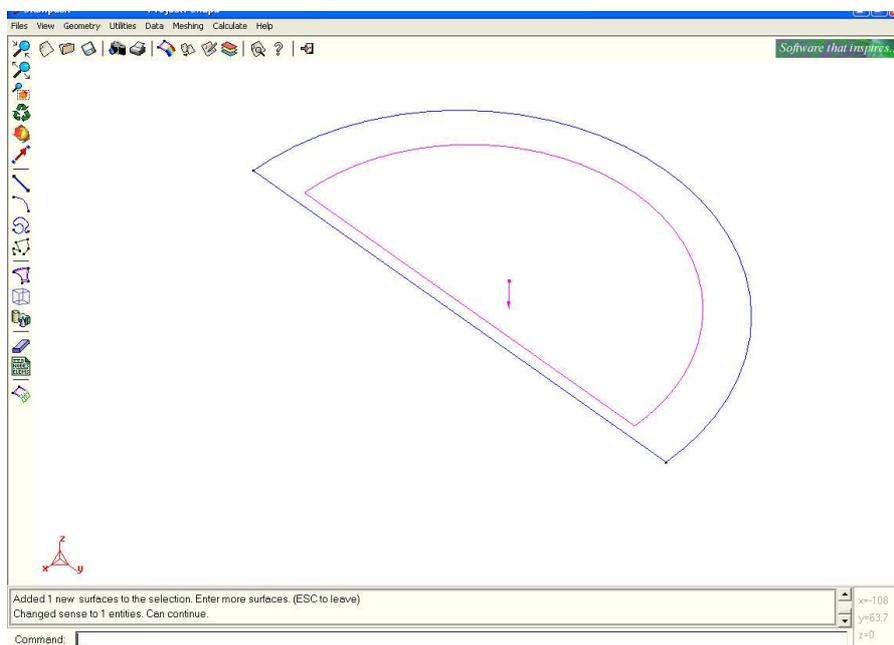


Figura 4. 10 Normal de la superficie orientada en el eje z.

Para verificar la orientación de las normales de las herramientas se debe tener en cuenta que estas deben estar orientadas hacia la chapa, es decir, las normales de un émbolo deben estar orientadas hacia fuera de la herramienta mientras que las normales de una matriz deben estar orientadas hacia el interior.

Al ingresar en el menú *Utilites>DrawNormals>Surfaces* y seleccionar toda la geometría, nos permite comprobar que cada parte que conforma una herramienta posee una diferente orientación.

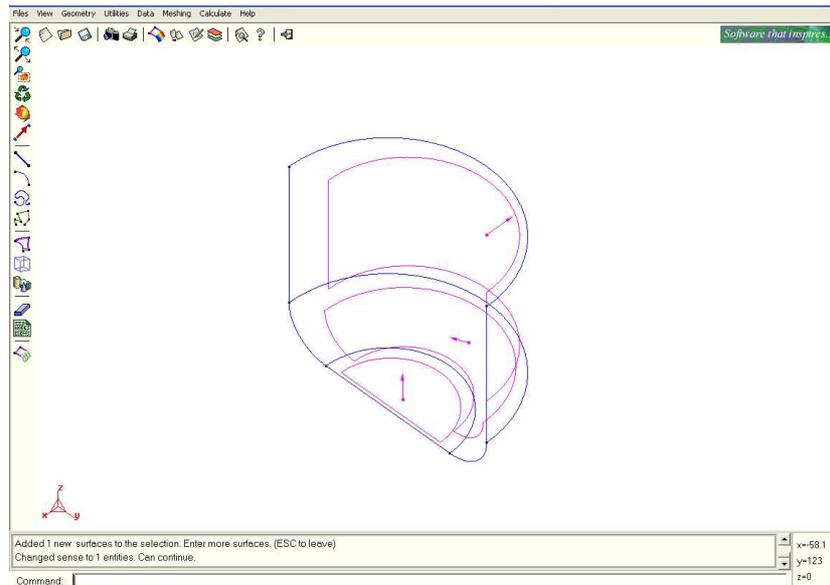


Figura 4. 11 Normales de las herramientas en diferente orientación

Para modificar la dirección de una normal, se pulsa el botón derecho del mouse con lo cual se ingresa al menú *Contextual*, en donde se selecciona la opción *Swap some* y se escoge las superficies que se desean modificar, automáticamente el programa invierte la dirección de las superficies seleccionadas.

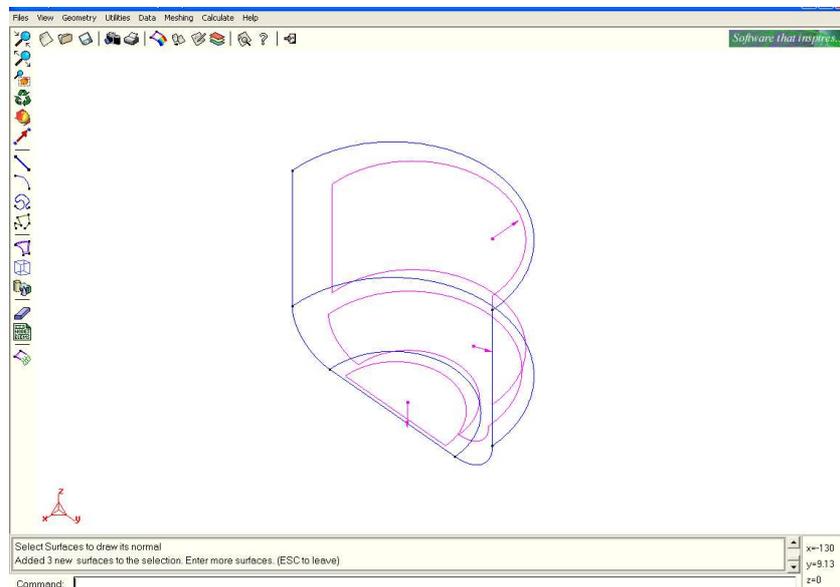


Figura 4. 12 Normales con sus orientaciones correctas.

Realizado el chequeo de todas las normales, se exporta cada herramienta con su nombre respectivo en un archivo con terminación *.igs, para luego importar cada herramienta a un archivo general.

4.2.1.6 Importación de la geometría

Para la importación de todas las herramientas se crean los layers (capas) con el nombre de cada herramienta, posteriormente, en la ventana correspondiente a los Layers en *Layer to use* se escoge el nombre de la herramienta a importar, para seguidamente, con la opción *Files>import>iges* importar cada geometría.

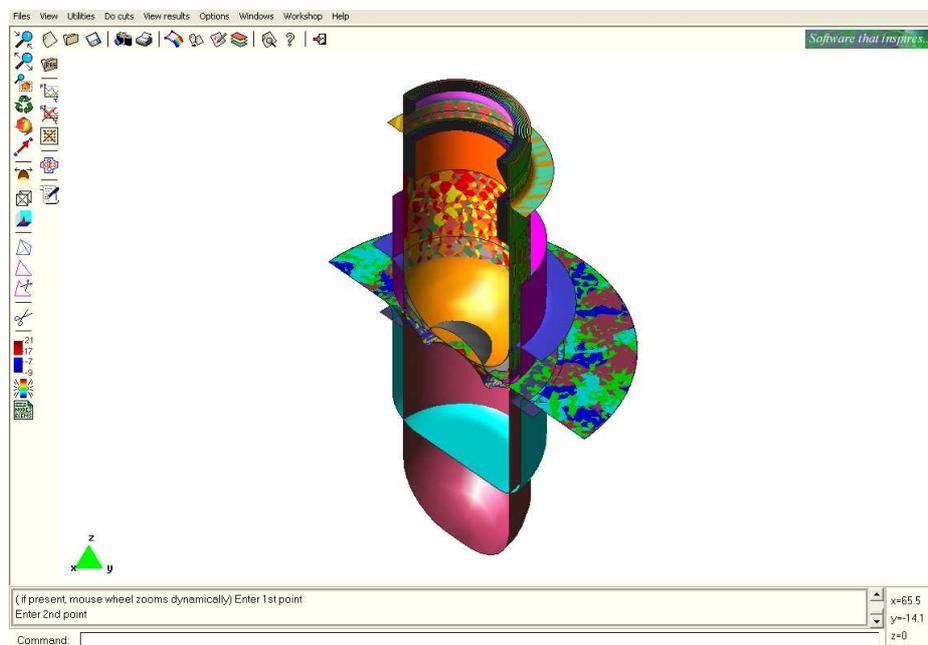


Figura 4. 13 Geometría importada para la simulación

Importada totalmente toda la geometría se procede a colapsar todo el modelo para que no presente problemas al momento de generar la malla, para realizar esto, se ingresa al menú *Utilites>Colapse>Model*

4.2.2 ELABORACIÓN DE LA MALLA

En esta etapa se desarrolla el tipo de mallado que corresponde a cada parte que interviene en el proceso de simulación, de tal manera, que los resultados obtenidos estén acorde con el proceso real.

Este tipo de simulaciones requieren que el mallado de la chapa sea del tipo no estructurado con elementos triangulares de 3 nodos y 3 grados de libertad por nodo, las herramientas se proceden a mallar con la opción *By cordal error* que permite una concentración mucho mayor de elementos en las zonas donde existen radios.

El mallado de las herramientas se lo realiza ingresando al menú *Meshing>Assign unstruct sizes>By cordal error*, en la ventana *Asing sizes by cordal error* se admite el valor por defecto que da el programa y se pulsa *OK*.

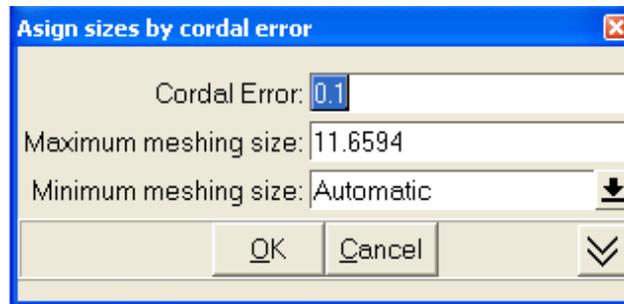


Figura 4. 14 Parámetros para el mallado por error cordal.

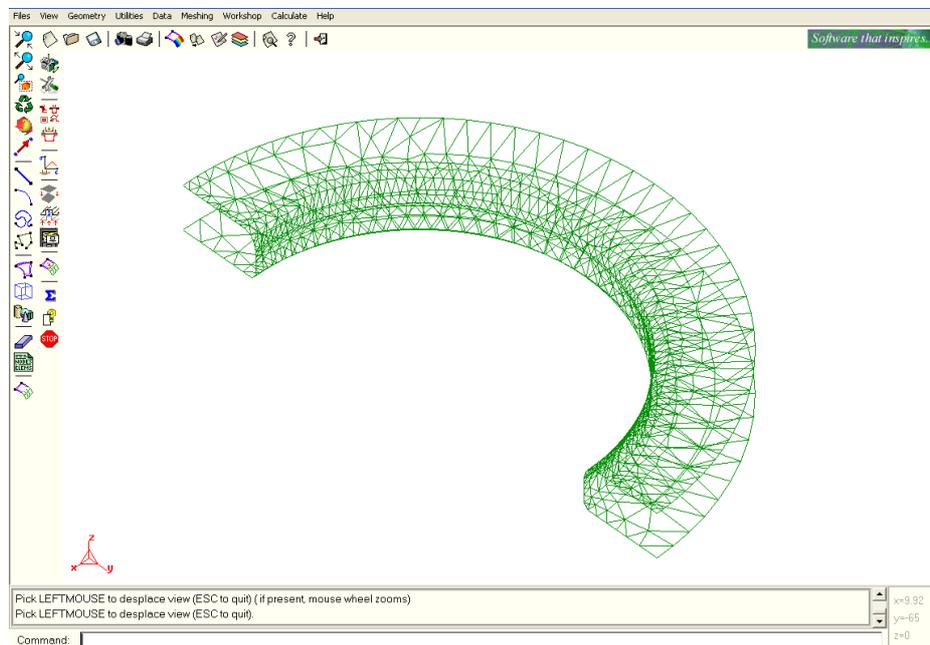


Figura 4. 15 Herramienta mallada con error cordal

Para la realización del mallado de la chapa metálica se ingresa al menú *Meshing>Asssing unstruc sizes>Surfaces...* se asigna el tamaño de cada elemento perteneciente a la chapa en 2 mm, a continuación, se selecciona la superficie de la chapa para asignarle este valor, debido a que esta condición de mallado se ingresó después del mallado por error cordal, es la que el programa considera para la generación de la malla, seguidamente, para asignar el tipo de elemento que se desea definir para la chapa, se ingresa al menú *Meshing>Element type>triangle* y se selecciona la superficie de la chapa..

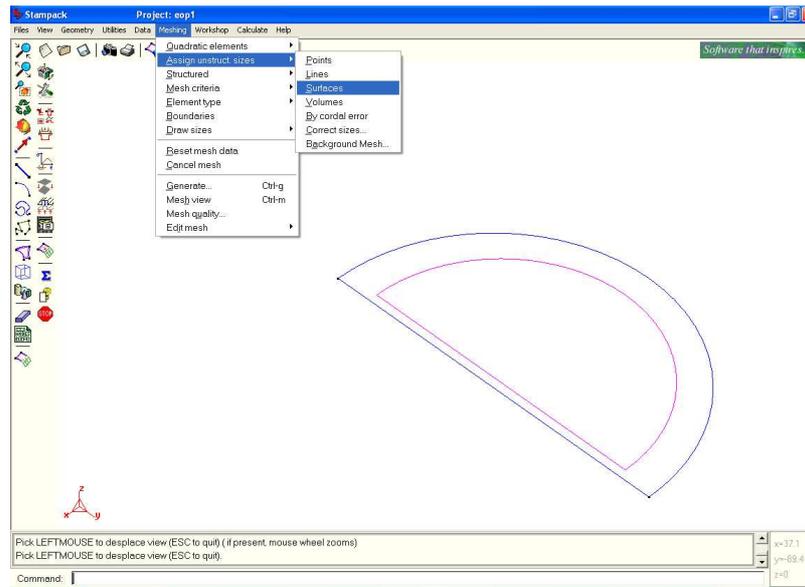


Figura 4. 16 Mallado de la chapa.

Una vez realizado los procesos de asignación del mallado se ingresa al menú *Meshing>Generate* el cual crea automáticamente la malla con las características anteriormente descritas.

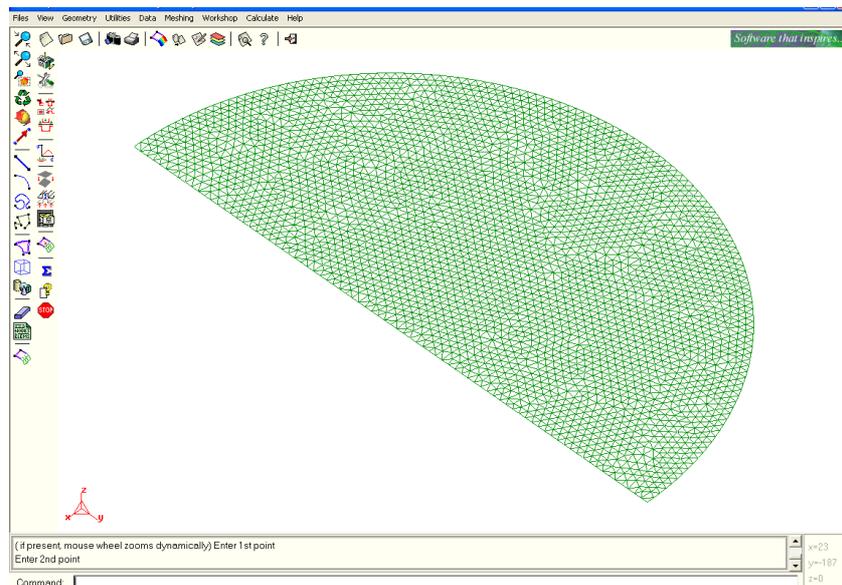


Figura 4. 17 Generación de la malla.

Efectuado todas las características generales de la geometría y el mallado se debe archivar el proyecto para lo cual se utiliza el menú *File>Save*, Stampack guarda automáticamente el proyecto en un archivo *.gid.

4.2.3 DECLARAR EL TIPO DE PROBLEMA

Stampack permite declarar el tipo de problema que se va a analizar ingresando al menú *Data>Problem type>stampack55*, el programa muestra nuevas utilidades que nos ayudan a definir las características del problema, el material a utilizar, las herramientas, la definición de históricos y las distintas operaciones.

4.2.3.1 Definición de características generales

El menú *Workshop>Problems characteristics...* activa la ventana *Define problem* en la cual se ingresan los siguientes parámetros.

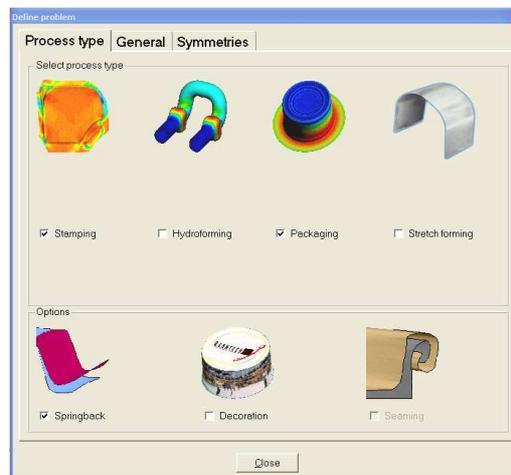


Figura 4. 18 Ventana Define problem opción Process type.

En *Process Type*, el usuario decide el proceso que desea analizar, debido a que este proyecto estudia la conformación de envases se procede a activar el proceso de *Packaging*.

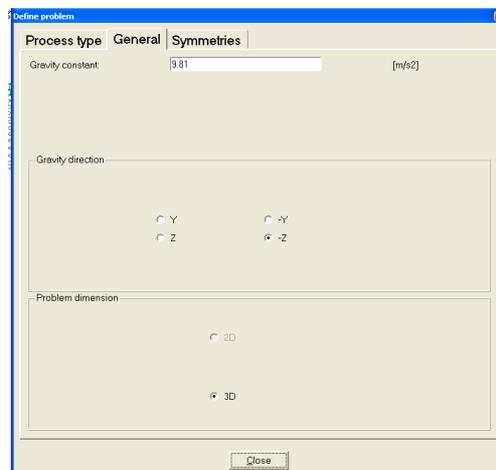


Figura 4. 19 Ventana Define problem opción General

En la opción *General*, el usuario puede cambiar el valor de la gravedad y su dirección si lo desea, Stampack automáticamente detecta el tipo de problema a ser estudiado.

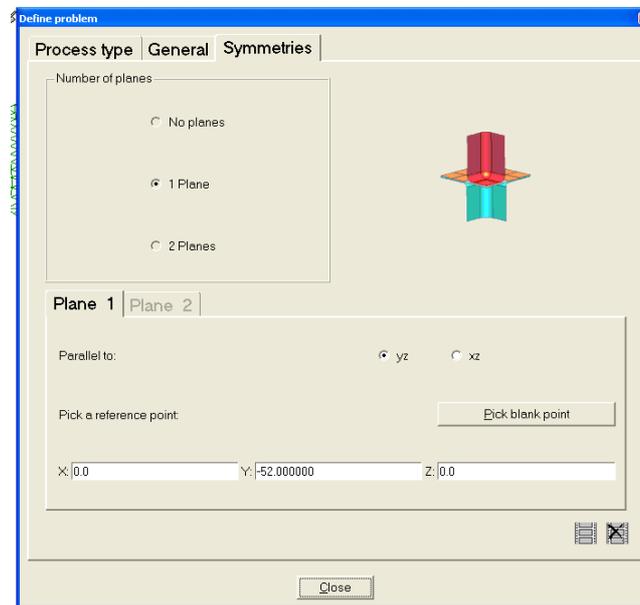


Figura 4. 20 Ventana Define problem opción Symmetries.

El menú *Symetries*, permite definir los planos de simetría, debido a que se trata de un caso simétrico con un plano, se define el plano de simetría introduciendo las coordenadas o seleccionando en la pantalla un nodo perteneciente a la chapa y al plano de simetría.

4.2.3.2 Asignación del material para la chapa

El menú *Workshop>Blank/Sheet* permite asignar el material a la chapa metálica de dos modos diferentes; ingresando las propiedades manualmente o seleccionando un material de la base de datos de Stampack.

Anteriormente se mencionó que para el proceso de fabricación de envases, el material adecuado es un aluminio AA3104-H14 el cual se selecciona de la base de datos del programa. La ventana *Define tools* permite asociar las propiedades de la chapa y las diferentes herramientas que intervienen en el proceso. Para realizar esto se pulsa el icono *Add a new zone* que se muestra en la figura 4.21.

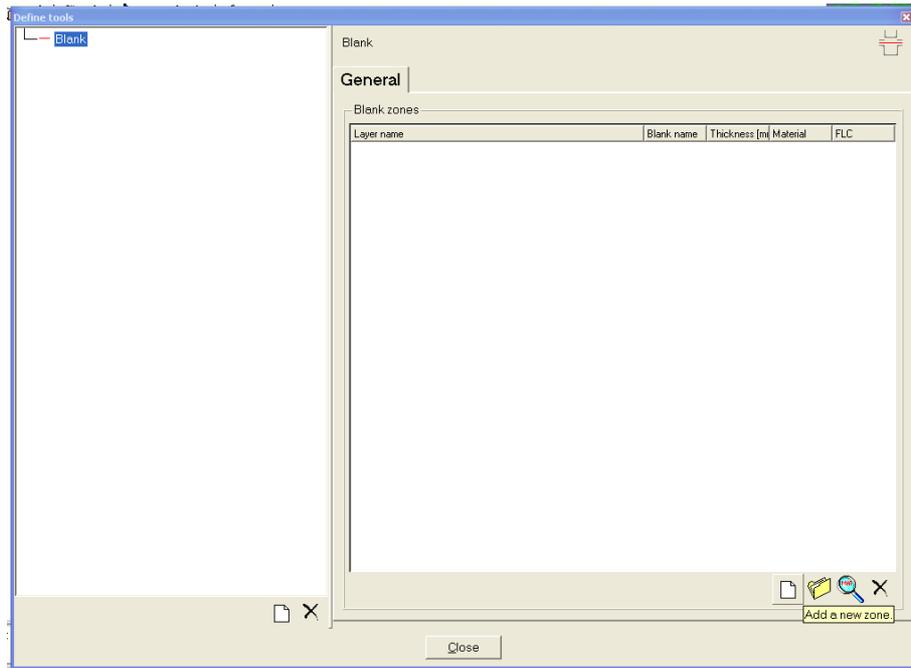


Figura 4. 21 Ventana Define Tools.

Con lo cual se ingresa a la ventana *Define Blank zone* en donde se selecciona el layer que corresponde a la chapa, para luego asignar el material pulsando *Properties*

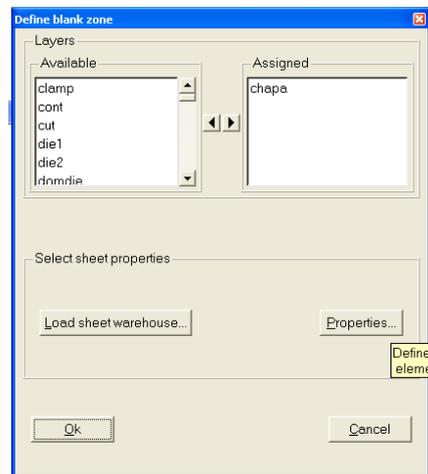


Figura 4. 22 Ventana Define Blank zone.

La ventana *Define sheet properties* permite seleccionar paso a paso el material ha utilizar. Como primer paso se especifica el espesor del material (1mm.), a continuación, en *material group* se selecciona el tipo de material, en este caso Aluminio, con lo cual se activa la base de datos del programa en donde se

selecciona AA3104-H14, es indispensable al mismo tiempo elegir una curva FLC que proporcione toda la información de las zonas en donde el material puede ser conformado, para el ejemplo ha realizar se selecciona una curva FLC 3104-H14,

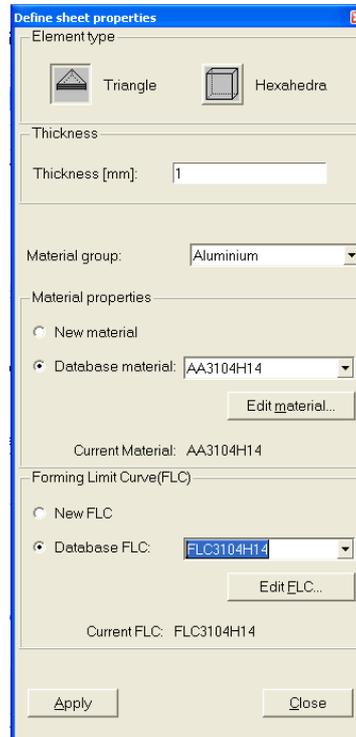


Figura 4. 23 Ventana Define Sheet properties.

Con el material y la curva FLC seleccionados, se procede a aplicar todo esto en el layer seleccionado anteriormente a través del menú *Apply* que solicita al usuario un nombre para reconocerlo.

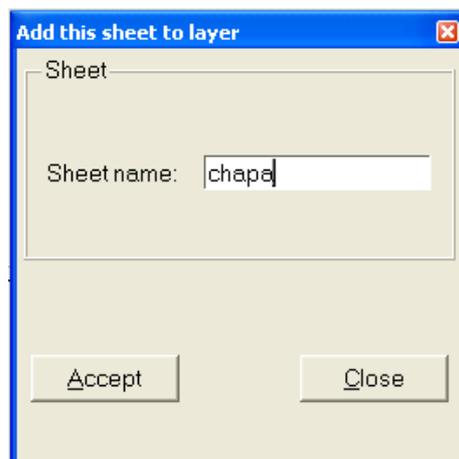
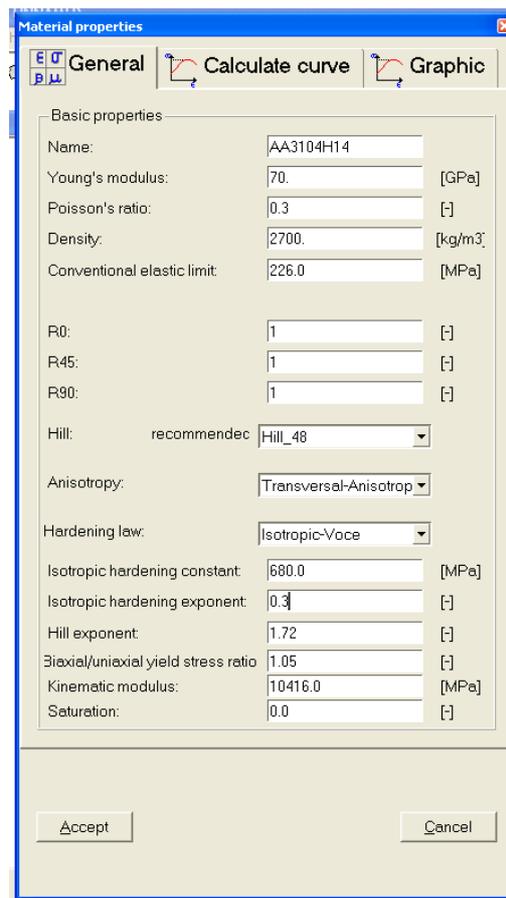


Figura 4. 24 Ventana para asignar el nombre a la chapa.

A continuación la figura 4.25 muestra las propiedades del material seleccionado.



Material properties

General Calculate curve Graphic

Basic properties

Name: AA3104H14

Young's modulus: 70 [GPa]

Poisson's ratio: 0.3 [-]

Density: 2700 [kg/m³]

Conventional elastic limit: 226.0 [MPa]

R0: 1 [-]

R45: 1 [-]

R90: 1 [-]

Hill: recommendec Hill_48

Anisotropy: Transversal-Anisotrop

Hardening law: Isotropic-Voce

Isotropic hardening constant: 680.0 [MPa]

Isotropic hardening exponent: 0.3 [-]

Hill exponent: 1.72 [-]

Biaxial/uniaxial yield stress ratio: 1.05 [-]

Kinematic modulus: 10416.0 [MPa]

Saturation: 0.0 [-]

Accept Cancel

Figura 4. 25 Propiedades del Aluminio AA3104-H14.

Una vez hecho todo esto, se observa en el menú principal la chapa con sus características.

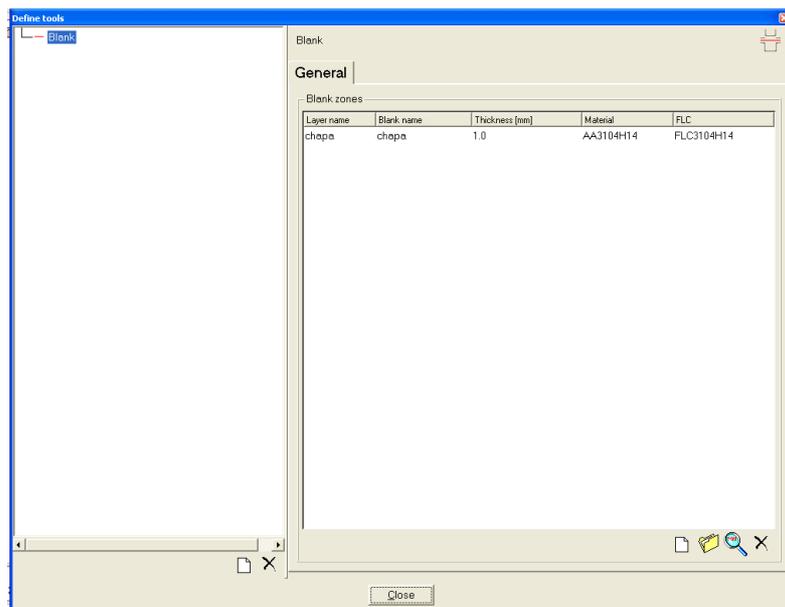


Figura 4. 26 Visualización del material asignado a la chapa.

Definida la chapa, es necesario informar del tipo de herramientas que se necesitan en el problema, para la asignación de las herramientas se procede en el mismo menú *Define Tools*, esto permite caracterizar cada herramienta con sus diferentes propiedades como son: el desplazamiento, dirección, distancia a recorrer y velocidad.

Las herramientas iniciales a definir son el pisador, émbolo y la matriz que se utilizan en la primera operación de embutido.

Para caracterizar este tipo de herramienta ingresamos en *Workshop>Tools* seguidamente en *Add a new tool* se escoge el tipo de herramienta *Blankholder* y se le asigna un nombre a la herramienta.

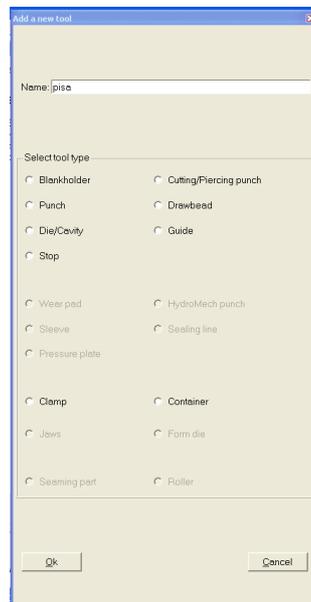


Figura 4. 27 Ventana Add a new tool.

En *Define tools* se asigna el layer correspondiente a la herramienta, la dirección de aplicación de la fuerza y su desplazamiento que para el presente caso es un pisador fijo. En el menú *Define* se ingresa el valor de la fuerza de pisado inicial y final.

Debido a que este problema es simétrico con un plano solo se tomará la mitad de la fuerza de pisado que se calcula con la ecuación 1.11 y el valor de p_n proporcionado en el Anexo 4.

$$P_n = p_n \frac{\pi}{4} [D^2 - (d_m + 2 r_M)^2]$$

$$P_n = 0.15 \frac{\pi}{4} [160^2 - (80 + 2(5))^2]$$

$$P_n = 2 \text{ Ton}$$

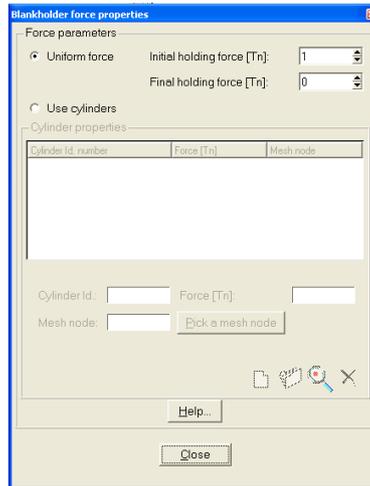


Figura 4. 28 Ingreso de la fuerza de pisado.

Para una herramienta de tipo émbolo se realiza el mismo procedimiento con la diferencia en el menú *Add a new tool* se escoje el tipo de herramienta *Punch* y se ingresa su nombre correspondiente, se selecciona el layer adecuado y se introduce su desplazamiento y dirección de embutición.

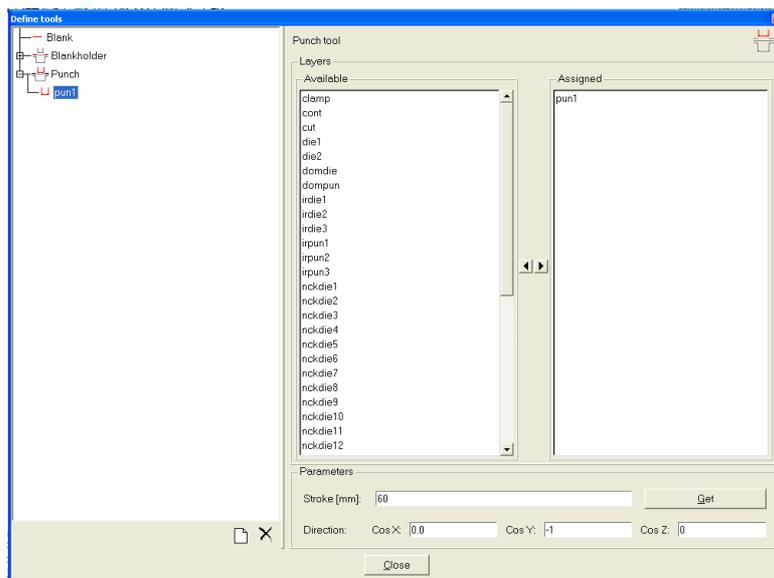


Figura 4. 29 Caracterización de la herramienta émbolo.

La caracterización de una herramienta de corte se la realiza en el mismo menú *Add a new tools*, seleccionando *Cutting/Piercing Punch*, con lo cual se ingresa en el menú *Define Tools* en donde se ubican dos tipos de parámetros para el corte, el primero es por selección de nodos (*By node selection*) y el segundo por orientación normal (*By normal orientation*),

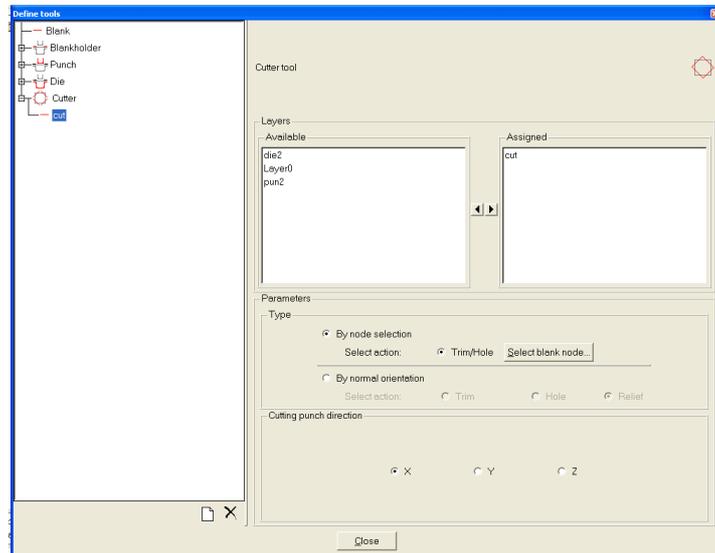


Figura 4. 30 Ventana para caracterizar una herramienta de corte.

Como se trata de retirar todo el material que se ubica en el borde de la chapa se elige el corte por selección de nodos, para lo cual se debe elegir un nodo de la chapa de donde se desea retirar el material.

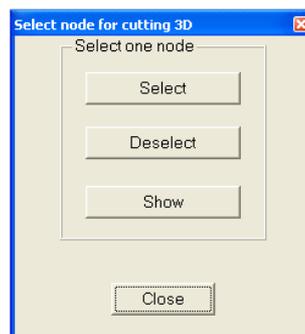


Figura 4. 31 Ventana Select node for cutting 3D

Los procesos de estirado, abombado y formación del cuello utilizan émbolos y matrices que se caracterizan de la misma manera anteriormente descrita.

Si se desea obtener resultados de una parte en particular de la chapa o herramientas, se debe ingresar al menú *Workshop>Detailed history outputs*, con lo cual se mostrará una ventana con las variables cuyo historial de variación puede calcular el programa, a continuación, se activan las variables que se desea calcular y se selecciona los nodos de donde se necesita cada información.

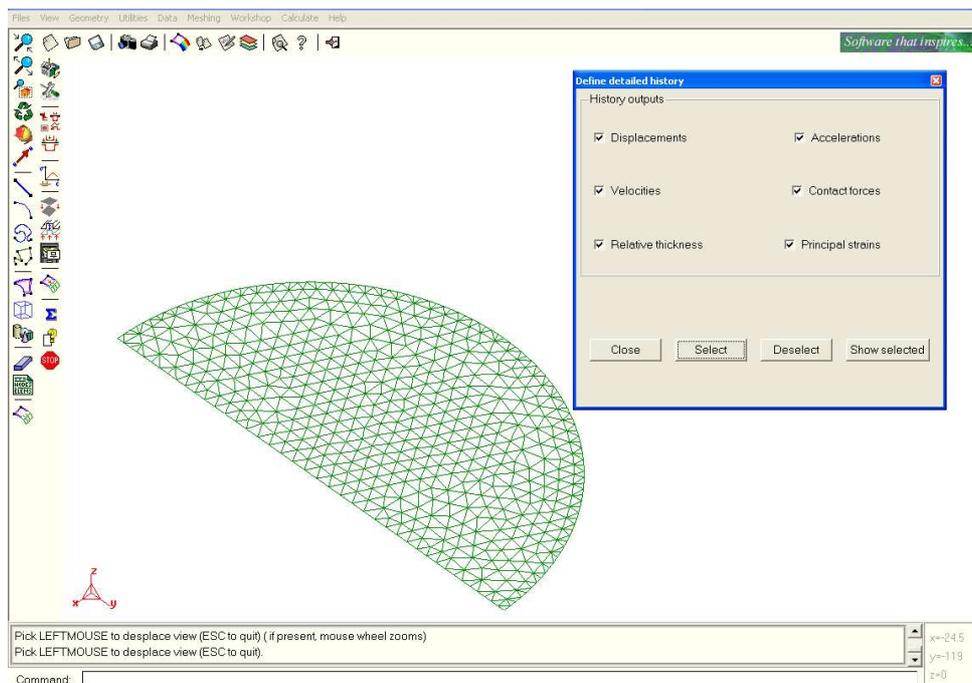


Figura 4. 32 Ventana Define detailed history.

4.2.3.3 Definición de operaciones

Para caracterizar cada operación en el proceso de elaboración de envases, ingresamos en el menú *Workshop>Operations*, el cual activa la ventana *Define>Operations* en la que se selecciona cada tipo de operación.

Para una operación de embutido se selecciona *Mechforming* y se ingresa un nombre para identificar a cada operación, en este caso a la primera operación de embutido se nombra *eop1*, una vez creada la operación se activa el menú *Define operations* en el que se caracteriza este proceso.

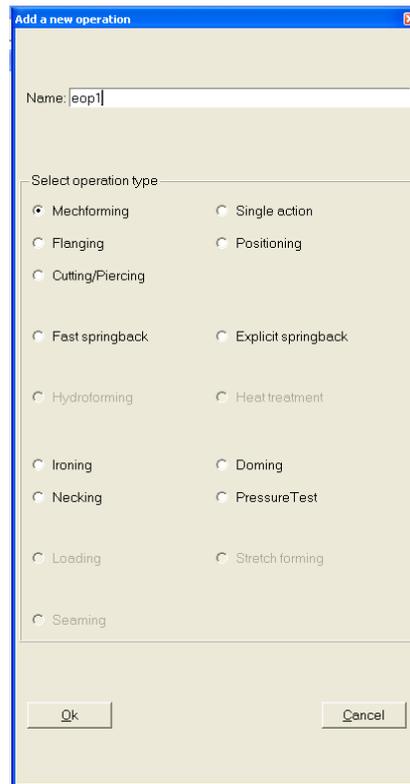


Figura 4. 33 Ventana Add a new operation.

En la ventana de *Define operations* se observan cuatro menús los cuales nos permiten establecer las condiciones para cada proceso. En el menú *Tools* se seleccionan las herramientas que van a intervenir en la operación.

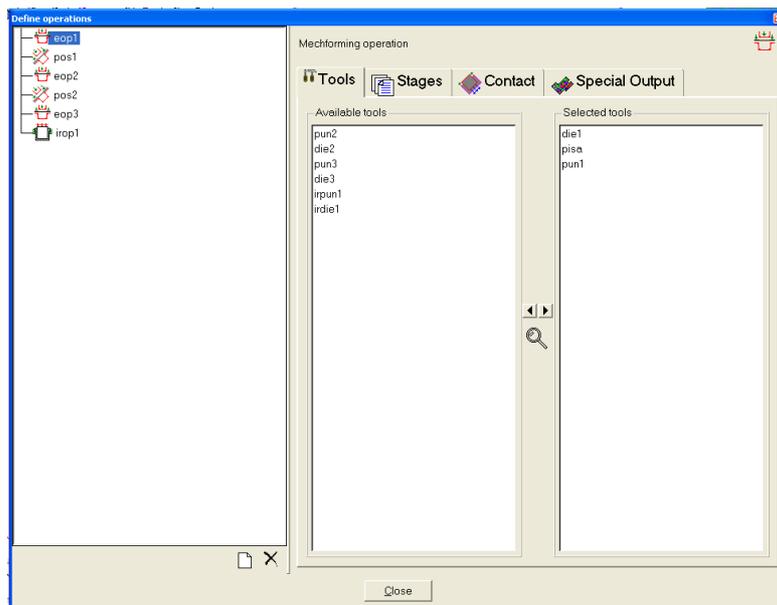


Figura 4. 34 Elección de herramientas en la opción Tools

Seleccionadas las herramientas, se procede a caracterizar las etapas para esta operación. En una operación del tipo *Mechforming* existen tres etapas: *Gravity* (Gravedad), *Holding* (Pisado) y *Forming* (Formado). La etapa de *Gravity* se omite en este tipo de problemas debido a que el peso propio de la chapa es despreciable y el efecto de la gravedad sería insignificante.

Para poder realizar la etapa de *Holding* se debió haber seleccionado una herramienta de tipo pisador, para este caso el pisador es plano y no necesita tener definido ninguna carrera, por lo tanto se debe activar la opción *closed*

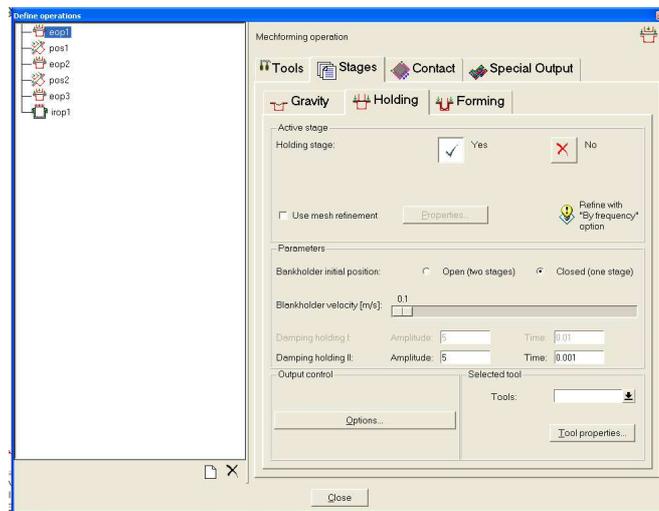


Figura 4. 35 Caracterización de la etapa Holding.

Para la etapa de *Forming* es necesario conocer la velocidad apropiada para un proceso de embutición, una velocidad aceptable para el embutido del aluminio es de 0.5 m/s.

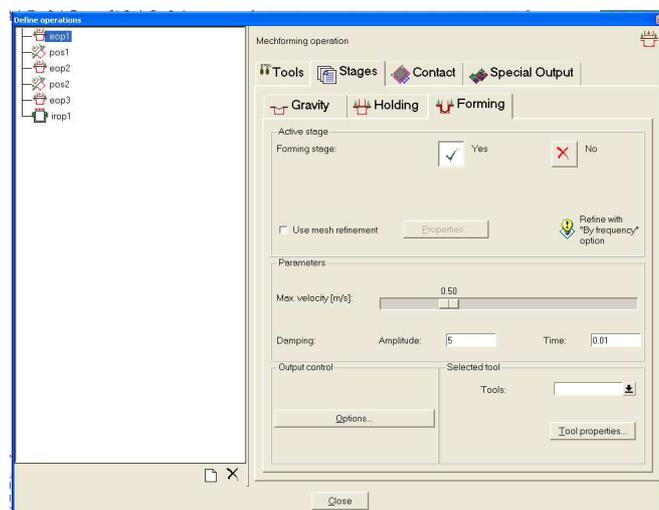


Figura 4. 36 Caracterización de la etapa Forming

En el menú *Contact*, el usuario ingresa los valores del coeficiente de fricción si así lo desea, es recomendable trabajar con los valores por defecto que se encuentran en el programa.

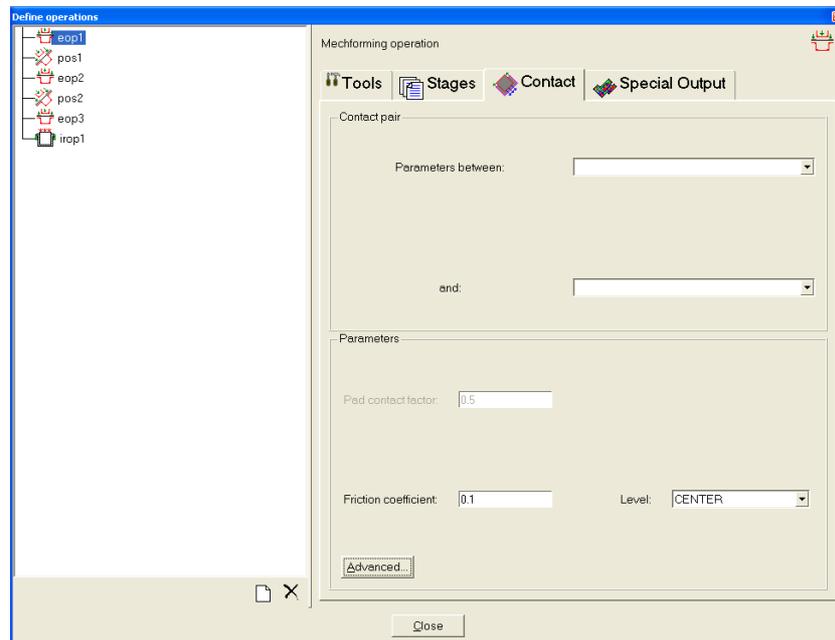


Figura 4. 37 Caracterización del menú Contact.

El menú *Special Output* permite obtener información relacionada con la distribución de la presión del pisador, marcas en la chapa y el desgaste que sufren las herramientas, si se desea obtener dicha información basta solamente con activar las casillas de verificación correspondientes.

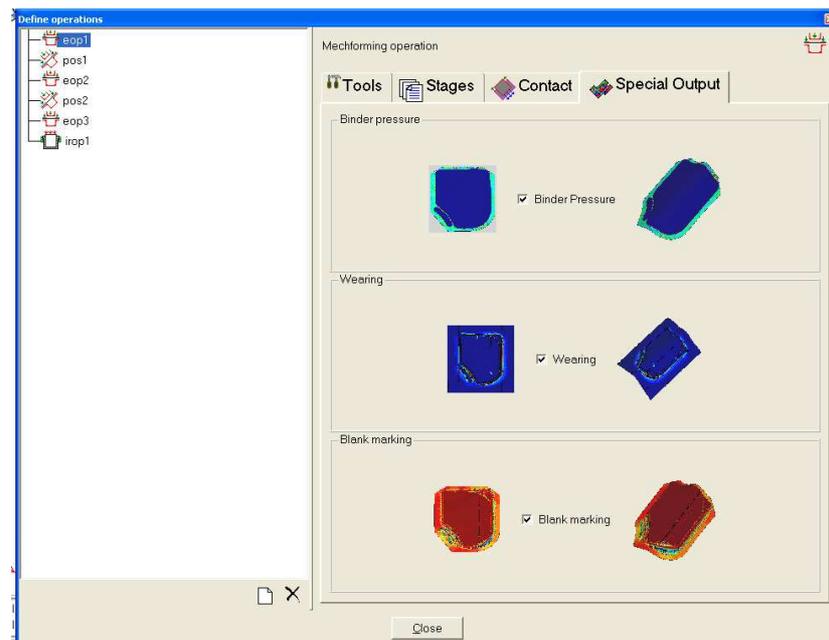


Figura 4. 38 Caracterización del menú Special Output

Una vez caracterizada la primera operación de embutición, es necesario que el material regrese a su posición inicial de modo que se consiga iniciar con la segunda operación. Para definir una operación de posicionamiento se activa *Positioning* en la ventana *Add a new operation*, en donde se ingresa el nombre de la operación (pos1).

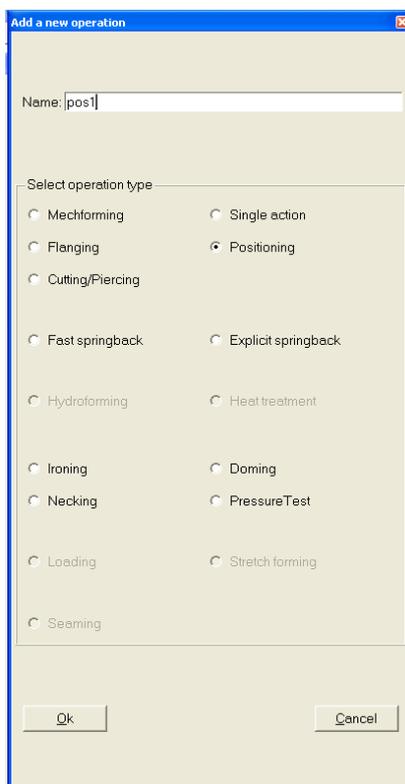


Figura 4. 39 Creación de una operación de Positioning.

Una vez creada la nueva operación, se procede a caracterizarla, en la ventana *Define operations* se visualiza tres opciones para el movimiento, *Blank* que permite únicamente el movimiento de la chapa, *Tools* define el movimiento de herramientas y con *Blank+Tools* se consigue el movimiento de material y herramienta a la vez. Al seleccionar la opción *Move tool/blank entirely* la operación traslada la herramienta y el material, si se selecciona *Move rotation center only* el material y la chapa girarán alrededor de su centro de rotación.

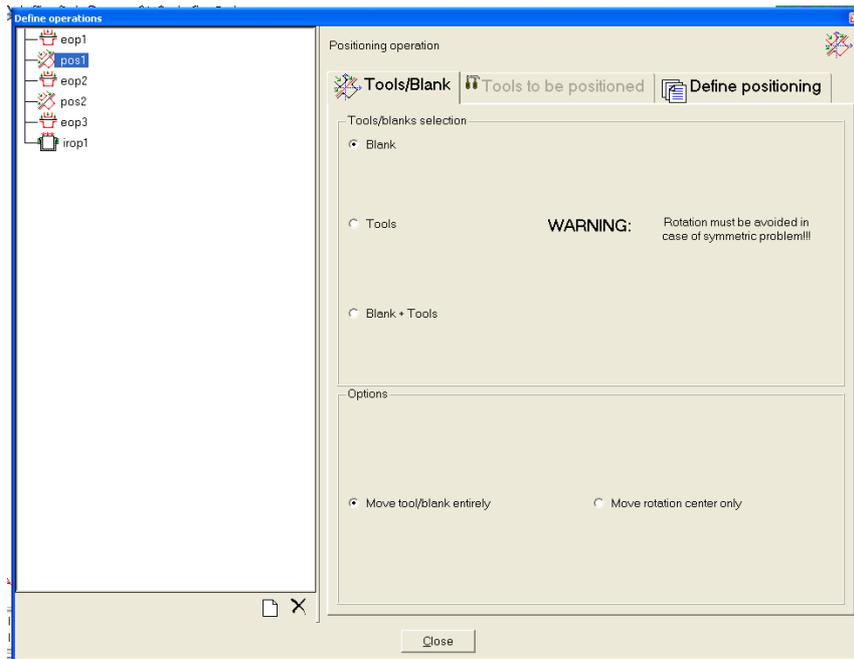


Figura 4. 40 Definición de una operación de Positioning

Al seleccionar que se desea desplazar, se ingresa en el menú *Define Positioning* en el cual se elige *Add a new positioning*, en la ventana *Positioning parameters* se ingresa el identificador de posición (*Positioning Identifier*) que puede ser un número o una letra, posterior a esto, se decide el tipo de posicionamiento: Traslación (*Traslation*), Rotación (*Rotation*) o Roto-Traslación (*Roto-traslation*).

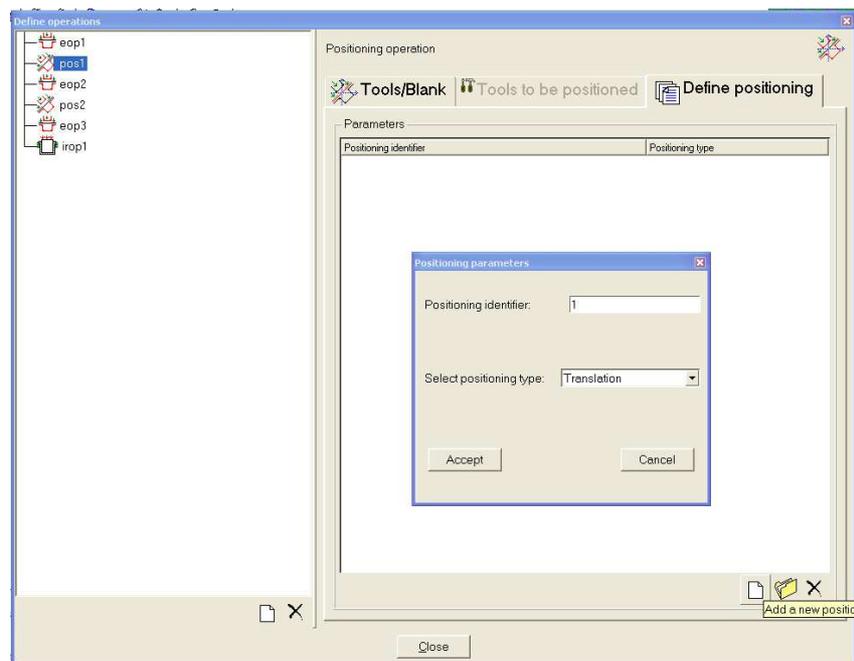


Figura 4. 41 Ventana Positioning parameters

Para finalizar la caracterización de la operación se ingresa en la ventana *Define positioning properties*, la cual nos permite ingresar las propiedades del posicionamiento. Como se desea que la chapa regrese a su posición original, en la casilla del vector de desplazamiento (*Translation vector*) se ingresa el valor que recorrió el material en el primer proceso de embutición.

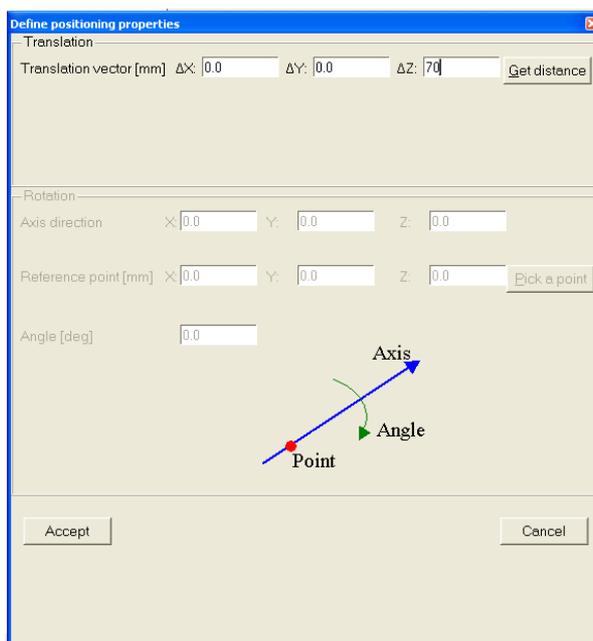


Figura 4. 42 Ventana Define Positioning properties

Al regresar la chapa conformada a su posición original se puede realizar sobre esta el segundo proceso de embutición, que se caracteriza de la misma manera descrita anteriormente.

Para definir una operación de estirado (*Ironing*), previamente se debe disponer que la chapa se encuentre en su posición original después de que sobre ella se ha realizado la segunda operación de embutición. Para crear una operación de estirado, se ingresa a la ventana *Add a new operation* en la cual se selecciona la operación *Ironing* e introducimos un nombre que identifique a esta operación.

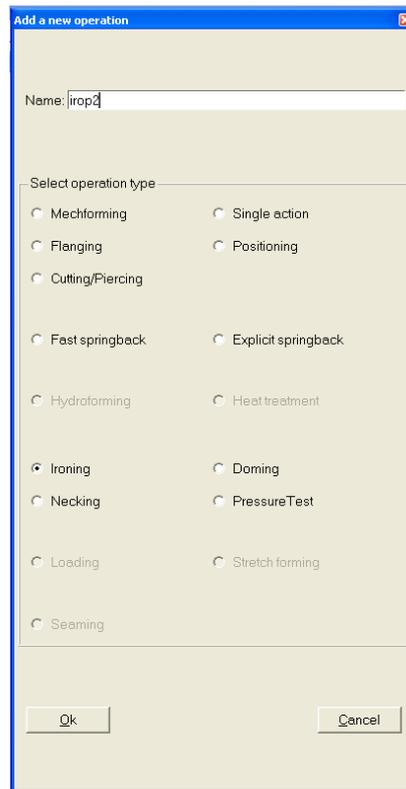


Figura 4. 43 Creación de una operación Ironing

Las operaciones de estirado (*ironing*), abombado (*doming*) y formación del cuello (*necking*), solo pueden contener herramientas del tipo *Punch* y *Die*, por tal razón, todas solo se definen con una etapa de conformado, en la cual se ingresa la velocidad del émbolo que anteriormente se mencionó.

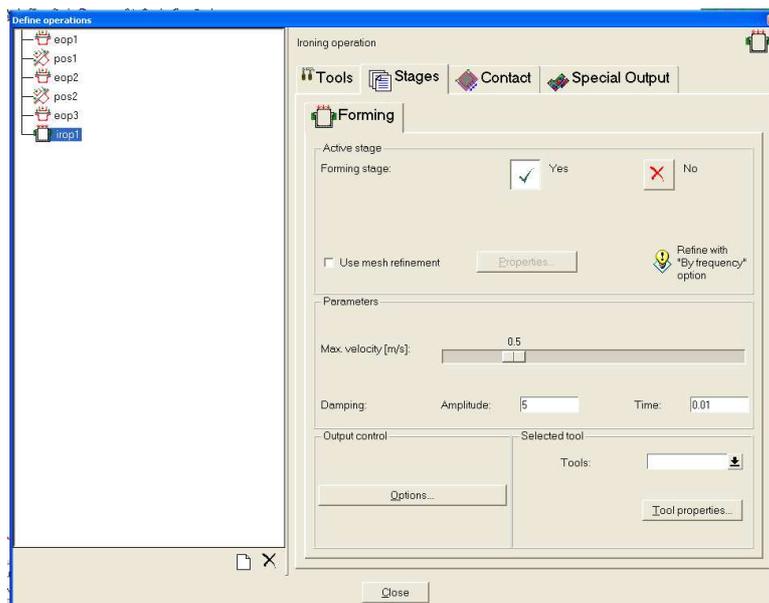


Figura 4. 44 Caracterización de una operación tipo Ironing.

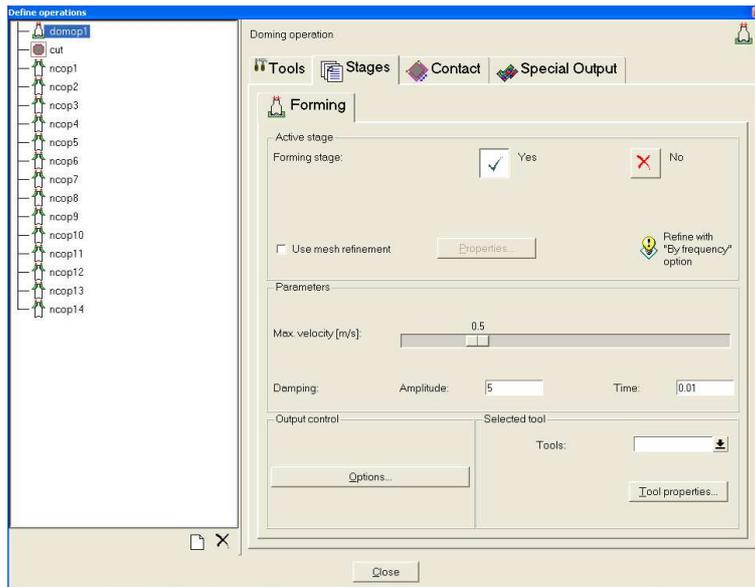


Figura 4. 45 Caracterización de una operación tipo Doming

Para una operación tipo *Necking* hay que tener en cuenta el posicionamiento de las herramientas de operaciones previas, las herramientas tipo *Punch* y *Die*, tienen que estar situadas de modo que sigan con la deformación de la pieza desde el punto en donde la dejaron operaciones anteriores, es usual que haya varias operaciones tipo *Necking* seguidas y por lo tanto el posicionamiento debe tener en cuenta la secuencia de las operaciones.

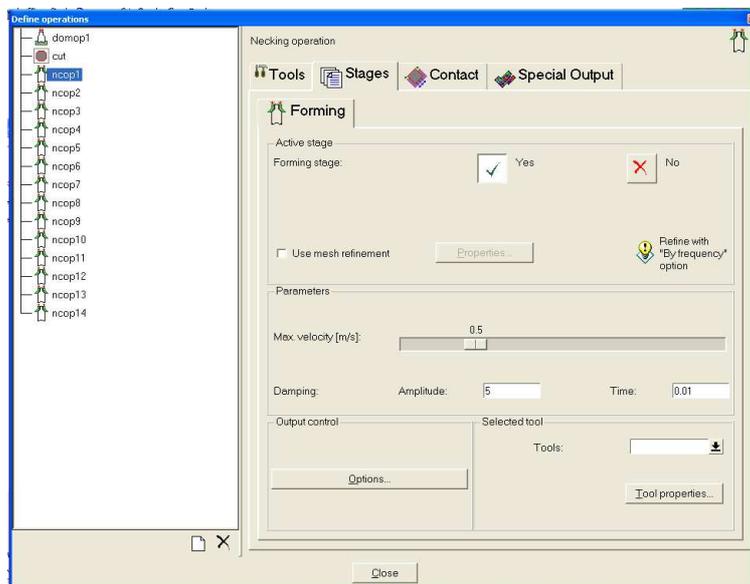


Figura 4. 46 Caracterización de una operación tipo Necking.

Los menús de *Contact* y *Special Output* se definen de la misma forma que se indico en operaciones anteriores.

Una vez caracterizado todas las operaciones, el programa puede iniciar con el cálculo. Se selecciona el intervalo que se quiere calcular para cada operación descrita.

En la ventana *Calculate the simulation* se notan diferentes opciones para el desarrollo del cálculo, al activar la opción *Accurate mode* (modo preciso), se obtiene resultados con la mayor precisión posible, si se desea obtener resultados en un menor tiempo, se debe seleccionar la opción *Fast mode* (modo rápido), pero con una consecuente pérdida de precisión en los resultados, esta opción sirve al usuario para observar si todas las operaciones fueron correctamente definidas y si los resultados obtenidos serán los adecuados. A continuación se selecciona las etapas que se desean calcular, finalmente para llevar a cabo el cálculo se presiona *OK*.

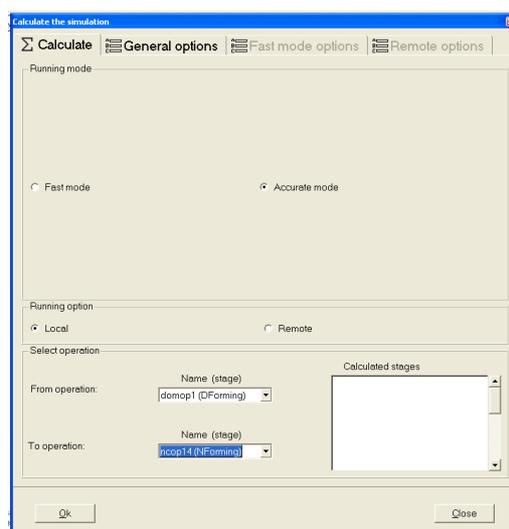


Figura 4. 47 Ventana Calculate the simulati3n

Una vez finalizada la etapa de c3lculo, el programa permite visualizar los resultados de cada operaci3n accediendo al men3 *Files>Postprocess*.

4.3 POST-PROCESAMIENTO

Los resultados de cada operaci3n se observan 3nicamente en el post-proceso, para visualizar los resultados es necesario cargar cada etapa de c3lculo, esto se realiza ingresando en el men3 *Workshop>Load Results*, con lo cual se ingresa a la ventana *Load Results*, donde se selecciona la operaci3n que se desea visualizar.

4.3.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS

Una vez cargado los resultados, se los puede visualizar a través de los diferentes menús, ingresando en *Workshop>View Standard results*, se selecciona el tipo de resultado que se desea visualizar.

4.3.1.1 Forma Final

Accediendo al menú *Workshop>View Standard results>final shape* se visualiza la pieza final conformada, en donde se observa si la forma final del envase es la que se esperaba.

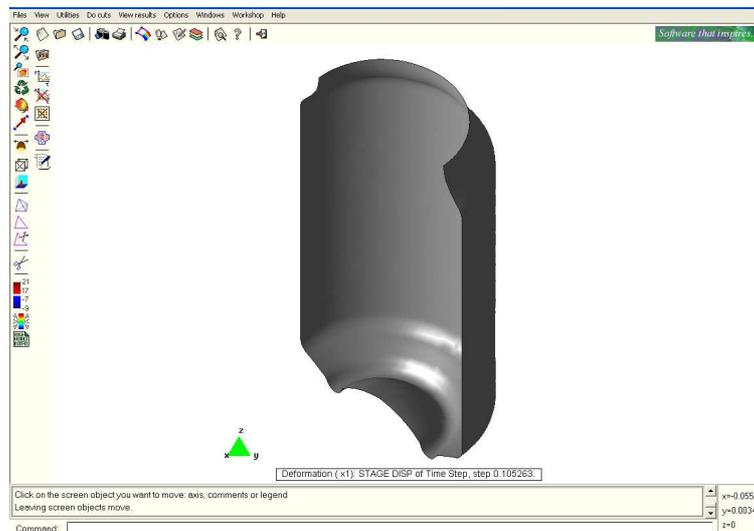


Figura 4. 48 Forma final del envase.

4.3.1.2 Desplazamientos totales

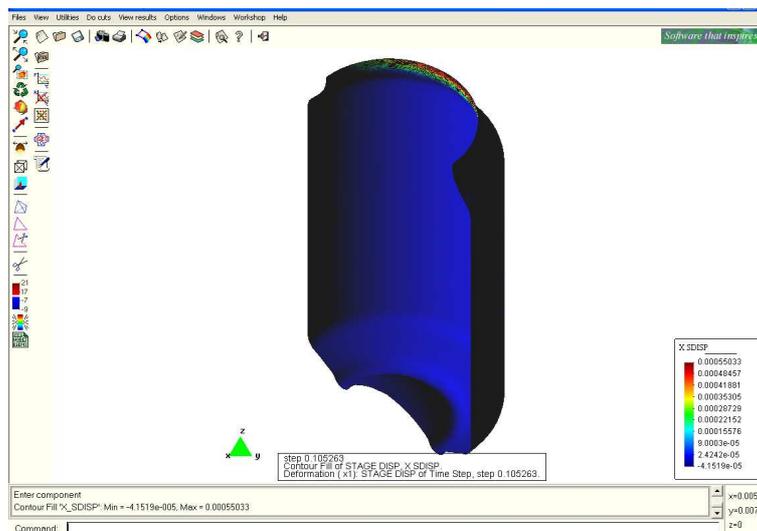


Figura 4. 49 Desplazamiento total en el eje X

Al ingresar en el menú *Workshop>View Standard results>total displacements*, el programa muestra los desplazamientos totales de los elementos que conforman la chapa en el eje de embutición z, debido a que se necesita la información de los desplazamientos que se realizan en el eje x, se cambia la visualización de los desplazamientos, para lograr esto, se ingresa en el menú *View Results>Contour Fill>STAGE DISP>X SDISP*.

La Figura 4.49 muestra los desplazamientos en el eje x con un valor máximo en la escala de 0.00055033 m. esto representa que el elemento se ha desplazado 0.5 mm, respecto a la última operación.

4.3.1.3 Espesor relativo

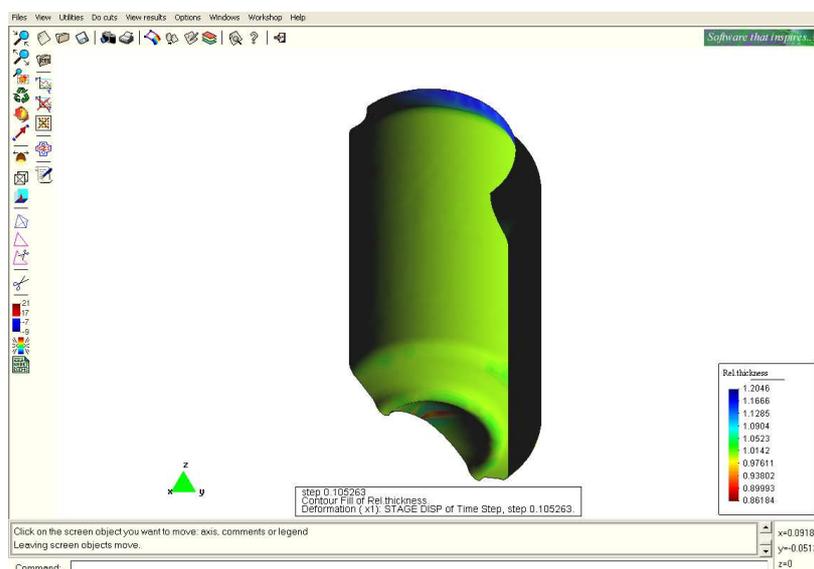


Figura 4. 50 Espesor relativo.

El espesor relativo representa la variación de espesor que sufre la chapa con respecto a su espesor inicial, la escala que se observa en la figura 4.50 es adimensional y como se advierte se tiene una reducción en el espesor del 14% en el fondo del envase.

4.3.1.4 Zona de curvaturas

Las zonas de curvatura muestran los sectores de la chapa donde los doblados son más severos, también pueden ser utilizadas para visualizar la formación de arrugas.

La figura 4.51 muestra la zona donde empieza la formación del cuello como la zona que más sufre en el proceso de *Necking*.

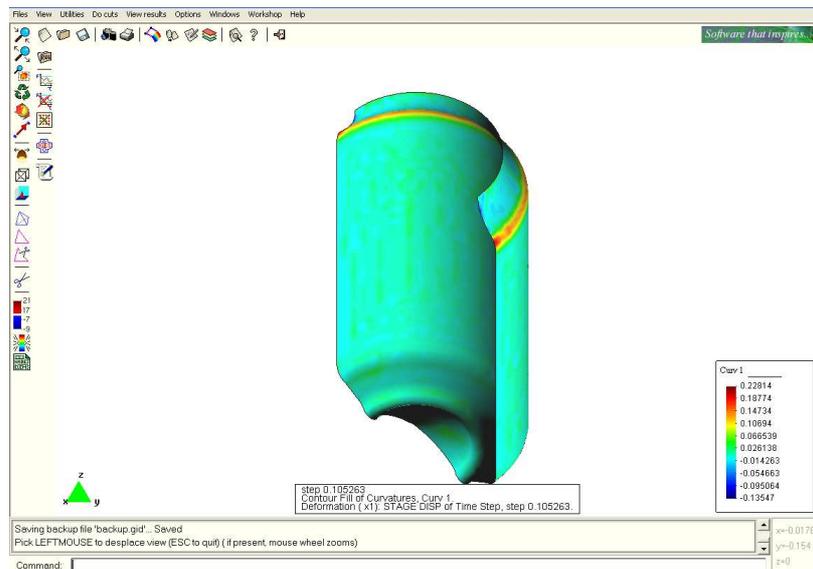


Figura 4. 51 Zonas de curvatura.

4.3.1.5 Mayor deformación principal

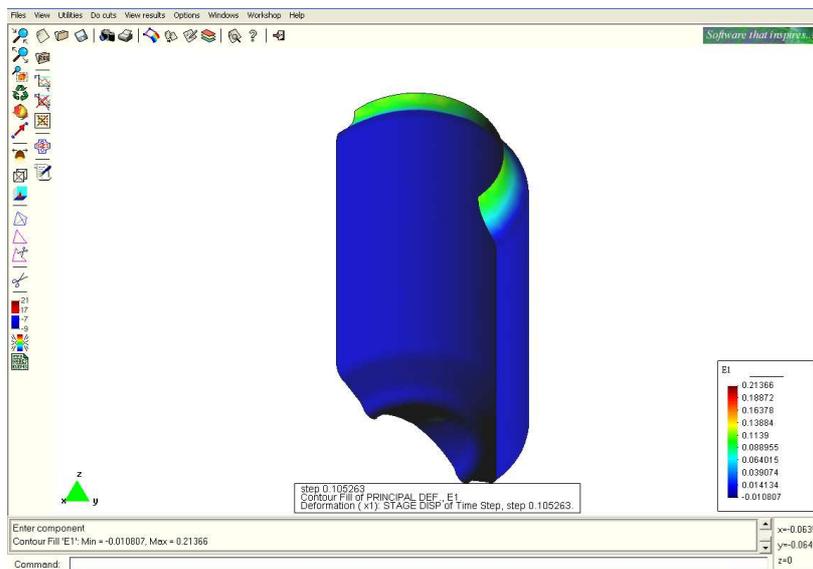


Figura 4. 52 Mayor deformación principal

En la figura 4.52 se observa que las mayores deformaciones se generan en la parte superior del envase con un valor máximo 0.21366 que se encuentra en el inicio de la zona plástica y lejos de la zona de rotura, lo que garantiza que el material no falle como se observará mas adelante, las zonas de color azul presentan mínimas deformaciones debido a que no sufren cambios en su forma.

4.3.1.6 Mapa FLD

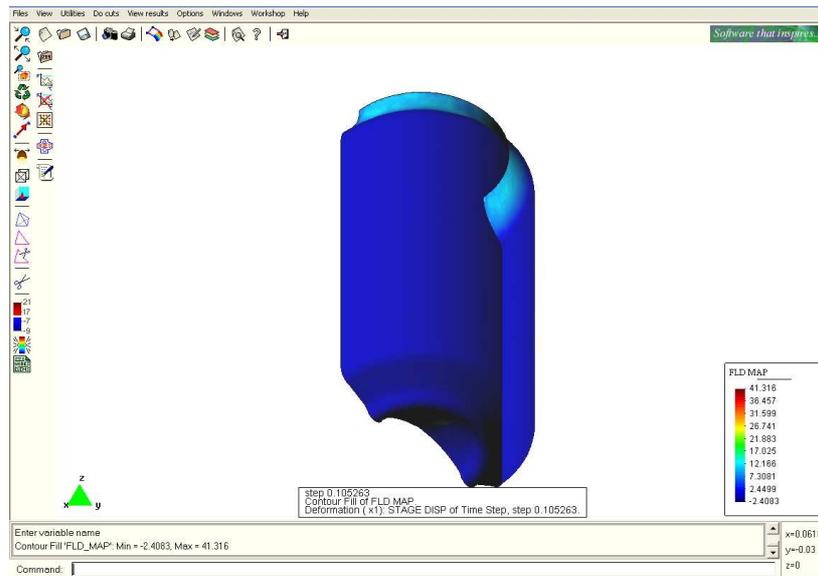


Figura 4. 53 Mapa FLD

El mapa FLD (Forming Limit Diagram), representa un parámetro adimensional, que indica, si el estado de deformación de un punto es crítico de acuerdo con su posición en la Curva Límite de Deformación. Un valor mayor a 100 en la escala del mapa FLD advierte una probable ruptura del material, en cambio, un valor que se encuentre entre 0 y 100 sugiere que el material se encuentra por debajo del límite definido por la curva FLC. La figura 4.53 muestra un valor máximo de 42 en la zona superior del cuello, esto sugiere que el material no presentará fallas.

4.3.1.7 Calidad de Conformado

El diagrama de *Calidad de Conformado (Forming Zones)*, cuantifica la calidad del estado de deformaciones. Este diagrama permite apreciar las zonas de la pieza que tienden a estar fuertemente estiradas (*Tight*), las que tienen tendencia a formar arrugas (*Wrinkling*) o fuertes arrugas (*Strogn Wrinkling*) y las que apenas sufren deformaciones (*Low Strain*), en las restantes zonas (*Plane Strain, Semitight y Loose*), el material tiende a estar estirado en una dirección y comprimido (*Semitight*) o sin deformación (*Plane Strain*) en la otra dirección.

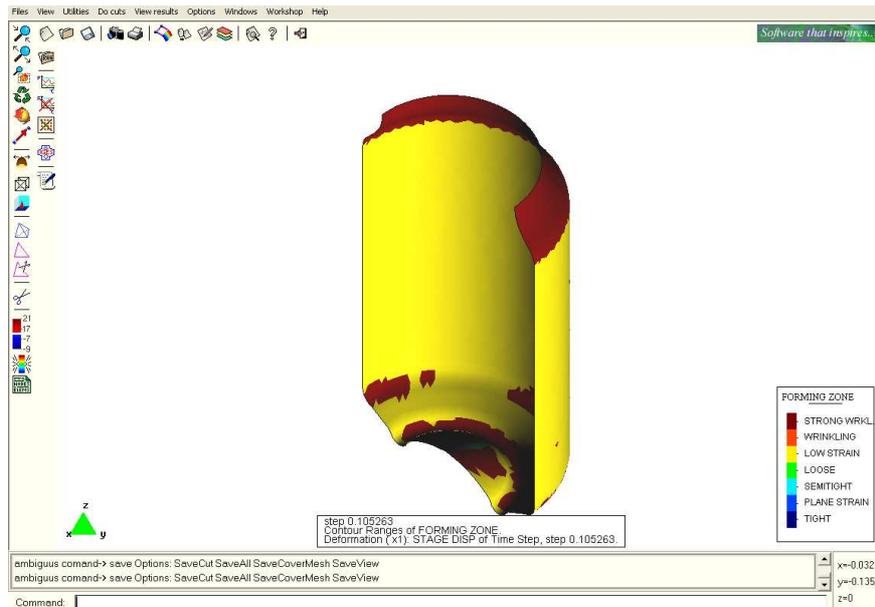


Figura 4. 54 Calidad de conformado

De acuerdo a lo descrito anteriormente, el envase presenta zonas de baja deformación en sus paredes laterales y zonas fuertemente arrugadas en la parte superior e inferior.

4.3.1.8 Zonas de seguridad

Al igual que el diagrama de *Calidad de Conformado*, el diagrama de *Zonas de Seguridad* muestra los problemas que puede presentar el material por su posición con respecto al diagrama FLD.

Los principales problemas que puede manifestar el material son: *Fail* que se produce por zonas que se encuentran por encima de la curva FLC, *Marginal* si esta zona se encuentra a un 10% de la curva FLC, también se pueden presentar problemas de arrugas *Wrinkling*, debido al propio estado de deformaciones y *Low Strain* si el material presenta bajas deformaciones. Además se incluye una región denominada *Thinning*, la cual manifiesta las zonas que han sufrido un adelgazamiento severo y finalmente *Safe* que representa las zonas en donde el material no presenta problemas.

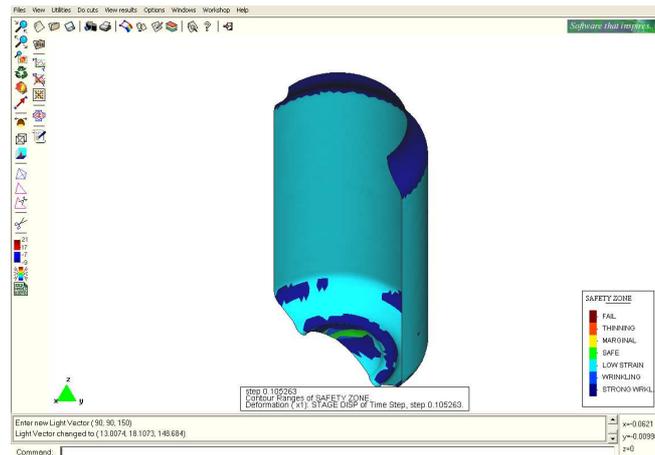


Figura 4. 55 Zonas Seguras

La figura 4.55 muestra las zonas seguras en el envase, la parte superior e inferior del material se muestra fuertemente arrugado mientras que sus paredes laterales sugieren una baja deformación.

4.3.1.9 Marcas en la chapa

Al activar el menú *Workshop>View estándar results>Blank marking*, se puede observar las marcas que aparecen como consecuencia del rozamiento entre la chapa y las herramientas, no obstante, esta variable no puede utilizarse directamente para predecir si aparecerá o no una marca, sino para definir las zonas donde es mayor el riesgo, un valor más alto indica un mayor riesgo de marcas. Este tipo de visualización de resultados, solo aparece en operaciones tipo *Mechforming* y siempre que el usuario los haya seleccionado en el pre-proceso.

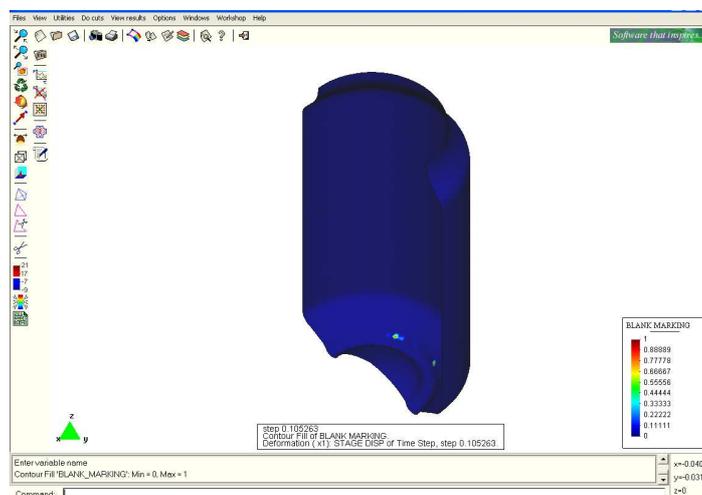


Figura 4. 56 Marcas en la chapa

Como se observa en la figura 4.56, existe riesgo de tener marcas en la chapa en la parte inferior del envase, debido a que esta operación es del tipo *Necking*, no se consigue advertir si la chapa tendrá marcas en la zona de formación del cuello.

4.3.1.10 Análisis e interpretación de curvas obtenidas

Una vez realizado la carga de resultados, se puede visualizar gráficas de la variación histórica de las variables en los nodos seleccionados en el pre-proceso. Para realizar esto, se ingresa al menú *Workshop>Detailed history outputs...*, con lo cual aparece la ventana *Load history information*, en donde el usuario selecciona las variables que van a ser analizadas.

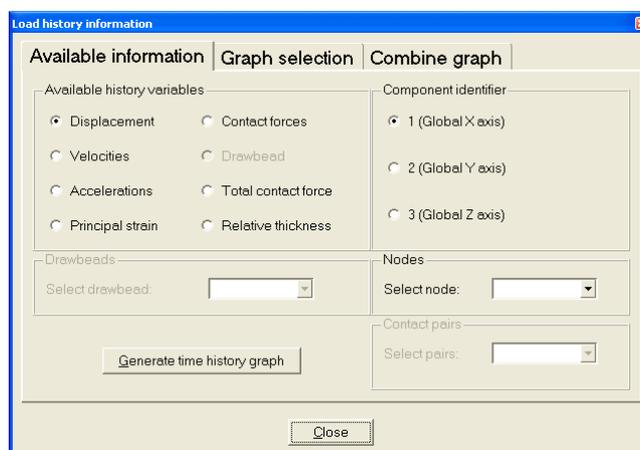


Figura 4. 57 Ventana Load history information.

Una variable muy importante en el proceso de fabricación de envases, es la fuerza que debe adquirir el émbolo para realizar la operación de conformado del cuello sin originar fallas en el material.

Para obtener esta curva, se ingresa en la ventana *Load history information* donde se selecciona *Total Contact Force*, de igual manera, en *Component identifier* se escoge el eje global en que se quiere visualizar la gráfica, que para nuestro caso es el eje global z, debido a que es en el que se realiza el conformado, seguidamente, en *Contact pairs* se opta por el par de contacto que realiza la herramienta con la chapa y finalmente se oprime *Generate time history graph*.

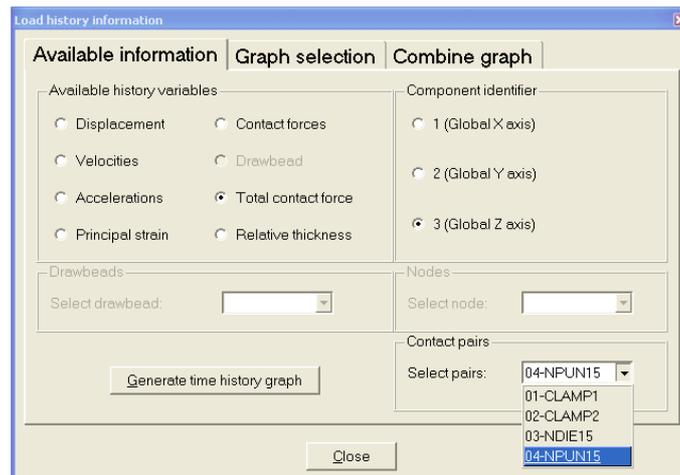


Figura 4. 58 Caracterización para obtener la fuerza total de contacto

Para visualizar la gráfica elaborada, se ingresa en la pestaña *Graph Selection*, donde en la ventana de diálogo perteneciente a *Total Contact Force* se selecciona el archivo apropiado y se presiona *View graph*.

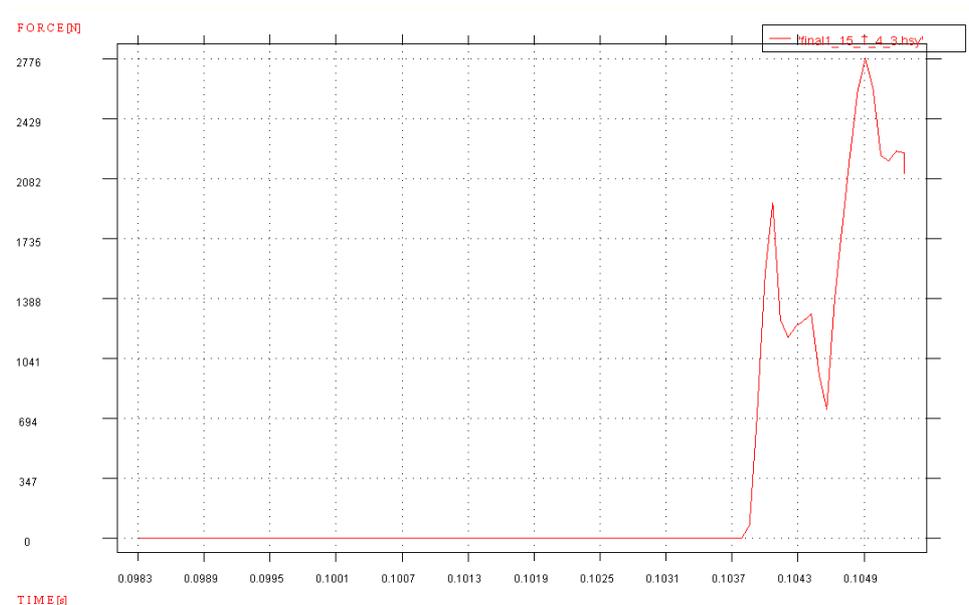


Figura 4. 59 Gráfica de la Fuerza Total de Contacto en el proceso de formación del cuello

Al analizar esta gráfica, se observa que la fuerza inicia con un valor de 0 N. durante un instante corto de tiempo, inmediatamente, crece con una pendiente constante hasta un valor aproximadamente de 1900 N. intervalo de tiempo en el cual comienza la interacción con el material, se distingue también un espacio de tiempo donde la fuerza decrece y finalmente alcanza un valor máximo de 2776 N., que se tomará como la fuerza necesaria para realizar el último conformado del cuello.

De la misma manera se puede analizar la gráfica de velocidad que tiene el émbolo en el proceso de conformando, seleccionando, *Velocities* en *Available information* y en *Component Identifier* elegir el eje global z, en la sección *Nodes*, se dispone de los nodos correspondientes a cada una de las herramientas declaradas en el preproceso, por lo que, se elige un nodo perteneciente al émbolo.

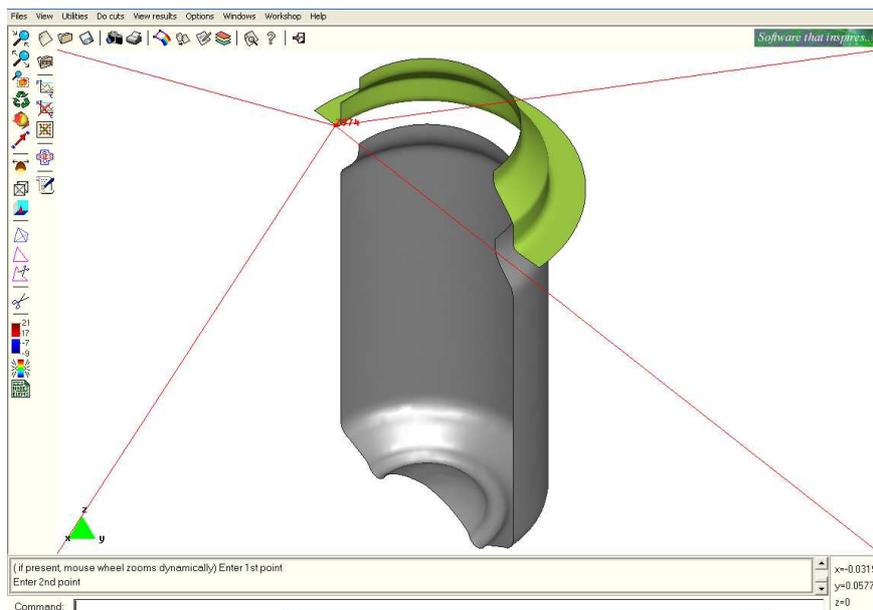


Figura 4. 60 Selección de un nodo para analizar la velocidad del émbolo.

Finalmente se pulsa en *Generate time history graph* y en *Graph selection* en la sección *Velocities* se oprime *View graph*.

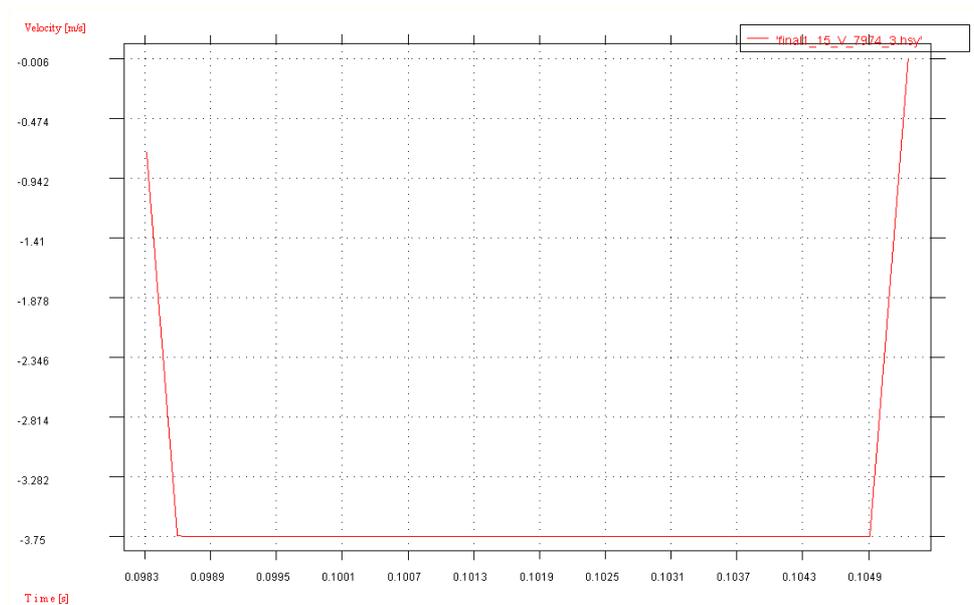


Figura 4. 61 Gráfico de la velocidad del émbolo

Al observar la figura 4.61, se tiene que el émbolo adquiere una velocidad constante de 3.75 m/s, que tiene un valor negativo debido a que se orienta en el eje negativo z, se debe recalcar que se elige el eje z, debido a que es el eje en el que se realiza el conformado, si se eligiera otro eje, nos transmitiría como resultado que la velocidad del émbolo tiene un valor de cero debido a que la herramienta no se traslada en estos ejes.

Debido a la cantidad de operaciones que conforman la elaboración del envase, resulta provechoso visualizar resultados obtenidos para los distintos procesos.

4.3.2 RESULTADOS OBTENIDOS PARA LOS PROCESOS DE EMBUTICIÓN

Anteriormente se mencionó que para la obtención del envase se debe realizar sobre el material dos procesos de embutición, a continuación se exponen los resultados que se obtuvieron para dichos procesos.

Una vez descargado los resultados de la primera operación, se presenta en la ventana del *Postprocess* únicamente las herramientas que intervienen en esta etapa.

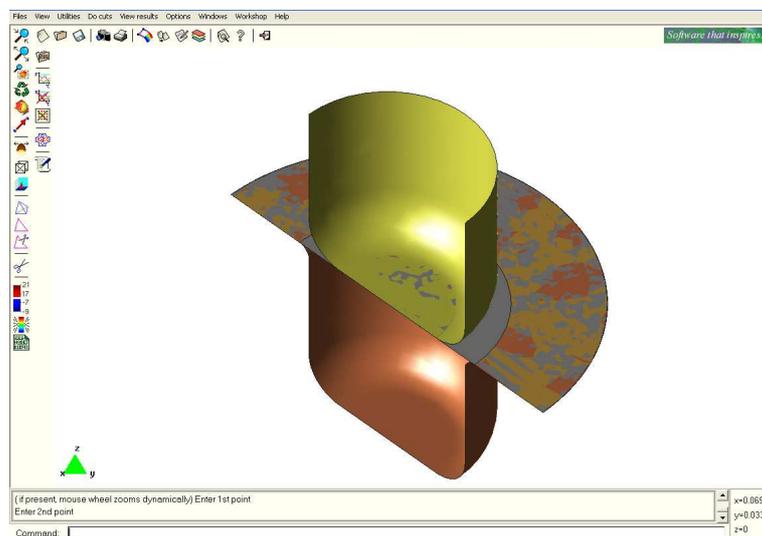


Figura 4. 62 Herramientas que intervienen en el proceso inicial de embutición.

Para observar los diferentes resultados obtenidos en el proceso inicial de embutición se proceda de la misma manera expuesta anteriormente.

4.3.2.1 Desplazamientos totales en el proceso inicial de embutición

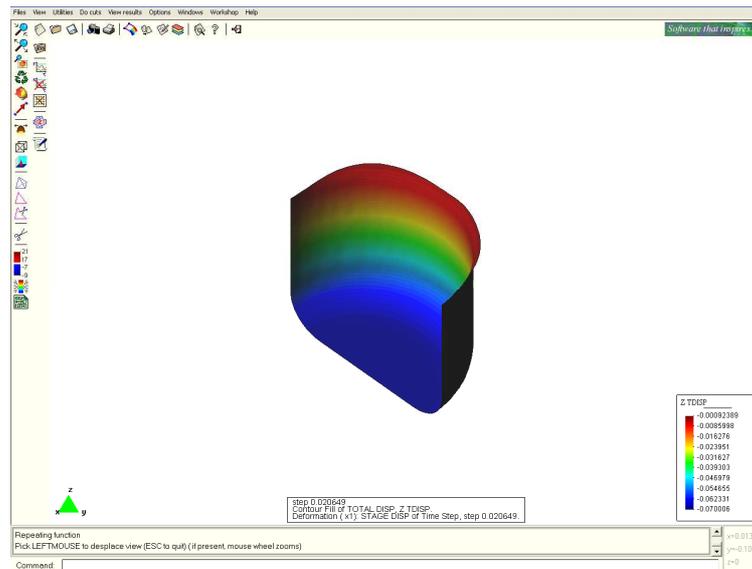


Figura 4. 63 Desplazamientos totales en el proceso inicial de embutición.

En la primera etapa de embutición se precisó el desplazamiento del émbolo en 70mm., la figura 4.63 muestra que el desplazamiento del material ha sido el adecuado.

4.3.2.2 Espesor relativo en el proceso inicial de embutición

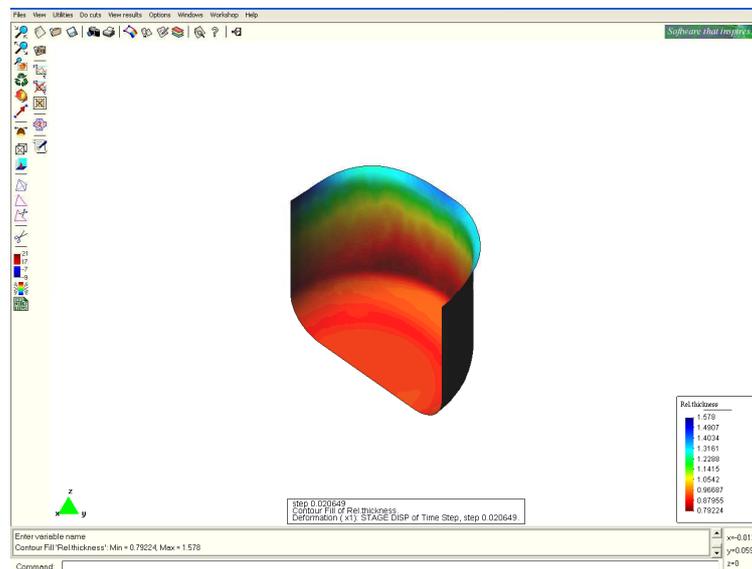


Figura 4. 64 Espesor relativo en el proceso inicial de embutición.

Una vez realizado la primera etapa de embutición, el material presenta una reducción en su espesor de aproximadamente un 21% en la pared lateral y de un 8% en el fondo del envase.

4.3.2.3 Zona de curvaturas en el proceso inicial de embutición

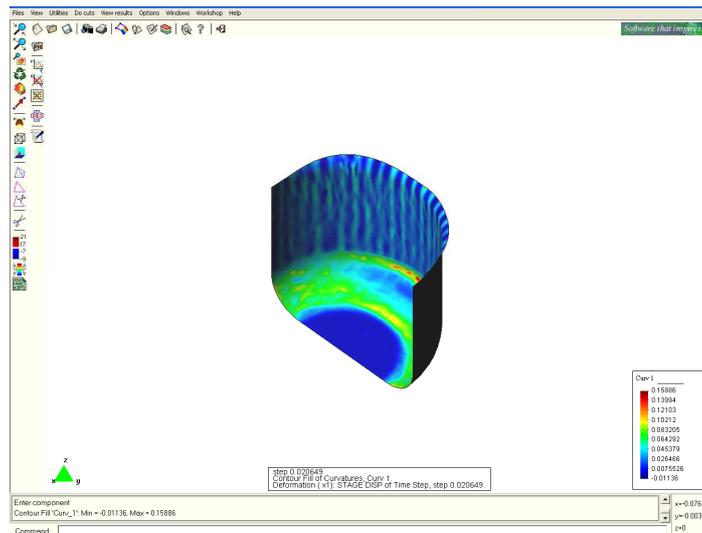


Figura 4. 65 Zonas de curvatura en el proceso inicial de embutición.

El material presenta la zona de la base, como el sector con el doblado más severo en la primera etapa de embutición.

4.3.2.4 Mayor deformación principal en el proceso inicial de embutición

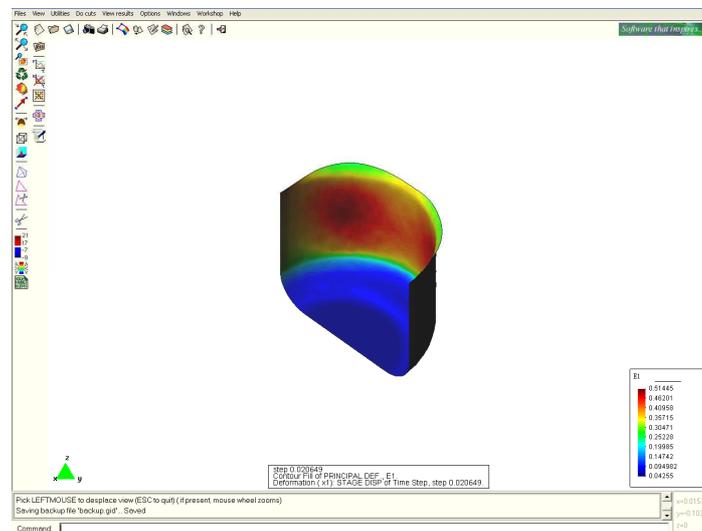


Figura 4. 66 Mayor deformación principal en el proceso inicial de embutición

La figura 4.66 muestra que las mayores deformaciones se generan en la pared lateral del envase con un valor máximo 0.51445 que se encuentra en el inicio de la zona plástica y lejos de la zona de rotura, lo que garantiza que el material no falle, las zonas de color azul presentan mínimas deformaciones debido a que no sufren cambios en su forma.

4.3.2.5 Mapa FLD en el proceso inicial de embutición

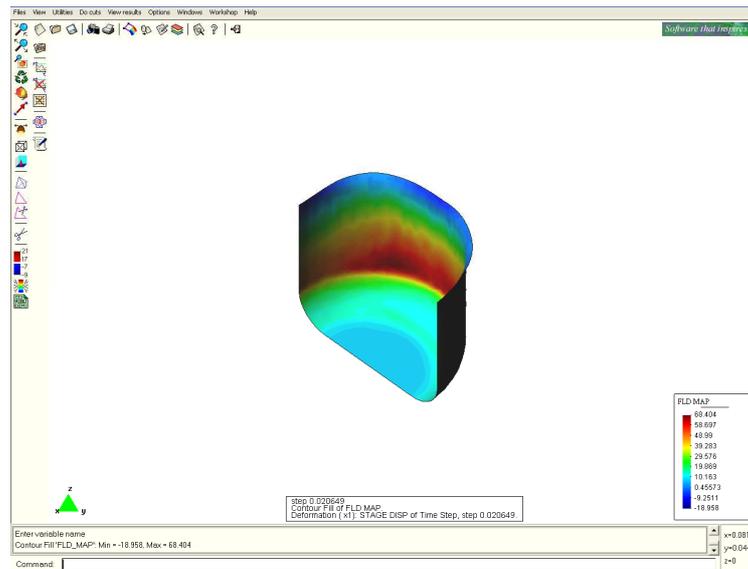


Figura 4. 67 Mapa FLD en el proceso inicial de embutición

La escala que se observa en la figura 4.67 muestra un valor máximo de 68.404 en la pared lateral del envase, esto indica que el material se encuentra por debajo de la Curva Límite de Deformación y que este no presentará fallas una vez realizado el proceso de embutición.

4.3.2.6 Zonas de conformado en el proceso inicial de embutición

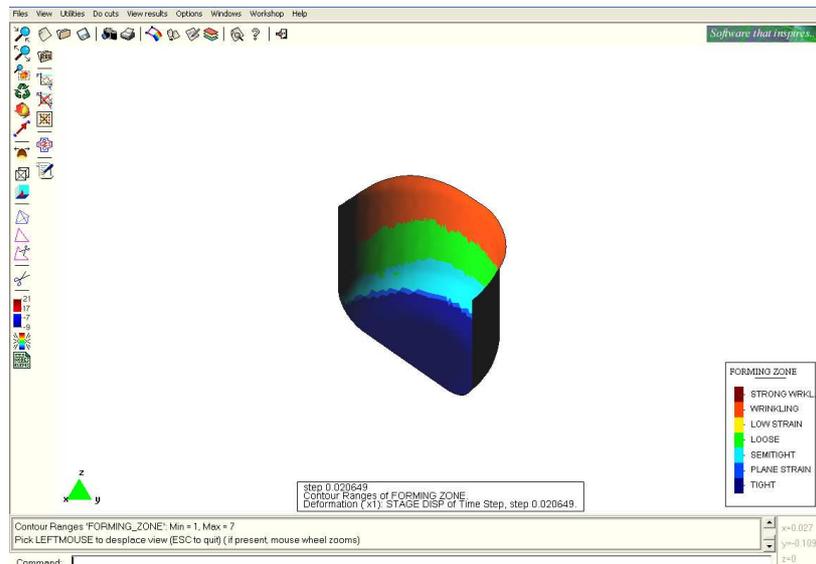


Figura 4. 68 Zonas de conformado en el proceso inicial de embutición.

En la figura 4.68, se muestra la formación de orejas *Wrinkling* en la parte superior del envase, defecto que desaparecerá al aplicar la operación de corte,

además se observa que en la parte del fondo del envase se tiene un adelgazamiento del material.

4.3.2.7 Zonas de seguridad en el proceso inicial de embutición

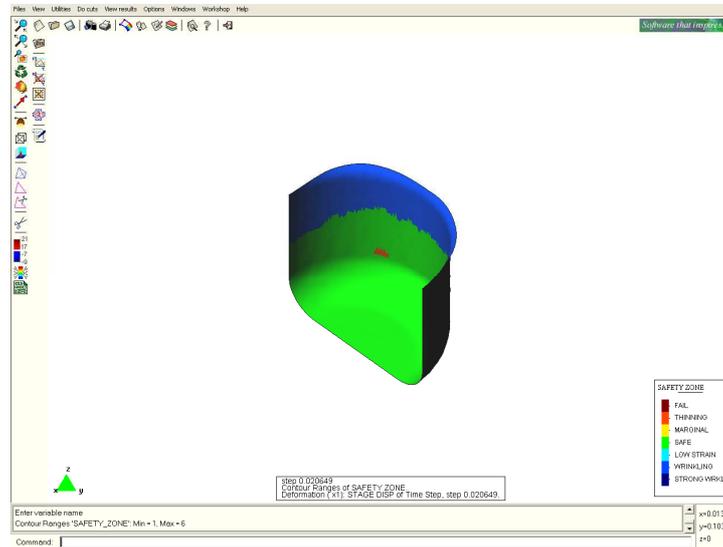


Figura 4. 69 Zonas seguras en el proceso inicial de embutición

La figura 4.69 muestra las zonas seguras en el proceso inicial de embutición, de acuerdo con la escala correspondiente, las paredes laterales se encuentran en una zona segura, mientras el borde superior indica una zona con formación de orejas.

4.3.2.8 Marcas en las herramientas en el proceso inicial de embutición

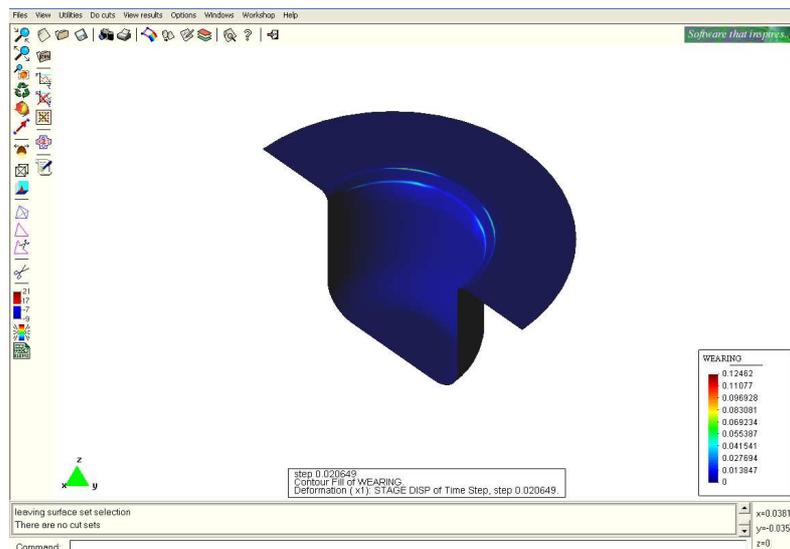


Figura 4. 70 Marcas en las herramientas en el proceso inicial de embutición.

Debido a que el proceso final aplicado al material es una operación tipo *Necking*, el software no permite visualizar las marcas que se pueden generar en las herramientas, ahora, como el proceso en el que se está visualizando los resultados es un proceso *Mechforming*, en la figura 4.70 se muestra las marcas que se pueden presentar en la matriz del primer proceso.

4.3.2.9 Presión del prensachapas en el proceso inicial de embutición

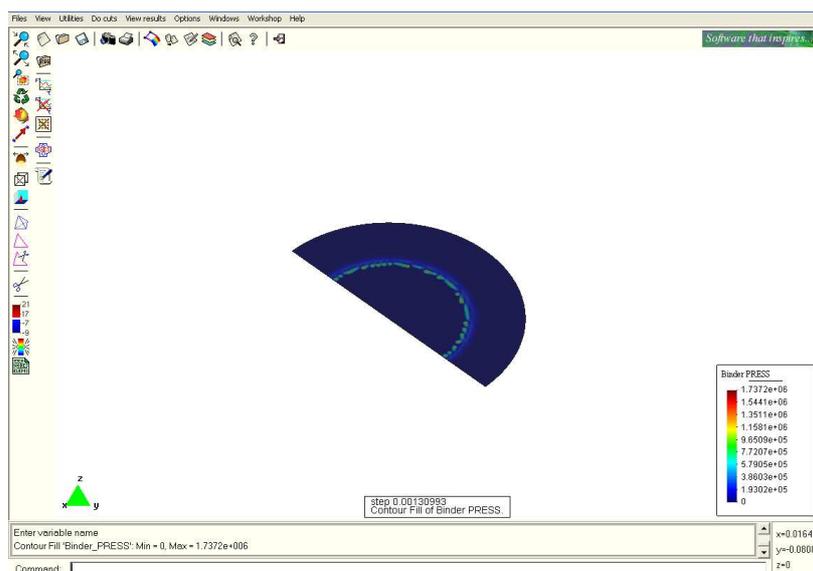


Figura 4. 71 Presión del pensachapas.

La figura 4.71 presenta como se encuentra aplicada la presión del prensachapas sobre el material, de acuerdo con los cálculos realizados y los resultados obtenidos, esta presión es la adecuada para este material, debido a que permite que el material fluya tranquilamente y no presente demasiadas arrugas en el borde.

4.3.2.10 Análisis e interpretación de curvas obtenidas en el proceso inicial de embutición

Para el análisis de los históricos en la primera etapa de embutición, se procede a seleccionar un nodo en la parte inferior del envase, que nos permite examinar como varia el espesor relativo y el desplazamiento que sufre el material en el proceso inicial de embutición.

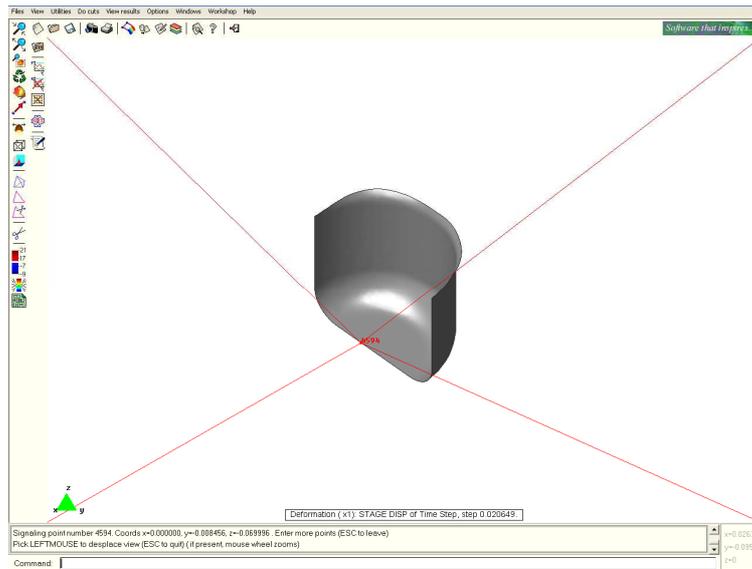


Figura 4. 72 Selección de un nodo para analizar su desplazamiento

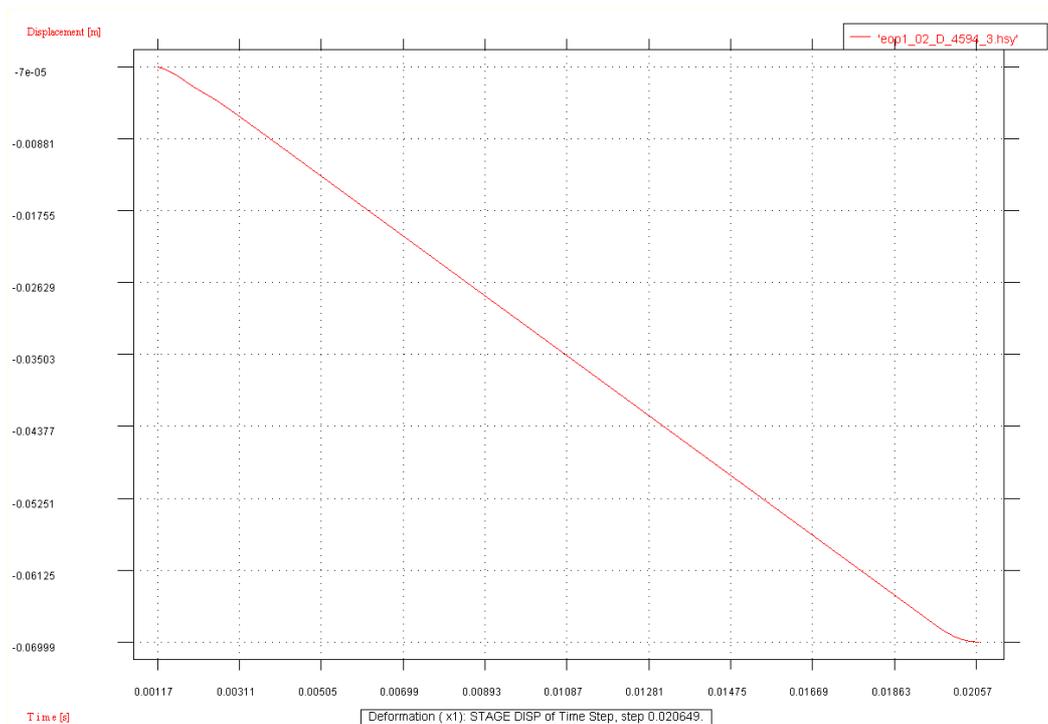


Figura 4. 73 Gráfica Desplazamiento vs. Tiempo

La figura 4.73 muestra el desplazamiento de un nodo en el eje z, se observa que la variación del desplazamiento es de forma lineal con una pendiente constante que demuestra que la velocidad del émbolo es constante, al tratarse de un nodo ubicado en el fondo del envase, el valor del desplazamiento correspondiente a este nodo es igual a la carrera del émbolo.

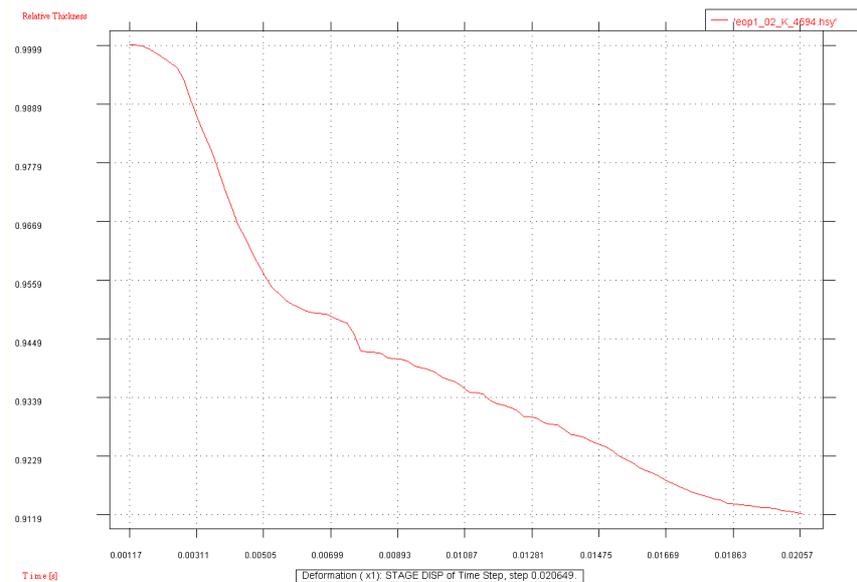


Figura 4. 74 Gráfica Espesor relativo vs. Tiempo

Anteriormente se observó que el espesor soportaba una reducción máxima del 21% en las paredes laterales del envase, la figura 4.74 muestra la variación del espesor en la zona inferior del envase, como se observa, está reducción es constante y tiene un valor máximo del 8%.

Nos interesa conocer la fuerza de contacto que tendrá el émbolo para deformar el material en la primera etapa de embutición, la figura 4.75 muestra como el valor de esta fuerza aumenta de manera constante hasta alcanzar un valor máximo de 42260 N.

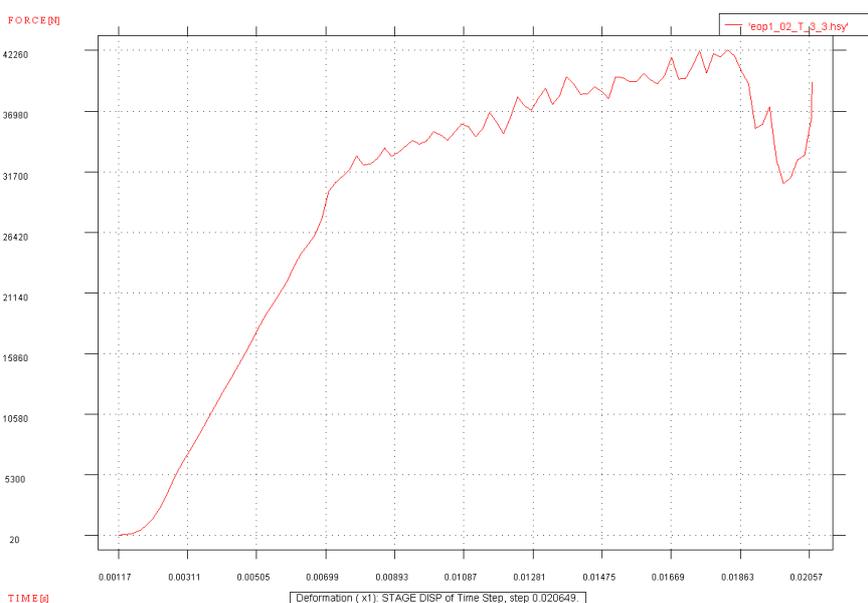


Figura 4. 75 Fuerza total de contacto del émbolo en el proceso inicial de embutición.

Anteriormente se mencionó que para la obtención final del envase se requieren de dos procesos de embutición, a continuación se muestran los resultados obtenidos para el segundo proceso:

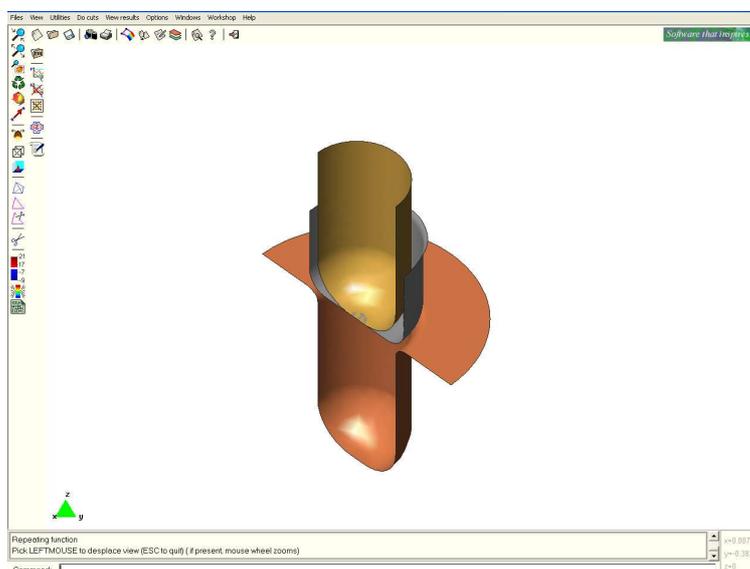


Figura 4. 76 Herramientas utilizadas en el segundo proceso de embutición

La figura 4.76 muestra la chapa conformada en el proceso inicial de embutición y las herramientas que se emplean en el segundo proceso de embutición.

4.3.2.11 Desplazamientos totales en el segundo proceso de embutición

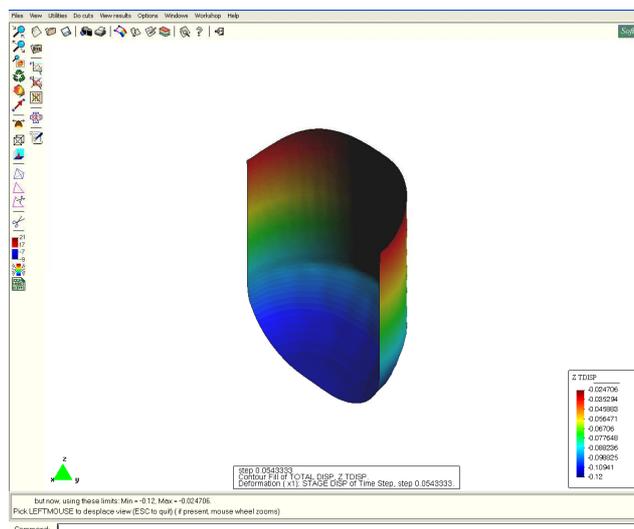


Figura 4. 77 Desplazamientos totales en el segundo proceso de embutición

La escala que se observa en la figura 4.77 muestra la zona final del envase con un desplazamiento total de 120 mm., que concuerda con el desplazamiento que realiza el émbolo en el segundo proceso de embutición.

4.3.2.12 Espesor relativo en el segundo proceso de embutición

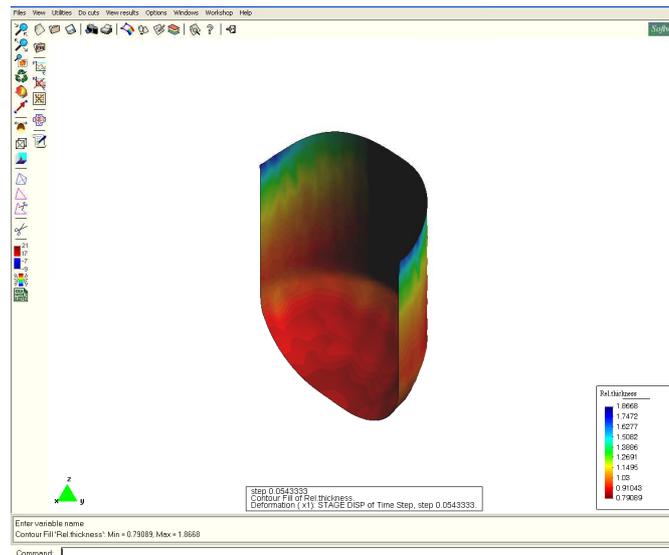


Figura 4. 78 Espesor relativo en el segundo proceso de embutición

La figura 4.78 muestra el espesor que adquiere el material en el segundo proceso de embutición, como se observa este no varía con respecto al obtenido en el proceso inicial de embutición.

4.3.2.13 Mayor deformación principal en el segundo proceso de embutición

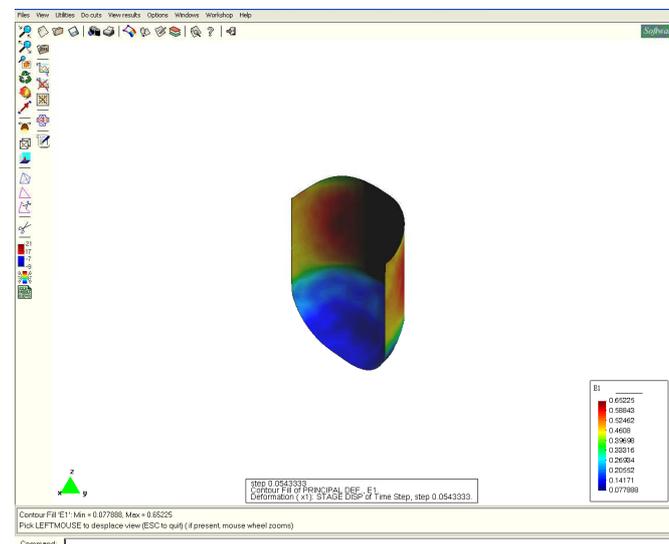


Figura 4. 79 Mayor deformación principal en el segundo proceso de embutición.

En el segundo proceso de embutición se observa un aumento de la deformación hasta un valor máximo de 0.65225 que de igual manera garantiza que el material no falle durante el proceso.

4.3.2.14 Mapa FLD en el segundo proceso de embutición

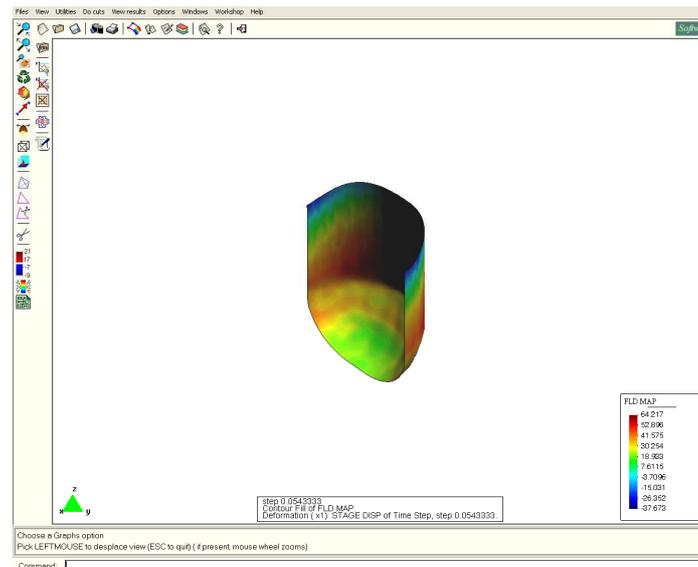


Figura 4. 80 Mapa FLD en el segundo proceso de embutición

La figura 4.80 muestra como se ubica el material, una vez realizado el segundo proceso de embutición con respecto al Diagrama Límite de Formación (FLD), se observa un valor máximo de 64.217 que implica que el material no falle.

4.3.2.15 Zonas de conformado en el segundo proceso de embutición

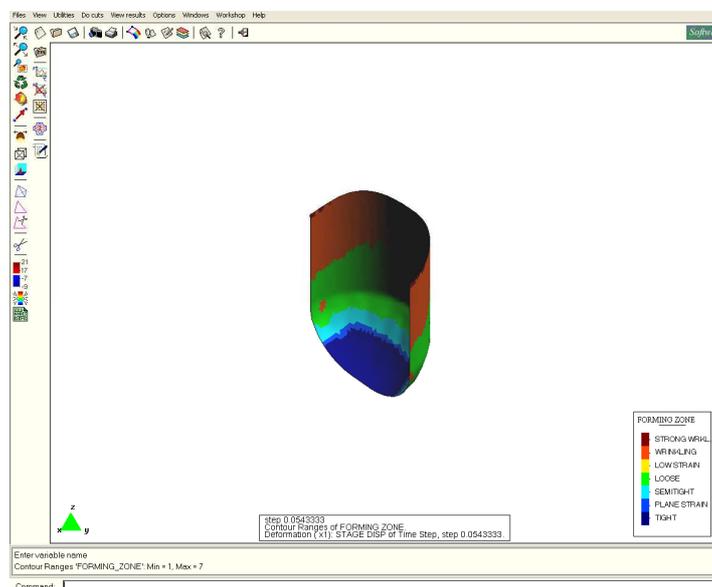


Figura 4. 81 Zonas de conformado en el segundo proceso de embutición

La figura 4.81 muestra, la zona superior del envase con una mayor tendencia a la formación de orejas con respecto al proceso inicial de embutición.

4.3.2.16 Zonas de seguridad en el segundo proceso de embutición

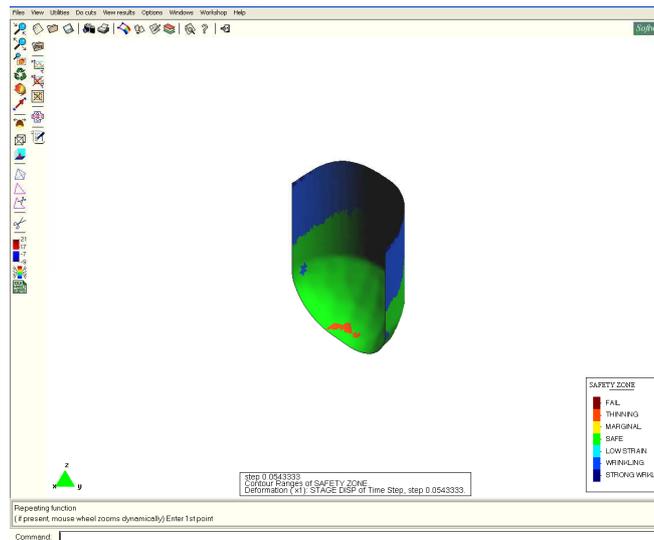


Figura 4. 82 Zonas seguras en el segundo proceso de embutición

En el segundo proceso de embutición el envase no presenta ningún cambio con respecto al proceso anterior, la figura 4.82 muestra que el envase mantiene sus paredes laterales en una zona segura, mientras el borde superior mantiene la zona con formación de orejas.

4.3.2.17 Análisis e interpretación de curvas obtenidas en el segundo proceso de embutición

A diferencia del proceso inicial de embutición, se selecciona un nodo en la zona de curvatura, que nos ayudará a la obtención de los diferentes históricos.

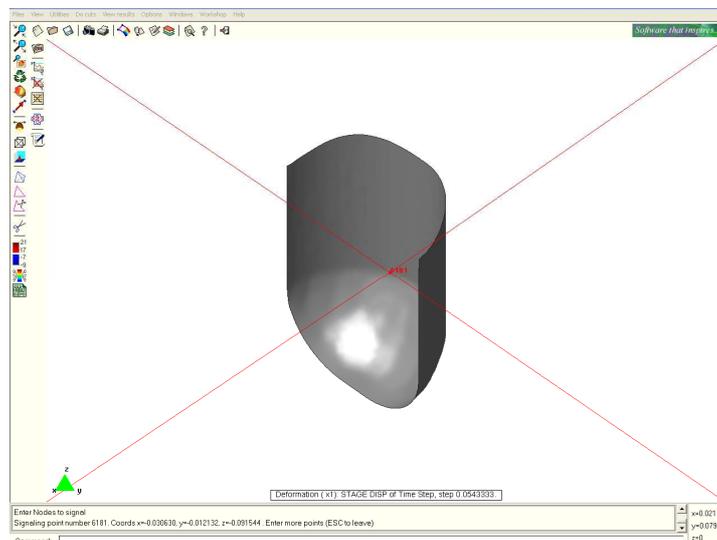


Figura 4. 83 Selección de un nodo en el segundo proceso de embutición

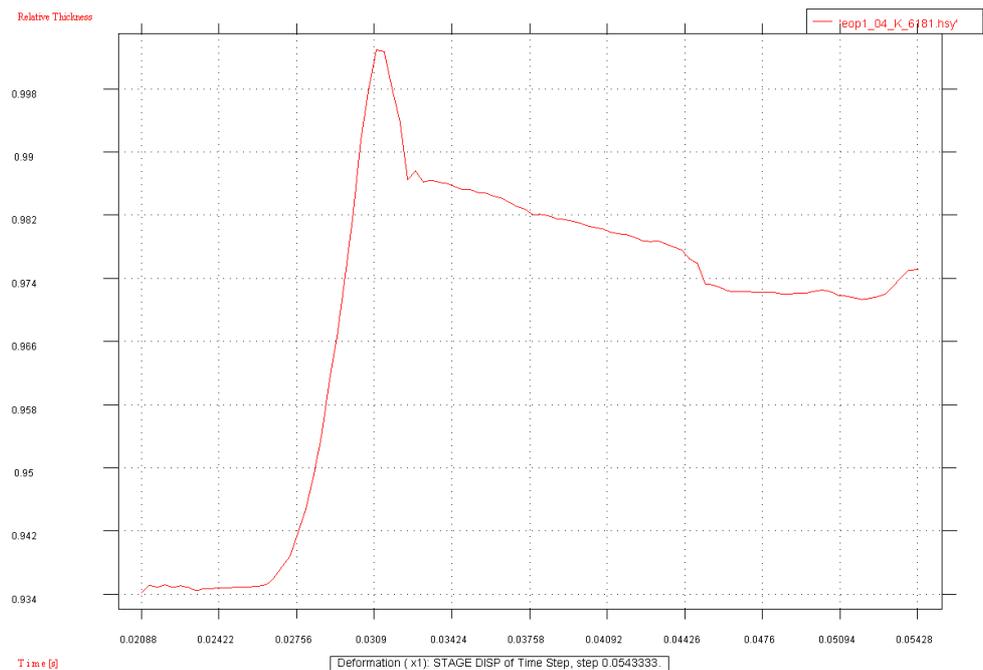


Figura 4. 84 Espesor relativo en el segundo proceso de embutición

La figura 4.84 muestra como varia el espesor relativo en la zona de curvatura, de acuerdo con la figura anterior, el material presenta un engrosamiento del espesor al iniciarse el segundo proceso de embutición, pero con el transcurso del tiempo este tiende a disminuir obteniendo un valor constante.

4.3.3 RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL PROCESO DE ABOMBADO

El proceso de abombado le otorga al envase la forma inferior, que le ayuda a mantener una mejor estabilidad.

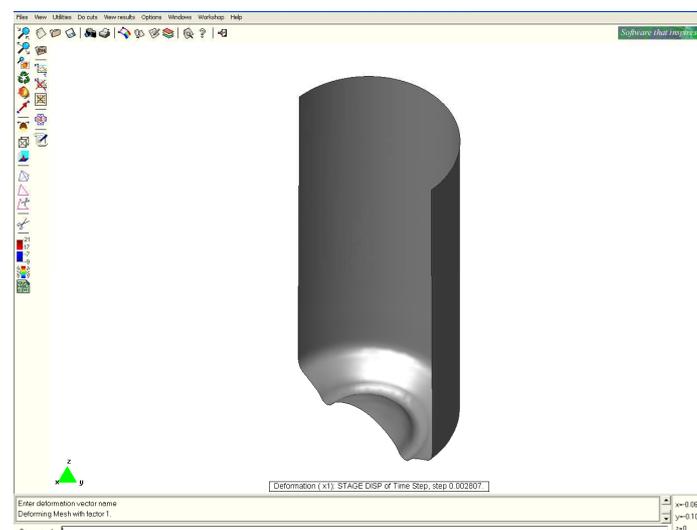


Figura 4. 85 Forma final del envase después de aplicar el proceso de abombado.

En la figura 4.85 se observa la forma que toma el envase en la parte inferior luego de haber aplicado una operación de abombado.

4.3.3.1 Desplazamientos totales en el proceso de abombado

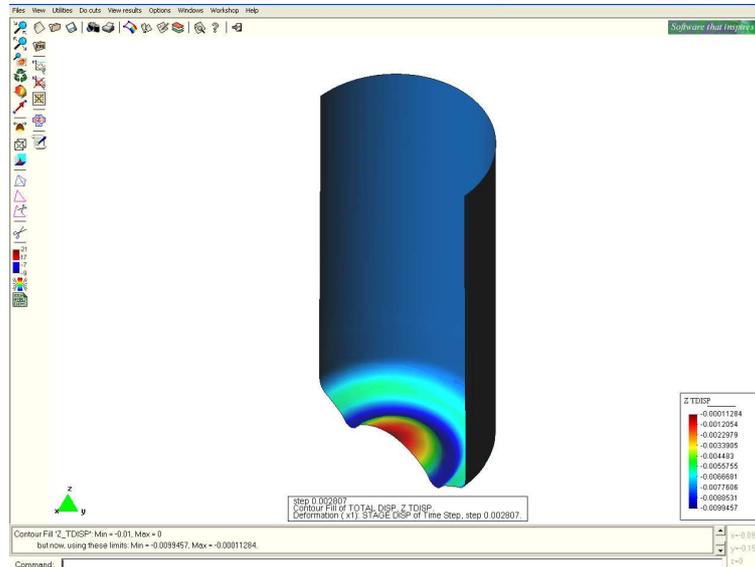


Figura 4. 86 Desplazamientos totales en el proceso de abombado

En la operación de abombado el émbolo realiza un desplazamiento de 10 mm., para conformar la forma inferior del envase, en la figura 4.86 se muestra en color azul el recorrido realizado por el material con un valor máximo de 0.0099457m.

4.3.3.2 Espesor relativo en el proceso de abombado

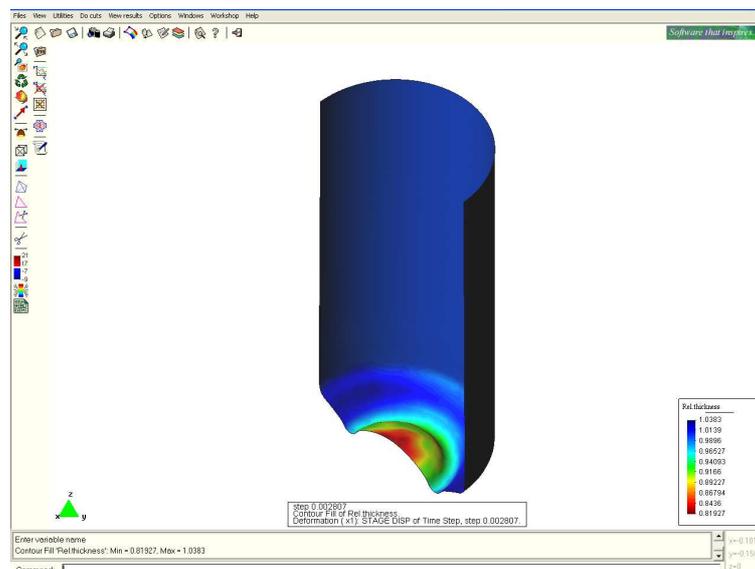


Figura 4. 87 Espesor relativo en el proceso de abombado

La figura 4.87 muestra una reducción del espesor en el centro del envase de aproximadamente un 19%.

4.3.3.3 Mayor deformación principal en el proceso de abombado

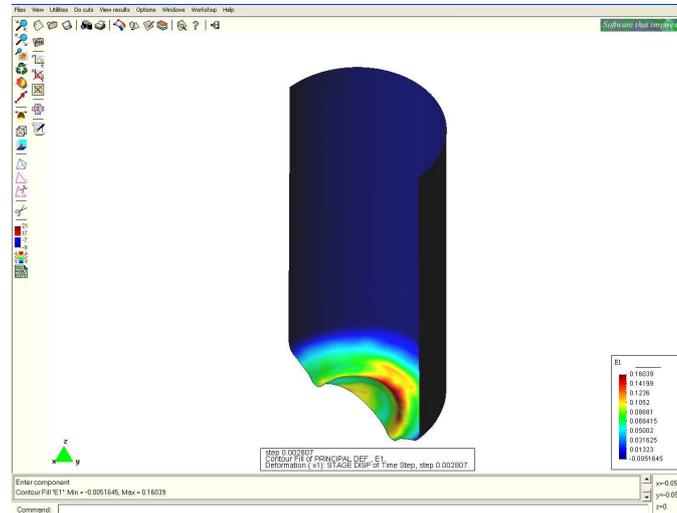


Figura 4. 88 Mayor deformación principal en el proceso de abombado.

El fondo del envase no sufre mayor deformación como lo muestra la figura 4.88 con un valor máximo de deformación de 0.81927, que se encuentra lejos de la zona de rotura.

4.3.3.4 Mapa FLD en el proceso de abombado

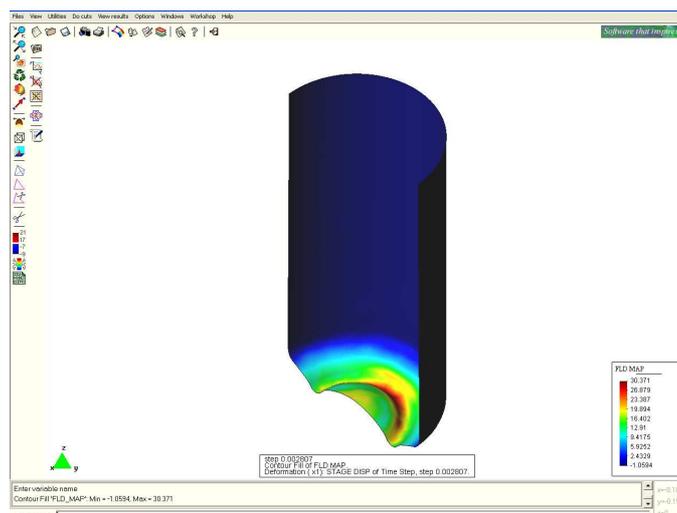


Figura 4. 89 Mapa FLD en el proceso de abombado

La figura 4.89 muestra un valor máximo de 30.271 en la zona inferior del envase, esto sugiere que el material no presentará fallas.

4.3.3.5 Zonas de conformado en el proceso de abombado

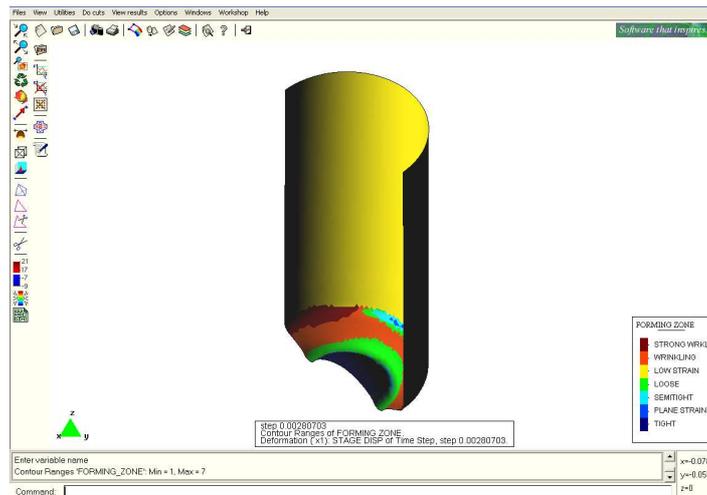


Figura 4. 90 Zonas de conformado en el proceso de abombado

La figura 4.90 muestra las diferentes zonas de conformado que manifiesta el envase en el proceso de abombado, las paredes laterales del envase muestran una baja deformación, en cambio, la zona del fondo exhibe diferentes regiones de conformado, la mayor parte manifiesta la tendencia a una formación de arrugas, mientras, que el redondeado interior se presenta como una zona sin deformación.

4.3.3.6 Zonas seguras en el proceso de abombado

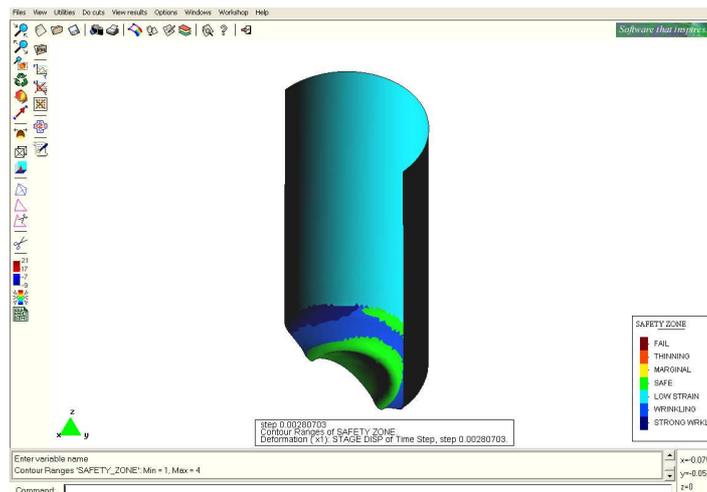


Figura 4. 91 Zonas seguras en el proceso de abombado.

Como se observa en la figura 4.91, el fondo del envase no presentará ninguna falla en el proceso de abombado.

4.3.4 RESULTADOS OBTENIDOS PARA EL PROCESO DE FORMACIÓN DEL CUELLO

El proceso para la obtención del cuello (*Necking*) consiste en utilizar un número definido de etapas de conformado en las que se irá disminuyendo el diámetro del envase hasta alcanzar la forma final.

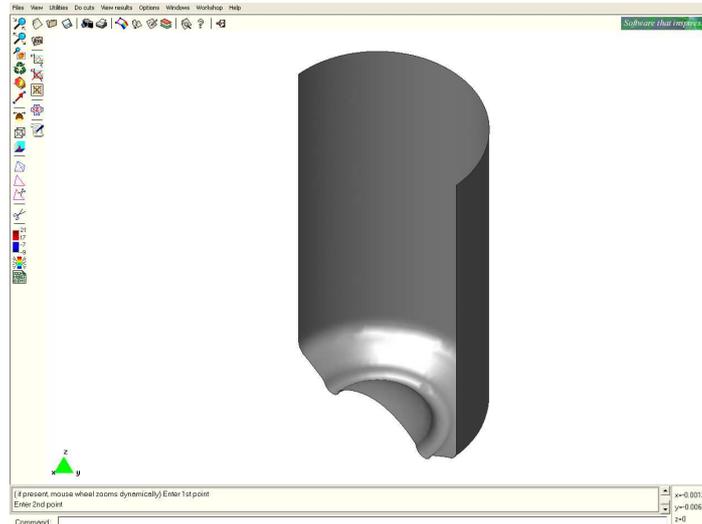


Figura 4. 92 Forma inicial del material para realizar la formación del cuello.

La figura 4.92 muestra la forma inicial que tiene el envase antes de realizar el proceso de formación del cuello.

En cada proceso se utiliza dos tipos de herramientas, una tipo émbolo (*Punch*) y otra tipo matriz (*Die*), las que irán reduciendo el diámetro del envase 1 mm., hasta alcanzar la forma final.

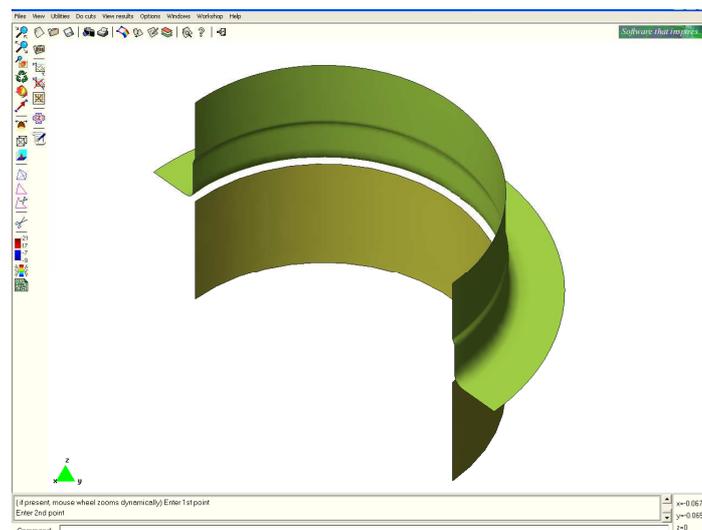


Figura 4. 93 Herramientas utilizadas en el proceso de formación del cuello.

Cada herramienta tipo émbolo debe realizar un recorrido de 25mm. para realizar el conformado sobre el material y obtener la forma deseada en cada etapa.

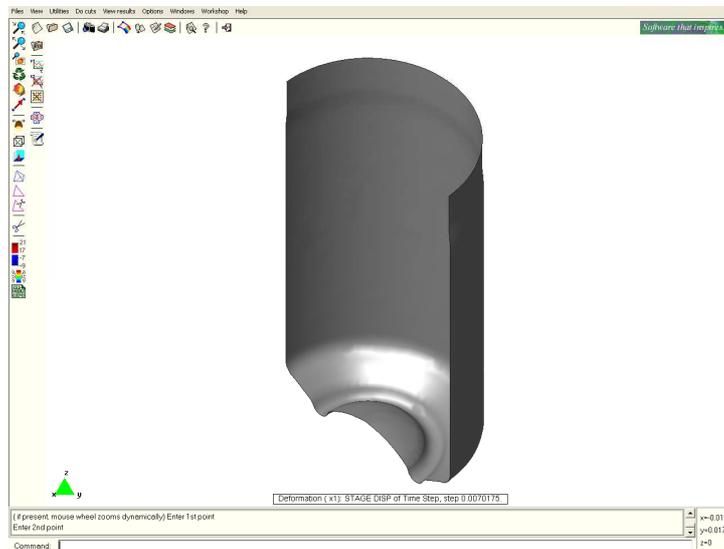


Figura 4. 94 Forma del envase finalizada la primera etapa

La figura 4.94 muestra la forma que obtiene el envase una vez realizada la primera etapa.

El proceso de formación del cuello consta de varias etapas para evitar que en el material se formen esfuerzos muy elevados que pueden ocasionar que este falle. En el presente trabajo se realizaron 15 etapas de conformado con sus respectivas herramientas.

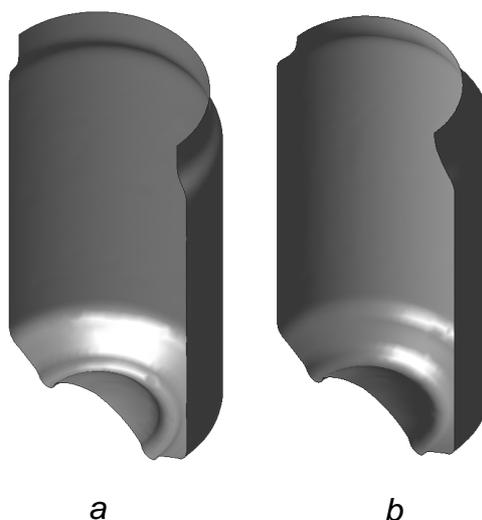


Figura 4. 95 Forma del envase finalizada, a) la séptima etapa, b) la quinceava etapa

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- Un software que utilice el Método de Elementos Finitos como una herramienta de cálculo, permite realizar el tratamiento de una infinidad de datos complicados en el menor tiempo posible, en comparación con el tiempo que llevaría resolver el mismo problema por algún método de cálculo analítico. El software Stampack resuelve una gran cantidad de problemas referente a deformación plástica de la chapa.
- La gran cantidad de programas de diseño, en los cuales el método de elementos finitos es la herramienta de cálculo, permite tanto al estudiante como a la industria alcanzar un nivel de diseño mas elevado, convirtiéndose en una herramienta de apoyo para la innovación de avances tecnológicos.
- El software Stampack permite reducir las pruebas experimentales, evitando el desperdicio de material destinado a pruebas y ensayos. Este ahorro de material nos representa un ahorro en los costos finales del producto terminado, lo cual es muy beneficioso para el mercado nacional.
- El software Stampack permite realizar análisis en zonas críticas de la chapa, debido a que es posible visualizar los resultados en una gama de presentaciones en función del tiempo.
- Es posible realizar variaciones en el proceso de simulación con el fin de observar el comportamiento de la chapa metálica en cada cambio de los parámetros, debido a la facilidad de manejo en el ingreso de los parámetros de diseño. Así tendremos una mejor concepción del proceso de embutición, además de permitirnos obtener los mejores resultados

para poderlo transportar a herramientas reales y obtener envases con el menor número de fallas.

- En cuanto a costos de adquisición del software, resulta relativamente costoso en un principio. Sin embargo, debido al gran alcance que posee, por un sin número de aplicaciones que ofrece el software a más de la facilidad de manejo, resulta muy conveniente adquirirlo, tanto para educación a nivel universitario como para la industria, incluso resulta muy conveniente tener acuerdos entre universidad e industria, así se beneficiarían ambas partes.
- La adquisición del software STAMPACK por parte de la Maestría en Materiales, Diseño y Producción, permite a los estudiantes simular diferentes procesos de formado de la chapa metálica, siendo una herramienta de apoyo necesaria para el estudiante, ya que le permite incursionar en los diferentes tipos de estampado, y poder ingresar al mercado manufacturero en deformación plástica mediante la aplicación de algún proceso de estampado que el software posee.
- Es importante que la universidad reconozca la importancia de los proyectos relacionados con este tipo de paquetes computacionales y se interese por su desarrollo, ya que la aplicación de este y otros programas, brindarán un valor agregado en la formación profesional de los estudiantes de la Escuela Politécnica Nacional, ofreciendo así una ventaja competitiva con respecto a otras universidades del país.

5.2 RECOMENDACIONES

- Es muy recomendable realizar continuos estudios de aplicación de este software en los distintos procesos de conformado mecánico, con el fin de aprovecharlo a toda su capacidad.

- La universidad debe crear cursos acerca del manejo del software dirigido a estudiantes y profesores, con el fin de familiarizarse con su ambiente y poder generar nuevas e innovadoras respuestas a problemas de ingeniería.
- Se recomienda realizar convenios universidad-industria, con el fin de obtener soluciones a problemas reales de la industria ecuatoriana, así el estudiante se encuentra familiarizado con las vivencias reales que ocurren a nivel industrial. Además, obtener beneficios económicos tanto para la universidad como para la industria.
- Es recomendable realizar una serie de simulaciones, con el fin de obtener la menor cantidad de errores posibles. Esto es posible gracias a que el software permite variar todo parámetro de geometría así como de diseño.
- Se recomienda que la Carrera de Ingeniería Mecánica utilice este software y muchos otros que existen en el mercado, para ser empleados en la solución de problemas referentes a las materias de carrera ya sean tradicionales u optativas a lo largo de la formación universitaria.

BIBLIOGRAFÍA

- ROSSI MARIO. Estampado en Frío de la Chapa. Novena Edición. Ed. Dossat. España, 1979.
- MANGONON PAT L. Ciencias de Materiales: Selección y Diseño. Primera Edición. Ed. Pearson Educación. México, 1999.
- NAVARRO LOPEZ T. Troquelado y Estampación. Quinta Edición Ampliada, Ed. Gustavo Gili, S.A. Barcelona, 1976.
- OEHLER-KAISER. Herramientas de Troquelar, Estampar y Embutir. Ed. Gustavo Gili, S.A. Barcelona, 1977.
- POPOV P. Mecánica de Sólidos. Segunda Edición. Ed. Pearson Educación. México, 2000.
- FIONN DUNNE-NIK PETRIC. Introduction to Computational Plasticity. Oxford University Press. New York, 2005.
- CEVALLOS J. Determinación de las Curvas Límites de Deformación en Chapas de Aluminio de Fabricación Local. Quito. EPN. Tesis, 1982.
- MALLA C., RICARDO S. Aplicación del Método de Elementos Finitos en Procesos de Estampado Utilizando el Programa Computacional Stampack, Quito, EPN, Tesis, 2006
- LIVESLEY R. Elementos Finitos: Introducción para Ingenieros. Limusa. México, 1994.

INTERNET

- http://www.lacan.upc.es/research/fundamentals/mesh_generation/index.html
- <http://www.dim.udec.cl/cursos/elefin/practico/index.htm>
- <http://aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=9&pageid=1005920572>
- <http://www.madehow.com/Volume-2/Aluminum-Beverage-Can.html>
- <http://www.powerultrasonics.com/chapter1.html>
- <http://www.w3.org/1999/xhtml>
- http://images.google.com.ec/imgres?imgurl=http://www.kobelco.co.jp/english/onlyone/005/fig01.gif&imgrefurl=http://www.kobelco.co.jp/english/onlyone/005/1174838_3011.html
- <http://www.steeluniversity.org/content/html/spa/default.asp?catid=18&pageid=2081271357>
- <http://www.ganoksin.com/cycle/adclick.cgi?manager=adcycle.com&gid=3&id=2145>
- <http://www.aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=188&pageid=2144416748>
- <http://www.aluminium.matter.org.uk/content/html/eng/default.asp?catid=9&pageid=1005920572>
- http://www.ball-europe.com/382_365_ENG_PHP.html
- <http://www.twinplex.com/faq.html>
- <http://www.dim.udec.cl/cursos/pdp/embutido/embutido1.htm>
- <http://www.dim.udec.cl/cursos/pdp/embutido/fuerza1/fuerza1.htm>
- <http://www.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA3104H19>
- <http://www.metalfforming-inc.com/Publications/Papers/ref133/ref133-p4.htm>
- http://www.stampack.com/picture_multistamp.htm
- <http://xture.rexam.com/xture/api/rexam5/?p=browse2.htm&SB=618310>
- <http://www.twinplex.com/metal-cans.html>

ANEXOS

ANEXO 1
PROCEDIMIENTOS DE PRUEBA PARA LA CHAPA METÁLICA EN EL
PROCESO DE EMBUTICIÓN

Procedimientos de prueba para la chapa metálica en el proceso de embutición

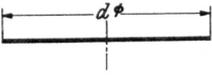
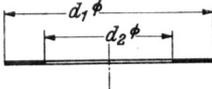
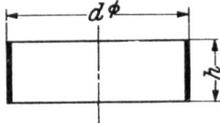
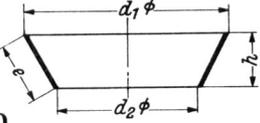
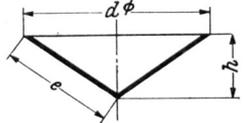
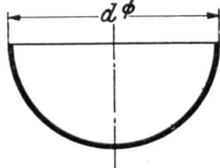
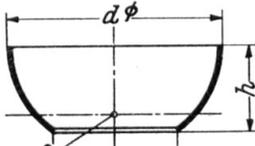
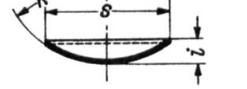
Nº	Tipo de prueba y designación	Particularidades del Procedimiento	DIN
a) Para una situación puramente de estirado (piezas embutidas planas no cilíndricas; como por ejemplo de carrocería)			
1	Procedimiento de abollado	Un émbolo con la punta redondeada en forma esférica aprieta contra una muestra de chapa sujeta, de manera que se forme una abolladura. La profundidad de esta abolladura cuando se produce la rotura, la forma de esta y la estructura externa de la misma, es decir la denominada granulación, sirven de referencia para determinar la calidad con este procedimiento, de sencilla realización.	50101 50102 1623 Euronorm 14-58
1.1	Émbolo esférico contra anillo fijo	Tiene mucha influencia el grado de engrase y la aspereza superficial. Se emplea un aparato de prueba de chapa construido por Ericksen	-
1.2	Émbolo esférico contra colchón de goma	Menos indicado para determinar la calidad de la chapa que la de la goma. Se emplea un aparato para verificar la goma por presión construido por Junkers.	-
1.3	Émbolo esférico contra bolsa de goma	No se obtienen condiciones claras de rotura. El aparato comprobador utilizado es el de Mullen	-
1.4	Abombado hidráulico	Percusión hidráulica directa de la chapa	-
2	Prueba de estirado de Güth	Una tira de chapa no curvada, con los dos extremos fijados en la parte inferior de una máquina para efectuar ensayos de rotura, presiona desde abajo hacia arriba, contra un rodillo o bloque conformado, el cual va fijado a la parte superior, hasta que se produce la rotura. La altura y la amplitud de abollado son la referencia de calidad para determinar la capacidad de estirado.	-
3	Prueba de rotura por embutición, de Siebel	Un émbolo en forma de disco presiona contra una tira fijada por su contorno y que presenta dos ranuras paralelas. La presión se ejerce en la zona comprendida entre las dos ranuras, hasta que se produce la rotura.	-
4	Prueba de rotura	Las barras a utilizar en la prueba son las especificadas en la norma DIN 1605 y 50114, pero no deben estamparse. Para determinar la calidad de la chapa en lo que se refiere a su aptitud para la embutición, es más importante la contracción transversal que el alargamiento.	50143 50144 50145 50146 Euronorm 11-55

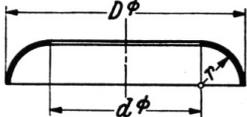
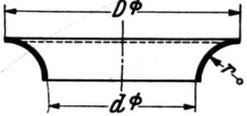
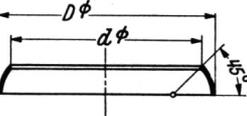
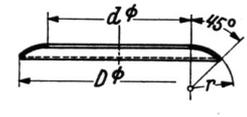
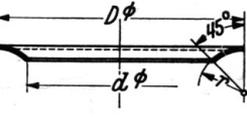
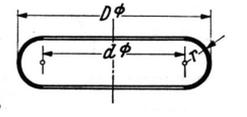
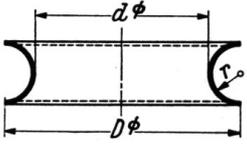
Nº	Tipo de prueba y designación	Particularidades del Procedimiento	DIN
b) Para solicitaciones de recalado (piezas embutidas cilíndricas y las que tienen paredes laterales verticales)			
5	Prueba de embutición de una capsula (también denominada prueba de escalonado y procedimiento AEG)	Se embuten recortes con distintos diámetros D, obteniéndose en todos los casos cápsulas con igual diámetro de embutición d. La mayor relación de de embutición D:d con la que no se produce rotura es la referencia para determinar la calidad de la chapa por lo que atañe a su embutición.	-
5.1	Prueba de embutición de una cápsula, según Swift	Con el émbolo dispuesto en la parte inferior provista de placa portaémbolos intercambiable, se embuten las muestras con fondo plano y con fondo semiesférico.	-
5.2	Prueba de embutición de una cápsula, según Engelhardt	Al embutir, se determinan las fuerzas de embutición y, seguidamente, después que se ha elevado la presión del prensachapas, se miden cuando se rompe la pared lateral	-
6	Prueba de embutición de una cápsula por percusión única según Petrasch	Se realiza la prueba bajo la acción de un martinete de caída y se determina seguidamente el ensanchamiento sufrido por el canto. Adecuada, para determinar si una chapa es apropiada para la embutición en varias fases y para la tendencia al envejecimiento.	-
7	Prueba de embutición con cuña, según Sachs	El extremo en forma de cuña de una tira de chapa se embute a través de una tobera de estirado. La referencia de calidad la da la relación de amplitud máxima alcanzable hasta que se produce la rotura. Véase también el procedimiento combinado.	-
8	Procedimiento combinado (Punügel Kayseler y Einsenkolb)	Formación de abolladuras tipo Erichsen en la pared lateral o en la parte deformada de la tira de chapa embutida con el procedimiento de verificación escalonado. Este procedimiento, todavía no muy conocido, permite la determinación de la idoneidad de la chapa para sufrir embuticiones sucesivas y, a veces, también para conocer su tendencia al envejecimiento.	-
c) Aplicable para ambos casos definidos en a) y b)			
9	Prueba de ensanchado del agujero, según Siebel-Pomp	En recortes redondos el agujero inicial tiene un diámetro d_0 ; el diámetro ensanchado es $0.5 (d_{m\acute{a}x} + d_{m\acute{i}n})$, y la profundidad t. Según Oehler, el grado de calidad es: $g = \frac{t \cdot (d_{m\acute{a}x} - d_{m\acute{i}n})^2}{4d_0 \cdot (d_{m\acute{a}x} + d_{m\acute{i}n})^2}$	-
10	Prueba de ensanchado, según Fukui	Se coloca un recorte redondo como los descritos en 9 en una matriz cónica con fondo en forma de segmento esférico. Se embute con émbolo de punta esférica.	-
11	Prueba de plastizometría	Aplicable para solicitaciones puramente de tracción y también de recalado y tracción, conjuntamente con pruebas metalgráficas y de rayos X. Solo adecuada para trabajos de investigación, y no para talleres.	-

ANEXO 2

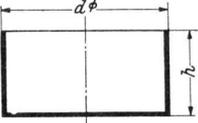
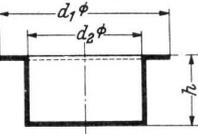
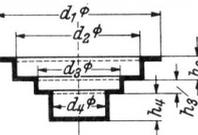
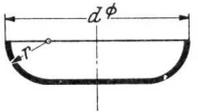
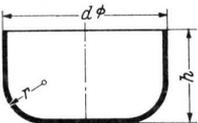
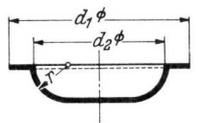
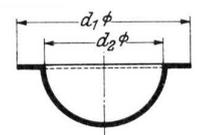
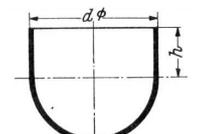
ELEMENTOS DE SUPERFICIE PARA EL CÁLCULO DEL DESARROLLO

Elementos de superficie para el cálculo del desarrollo

Elementos de superficie	Área F	$\frac{4}{\pi} \cdot F$
A 	$\frac{\pi}{4} \cdot d^2$	d^2
B 	$\frac{\pi}{4} \cdot (d_1^2 - d_2^2)$	$d_1^2 - d_2^2$
C 	$\pi \cdot d \cdot h$	$4 \cdot d \cdot h$
D 	$\frac{\pi \cdot e}{2} \cdot (d_1 + d_2)$ $= \frac{\pi \cdot (d_1 + d_2)}{2} \cdot \sqrt{h^2 + \frac{(d_1 - d_2)^2}{4}}$	$2e \cdot (d_1 + d_2)$ $= 2 \cdot (d_1 + d_2) \cdot \sqrt{h^2 + \frac{(d_1 - d_2)^2}{4}}$
E 	$\frac{\pi \cdot d \cdot e}{2} = \frac{\pi \cdot d}{2} \cdot \sqrt{\frac{d^2}{4} + h^2}$	$2 \cdot d \cdot e = 2 \cdot d \cdot \sqrt{\frac{d^2}{4} + h^2}$
F 	$\frac{\pi \cdot d^2}{2}$	$\pi \cdot d^2$
G 	$\pi \cdot d \cdot h$	$4 \cdot d \cdot h$
H 	$\pi \cdot d \cdot i = 2 \cdot R \cdot i \cdot \pi$ $= \frac{\pi}{4} \cdot (s^2 + 4i^2)$	$4 \cdot d \cdot i = 8 \cdot R \cdot i \cdot \pi = s^2 + 4i^2$

Elementos de superficie	Área F	$\frac{4}{\pi} \cdot F$
I 	$\frac{\pi^2 \cdot r}{2} \cdot (d + 1.3 r)$ $= \frac{\pi^2 \cdot r}{2} \cdot (D - 0.7 r)$	$2 \pi \cdot r \cdot (d + 1.3 r)$ $= 2 \pi \cdot r \cdot (D - 0.7 r)$
K 	$\frac{\pi^2 \cdot r}{2} \cdot (d + 0.7 r)$ $= \frac{\pi^2 \cdot r}{2} \cdot (D - 1.3 r)$	$2 \pi \cdot r \cdot (d + 0.7 r)$ $= 2 \pi \cdot r \cdot (D - 1.3 r)$
L 	$\frac{\pi^2 \cdot r}{4} \cdot (d + 0.4 r)$ $= \frac{\pi^2 \cdot r}{2} \cdot (D - 0.2 r)$	$\pi \cdot r \cdot (d + 0.4 r)$ $= \pi \cdot r \cdot (D - 0.2 r)$
M 	$\frac{\pi^2 \cdot r}{4} \cdot (d + 0.74 r)$ $= \frac{\pi^2 \cdot r}{2} \cdot (D - 0.68 r)$	$\pi \cdot r \cdot (d + 0.74 r)$ $= \pi \cdot r \cdot (D - 0.68 r)$
N 	$\frac{\pi^2 \cdot r}{4} \cdot (d + 0.2 r)$ $= \frac{\pi^2 \cdot r}{2} \cdot (D - 0.4 r)$	$\pi \cdot r \cdot (d + 0.2 r)$ $= \pi \cdot r \cdot (D - 0.4 r)$
O 	$\frac{\pi^2 \cdot r}{4} \cdot (d + 0.68 r)$ $= \frac{\pi^2 \cdot r}{4} \cdot (D - 0.74 r)$	$\pi \cdot r \cdot (d + 0.68 r)$ $= \pi \cdot r \cdot (D - 0.74 r)$
P 	$\pi^2 \cdot r \cdot d$	$4 \cdot \pi^2 \cdot r \cdot d$
Q 	$\pi^2 \cdot r \cdot (d + 1.27 r)$ $= \pi^2 \cdot r \cdot (D - 0.73 r)$	$4 \cdot \pi \cdot r \cdot (d + 1.27 r)$ $= 4 \cdot \pi \cdot r \cdot (D - 0.73 r)$
R 	$\pi^2 \cdot r \cdot (d + 0.73 r)$ $= \pi^2 \cdot r \cdot (D - 1.27 r)$	$4 \cdot \pi \cdot r \cdot (d + 0.73 r)$ $= 4 \cdot \pi \cdot r \cdot (D - 1.27 r)$

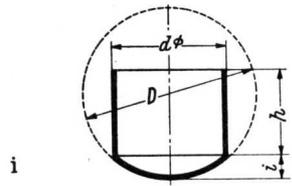
Diámetro D de los discos de chapa necesarios para obtener diversas formas de recipientes.

Forma del recipiente	ϕ del disco de chapa = $\sqrt{\frac{4}{\pi} \cdot F}$	Elementos
a 	$\sqrt{d^2 + 4dh}$	A + C
b 	$\sqrt{d_1^2 + 4d_2h}$	A + C + B = A1 + C
c 	$\sqrt{d_1^2 + 4(d_2h_2 + d_3h_3 + d_4h_4)}$	A + C + B + C + B + C + B = A1 + C2 + C3 + C4
d 	$\sqrt{(d - 2r)^2 + 2\pi r(d - 0.7r)}$	A + J
e 	$\sqrt{(d - 2r)^2 + 4d(h - r) + 2\pi r(d - 0.7r)}$	A + C + J
f 	$\sqrt{d_1^2 - d_2^2 + (d_2 - 2r)^2 + 2\pi r(d_2 - 0.7r)}$	A + J + B
g 	$\sqrt{d_1^2 + d_2^2}$	F + B
h 	$\sqrt{2d^2 + 4dh}$	F + C

Elementos de superficie

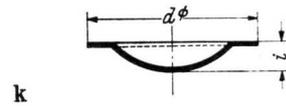
Área F

$$\frac{4}{\pi} \cdot F$$



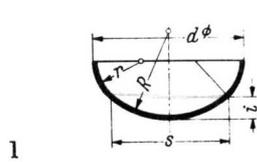
$$\sqrt{4dh + 4Di} \quad \text{o} \quad \sqrt{4dh + d^2 + 4i^2}$$

$$H + C$$



$$\sqrt{d^2 + 4i^2}$$

$$H + B$$

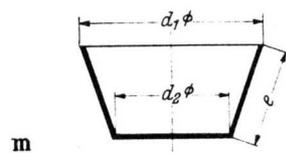


$$\sqrt{8 \cdot R \cdot i + \pi r (d - 0.2 r)}$$

o

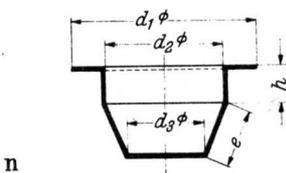
$$\sqrt{s^2 + 4i^2 + \pi r (d - 0.2 r)}$$

$$H + L$$



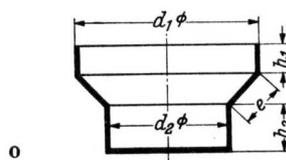
$$\sqrt{d_2^2 + 2e(d_1 + d_2)}$$

$$A + D$$



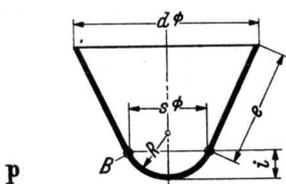
$$\sqrt{d_2^2 + 2e(d_2 + d_3) + 4d_2 h + d_1^2 - d_2^2}$$

$$A + D + C + B$$



$$\sqrt{d_2^2 + 4d_2 h_2 + 2e(d_1 + d_2) + 4d_1 h_1}$$

$$A + C + D + C$$



$$\sqrt{8 \cdot R \cdot i + 2e(d + s)}$$

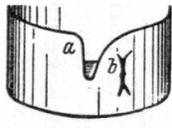
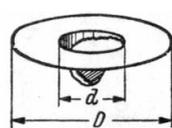
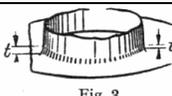
o

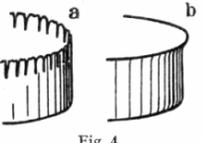
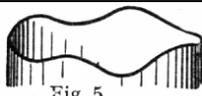
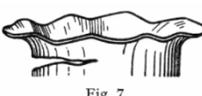
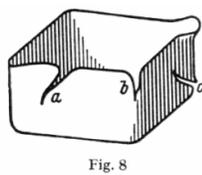
$$\sqrt{s^2 + 4i^2 + 2e(d + s)}$$

$$H + D$$

ANEXO 3
DEFECTOS ENCONTRADOS EN LA CHAPA METÁLICA DURANTE EL
PROCESO DE EMBUTICIÓN

Defectos encontrados en la chapa metálica durante el proceso de embutición

N°	Características externas y aspecto del defecto	Motivo del defecto	Medidas para evitar los defectos	
1	 <p style="text-align: center;">Fig. 1</p>	Líneas de fluencia (Líneas Lüders)	Demasiado tiempo de almacenaje; transporte o almacenamiento con calor excesivo	Embutir rápidamente sin esperar; almacenar en sitio frío
2		Líneas de fluencia con rotura	Relación de estirado demasiado grande	Pedir un acero de límite de elasticidad menor
3		Retroceso elástico	Relación r_M / s demasiado grande	Menor radio de la arista de embutición, o cambiar el diseño
4		a) Rotura unilateral o pequeñas roturas transversales (véase la rotura (a) en las figuras 1 y 8 de esta tabla)	Aumento de grosor de aspecto nudoso, zonas incompletas o cuerpos extraños ocluidos	Tomar una chapa más idónea, o bien, realizar un almacenaje más limpio; quizás este desgastada la arista de embutición
5		b) Pliegues de aspecto (fig. 1)	Pequeños agujeros en el material	Aparece muy raramente; tómese una chapa más gruesa
6		c) Poco después de iniciarse la formación de la pared lateral, se desprende el fondo, quedando unido solamente por un lado (fig. 2)	Corrosión originada por ensiones, principalmente en el latón con un contenido de Zn del 63% y más	Revenido para eliminar esfuerzos, a 250° - 300° C. Mayor contenido de Cu
7	 <p style="text-align: center;">Fig. 2</p>	Poco después de iniciarse la formación de la pared lateral, se desprende el fondo, quedando unido solamente por un lado (fig. 2)	Colocación descentrada del recorte.	Comprobar la posición de la clavija de colocación del recorte, en la parte inferior
8		a) La brida de chapa es ancha por una parte y estrecha por la parte opuesta	Espesor desigual de la chapa	Comprobar la tolerancia del espesor de la chapa de acuerdo con la norma DIN
9		b) La brida de chapa es más ancha de lo normal en dos zonas enfrentadas		
10		c) Brida de chapa de anchura uniforme	El escalonado de embuticiones previsto es excesivo y no corresponde a la idoneidad del material para la embutición	Tomar un material de embutición de mejor calidad. Escalonado más estrecho
11		d) Huellas de compresión intensas, en comparación con la constitución del fondo, en la parte inferior rasgada de la superficie de la pared lateral	El émbolo se desplaza en posición descentrada respecto al aro de la matriz	Variación en el ajuste de la matriz
11	 <p style="text-align: center;">Fig. 3</p>	Las huellas de compresión en el borde de la pared lateral presentan en las zonas opuestas (t) e (i), distinta altura (fig. 3)	El émbolo está inclinado respecto al aro de embutición	Este inconveniente se evita en las matrices con columna de guía

N°	Características externas y aspecto del defecto	Motivo del defecto	Medidas para evitar los defectos	
12	 <p>Fig. 4</p>	El fondo se desgarr por todo el contorno, sin que se forme pared lateral	Elegir correctamente el redondeado de la arista de embutición y del émbolo, el ancho del juego, la velocidad de embutición, la presión del pisón prensachapas y el escalonado de las embuticiones.	
13		El borde de la pared lateral presenta flecos con pliegues verticales (fig. 4a); o formación de labios (fig. 4b)		a) Huelgo de embutición demasiado grande b) Redondeado de la arista de embutición demasiado grande c) Presión del prensachapas demasiado pequeña
14	 <p>Fig. 5</p>	Formación de sinuosidades en el borde a) Sinuosidades formadas a 90° una de otra (fig. 5)	Estos efectos pueden evitarse eligiendo un producto de engrase correcto, siempre que no pueda eliminarse directamente la causa que origina el efecto	
15		b) Formación irregular de sinuosidades		Espesor desigual de la chapa
16	 <p>Fig. 6</p>	Formación de sopladuras en el borde del fondo (fig. 6); a veces también se abomba el fondo	a) Mala expulsión de aire b) Arista de embutición muy desgastada	
17	 <p>Fig. 7</p>	En una embutición casi correctamente conseguida aparece una brida con pliegues y con fisuras debajo que, en la mayoría de los casos, son horizontales (fig. 7)	a) Presión del prensachapas demasiado pequeña b) Juego de embutición demasiado estrecho c) Redondeado del borde con radio excesivamente Grande	
18		Vestigios de presión h lustrosos	Juego de embutición demasiado estrecho	
19		Formación de labios (como en la fig. 4b) con pared lateral abombada	Juego de embutición demasiado grande	Modificar el ancho del juego Redondeado parabólico del émbolo
20		Estrangulamiento por encima del borde del fondo		
21	 <p>Fig. 8</p>	En embuticiones de sección cuadrangular (fig. 8) a) Fisura en el centro b) Fisura vertical en la esquina, partiendo del borde c) Fisura en la esquina que se inicia casi horizontalmente	En piezas cuadrangulares, en forma ovalada u de otras formas no redondeadas, cuando se repiten a menudo las piezas defectuosas, ha de atribuirse, la mayoría de las veces al diseño de la pieza; en b) escasez de material; en c) acumulación de material. Posibilidades que se dan raramente para b) y c): 1. Colocación excéntrica 2. Espesor desigual de la chapa 3. Lubricación no apropiada 4. Desgaste del émbolo y de la arista del arco de embutición en las esquinas 5. Juego de embutición demasiado pequeño	En embuticiones angulares ha de ensancharse un poco el juego de las esquinas. Los émbolos han de limpiarse cuidadosamente en estas zonas, para eliminar los restos de lubricantes Cambiar la forma del recorte en las esquinas
22		d) Lados doblados hacia el interior	Aplastamiento excesivo en las esquinas	Modificar el recorte o los nervios de Embutición
23		e) Bordes doblados hacia abajo (piezas planas)		
		Fisuras en piezas de forma irregular		

ANEXO 4
TRATAMIENTO DE LA CHAPA

Tratamiento de la chapa

Material	Estado	54	55	56	57	58	59	60	AlMgSi 1
		AlRMg 2 y F 13 (blando)	Al 99,9 Mg 2 F 17 (semiduro)	AlMg 3 Si y F 18 (blando)	AlMgMn F 23 (semiduro)	AlMgSi 1 w (blando)	AlMgSi 1 F 20 (templado en frío)	AlMgSi 1 F 28 (templado en caliente)	F 32
N.º de material		3.3329.10 3.3328.10	3.3329.26 3.3328.26	3.3245.10 3.3527.10	3.3245.26 3.3527.26	3.2315.10	3.2315.51	3.2315.71 3.2315.72	3.2315.71 3.2315.72
A. Cortado									
1. Resistencia de cortadura τ_B (kp/mm ²)		9-11	11-13	11,5-13	14-15	8-9	14-18	19-23	19-23
B. Curvado									
1. Factor mínimo de redondeado c para espesor de chapa s_0		1,35	1,4	1,4	1,9	1,4	1,9	2,45	2,45
= 0,5 mm		1,05	1,1	1,2	1,95	1,15	1,9	2,5	2,5
= 1,0 mm		0,8	1,05	1,2	2,1	0,95	2,0	2,55	2,55
para $r_{\min} = c \cdot s_0$									
= 2,0 mm		0,85	1,2	1,35	2,35	1,0	2,1	2,6	2,6
= 3,0 mm		1,0	2,0	1,8	3,35	1,2	2,75	3,75	3,75
= 6,0 mm		0,985	0,985	0,985	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96
2. Factor de retroceso elástico K con $r_2/s = 1$ con $r_2/s = 10$		0,94	0,94	0,935	0,85	0,93	0,89	0,82	0,82
C. Embutición¹		Petróleo con adición de grafito granulado o aceite de colza o grasas minerales o aceites (aceite de máquinas, aceites usados), siempre que no se utilicen aceites de lubricación de marca. Se mejora por medio del procedimiento MBV							
1. Lubricante		10	13	12	15	12	15	18	18
2. Presión del pisón prensachapas p_n (kp/cm ²)		2,05	1,9	2,0	1,95	2,05	1,95	1,85	1,85
3. Relación de gradación β_{100} para la		1,6	1,5	1,4	1,45	1,4	1,3	1,35	1,35
1.ª embutición		1,9	1,8	1,85	1,85	1,9	1,8	—	—
2.ª embutición sin recocido intermedio									
2.ª embutición con recocido intermedio		0,27	0,29	0,28	0,28	0,27	0,28	0,30	0,30
4. Factor q para embutición de piezas rectangulares (1.ª embutición)		300-430°		350-400°		330-370°			
5. Temperatura de incandescencia (°C)									
D. Características del producto tal como se pone a la venta:									
1. Resistencia mínima a la tracción σ_B (kp/mm ²)		13	17	18	23	15	20	28	32
2. Límite mínimo $0,2 \sigma_{0,2}$ (kp/mm ²)		5	13	8	14	—	10	20	26
3. Alargamiento mínimo δ_5 (%)		20	7	17	9	18	16	12	10
4. Profundidad Erichsen IE (mm)									
para $s_0 = 0,5$ mm		8,6	6,8	7,5	7,4	8,5	8,3	7,8	7,6
= 1,0 mm		10,4	8,9	9,3	9,2	10,5	10,4	9,4	9,2
= 2,0 mm		12,0	10	11,3	10,9	11,8	11,6	11,0	10,8
5. Espesor máximo de chapa s_{\max} (mm)		5	3	6	6	6	20	20	10
E. Prescripciones DIN		DIN 1725, Hoja 4				DIN 1725, Hoja 1			
1. Composición									
2. Propiedades de resistencia									
3. Condiciones técnicas de suministro									
4. Dimensiones y diferencias admisibles en las mismas		DIN 1745, Hoja 1							

ANEXO 5

PROPIEDADES DE LA ALEACIÓN DE ALUMINIO AA 3104-H14

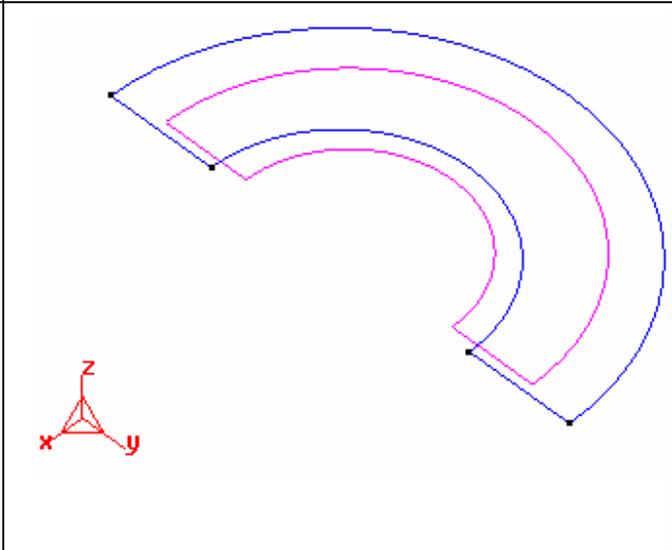
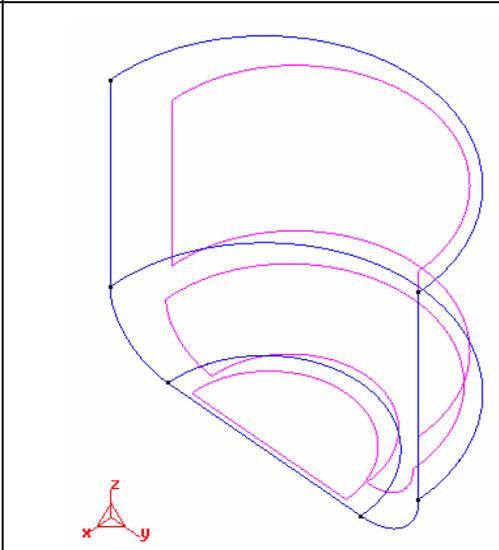
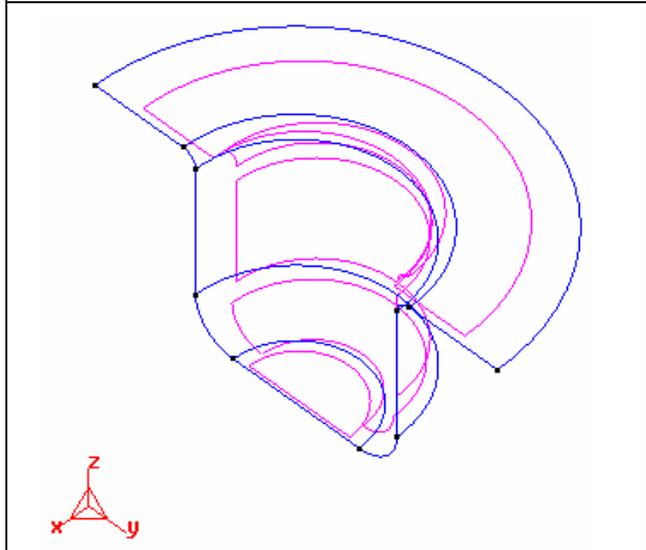
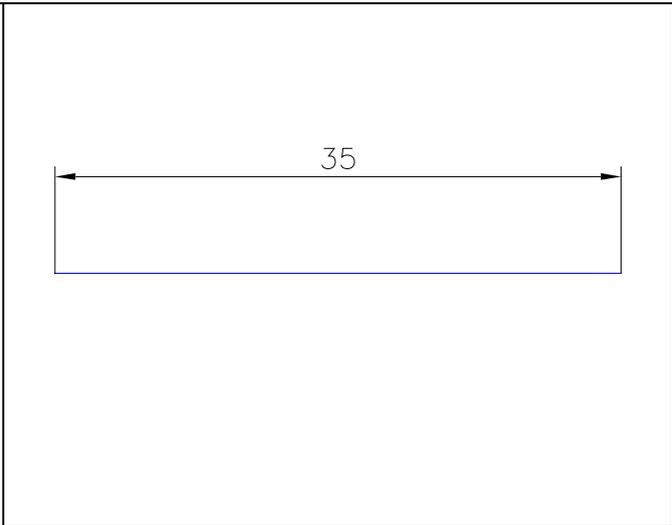
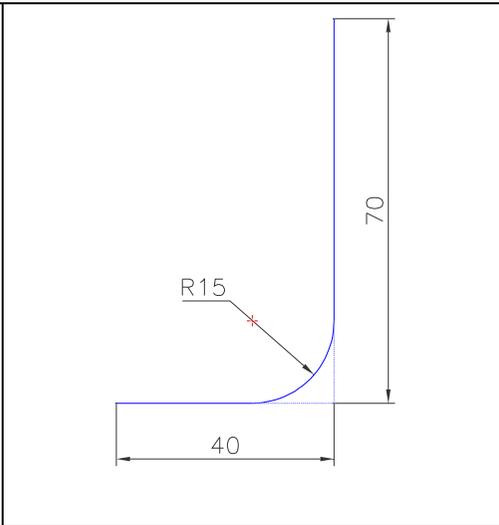
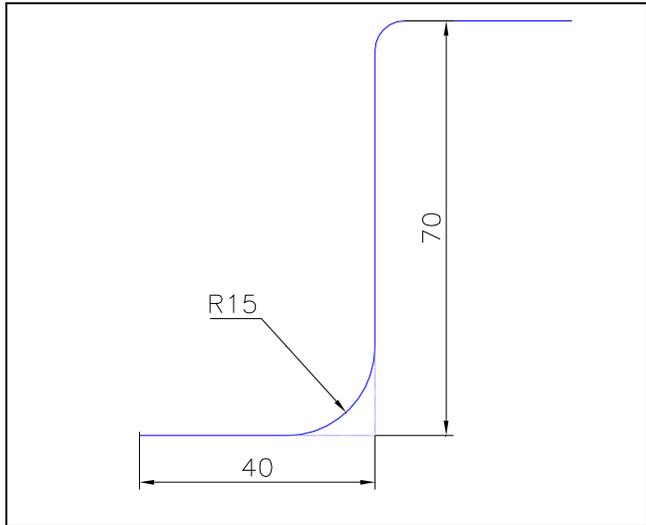
Propiedades de la aleación de Aluminio AA 3104-H14

Grade		Class	Symbol	Informative reference
Alloy No.	Profile			Characteristics and examples of application
2219	Plate, coiled sheet	—	A 2219 P	Strength high and excellent in heat resistance and weldability. For equipments of aircrafts and spacecrafts and so on.
2024	Plate	—	A 2024 P	Higher in strength than 2017 and excellent in machinability. Clad plate is one in which 1230 is laminated on the surface of the plate to improve corrosion resistance. For materials for airplane, various construction materials and others.
	Clad plate	—	A 2024 PC	
3003	Plate, coiled sheet, circle	—	A 3003 P	A little higher in strength than 1100 and excellent in formability, weldability and corrosion resistance. For general vessels, architectural materials, materials for ships, materials for fins, various containers and so on.
3203	Plate, coiled sheet, circle	—	A 3203 P	
3004	Plate, coiled sheet, circle	—	A 3004 P	Higher in strength than 3003, excellent in formability and good in corrosion resistance. For cans for beverage, roofplates, materials for door panels, colored aluminium, lamp socket, and so on.
3104	Plate, coiled sheet, circle	—	A 3104 P	
3005	Plate, coiled sheet, circle	—	A 3005 P	Higher in strength than 3003, excellent in corrosion resistance. For architectural materials, colored aluminium and others.

Alloy No.	Cladding and base material	Chemical composition %											
		Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Zr, Zr + Ti, Ga, V	Ti	Others ⁽¹⁾		Al
											Each	Total	
3004	—	0.30 max.	0.7 max.	0.25 max.	1.0 to 1.5	0.8 to 1.3	—	0.25 max.	—	—	0.05 max.	0.15 max.	Remainder
3104	—	0.6 max.	0.8 max.	0.05 to 0.25	0.8 to 1.4	0.8 to 1.3	—	0.25 max.	Ga 0.05 max, V 0.05 max.	0.10 max.	0.05 max.	0.15 max.	Remainder
3005	—	0.6 max.	0.7 max.	0.30 max.	1.0 to 1.5	0.20 to 0.6	0.10 max.	0.25 max.	—	0.10 max.	0.05 max.	0.15 max.	Remainder
3105	—	0.6 max.	0.7 max.	0.30 max.	0.30 to 0.8	0.20 to 0.8	0.20 max.	0.40 max.	—	0.10 max.	0.05 max.	0.15 max.	Remainder
5005	—	0.30 max.	0.7 max.	0.20 max.	0.20 max.	0.50 to 1.1	0.10 max.	0.25 max.	—	—	0.05 max.	0.15 max.	Remainder
5052	—	0.25 max.	0.40 max.	0.10 max.	0.10 max.	2.2 to 2.8	0.15 to 0.35	0.10 max.	—	—	0.05 max.	0.15 max.	Remainder
5652	—	Si + Fe 0.40 max.		0.04 max.	0.01 max.	2.2 to 2.8	0.15 to 0.35	0.10 max.	—	—	0.05 max.	0.15 max.	Remainder
5154	—	Si + Fe 0.45 max.		0.10 max.	0.10 max.	3.1 to 3.9	0.15 to 0.35	0.20 max.	—	0.20 max.	0.05 max.	0.15 max.	Remainder
5254	—	Si + Fe 0.45 max.		0.05 max.	0.01 max.	3.1 to 3.9	0.15 to 0.35	0.20 max.	—	0.05 max.	0.05 max.	0.15 max.	Remainder

Symbol	Temper grade ⁽²⁾	Tensile test				Bend test	
		Thickness mm	Tensile strength kgf/mm ² {N/mm ² }	Proof stress kgf/mm ² {N/mm ² }	Elongation %	Thickness mm	Inside radius
A 3004 P A 3104 P	O	0.2 and over, up to and incl. 0.5		-	10 min.		
Over 0.5, up to and incl. 0.8		16 {157} min.	-	14 min.	0.2 and over, up to and incl. 0.8	Flat on itself	
Over 0.8, up to and incl. 1.3		20 {196} max	6.0 {59} min.	16 min.	Over 0.8, up to and incl. 3	Thickness x 0.5	
		Over 1.3, up to and incl. 3		6.0 {59} min.	18 min.		
	H 12	0.5 and over, up to and incl. 0.8		-	3 min.		
	H 22 ⁽³⁾	Over 0.8, up to and incl. 1.3	20 {196} min.	15 {147} min.	4 min.	0.5 and over, up to and incl. 0.8	Thickness x 0.5
	H 32	Over 1.3, up to and incl. 3	25 {245} max.	15 {147} min.	5 min.	Over 0.8, up to and incl. 3	Thickness x 1
	H 14 H 24 ⁽³⁾ H 34	0.2 and over, up to and incl. 0.5		-	1 min.		
		Over 0.5, up to and incl. 0.8	23 {226} min.	-	3 min.	0.2 and over, up to and incl. 0.8	Thickness x 1
		Over 0.8, up to and incl. 1.3	27 {265} max.	18 {177} min.	3 min.	Over 0.8, up to and incl. 3	Thickness x 1.5
		Over 1.3, up to and incl. 3		18 {177} min.	4 min.		

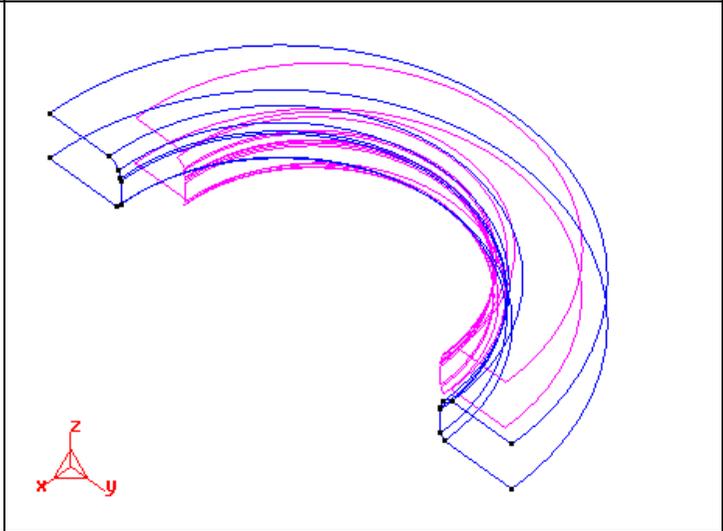
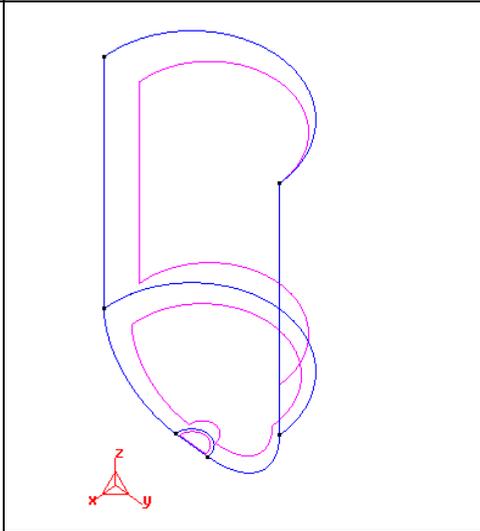
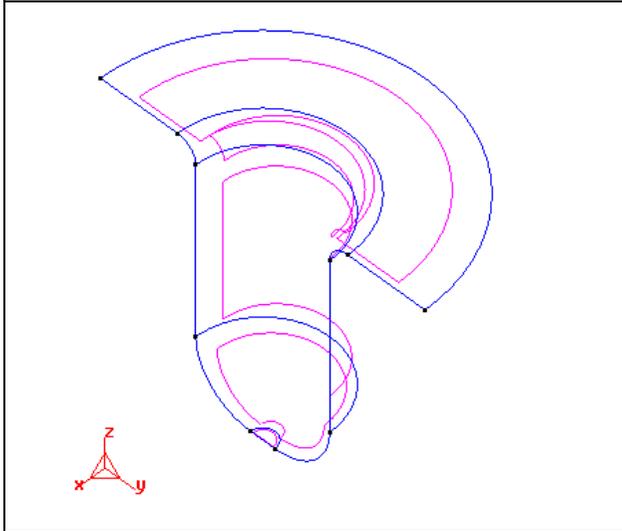
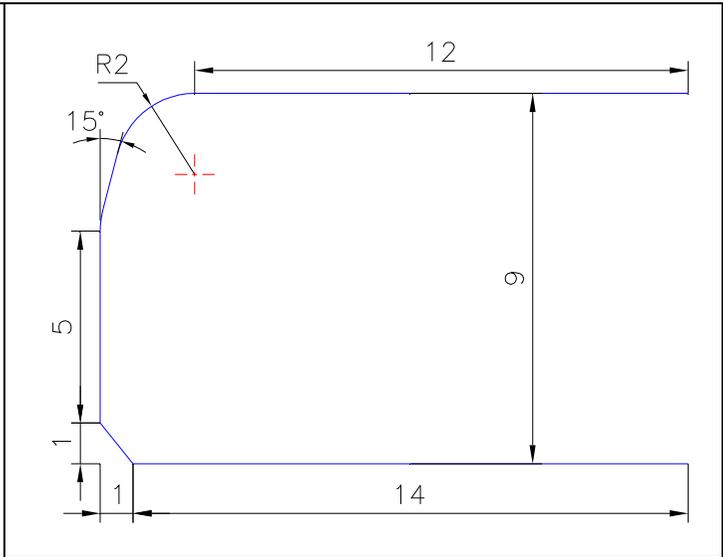
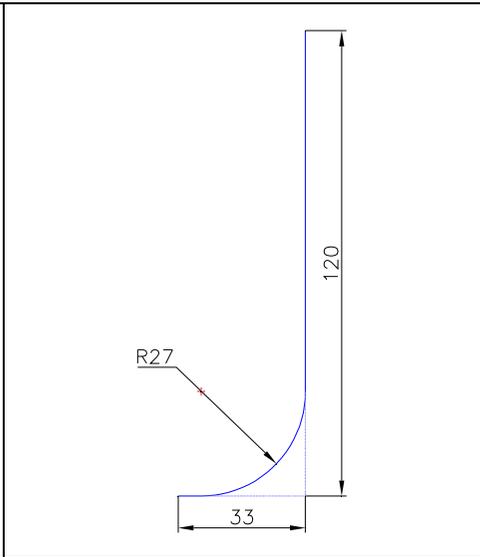
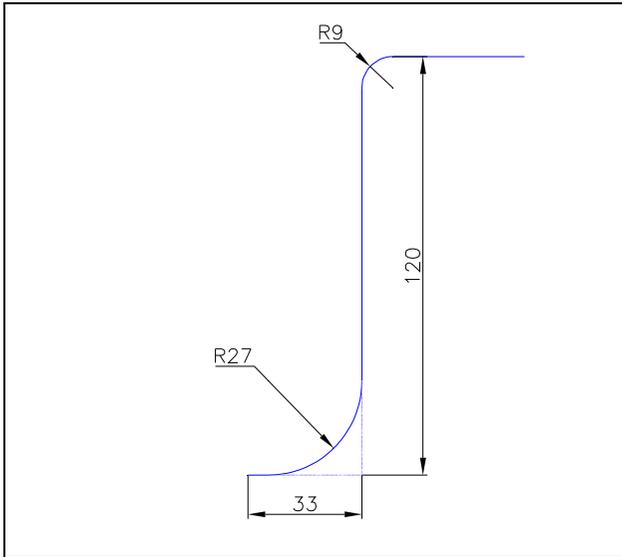
ANEXO 6
HERRAMIENTAS DEL PROCESO DE EMBUTICIÓN PROFUNDA



Matriz 1 (Die 1)

Émbolo 1 (Pun 1)

Pisador

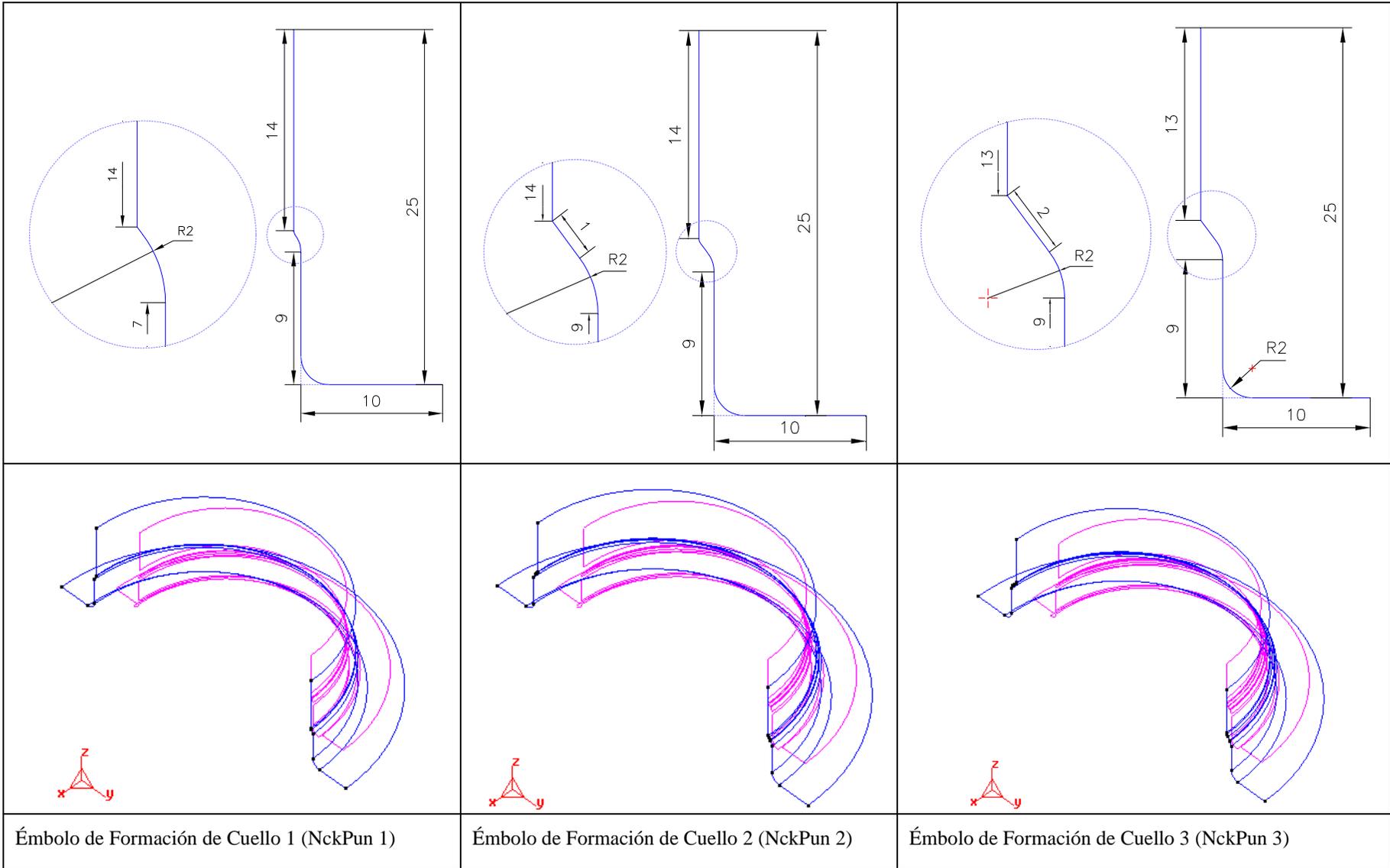


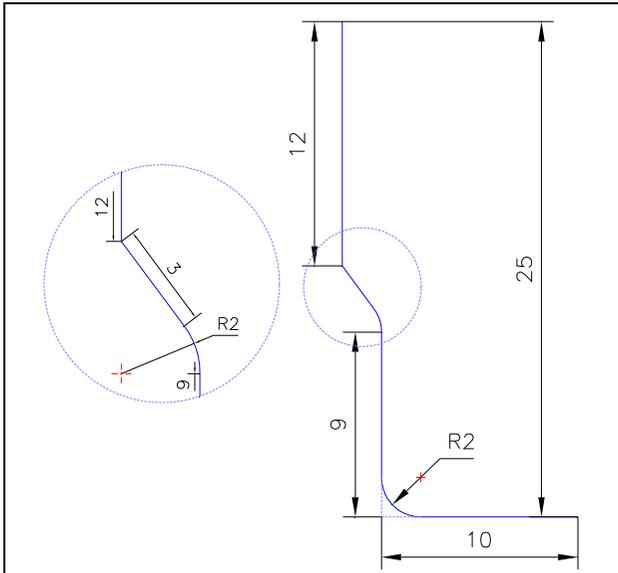
Matriz 2 (Die 2)

Émbolo 2 (Pun 2)

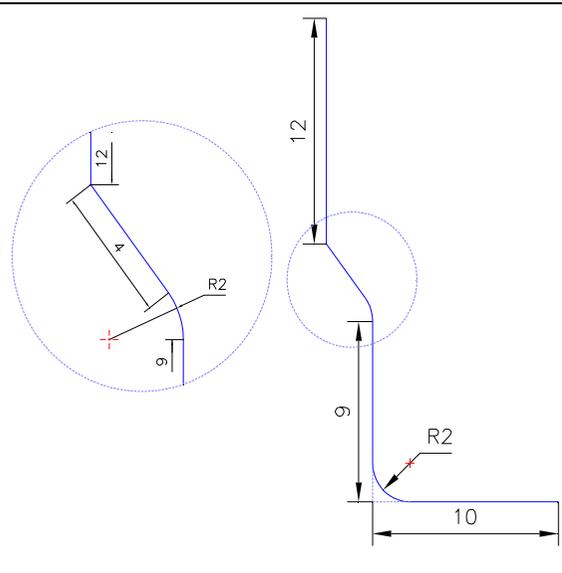
Matriz de Estirado (IrDie)

<p>Émbolo de Estirado (IrPun)</p>	<p>Matriz de formado (DomDie)</p>	<p>Émbolo de Formado (DomPun)</p>

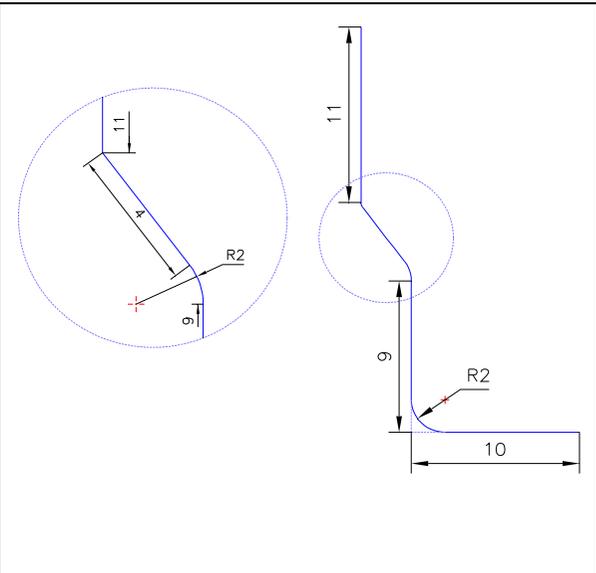




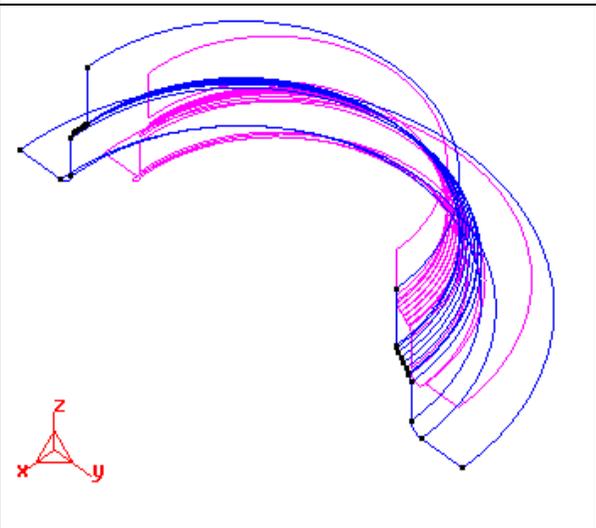
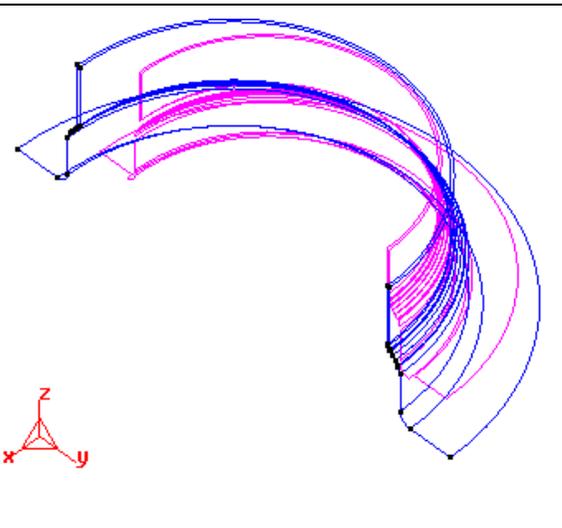
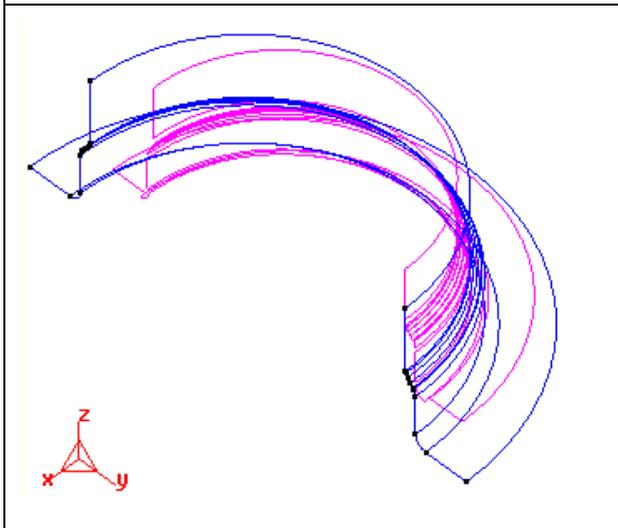
Émbolo de Formación de Cuello 4 (NckPun 4)

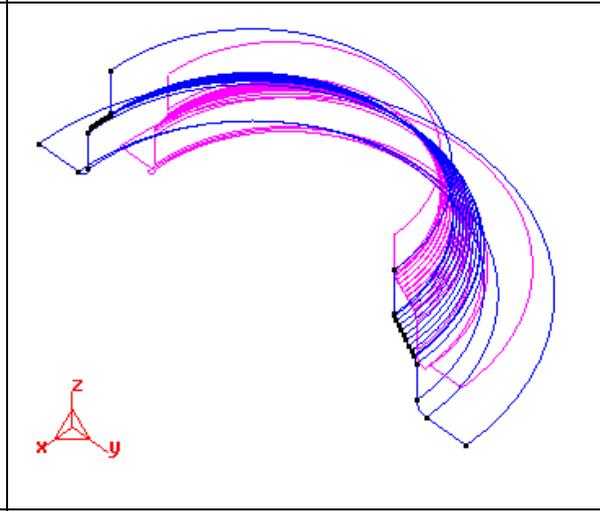
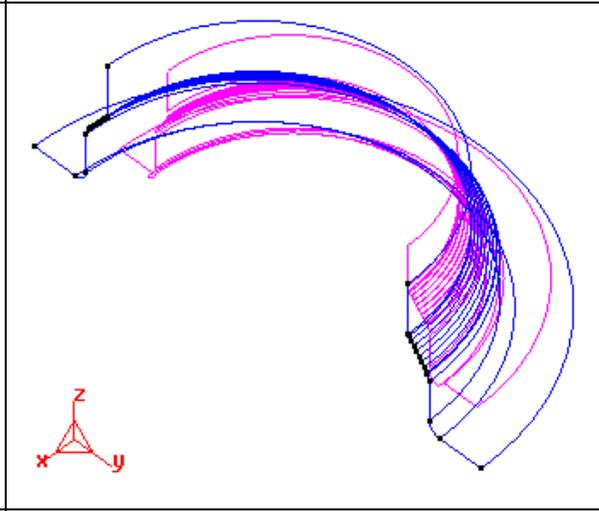
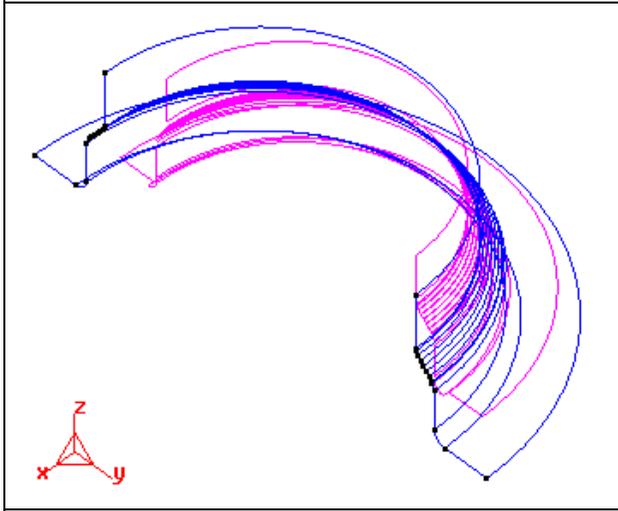
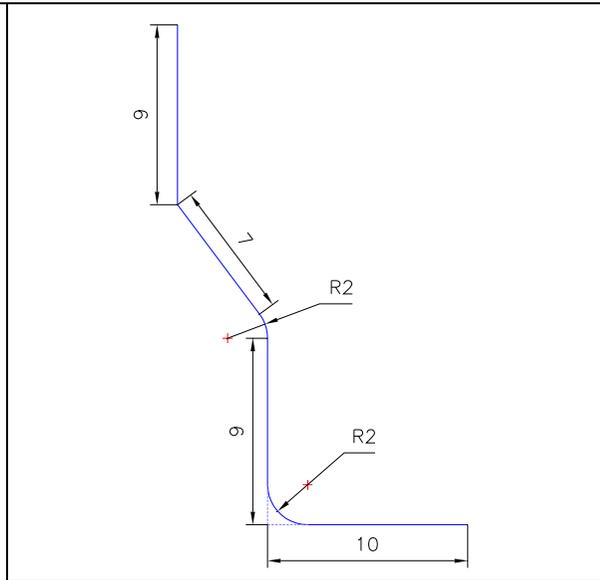
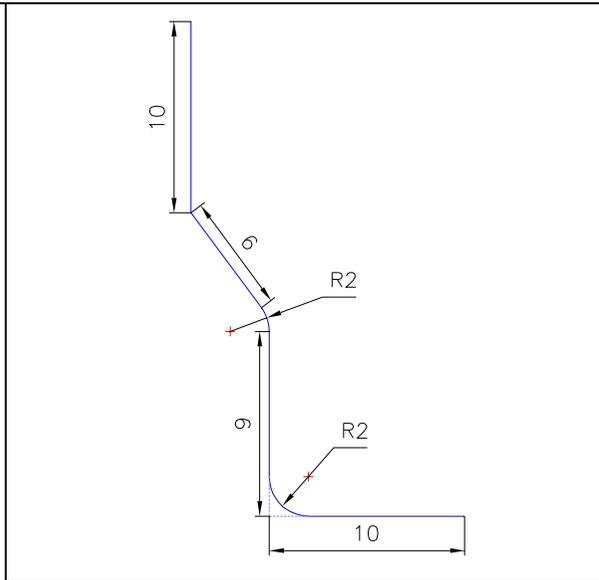
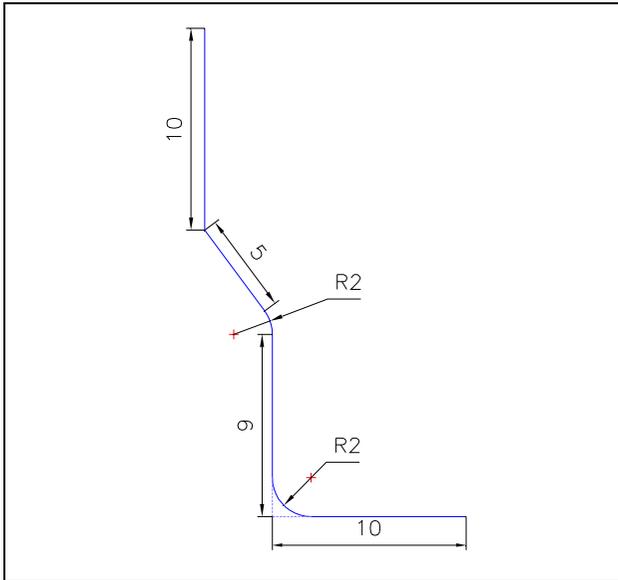


Émbolo de Formación de Cuello 5 (NckPun 5)



Émbolo de Formación de Cuello 6 (NckPun 6)





Émbolo de Formación de Cuello 7 (NckPun 7)

Émbolo de Formación de Cuello 8 (NckPun 8)

Émbolo de Formación de Cuello 9 (NckPun 9)

<p>Émbolo de Formación de Cuello 10 (NckPun 10)</p>	<p>Émbolo de Formación de Cuello 11 (NckPun 11)</p>	<p>Émbolo de Formación de Cuello 12 (NckPun 12)</p>

<p>Émbolo de Formación de Cuello 13 (NckPun 13)</p>	<p>Émbolo de Formación de Cuello 14 (NckPun 14)</p>	<p>Émbolo de Formación de Cuello 15 (NckPun 15)</p>