



**UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

TRABAJO DE DIPLOMA

**SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LOS PROCESOS DE EMBUTICIÓN
RECTANGULAR CON PESTAÑA**

Autor: ERICK LUIS ZAMORA HONDARES

Tutor: Dr.C. YUDIESKI BERNAL AGUILAR

**Santa Clara
2014**



**UNIVERSIDAD CENTRAL "MARTA ABREU" DE LAS VILLAS
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

TRABAJO DE DIPLOMA

**SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LOS PROCESOS DE EMBUTICIÓN
RECTANGULAR CON PESTAÑA**

Autor: ERICK LUIS ZAMORA HONDARES

Tutor: Dr.C. YUDIESKI BERNAL AGUILAR

**Santa Clara
2014**



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería en Mecánica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

Firma del Tutor

Firma del Jefe de Departamento
donde se defiende el trabajo

PENSAMIENTO

PENSAMIENTO

Nuestra recompensa se encuentra en el esfuerzo y no en el resultado. Un esfuerzo total es una victoria completa.

Mahatma Gandhi

DEDICATORIA

DEDICATORIA

*Todo el esfuerzo y dedicación que permitió la realización de este trabajo de diploma va
dedicado a mis padres.*

AGRADECIMIENTOS

AGRADECIMIENTOS

Mi sincera gratitud:

A mi tutor y amigo el Dr.C Yudieski Bernal Aguilar, por su constante preocupación y ayuda durante todo el transcurso de mi formación profesional.

A mis padres, por su inagotable paciencia y apoyo.

A mi compañera y amiga Gaby por estar siempre a mi lado cuando más la he necesitado.

A todas las personas que intervinieron directa o indirectamente en mi formación como profesional.

A la revolución por hacer de mí un profesional preparado y dispuesto a enfrentar cualquier tarea que se me encomiende.

Gracias

RESUMEN

RESUMEN

La investigación constituye un análisis del proceso de embutido del fregadero rectangular fabricado en la Industria Nacional Productora de Utensilios Domésticos (INPUD). Persigue el objetivo de simular mediante el software de elementos finitos Stampack dicho proceso de embutido, lográndose la predicción del comportamiento del material a deformar. Los defectos que comúnmente se presentan en los procesos de conformación de chapas metálicas son: el surgimiento de arrugas, la variación del espesor, la profundidad del embutido, el agrietamiento debido al endurecimiento del material por la deformación plástica, las altas tensiones surgidas durante el proceso. La presencia de arrugas y la variación del espesor en el producto terminado no son aceptables debido al no cumplimiento de las exigencias de calidad demandada por el cliente, además de comprometer la integridad física del mismo. Mediante la simulación por el método de elementos finitos se alcanza una mejor comprensión de la interdependencia entre los diferentes parámetros que intervienen en el proceso, permitiéndonos escoger la solución óptima sin tener que probarla en la práctica lo que se reflejaría en un alto costo de producción. La simulación realizada demostró la existencia de zonas donde convergían altas tensiones y adelgazamiento en el espesor de la chapa, las cuales constituyen un factor alarmante ya que pueden provocar la rotura del material. Conjuntamente se determinaron regiones con tendencias al surgimiento de arrugas, pero las mismas se pueden eliminar variando la fuerza del prensachapas.

ABSTRACT

ABSTRACT

The investigation constitutes a process analysis of drawing of the rectangular kitchen sink manufactured in Industria Nacional Productora de Utensilios Domésticos (INPUD). The aforementioned Stampack pursues the objective to play-act by means of the software of finite elements process of drawing, turning out well the prediction of the behavior of the material to deform. The defects that commonly present itself in the processes of conformation of metallic sheets are: The surging of wrinkles, the variation of thickness, the depth of the drawing, the cracking due to the hardening of the material for the plastic deformation, the high happened tensions in the process. The presence of wrinkles and the variation of the thickness in the finished product are not acceptable due to the no fulfillment of the requirements about quality demanded to client, in to besides to compromise the physical integrity of the same. A better understanding of the interdependence between the different parameters that they tap in the process is attained by means of the simulation for the finite-element method, allowing us choosing the optimal solution without having that to try her would be reflected in a loud cost of production in practice. The realized simulation demonstrated the existence of zones where high tensions and thinning in the thickness of the sheet, which converged they constitute an alarming factor since they can provoke the rupture of the material. Jointly they determined to the surging of wrinkles regions with tendencies, but the same can eliminate themselves varying the blankholder force.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS

Figuras	Título	Pág.
Figura 1.1	Embutición simple	6
Figura 1.2	Embutición de doble efecto	7
Figura 1.3	Embutición inversa	7
Figura 1.4	Curva de Tensión vs. Deformación	9
Figura 1.5	Ciclo carga-descarga-recarga	12
Figura 1.6	Curva uniaxial tensión-deformación para un modelo elastoplástico	14
Figura 1.7	Curva tensión-deformación con endurecimiento por deformación	14
Figura 1.8	Curva tensión-deformación con plasticidad perfecta	15
Figura 1.9	Curva tensión-deformación con ablandamiento por deformación	15
Figura 1.10	Fuerzas en el material	16
Figura 1.11	Representación esquemática del campo de desplazamientos de un elemento	23
Figura 2.1	Semiproducto a embutir circular y rectangular	27
Figura 2.2	Parámetros geométricos de una pieza cilíndrica embutida a partir de un disco	28
Figura 2.3	Representación esquemática de los parámetros geométricos de una pieza rectangular embutida	29
Figura 2.4	Metodología de simulación en el software <u>Stampack</u>	35
Figura 2.5	Geometría de la matriz (a) y el punzón (b) de la pieza rectangular	36
Figura 2.6	Geometría del conjunto de la pieza rectangular	36
Figura 2.7	Elemento triangular de lámina	38
Figura 2.8	Mallado del semiproducto	39
Figura 2.9	Mallado del conjunto	39
Figura 2.10	Curva tensión-deformación ideal con endurecimiento por deformación	41
Figura 2.11	Curva de tensión-deformación del material a simular	42
Figura 3.1	Malla deformada sobrepuesta a la forma inicial	51
Figura 3.2	Comparación entre la pieza deformada real (a) y la pieza simulada b)	51
Figura 3.3	Variación del espesor en la pieza embutida simulada	52
Figura 3.4	Zonas de deformación en la pieza embutida rectangular simulada	53
Figura 3.5	Zonas de deformación en la pieza rectangular real embutida	53
Figura 3.6	Diagrama del límite de conformabilidad	54
Figura 3.7	Análisis de tensiones en la pieza simulada	55
Figura 3.8	Curva de fuerza del punzón en función del recorrido	56
Figura 3.10	Guía para las mediciones y línea AB, dirección de mayor interés	57
Figura 3.11:	Huella de la sección transversal de la pieza real	57
Figura 3.12:	Comparaciones entre las mediciones de la pieza real y la pieza simulada	59

ÍNDICE DE TABLAS

Tablas	Título	Pág.
Tabla 2.1	Composición química del acero inoxidable.	41
Tabla 2.2	Propiedades mecánicas del acero inoxidable	41

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

MEF	Método de los Elementos Finitos
INPUD	Empresa Industrial Nacional Productora de Utensilios Domésticos “1ro de Mayo”. Santa Clara. Villa Clara
DLC	Diagrama límite de conformación
CAD	Diseño asistido por computadora
CAE	Ingeniería asistida por computadora
ASMT	American Society for Testing and Materials
AISI	American Iron and Steel Institute

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Unidades	Denominación
n	-	Coeficiente de endurecimiento
r	-	Coeficiente de anisotropía
β	-	Relación de embutición
F	-	Condición de fluencia para los materiales metálicos
σ	Pa	Tensión real efectiva
σ_f	MPa	Tensión de fluencia
ε	-	Deformación Plástica logarítmica
$\bar{\varepsilon}$	-	Deformación equivalente
K	Pa	Constante de plasticidad del material
ε_0	-	Valor de la pre deformación
ε_r	-	Alargamiento máximo
r_m	mm	Radio de la matriz
D	mm	Diámetro de la pieza embutida
d	mm	Diámetro de la pieza existente antes del proceso
μ	-	Coeficiente de fricción entre el material y la herramienta
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	Pa	Valores de tensiones que se asumen por un criterio de fluencia
$\sigma_{\text{máx}}$	MPa	Tensión Máxima
$\sigma_{\text{mín}}$	MPa	Tensión Mínima
t_0	mm	Espesor de la chapa
$\beta_{\text{lím}}$	-	Relación límite de embutición
$F_{\text{máx}}$	N	Fuerza máxima de embutición
A_0	mm ²	Área inicial del semiproducto
K_{fm}	N/mm ²	Coeficiente medio de la resistencia a la conformación
P_{pc}	MPa	Presión del prensachapa
β_0	-	Relación máxima de embutido inicial
K_{f1}	N/mm ²	Criterio de fluencia
K_{f2}	N/mm ²	Criterio de fluencia
F_{cr}	N	Fuerza de rotura del material

F_{id}	N	Fuerza ideal de embutición
r_p	mm	Radio de redondeo del punzón
A_c	mm ²	Área del semiproducto circular
A_R	mm ²	Área del semiproducto rectangular
D_e	mm	Diámetro equivalente
$(h_{perm})_c$	mm	Altura permisible de la copa cilíndrica en función del diámetro equivalente
A_{CC}	mm ²	Área de la copa cilíndrica
A_{RR}	mm ²	Área del recipiente rectangular
$(h_{perm})_R$	mm	Altura permisible del recipiente rectangular
Z	mm	Juego de embutido
d_1	mm	Diámetro final de la pieza
σ_u	MPa	Resistencia última del material de la chapa
D_r	mm	Diámetro de la pieza en el momento de la fuerza máxima
D_0	mm	Diámetro inicial de la pieza
c	mm	Largo del flanco o semiproducto
h	mm	Altura de la copa cilíndrica
d_e	mm	Diámetro medio equivalente
F_{APC}	N	Fuerza de fricción entre matriz-prensachapas
F_{AR}	N	Fuerza de fricción en la zona del radio de la matriz
F_{RE}	N	Fuerza de retorno elástico
σ_{rd}	MPa	Tensión radial máxima
σ_{RA}	MPa	Tensión radial debido al rozamiento
σ_{AR}	MPa	Tensión de fricción en el radio de la matriz
σ_A	MPa	Tensión total
σ_{RE}	MPa	Tensión de retorno elástico
σ_{total}	MPa	Tensión total de embutición

ÍNDICE

PENSAMIENTO.....	
DEDICATORIA.....	
AGRADECIMIENTOS.....	
RESUMEN.....	
ABSTRACT.....	
	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
 CAPÍTULO I: ESTADO ACTUAL DE LOS PROCESOS DE CONFORMACIÓN DE LA CHAPA METÁLICA	
1.1.- Generalidades.....	5
1.2.- El proceso de embutición.....	5
1.3.- Comportamiento plástico de los materiales durante el proceso.....	9
1.4.- Fuerzas existentes en la chapa durante el proceso.....	15
1.5.- Métodos numéricos.....	19
1.6.- Métodos de refinamiento de la malla.....	21
1.7.- Repercusión del empleo del método de elementos finitos en la industria.....	24
1.8.- Conclusiones parciales.....	25
 CAPÍTULO II: MODELO DE CÁLCULO ANALÍTICO Y SIMULACIÓN DE PIEZAS EMBUTIDAS RECTANGULARES CON PESTAÑA	
2.1.- Generalidades.....	26
2.2.- Modelo analítico para el cálculo de piezas embutidas rectangulares.....	26
2.3.- Metodología para la simulación del proceso de embutido para piezas rectangulares usando el software <u>Stampack</u>	33
2.4.- Conclusiones parciales.....	44
 CAPÍTULO III: ANÁLISIS Y VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN	
3.1.- Generalidades.....	45
3.2.- Cálculo de los parámetros fundamentales en los procesos de embutición rectangular.....	45
3.3.- Resultados obtenidos de la simulación para la pieza rectangular.....	50
3.4.- Validación práctica de los resultados de la simulación.....	56
3.5.- Conclusiones parciales.....	59
CONCLUSIONES GENERALES.....	61
RECOMENDACIONES.....	62
BIBLIOGRAFÍA.....	63
ANEXOS.....	

INTRODUCCIÓN

INTRODUCCIÓN

En el siguiente proyecto el tema de estudio fundamental lo constituye el proceso de embutición del fregadero rectangular fabricado en la Industria Nacional Productora de Utensilios Domésticos (INPUD). El embutido es el proceso de conformado de láminas metálicas más común existente en la actualidad. Utilizando una matriz o estampa se forma un cuerpo hueco mediante estirado, a partir de una chapa plana cortada a medida. En función de la profundidad de embutición, ésta puede ser: estirado único o estirados sucesivos. En el conformado de chapas mediante embutición existen una gran variedad de factores que afectan la calidad e integridad física del producto terminado. La fricción es un factor a tener en cuenta, ya que el material se desliza en la holgura entre el punzón y la matriz por lo que hay que asegurar la lubricación adecuada de la chapa y de las herramientas en su conjunto. Un elemento fundamental en el proceso de embutición es el prensachapas, el mismo tiene la función de sujetar la chapa a conformar durante todo el proceso con la finalidad de que no se formen pliegues o arrugas. El problema fundamental de la industria actual del conformado es la predicción del comportamiento del material a conformar, para ello se emplean softwares de elementos finitos como el usado en el presente trabajo “Stampack”, con el fin de obtener un proceso de embutición simulado que represente el comportamiento real de la chapa. El uso de este software de elementos finitos nos permitirá introducir variaciones en los distintos parámetros de dicho proceso sin necesidad de recurrir a intentos de fabricación de prueba, predecir el comportamiento de dicho material durante el proceso de embutición y anticipar posibles fallos.

El Método de los Elementos Finitos (MEF) es uno de los métodos numéricos más potentes aplicables al análisis de estructuras de cualquier tipo, sometidas a solicitaciones mecánicas, térmicas y electromagnéticas tanto estacionarias como transitorias. Las relaciones matemáticas en forma diferencial para un determinado problema planteado se establecen basadas en la teoría de la plasticidad, la cual plantea su integración cerrando el

problema con condiciones iniciales y de contorno para obtener las funciones que definen las variables representativas del comportamiento de la estructura. El método de los elementos finitos consiste en una simplificación de dichas ecuaciones, puesto que su forma diferencial se sustituye por un conjunto discreto de ecuaciones y de sus respectivas condiciones de contorno para su posterior resolución. La discretización del problema en el caso de un medio continuo se lleva a cabo mediante un proceso de modelización para convertirlo en un número finito de elementos ensamblados entre sí en puntos llamados nodos. De la resolución de las ecuaciones de desplazamientos planteadas para dichos nodos y la imposición de las condiciones de contorno apropiadas se obtendrá el campo de desplazamientos para cada uno de los nodos y, a partir de él y si fuera necesario, el campo de tensiones. El comportamiento en el interior de los elementos se interpolará a partir de los desplazamientos nodales mediante las llamadas funciones de forma. En la actualidad el Método de los Elementos Finitos se aplica en casi todos los campos de la industria de construcción de barcos, automóviles, biomecánica, balística, medicina, eléctrica, y mecánica, entre otras.

Situación problémica:

La necesidad de disminuir el uso del método de prueba y error comúnmente empleado en la industria del conformado cubana lo que representa un elevado índice de pérdida de la materia prima empleada, un aumento del tiempo en la etapa del rediseño de los troqueles y por ende un elevado costo de producción.

Problema científico:

¿Qué defectos pueden diagnosticarse dentro del proceso de embutido del fregadero rectangular mediante el uso del software de elemento finito Stampack?

Objetivo general:

Simular el comportamiento del material mediante el software de elementos finitos Stampack para el proceso de embutición del fregadero rectangular con pestaña, fabricado en la INPUD “1ero de Mayo” de Santa Clara.

Objetivos específicos:

- Emplear una metodología de cálculo analítico que permita obtener de una forma ordenada y lógica los parámetros técnicos del proceso de embutición de chapas rectangulares con pestaña.
- Realizar una metodología de simulación que constituya una guía para realizar el análisis por el método de los elementos finitos mediante el software Stampack.
- Diagnosticar los defectos y sus posibles causas, que afectan la calidad e integridad física en la pieza embutida.

Hipótesis:

Empleándose el software de elementos finitos Stampack es posible la detección de los defectos que tienen lugar en el proceso de embutición del fregadero rectangular con pestaña fabricado en la INPUD “1ero de Mayo” de Santa Clara.

Justificación:

Esta investigación tiene una gran importancia económica y social, ya que la implementación de la misma permitirá la reducción del costo de producción del producto terminado así como el costo de fabricación de los troqueles empleados para la fabricación del mismo lo que permitirá un descenso en el precio de dicho producto en el mercado.

Viabilidad:

Para la realización de la presente investigación se cuentan con los recursos materiales e informáticos necesario para su desarrollo además se tiene el apoyo de numerosos profesionales vinculados a la producción e investigadores del tema.

Estructura del trabajo:

El presente trabajo de diploma consta de una síntesis o resumen, introducción, tres capítulos, así como conclusiones, recomendaciones y bibliografía. A continuación se explicará brevemente los contenidos tratados en cada uno de los capítulos que conforman este proyecto.

Capítulo I: En este capítulo se realiza una revisión bibliográfica con el objetivo de profundizar los conocimientos sobre los procesos de embutición de chapas metálicas y los fenómenos plásticos que ocurren en el mismo, así como los métodos que actualmente se emplean para el estudio y comprensión de dichos fenómenos.

Capítulo II: El contenido del capítulo lo constituye la definición de la metodología para el cálculo analítico de los parámetros técnicos del proceso de embutición aplicada a chapas rectangulares y una metodología para la ejecución de la simulación de dicho proceso mediante el software de elementos finitos Stampack.

Capítulo III: Este capítulo constituye el análisis y validación práctica de los resultados obtenidos mediante la aplicación de la metodología de simulación planteada en el capítulo anterior.

CAPÍTULO I

ESTADO ACTUAL DE LOS PROCESOS DE CONFORMACIÓN DE LA CHAPA METÁLICA

CAPÍTULO I: ESTADO ACTUAL DE LOS PROCESOS DE CONFORMACIÓN DE LA CHAPA METÁLICA

1.1.- Generalidades

El conformado por deformación plástica es el proceso más antiguo para la fabricación de piezas metálicas. El notable desarrollo tecnológico que han sufrido estos procesos hasta la actualidad permite disponer de una amplia variedad de técnicas adaptadas para las distintas aplicaciones (ver anexo 1), que abarcan desde productos que sirven como materia prima para otros procesos de fabricación hasta productos finales.

La conformación de piezas por deformación utiliza las propiedades plásticas de los materiales para obtener deformaciones permanentes. En determinadas operaciones, el material es llevado hasta el límite de cizalladura produciendo un corte de silueta en la chapa que da lugar a una pieza de contornos interiores y/o exteriores específicos. [1]

En esta clase de procesos, la temperatura, es un factor determinante, debido a que cuanto mayor es la temperatura del proceso menor será el esfuerzo necesario que habrá que realizar para superar el límite de fluencia del material y, por lo tanto, mayor será su ductilidad, esto se explica debido a que la temperatura del material afecta a la distancia media existente entre los átomos: a mayor temperatura, mayor será la amplitud de la vibración de los átomos y, por lo tanto, mayor distancia entre ellos. Por este motivo, algunos procesos de conformado se llevan a cabo en caliente, con temperaturas inferiores al límite de fusión[2].

Por tratarse del proceso utilizado para la fabricación de las piezas objetos de estudio en este trabajo, se realizará una descripción detallada del proceso de embutición de chapas metálicas que del resto de procesos existentes.

1.2.- El proceso de embutición.

Se trata de un proceso de conformado de láminas metálicas más común existente en la actualidad. Las piezas recortadas a emplear se disponen en el asiento o anillo de centrado, fijado a la matriz de embutir, con el objetivo de centrar el disco durante el proceso de

embutición. Un dispositivo pisador prensa el disco contra la matriz de embutir para evitar la aparición de pliegues en la pieza. El punzón al bajar estira el material sobre los bordes rebordeados de la matriz de modo que se produzca una pieza hueca.

En función de la profundidad de embutición, el proceso se puede clasificar como[3]:

- Estirado único.
- Estirados sucesivos.

En dependencia de las características geométricas del producto a obtener el proceso se puede realizar de tres formas [4]:

- Embutición de simple efecto (Sin dispositivo de pisador):

El semiproducto que se va a embutir se fija en su asiento, el punzón comienza a empujar el material en la matriz y finalmente se expulsa la pieza embutida por acción de un expulsor como se muestra en la figura 1.1

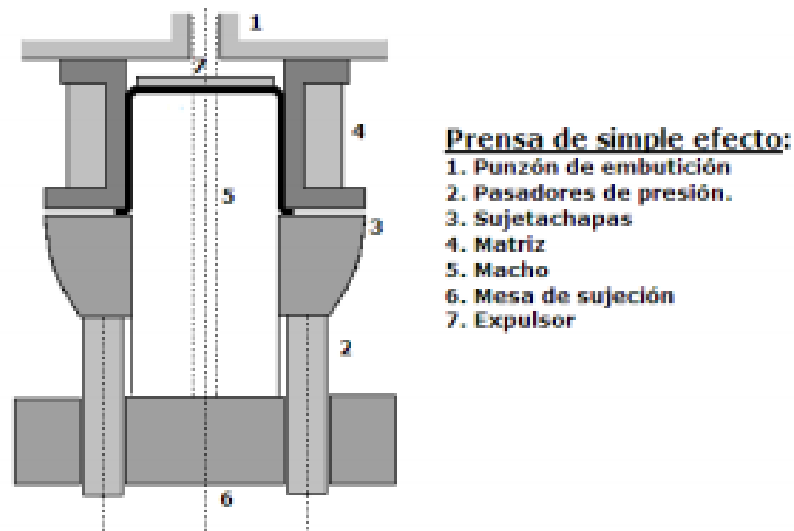


Figura 1.1: Embutición simple.

- Embutición de doble efecto (Con dispositivo de pisador):

En este tipo de embutido, el punzón se sitúa en la parte superior de la prensa, el semiproducto se coloca en el asiento de la matriz y el conjunto punzón–placa–prensa actúan simultáneamente. En este caso la matriz también dispone de un expulsor como se representa en la figura 1.2 [5].

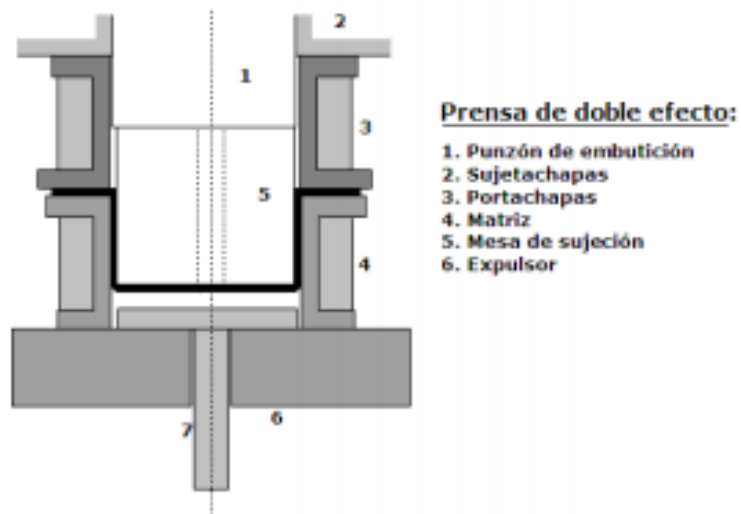


Figura 1.2: Embutición de doble efecto.

- Embutición de triple efecto (Con dispositivo de pisador + cojín de prensa):

La embutición inversa según [3] ofrece la posibilidad de ahorrar una o dos etapas de embutición. Con éste tipo de embutición la pieza previamente embutida se dispone con la abertura hacia abajo sobre una matriz negativa de embutir. El punzón, que desciende sobre la pieza así dispuesta la vuelve de forma que la superficie interior se convierte en superficie exterior de la misma. De este modo se obtiene con una herramienta profundidades mayores que con la embutición corriente mostrada en la figura 1.3.



Figura 1.3: Embutición inversa.

Durante el desarrollo del proceso es de vital importancia tener en cuenta algunos factores tecnológicos y de diseños, ya que dichos factores condicionan la calidad final del producto, ejemplo de estos factores son: la fricción (lubricación), ya que el material se desliza en la abertura entre el punzón y la matriz, por lo tanto esta área debe estar pulida y lapeada con el objetivo de reducir la carga necesaria para el desarrollo del embutido. El achaflanado o radios de los bordes de la matriz y el punzón se deben seleccionar con gran cuidado debido a que los mismos ayudan al material a fluir por la pared del agujero, facilitando la operación. El juego que queda entre el punzón y la matriz de embutir tiene que ser mayor que el espesor de la chapa para evitar el adelgazamiento en el espesor, aunque existen fórmulas, tablas y valores empíricos en la bibliografía se ha demostrado que esta magnitud depende mucho de la experiencia del diseñador de los troqueles. La adecuada fuerza definida para que sea ejercida por el prensachapas influirá en el correcto flujo del material y evitará la formación de pliegues o arrugas en el producto terminado. Las principales limitaciones de los procesos de embutición de chapas metálicas convencionales son muchas como son: no se pueden obtener en las piezas terminadas, esquinas muy afiladas debido a la alta concentración de tensiones que allí ocurren que pueden provocar el agrietamiento, alta fricción entre el dado y la chapa pone un límite a la relación de estirado limitante (LDR) la cual delimita la razón para máximo de diámetro inicial en blanco que se puede extraer con éxito para el diámetro de la copa elaborada, y por último el acabado de la superficie del producto obtenido es generalmente de baja calidad por lo que es necesario el empleo de otros procesos tecnológicos, como el maquinado [6].

Es de destacar que casi todas las limitantes existentes en los procesos de conformación de chapas metálicas están vinculadas al comportamiento no deseado del material es por eso que este punto es fundamental en la comprensión del proceso de embutido.

1.3- Comportamiento plástico de los materiales durante el proceso.

Curva real de tensión contra deformación.

Un ensayo típico para la estimación de las propiedades plásticas de un material es el ensayo de tracción. Este ensayo consiste en estirar una probeta a una velocidad constante registrando la resistencia (fuerza) que opone al estiramiento. De aquí se obtiene una curva fuerza-incremento de longitud. La curva que habitualmente se usa en la figura 1.4, es la fuerza dividida el área de la sección inicial de la probeta frente al incremento de longitud dividido por la longitud inicial de la probeta. [7]

Las tensiones(s) y deformaciones (ϵ) nominales (fuerza e incremento de la longitud respectivamente) están referidas a valores geométricos iniciales, pero la tensión real depende del área actual que soporta la carga y la deformación real depende de la historia de las distintas deformaciones a las que ha sido sometida la probeta. Para relacionar los valores nominales con los reales se parte de la hipótesis de conservación de volumen durante los procesos de deformación.[8]

$$A_0 \cdot l_0 = A \cdot l \quad (1.1)$$



Figura 1.4: Curva de Tensión vs. Deformación

1. Deformaciones elásticas

En esta zona las deformaciones se reparten a lo largo de la probeta, son de pequeña magnitud y, si se retirara la carga aplicada, la probeta recuperaría su forma inicial. El coeficiente de proporcionalidad entre la tensión y la deformación se denomina módulo de elasticidad o de Young y es característico del material. Así, todos los aceros tienen el mismo módulo de elasticidad aunque sus resistencias puedan ser muy diferentes. La tensión más elevada que se alcanza en esta región se denomina límite de fluencia y es el que marca la aparición de este fenómeno. Pueden existir dos zonas de deformación elástica, la primera recta y la segunda curva, siendo el límite de proporcionalidad el valor de la tensión que marca la transición entre ambas. Generalmente, este último valor carece de interés práctico y se define entonces un límite elástico (convencional o práctico) como aquél para el que se produce un alargamiento prefijado de antemano (0,2%, 0,1%, etc.). Se obtiene trazando una recta paralela al tramo proporcional (recto) con una deformación inicial igual a la convencional.[9]

2. Tensión de Fluencia

Es la deformación brusca de la probeta sin incremento de la carga aplicada. El fenómeno de fluencia se da cuando las impurezas o los elementos de aleación bloquean las dislocaciones de la red cristalina impidiendo su deslizamiento, mecanismo mediante el cual el material se deforma plásticamente. Alcanzado el límite de fluencia se logra liberar las dislocaciones produciéndose la deformación bruscamente. La deformación en este caso también se distribuye uniformemente a lo largo de la probeta pero concentrándose en las zonas en las que se ha logrado liberar las dislocaciones (bandas de Luders). No todos los materiales presentan este fenómeno, en cuyo caso la transición entre la deformación elástica y plástica del material no se aprecia de forma clara.[7]

3. Deformaciones plásticas

Esta es la zona de interés en todo proceso de conformación de metales ya que esta zona describe el comportamiento plástico del material. A diferencia de la zona de deformación

elástica aquí si se retira la carga aplicada en dicha zona, la probeta recupera sólo parcialmente su forma quedando deformada permanentemente [10].

4. Estricción

En un punto del ensayo, las deformaciones se concentran en la parte central de la probeta apreciándose una acelerada reducción de la sección transversal de la misma, momento a partir del cual las deformaciones continuarán acumulándose hasta la rotura de la probeta por esa zona. La estricción es la responsable del descenso de la curva tensión-deformación; realmente las tensiones no disminuyen hasta la rotura, sucede que lo que se representa es el cociente de la fuerza aplicada (creciente) entre la sección inicial y cuando se produce la estricción la sección disminuye, efecto que no se tiene en cuenta en la representación gráfica. Los materiales frágiles no sufren estricción ni deformaciones plásticas significativas, rompiéndose la probeta de forma brusca. Terminado el ensayo se determina la carga de rotura, carga última o resistencia a la tracción: la máxima resistida por la probeta dividida por su sección inicial, el alargamiento en (%) y la estricción en la zona de la rotura [10].

Partiendo de la hipótesis de invariabilidad del volumen y los parámetros iniciales se obtienen los valores reales siguientes [3]:

a) Tensión real.

$$\sigma = \frac{P}{A} = \frac{P \cdot A_0}{A_0 \cdot A} = s \cdot (1 + e) \quad (1.2)$$

b) Deformación real.

$$\varepsilon = \int_{l_0}^l \frac{dl}{l} = \ln \frac{l}{l_0} = \ln(1 + e) \quad (1.3)$$

c) Velocidad de deformación.

$$\dot{e} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{dl}{dt} \cdot \frac{1}{l_0} = \frac{v}{l_0} \quad (1.4)$$

Curva ideal tensión en modelos elastoplásticos.

El comportamiento elastoplástico se caracteriza por los siguientes hechos [9]:

1. A diferencia del caso elástico, no existe unicidad en la relación tensión-deformación. Un mismo valor de la deformación puede corresponder a infinitos valores de la tensión y viceversa. El valor de la tensión depende, además de la deformación, de la historia de carga.
2. No hay una relación lineal entre la tensión y la deformación. A lo sumo esta linealidad puede ser incremental en ciertos tramos del proceso de deformación.
3. Se producen deformaciones irre recuperables o irreversibles en un ciclo carga-descarga.

Dicho modelo elastoplástico esta descrito a través de la siguiente curva de tensiones contra deformaciones como se muestra en la figura 1.5.

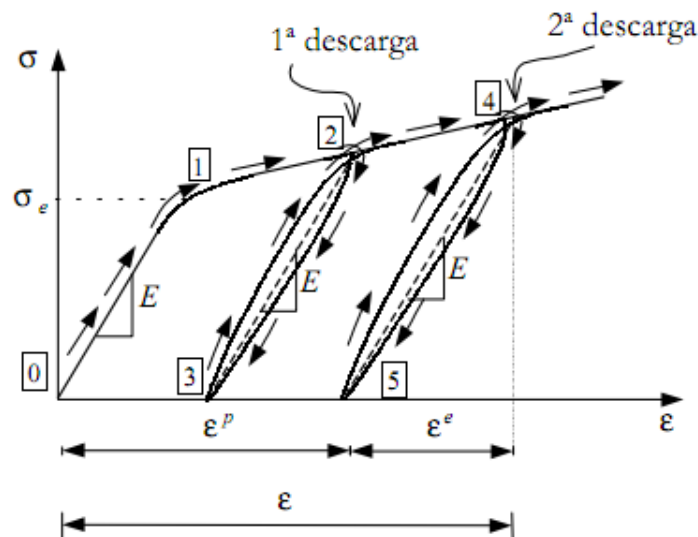


Figura 1.5: Ciclo carga-descarga-recarga.

Analizando el primer ciclo se observa que, mientras la tensión no supera el valor σ_e (denominado límite elástico) en el punto 1, el comportamiento es elástico lineal caracterizado por el módulo elástico E ($\sigma = E\varepsilon$) y no existen deformaciones

irrecuperables (durante una eventual descarga se recupera la deformación producida durante la carga).[11]

Para tensiones superiores a σ_e , el comportamiento deja de ser elástico y parte de la deformación no se recupera ante una eventual reducción a cero de la tensión (punto 3), apareciendo una deformación remanente denominada deformación plástica ε^p . Sin embargo, durante la rama de descarga 2-3 el comportamiento vuelve a ser, al menos de forma aproximada, incrementalmente elástico ($\Delta\sigma = E\Delta\varepsilon$). Lo mismo ocurre en la posterior recarga 3-2, produciéndose un comportamiento incrementalmente elástico, hasta que la tensión alcanza, en el punto 2, el máximo valor que había alcanzado durante el proceso de carga. A partir de este punto el comportamiento deja de nuevo de ser incrementalmente elástico (como si el material recordase la máxima tensión a la cual había estado sometido previamente). Un siguiente ciclo carga-descarga-recarga 2-4-5-4 pone de nuevo de manifiesto que durante el tramo 2-4 se ha generado más deformación plástica, que aparece en forma de deformación permanente en el punto 5, y también más deformación elástica, entendida como aquella parte de la deformación que sí se recupera durante el tramo de descarga de 4-5.[12]

En la aplicación matemática del modelo elastoplástico a esta curva se le realiza una aproximación, la más popular es la llamada Teoría Incremental de la Plasticidad, en la cual se plantea que para el caso de una dimensión se pretende, aproximar un comportamiento tensión-deformación como el de la figura 1.5 mediante aproximaciones a trozos mediante ramas elásticas e inelásticas como las de la figura 1.6. La generalización a varias dimensiones requiere la introducción de conceptos más abstractos.[13]

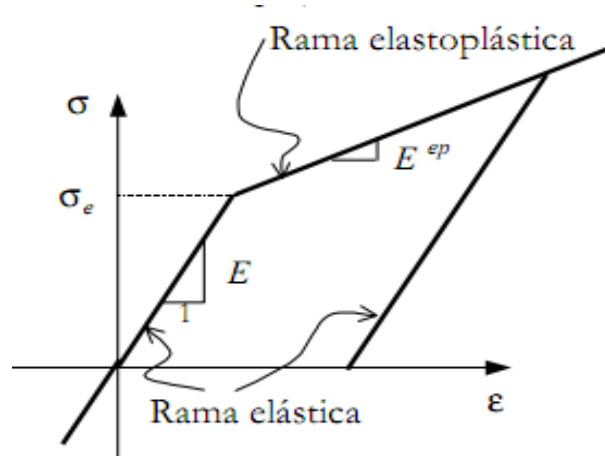


Figura 1.6: Curva uniaxial tensión-deformación para un modelo elastoplástico.

En la curva se puede apreciar que las pendientes están definidas por los valores numéricos del módulo de elasticidad y el módulo de plasticidad respectivamente. El módulo de plasticidad está estrechamente relacionado con el parámetro de endurecimiento (H') según se puede ver en la siguiente ecuación de las figuras 1.7, 1.8, 1.9.[13]

$$E^{ep} = E * \frac{H'}{E + H'} \quad (1.5)$$

En función del valor de H' se pueden definir los siguientes casos de comportamiento:

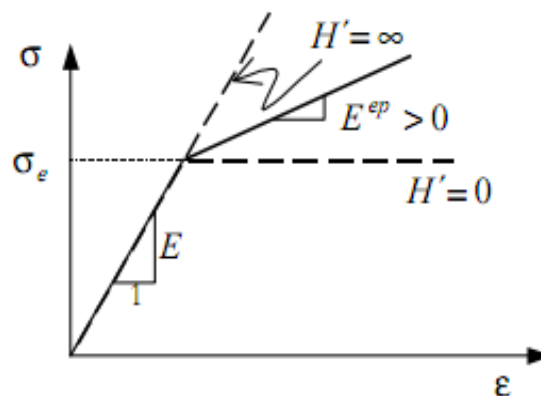


Figura 1.7: Curva tensión-deformación con endurecimiento por deformación.

$H' > 0 \Rightarrow E^{ep} > 0$ Plasticidad con endurecimiento por deformación.

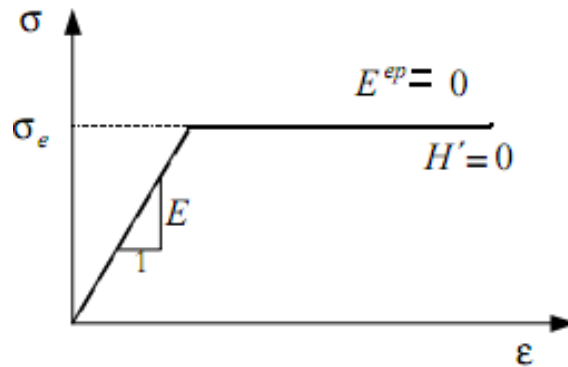


Figura 1.8: Curva tensión-deformación con plasticidad perfecta.

$H' = 0 \Rightarrow E^{ep} = 0$ Plasticidad perfecta.

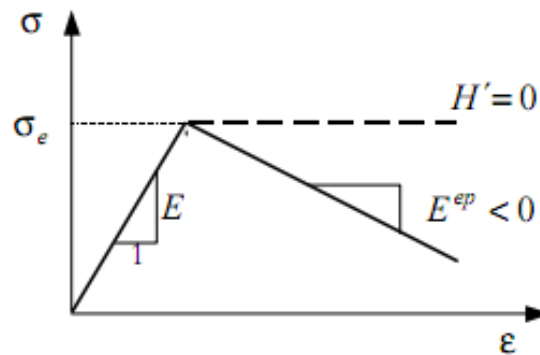


Figura 1.9: Curva tensión-deformación con ablandamiento por deformación.

$H' < 0 \Rightarrow E^{ep} < 0$ Plasticidad con ablandamiento por deformación.

1.4.- Fuerzas existentes en la chapa durante el proceso.

La deformación de la chapa se realiza por una compleja combinación de fuerzas que se traducen en un flujo de material. La chapa se ve sometida a esfuerzos muy complejos de compresión, tangenciales y de tracción en sentido radial como se muestra en la figura 1.10. La máxima fuerza de compresión se sitúa cerca del borde. La máxima fuerza de tracción está localizada en una zona próxima a la curvatura del canto. Las magnitudes de estas fuerzas dependen de muchos factores como son la profundidad de embutido, la microestructura del material y sus propiedades, el diseño de las herramientas, la velocidad de deformación, entre otros.[12]

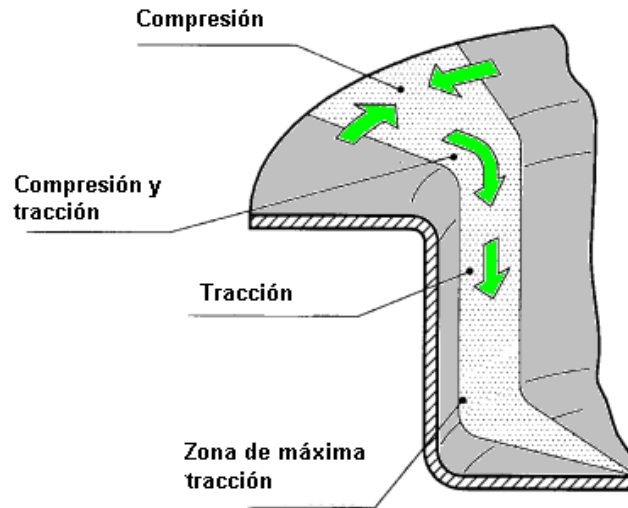


Figura 1.10: Fuerzas en el material.

Para que el proceso de embutición transcurra sin desgarro es preciso que el fondo resista la presión del punzón; por lo tanto, esta presión ha de ser inferior a la resistencia del fondo al arranque. Por otro lado, se producen pliegues en la chapa, por efecto de la compresión, tanto más intensos cuanto menor sea la distancia a los bordes exteriores.[2]

Criterios de plasticidad.

En las últimas décadas muchos han sido los criterios de plasticidad propuestos para describir el comportamiento plástico de materiales isotópicos y anisotrópicos. Algunos de los más destacados en cuanto a los materiales isotrópicos son [9]:

- Tresca(1864)

$$\sigma_I - \sigma_{III} = Y, \quad (1.6)$$

- Von Misses(1913)

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 2Y^2 \quad (1.7)$$

- Drucker(1949)

$$J_2^3 - cJ_3^2 = k^2 \quad (1.8)$$

- Hershey(1945) e Hosford(1972)

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^{2a} + (\sigma_2 - \sigma_3)^{2a} + (\sigma_1 - \sigma_3)^{2a} = 2Y^{2a} \quad (1.9)$$

Dónde: σ_I e σ_{III} son la mayor y menor de las tensiones principales en el tensor σ , Y es la tensión límite de elasticidad del material (tensión de fluencia), σ_1, σ_2 e σ_3 son las tensiones principales del tensor σ' ; J_2 e J_3 son constantes del tensor σ' , y $k^2 = 27(Y/3)^6$

Los criterios de plasticidad para materiales anisotrópicos fueron propuestos por varios autores siendo los más relevantes los planteados por: Hill (1948, 1979, 1990 y 1993), Bassani (1977), Budiansky (1984) y más recientemente por Barlat (1989, 1991, 1994, 1997, 2000).[7]

De los anteriores mencionados el más empleado en la actualidad en la simulación de procesos de conformación de chapas metálicas es el criterio de Hill (1948) debido a que es el que menos limitaciones presenta ya que los criterios Hill (1990 y 1993) apenas se aplican a estados tensionales planos y los propuestos en los años 1979 y 1993 poseen limitaciones asociadas a la dirección de las cargas.[14]

El criterio de plasticidad propuesto por Hill en 1948 es una generalización del criterio cuadrático isotrópico propuesto por von Mises para materiales anisotrópicos ortotrópicos y se representa mediante la siguiente ecuación:[14]

$$F(\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + G(\sigma_{zz} - \sigma_{xx})^2 + H(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + 2L\sigma_{yz}^2 + 2M\sigma_{xz}^2 + 2N\sigma_{xy}^2 = Y^2 \quad (1.10)$$

Donde F, G, H, L, M, y N son parámetros de anisotropía del criterio de Hill (1948) fácilmente determinables mediante tres ensayos de tracción uniaxial respectivamente a 0°, 45° y 90° respectivamente en la probeta obtenida del material a embutir.

Leyes de endurecimiento

El proceso de endurecimiento y la anisotropía son dos fenómenos mecánicos muy importantes a considerar en los procesos de conformado de chapas. La anisotropía está asociada a la estructura cristalográfica inicial del material y a los criterios de plasticidad, adoptándose leyes de plasticidad asociadas o no. Por otro lado el comportamiento

plástico esta descrito por lo general por las leyes de endurecimiento ya sea isotrópico, cinemático o la combinación de ambos.[13]

Durante el endurecimiento isotrópico la superficie mantiene su forma mientras el crecimiento de su tamaño es controlado por un parámetro de endurecimiento.

Las leyes propuestas por Swift y Voce son las leyes de endurecimiento isotrópico más empleadas en la actualidad en los programas de simulación por elementos finitos de los procesos de conformado de chapas metálicas. Dichas leyes se reflejan a través de las siguientes ecuaciones [15]:

Swift (1947)

$$Y = C \left(\epsilon_0 + \bar{\epsilon}^p \right)^n \quad (1.11)$$

Voce (1948)

$$Y = Y_0 + R, \quad (1.12)$$

siendo

$$\dot{R} = C_Y (Y_{sat} - R) \dot{\bar{\epsilon}}^p \quad \text{y} \quad R(0) = 0 \quad (1.13)$$

En las ecuaciones planteadas anteriormente Y e Y_0 son respectivamente la evolución de la tensión límite de elasticidad (fluencia) y el límite inicial de elasticidad en tracción uniaxial, $\bar{\epsilon}$ y $\bar{\epsilon}^p$ son la deformación logarítmica equivalente y la deformación plástica equivalente respectivamente y los demás parámetros son constantes de los materiales a determinar experimentalmente.

Sin embargo la asociación a estas leyes de una ley de endurecimiento cinemático es fundamental ya que permite la exactitud en la previsión del retorno elástico en el comportamiento del material springback. El endurecimiento cinemático ocurre cuando la superficie no cambia de forma ni de tamaño, pero se traslada en el espacio de tensiones principales, de manera que si originalmente estaba descrita por una ecuación $F(\sigma, \alpha)=0$, después de un incremento de deformaciones, su descripción será $F(\sigma - x_0, \alpha)=0$ (x_0 son las coordenadas del nuevo centro y la dirección de la traslación está determinada por la del incremento de deformación plástica.[15]

Las leyes de endurecimiento cinemático más destacadas fueron las propuestas por Prager (1955) y Ziegler (1959) y Lemaitre & Chaboche (1985), esta última es la ley de endurecimiento cinemático no lineal más empleada en la actualidad en combinación con la ley de endurecimiento isotrópico Swift y Voce [5]:

- Lemaitre & Chaboche

$$\dot{\mathbf{X}} = C_X \left[\frac{X_{sat}}{\bar{\sigma}} (\boldsymbol{\sigma}' - \mathbf{X}) - \mathbf{X} \right] \dot{\bar{\epsilon}}^p, \quad (1.14)$$

Con $\mathbf{X}(0) = \mathbf{0}$

Donde X_{sat} y C_X son parámetros de los materiales y $\mathbf{X}$ es el tensor de tensiones.

La selección de una ley de endurecimiento dependerá de varios factores como son: la exactitud que se requiera, la relevancia de la velocidad de deformación para un determinado proceso o sollicitación, de la trayectoria de deformación y cambios a que se someta el material y por último dependerá de los resultados de los ensayos mecánicos e información experimental disponible para identificar los parámetros necesarios para cada ley de endurecimiento.[16]

1.5.- Métodos numéricos.

Los métodos numéricos son los más empleados en la actualidad en la predicción del comportamiento del material en los procesos de conformado de chapas, dentro de dichos métodos se destaca el método de los elementos finitos por su gran exactitud en la respuestas brindadas a este tipo de problema de ingeniería.

Los primeros trabajos publicados de simulaciones de chapa se remontan al final de la década de los 60 cuando Woo propuso una solución a un problema de conformado de chapas mediante el método de diferencias finitas. Este método se emplea poco ya que está limitado a simulaciones de conformado axisimétrico (2D), además no permite la aplicación de las condiciones de fronteras de una forma tan general como es posible en el método de los elementos finitos.[17]

El verdadero florecimiento de la simulación numérica en los procesos de conformación de chapas metálicas solo fue posible gracias al desarrollo de los elementos finitos. En trabajos realizados por Wifi en 1976, Gotoh e Ishise en 1978 y Wang y Budiansky también en este año se empleaba un modelo rígido-plástico que al igual que el modelo elasto-plástico propuesto más tarde utilizaba un elemento tipo membrana. Todos los trabajos mencionados anteriormente empleaban formulaciones estáticas resueltas mediante algoritmos implícitos o explícitos, no fue hasta 1977 que Belytschko y Mullen presentan un estudio que emplea métodos dinámicos.[18]

Método de los elementos finitos.

La simulación de procesos de conformado de chapas metálicas por elementos finitos es un desafío multidisciplinar ya que exige conocimiento de la mecánica del propio proceso tecnológico a la hora de modelar el comportamiento del material en el desarrollo del problema y se necesita dominar la base matemática necesaria para comprender los algoritmos planteados para dar la solución requerida.

El Método de los Elemento Finitos se trata de una simplificación de las ecuaciones planteadas en la teoría de la elasticidad y plasticidad, puesto que su forma diferencial se sustituye por un conjunto discreto de ecuaciones y de sus respectivas condiciones de contorno. En función del número de estas ecuaciones será necesario o no implementar el problema para su resolución de forma computarizada.[2]

Para lograr representar el medio continuo (sistema real) que se quiere analizar de forma computacional y obtener las soluciones que se requieran de él es necesario realizar una discretización espacial de dicho medio la cual se logra mediante la construcción de una malla de elementos finitos en la cual se formularán las ecuaciones antes mencionadas.

Discretización del medio continuo.

La calidad de la discretización del sistema real influye en la exactitud de los resultados obtenidos por la simulación numérica. La calidad de la discretización depende de dos factores fundamentalmente: la geometría de la malla o topología y el tipo de elemento

finito adoptado para la discretización o tipología. El primer factor se relaciona con aspectos geométricos de la malla o sea buscar que la malla sea lo más homogénea posible y que no existan variaciones bruscas del tamaño del elemento (dentro de lo posible), las mallas de elementos finitos pueden ser estructuradas o no estructuradas, regular o irregular e isotrópicas y anisotrópicas. El segundo factor involucra aspectos relacionados con la modelación del problema o con el modo en que las ecuaciones sean formuladas y al comportamiento de cada elemento. [19]

1.6.- Métodos de refinamiento de la malla.

Con el objetivo de disminuir los errores en la discretización del medio continuo, el tiempo de solución y mejorar la calidad de los resultados se emplean los métodos de refinamiento de malla, a continuación se exponen algunos de los más utilizados en las simulaciones por elementos finitos de procesos de conformación de chapas metálicas:

- Refinamiento uniforme de la malla: es la solución más simple, consiste en la generación de una nueva malla más refinada que la anterior. Este tipo de refinamiento conlleva a que en gran parte del dominio el grado de refinamiento sea mucho mayor del necesario lo que se refleja en la simulación como un gasto innecesario de tiempo computacional.[20]
- Refinamiento local de la malla: este método consiste en la modificación de la malla ya existente mediante la refinación de los elementos que se encuentran en la zona donde se requiere mayor precisión en los resultados. Se debe tener especial atención a la forma del elemento ya que durante este método la tipología del elemento puede cambiar lo que se reflejaría en imprecisiones numéricas.[21]
- Refinamiento adaptativo: Mediante este método se genera una malla nueva para todo el dominio computacional compatible en cada elemento con un indicador de error o criterio de remallado. A pesar de su elevado costo computacional asociado a la operación de refinamiento es posible la obtención de una malla óptima[22].

Elección del elemento.

Es necesario definir en dependencia de los estados tensionales presentes, la complejidad de las condiciones de cargas y de frontera si el problema constituye un problema 2D o 3D ya que esto definirá que tipo de elemento representará mejor el sistema real.

Básicamente existe dos tipos de elementos finitos usados en la simulación numérica de procesos de conformado de chapas: los llamados elementos 3D y los elementos 2D. Existen muchas referencias de que elemento utilizar para una determinada sollicitación aunque no existe un criterio único de cuál es el “mejor tipo de elemento”. La selección de un elemento está determinada por el tipo de problema, su comportamiento ante sollicitaciones requeridas, la economía en cuanto al tiempo computacional y la exactitud del resultado.[23]

Formulación general para un elemento.

a).- Campo de desplazamiento.

Para el desarrollo del siguiente modelo matemático se considerará un elemento genérico e de nodos i, j , y superficie S^e y volumen V^e donde [2]:

$$\{a^e\} = \begin{Bmatrix} \{a_i\} \\ \{a_j\} \\ . \\ . \end{Bmatrix} \quad (1.15)$$

Donde $\{a_i\}$ es el vector columna de desplazamientos de cada nodo en coordenadas locales.

En la figura 11 será entonces de forma:

$$\{a_i\} = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ w_i \end{Bmatrix} \quad (1.16)$$

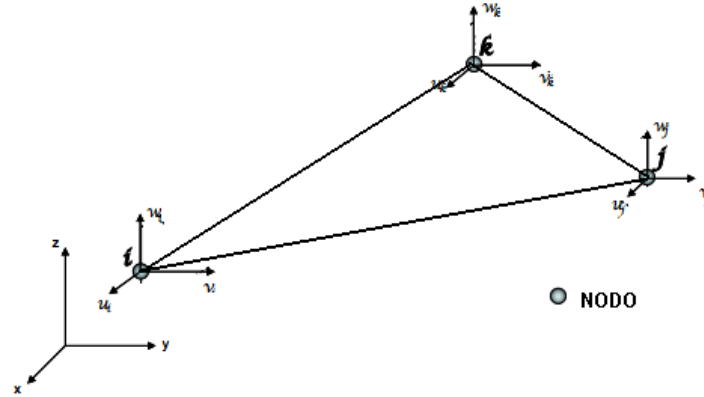


Figura 1.11: Representación esquemática del campo de desplazamientos de un elemento.

Entonces el campo de desplazamiento del elemento teniendo en cuenta todos sus nodos quedará definido entonces por la siguiente ecuación [2]:

$$\{u(xyz)\} = [N(xyz)] * \{a^e\} = [[N_i(xyz)], [N_j(xyz)]] * \begin{Bmatrix} \{a_i\} \\ \{a_j\} \\ \vdots \end{Bmatrix} \quad (1.17)$$

Donde $[[N_i(xyz)], [N_j(xyz)]]$ son las denominadas matrices de forma, que se caracterizan por las siguientes propiedades:

- Son matrices cuadradas, ya que el número de componentes del vector columna $\{u(xyz)\}$ es igual al número de componentes en $\{a_i\}, \{a_j\} \dots$
- $[N_i(x_i, y_i, z_i)] = I$, $[N_i(x_j, y_j, z_j)] = [0]$ si $i \neq j$ puesto que las funciones de interpolación toman valores de los desplazamientos nodales en los mismos.
- Si se considerasen las mismas funciones de forma en todas las componentes $\{u(xyz)\}$ se observa que $[N_i(x_i, y_i, z_i)] = [N_i(xyz)] * I$ en donde $[N_i(xyz)]$ es la función escalar de forma

b).- Campo de deformación del elemento.

Las deformaciones se obtienen a partir de derivadas parciales de las componentes del corrimiento y su forma general es[2]:

$$\{\delta\} = [S] * \{u\} = [S] * [N] * \{a^e\} = [B] * \{a^e\} \quad (1.18)$$

Con;

$[B]=[S]*[N]$, donde $[S]$ es una matriz operacional que incluye las derivaciones parciales adecuadas y $[N]=[[N_i],[N_j],...]$

c).- Campo de esfuerzos del elemento

El campo de esfuerzos $\{\sigma\}$, que contendrá el mismo número de elementos que el campo de deformaciones $\{\delta\}$ podrá determinarse por la siguiente expresión:

$$\{\sigma\}=[D]*\{\varepsilon\}=[D]*\{\delta\}-[D]*\{\eta\} \quad (1.19)$$

Donde $[D]$ es la matriz de rigidez del material y $\{\eta\}$ son las deformaciones térmicas.

1.7- Repercusión del empleo del método de elementos finitos en la industria.

El análisis de elementos finitos, permite la construcción de diseños enteros, su refinación y la optimización de éstos antes de que el diseño sea manufacturado. Esta poderosa herramienta de diseño ha mejorado en gran forma, ambos, el estándar de diseños en ingeniería y la metodología del proceso del diseño en muchas aplicaciones industriales. La introducción del análisis de elementos finitos ha reducido el tiempo que se toma para llevar productos desde el concepto hasta la línea de producción. A través de la mejora de diseños de prototipos iniciales usando el análisis de elementos finitos se han acelerado, principalmente, las pruebas y el desarrollo. A grandes rasgos, los beneficios del análisis de elementos finitos son: una alta precisión, diseño mejorado, y una mejor percepción de los parámetros críticos de diseño, prototipos virtuales, menos prototipos de *hardware*, y ciclo de diseño más rápido y económico, alza en la productividad y en las ganancias.

Es tendencia actual que las industrias en el mundo utilicen las simulaciones mediante el método de los elementos finitos como una vía para aumentar la productividad. Dentro de las ventajas que traería consigo la integración de esta avanzada herramienta al proceso productivo de una industria de conformación de chapas se pueden citar [24]:

1. Reducción de tiempo.
 - Reducción del periodo de prueba y error.
 - Rápida respuesta a posibles alteraciones.
2. Reducción de los costos.

- Productos más baratos.
 - Aumento de la fiabilidad
 - Mejor selección de prensas
 - Menores costos de herramientas de conformar(troqueles)
3. Aumento de la calidad de los productos.
- Permite optimizar parámetros del proceso.
 - Se pueden realizar procesos de conformados más complejos.
 - Se selecciona un material óptimo.

1.8- Conclusiones parciales.

1. La revisión bibliográfica demuestra que existe una abundante información sobre los procesos de embutición de chapas metálica, la misma se puede encontrar tanto en soporte duro como en soporte digital mediante artículos científicos, libros, catálogos, normas y manuscritos, los cuales han sido elaborados basándose en experiencias empíricas.
2. En la actualidad internacional existe una marcada tendencia por el desarrollo y empleo de un nuevo concepto denominado mecánica computacional, el cual se basa en el uso de técnicas y procedimientos computacionales que permiten modelar, simular y optimizar procesos de conformación de chapas metálicas.
3. En el ámbito nacional es de destacar que existen pocos trabajos que traten la simulación de los procesos de conformación de metales aun siendo esta herramienta una forma viable para lograr una reducción de los costos de producción y una mejoría considerable en la calidad final del producto.
4. De la información recopilada es fácil percatarse que en la actualidad el problema fundamental de la industria del conformado de chapas es la predicción del comportamiento del material de la chapa, para ello se emplean potentes softwares desarrollados que tienen como base de la teoría de la plasticidad basándose en diferentes criterios planteados por varios autores consultados en el proyecto.

CAPÍTULO II

MODELO DE CÁLCULO ANALÍTICO Y SIMULACIÓN DE PIEZAS EMBUTIDAS RECTANGULARES CON PESTAÑA

CAPÍTULO II: MODELO DE CÁLCULO ANALÍTICO Y SIMULACIÓN DE PIEZAS EMBUTIDAS RECTANGULARES CON PESTAÑA

2.1.- Generalidades

La determinación de los parámetros técnicos mediante el empleo del método analítico nos permitirá tener un punto de referencia a la hora de correr la simulación así como la determinación de algunos parámetros de diseño necesarios para la modelación del sistema real mediante un sistema CAD.

La revisión bibliográfica acerca de los cálculos analíticos de un proceso de conformación de chapas rectangulares arroja una amplia gama de métodos y criterios de varios autores y se concuerda con Bernal- Aguilar, Y al afirmar que no existe una metodología única donde se refleje de manera ordenada una secuencia de pasos para determinar los parámetros técnicos que permitan el cálculo y diseño de los troqueles de embutición sin que la diferencia entre los mismos llevados a cabo por diferentes equipos de trabajos difieran significativamente. Las recomendaciones se encuentran dispersas en la literatura y en ocasiones se apela a la experiencia del diseñador.

A continuación se empleará para la realización de este trabajo la metodología para el cálculo analítico de los parámetros de una pieza rectangular embutida propuesta por Bernal-Aguilar, Y y la metodología para la simulación del proceso de chapas rectangulares propuesta por el autor. Estas metodologías se aplican en el taller de moldes y troqueles de la INPUD “1ero de Mayo” de Santa Clara.

2.2.- Modelo analítico para el cálculo de piezas embutidas rectangulares.

Determinación del diámetro equivalente y la altura permisible a partir del diámetro equivalente de la pieza rectangular.

Basado en los estudios realizados por García y colaboradores[24], se presenta aquí una técnica novedosa que incorpora el concepto de “diámetro equivalente” para el cálculo del embutido de piezas rectangulares, basado en la teoría para el cálculo de piezas cilíndricas.

Estas expresiones son de utilidad a nivel del taller de fabricación para el desarrollo y diseño de nuevos productos o modificaciones necesarias a los ya existentes.

Teniendo en cuenta la teoría desarrollada para el embutido de las formas circulares, en el desarrollo de las formas rectangulares se introduce un nuevo concepto llamado “diámetro equivalente”, siendo este el diámetro del semiproducto circular cuya área es igual al área del semiproducto o silueta rectangular, es decir, de acuerdo a la figura 2.1.

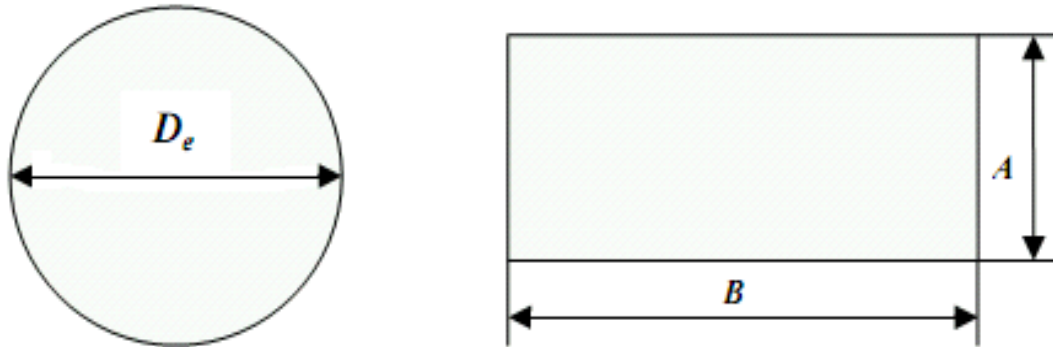


Figura 2.1: Semiproducto a embutir circular y rectangular.

Área del semiproducto circular:

$$A_C = \frac{\pi D_e^2}{4} \quad (2.1)$$

Área del semiproducto rectangular:

$$A_R = AB \quad (2.2)$$

Igualando ambas áreas $A_C = A_R$ se obtiene el diámetro equivalente “ D_e ”

$$D_e = 2\sqrt{\frac{AB}{\pi}} \quad (2.3)$$

El concepto de diámetro equivalente se emplea para deducir una expresión para el cálculo de la altura permisible de embutido de una pieza rectangular en una sola operación, a partir de la teoría para el embutido cilíndrico.

La altura h de una copa cilíndrica con un diámetro medio de la copa d como se representa en la figura 2.2.

$$h = \frac{(D^2 - d^2)}{4d} \quad (2.4)$$

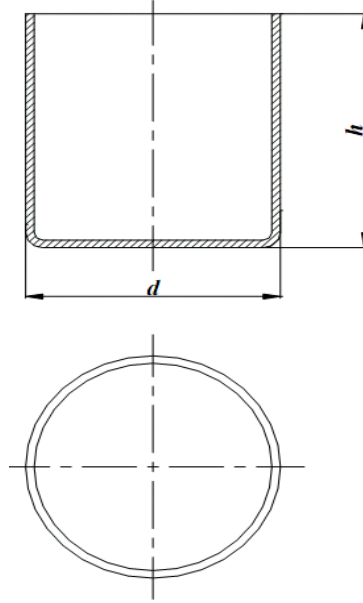


Figura 2.2: Parámetros geométricos de una pieza cilíndrica embutida a partir de un disco:

h = altura de la pieza, d = diámetro medio de la pieza.

En donde D es el diámetro del semiproducto a embutir. Por otra parte, aplicando el concepto de capacidad de embutición en la primera operación para piezas cilíndricas e incorporando la ecuación (2.3), se tiene:

$$\frac{D}{d} = \frac{D_e}{d_e} \quad (2.5)$$

Considerando que el máximo porcentaje de reducción $100(1 - d/D)$ que se obtiene en la práctica para una sola operación de embutido, es de 50% bajo condiciones óptimas del herramental y material de la lámina involucrado, entonces:

$$100(1 - \frac{d}{D}) = 100(1 - \frac{d_e}{D_e}) = 50\% \quad (2.6)$$

Resolviendo para d_e :

$$d_e = 0.5D_e = \sqrt{\frac{AB}{\pi}} \quad (2.7)$$

Sustituyendo (2.7) en la ecuación (2.4) se obtiene la expresión de la altura permisible de la copa cilíndrica en función del diámetro equivalente:

$$(h_{perm.})_C = \left[\frac{D_e - (0.5D_e)^2}{4(0.5D_e)} \right] = \frac{3}{8} D_e = \frac{3}{4} \sqrt{\frac{AB}{\pi}} \quad (2.8)$$

Por otra parte, considerando que en teoría, durante el proceso de embutido se cambia la forma no el volumen del material, es decir, es un proceso a volumen constante, entonces el volumen de la copa es igual al del recipiente rectangular, por lo que también se puede establecer:

Área de la copa cilíndrica:

$$A_{CC} = \pi d_e (h_{perm.})_C + \frac{\pi d_e^2}{4} \quad (2.9)$$

Área del recipiente rectangular ver figura 2.3:

$$A_{RR} = ab + (2a + 2b)(h_{perm.})_R \quad (2.10)$$

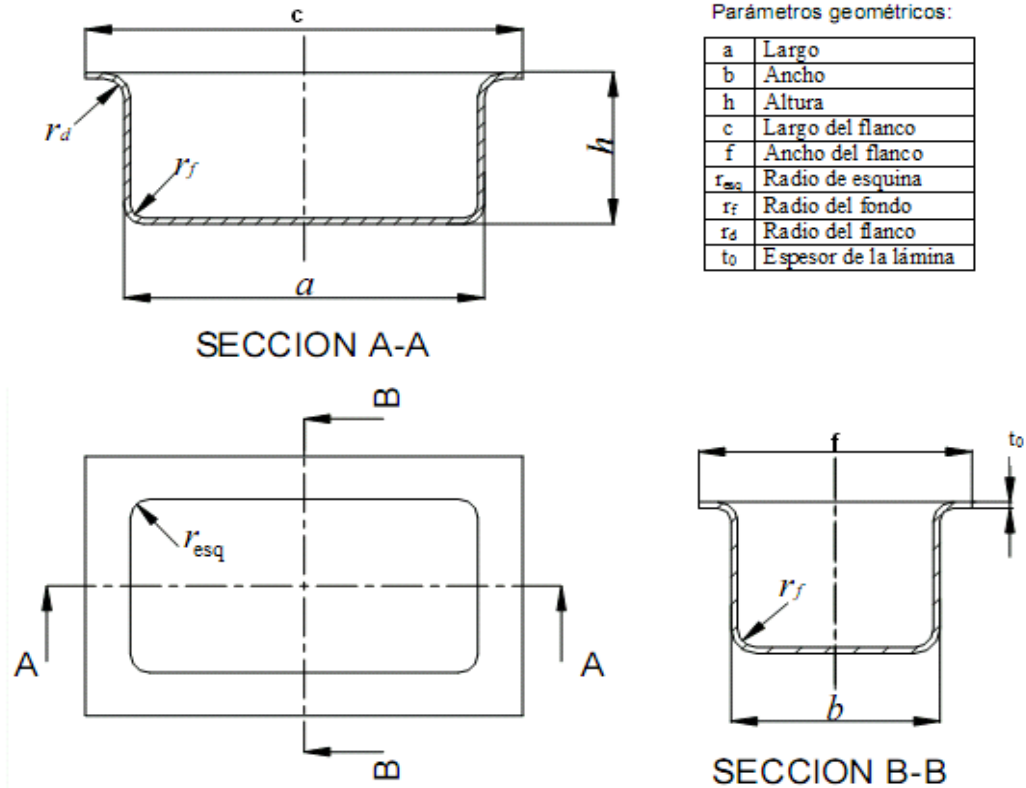


Figura 2.3: Representación esquemática de los parámetros geométricos de una pieza rectangular embutida.

Donde $(h_{perm.})_C$ y $(h_{perm.})_R$ representan la altura permisible de la copa cilíndrica y el recipiente rectangular respectivamente.

Igualando (2.9 y 2.10) y despejando la altura permisible para el recipiente rectangular,

$(h_{perm.})_R$ se obtiene:

$$(h_{perm.})_R = \frac{\pi d_e (h_{perm.})_C + \frac{\pi d_e^2}{4} - ab}{2(a+b)} \quad (2.11)$$

Esta ecuación es válida cuando $t_0 \ll a$; $t_0 \ll b$

Cálculo de los parámetros activos de la herramienta

El radio de la matriz r_m , depende del diámetro equivalente de la pieza y de su espesor. En la literatura aparecen recomendaciones para su determinación. Kakandikar ofrece una relación en la que el factor de 0.0035, puede incrementarse hasta 0.08 en la ecuación 2.12

$$r_m = 0.0035[50 + (D_e - d_e)]\sqrt{t_0} \quad (2.12)$$

El radio del punzón r_p nunca debe ser menor que el de la matriz. Se recomienda concebir el radio del punzón mayor que el de la matriz en un factor de 3 a 5 veces.

$$r_p = (3 \dots 5) * r_m \quad (2.13)$$

Fuerzas y tensiones para ejecutar la operación de conformación

Una fórmula empírica para la determinación de la fuerza total de embutido es la ofrecida por Schaeffer [11] en la que se consideran la fuerza ideal, las fuerza de fricción (matriz/prensachapas y matriz/chapa) y la fuerza de retroceso elástico.

La fuerza ideal de embutición, necesaria para lograr la transformación del semiproducto inicial, es calculable por:

$$F_{id} = \left[DK_{fm} \ln \frac{D}{d_e} \right] \quad (2.14)$$

Dónde D,

$$D = (0.77 * \frac{D_e}{d_e} + 0.23)d_e = 2. * \sqrt{\frac{c. * f}{\pi}} \quad c \text{ y } f \text{ (ver figura 2.3)} \quad (2.15)$$

Fuerza de fricción entre matriz prensachapas:

$$F_{APC} = \left[D * \mu * p_{pc} \frac{d_e}{t_0} * \frac{\beta_0^2 - 1}{2\beta} \right] \quad (2.16)$$

Fuerza de fricción en la zona del radio de la matriz:

$$F_{AR} = \left[\left(e^{\frac{\mu}{2}} - 1 \right) * (F_{id} + F_{APC}) \right] = \left(e^{\frac{\mu}{2}} - 1 \right) * \pi d_e t_0 \left(k f m * \ln \frac{D}{d_e} + \mu p_{pc} * \frac{d_e}{t_0} * \frac{\beta_0^2 - 1}{2\beta} \right) \quad (2.17)$$

Fuerza del retorno elástico:

$$F_{RE} = \left[\pi * D t_0 k f_1 \frac{t_0}{4r_m} \right] \quad (2.18)$$

La fuerza de embutido total es la suma de las ecuaciones (2.14), (2.16), (2.17) y (2.18) por lo que se obtiene:

$$F_{m\acute{a}x} = F_{id} + F_{APC} + F_{AR} + F_{RE} \quad (2.19)$$

Otra fórmula empírica para el cálculo de la presión del prensachapas es la que ofrece Kakandicar citando a Siebel:

$$p_{pc} = 0.0025 \left[(\beta_0 - 1)^2 + 0.5 \frac{d_e}{100t_0} \right] \sigma_u \quad (2.20)$$

La fuerza de rotura del material permitida en un proceso está limitada por la carga que puede ser transmitida a la chapa en las regiones más peligrosas de la pieza embutida. Según [5] esta fuerza se puede calcular por:

$$F_{cr} = \pi D_e t_0 \sigma_u \quad (2.21)$$

Parámetros técnicos del proceso.

El juego de embutido se determina por la expresión:

$$z = t_0 + k \cdot \sqrt{10t_0} \quad (2.22)$$

Donde K asume los valores de 0.07, para el acero; 0.02 para el aluminio y 0.04 para otros materiales ferrosos.

El valor medio de las tensiones se determina por la expresión:

$$kfm = \frac{k_{f_1} + k_{f_2}}{2} \quad (2.23)$$

Tensión radial máxima

$$\sigma_{rd} = kfm * \ln\left(\frac{D/2}{r_0}\right) = kfm * \ln \frac{D}{d_e} \quad (2.24)$$

Tensión radial debido al rozamiento

$$\sigma_{RA} = \frac{F_{APC}}{\pi d_e t_0} = \mu * p_{pc} * \frac{d_e}{t_0} * \frac{\beta_0^2 - 1}{2\beta} \quad (2.25)$$

Tensión de fricción en el radio de la matriz

$$\sigma_{AR} = \frac{F_{AR}}{\pi D t_0} \quad (2.26)$$

La tensión total se determina como:

$$\sigma_A = \sigma_{RA} + \sigma_{AR} \quad (2.27)$$

Tensión de retorno elástico se determina por la siguiente expresión:

$$\sigma_{RE} = k_{f_1} * \frac{t_0}{4r_m} \quad (2.28)$$

Tensión total de embutición se determina como:

$$\sigma_{total} = \sigma_{rd} + \sigma_A + \sigma_{RE} \quad (2.29)$$

La tensión total no debe sobrepasar la σ_u del material ya que puede ocurrir un rompimiento de la chapa.

Las deformaciones se determinan por las siguientes expresiones:

$$\phi_1 = \ln \frac{\sqrt{D_e^2 + d_e^2} - D^2}{d_e} = \ln \sqrt{\beta_0^2 + 1 - \beta^2} \quad (2.30)$$

$$\beta_0 = \frac{D_e}{d_e} \quad (2.31)$$

$$\beta = \frac{D}{d_e} \quad (2.32)$$

$$\varphi_2 = \ln\left(\frac{D_e}{d_e}\right) \quad (2.33)$$

$$\varphi_3 = -(\varphi_1 + \varphi_2) \quad (2.34)$$

2.3.- Metodología para la simulación del proceso de embutido para piezas rectangulares usando el software Stampack.

Stampack es un software de elementos finitos para la simulación numérica de diversos tipos procesos de conformado de metales. Stampack permite al usuario realizar una simulación completa con una interfaz gráfica amigable que facilita su empleo. A grandes rasgos el software permite importaciones de archivos de intercambio entre sistemas CAD y sistemas CAE, preparar la geometría, mallar las diferentes partes, especificar el proceso de conformación que se empleará, iniciar el cálculo y, finalmente, analizar los resultados sin cambios en el entorno del software.

Antes de iniciar el proceso de simulación, es necesario definir claramente los objetivos de la misma, el método que se empleará basado en la información recopilada en el proceso real y los recursos informáticos disponibles. El aspecto más importante es llevar a cabo los objetivos utilizando las funciones de código de Stampack ya que este ha sido seleccionado como la herramienta de simulación. La simulación permite el estudio de los procesos de conformado minimizando el uso de técnicas de prueba y error comúnmente empleadas en la industria cubana actualmente lo que tributa a un elevado coste en la fabricación de prototipos de troqueles.

Obtener resultados correctos en la simulación de problemas reales exige considerar varios factores: la complejidad de la geometría de las herramientas de estampación y el semiproducto, los materiales que se utilizan, la interacción entre la chapa y las herramientas y las magnitudes de las cargas aplicadas.

Dentro del software Stampack se incluyen las funcionalidades siguientes:

- **Modelador geométrico 2D y 3D** para importar, crear y reparar la geometría.
- **Módulo de Mallado** para generar la malla de elementos finitos y asignarle las diversas características que tendrá la misma.
- **Definición de datos** para otorgarle al modelo numérico las condiciones físicas del proceso real y configurar así nuestro análisis.
- **Módulo de cálculo** para resolver el análisis basado en el método numérico de los elementos finitos
- **Visualizador gráfico** para evaluar los resultados del análisis.

Estas funcionalidades definen de forma general el procedimiento que debe seguirse para realizar un análisis de elementos finitos mediante el software Stampack, el procedimiento específico para el caso de estudio tratado en el trabajo se expone a continuación en la figura 2.4 explicándose en el presente capítulo cada paso en el mismo.

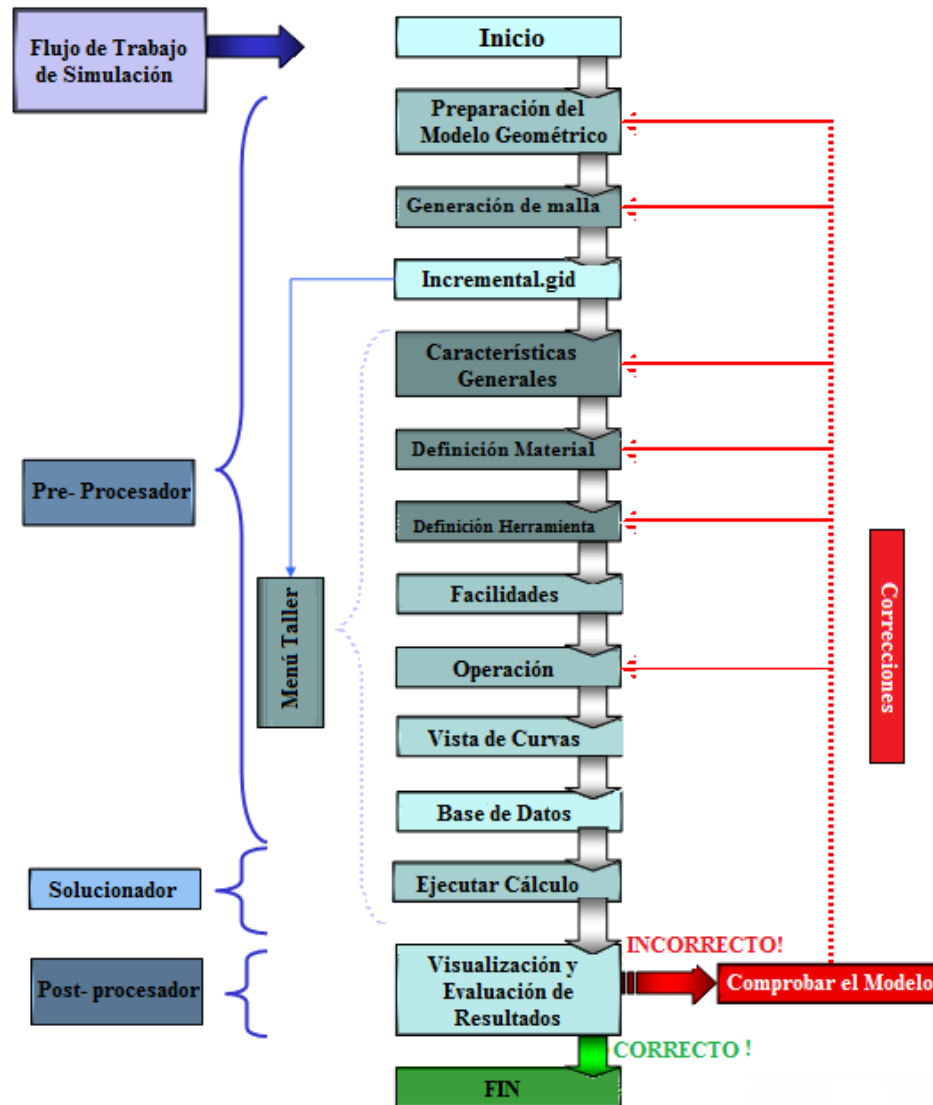


Figura 2.4: Metodología de simulación en el software Stampack.

Importación, generación y reparación de la geometría.

El software Stampack soporta tanto la generación interna en su ambiente gráfico de geometrías como la importación en diferentes formatos de archivos que contienen geometrías creadas en un sistema CAD (.sat, .step, .iges, entre otros) así como las tolerancias establecidas en las mismas, dichos archivos serán transformados al formato interno del software para ser mallados, la opción de generar o importar la geometría es influenciada por la complejidad de la misma o por decisión del usuario. Stampack también permite el chequeo de la geometría importada con el objetivo de encontrar

errores o discontinuidades en las mismas ya que de existir estos la generación de la malla es imposible.

Para el caso del embutido del fregadero rectangular y con el objetivo de simplificar el tiempo de resolución, la geometría real se representa mediante superficies no representativas (espesor despreciable) generadas en un sistema CAD (Autodesk Inventor 2012). No fue necesaria su reparación una vez exportada mediante un archivo de intercambio (.sat) ya que dicha operación se llevó a cabo en el propio sistema CAD, no obstante se verificó mediante el uso del Stampack. La geometría del conjunto es simétrica solo longitudinalmente como se puede apreciar en el croquis de las herramientas representado en las figuras 2.5 y 2.6.

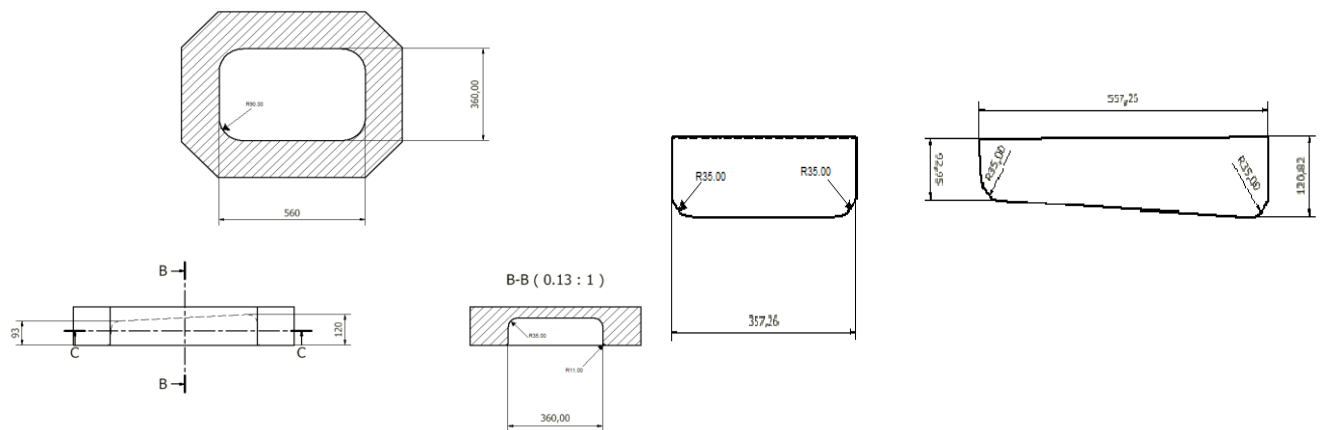


Figura 2.5: Geometría de la matriz (a) y el punzón (b) de la pieza rectangular

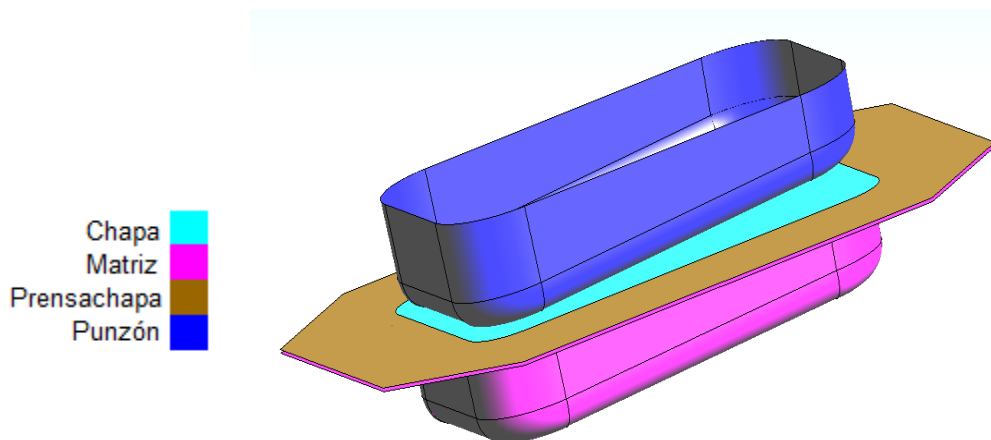


Figura 2.6: Geometría del conjunto de la pieza rectangular

Generación de la malla.

Una vez definido el modelado de la geometría real es hora de discretizar el modelo mediante la generación de la malla de elementos finitos. El software Stampack considera para la generación de una malla dos tipos de mallas y dos métodos de generación de la misma, los tipos de mallas son, un tipo de malla si el componente es deformable (chapa y prensachapas) y otro si no lo es (troqueles), y la generación de la misma puede ser por generación directa y por copia. Creada la malla de elementos finitos se asigna todos los parámetros y condiciones del proceso de embutición sobre ella, esto implica que cualquier regeneración de la malla de la chapa o de cualquier herramienta supondrá eliminar toda condición asignada. Dos motivos pueden llevar a la regeneración de una malla: una modificación de la geometría original o una optimización de la malla generada.

La calidad del resultado de una simulación depende en gran medida de la calidad de la malla generada para las diferentes partes materiales del proceso. Generar una malla correcta va a permitir obtener resultados válidos y minimizar el tiempo de cálculo. Para poder obtener una malla correcta el pre-procesador permite generar mallas totalmente regulares (mallas estructuradas), cuya definición puede resultar laboriosa, como mallas no estructuradas que no presentan igual regularidad pero su generación es más automática así como realizar refinamientos locales de la misma y refinamiento adaptativo.

Otro aspecto fundamental a la hora de generar una malla de elementos finitos es la selección del elemento, el cual debe ser capaz de replicar el comportamiento del material real.

El software ofrece para el mallado de los componentes no deformables tres tipos de elementos:

- Elemento cuadrilátero de cuatro nodos para problemas de 2D
- Elemento triangular tipo lámina de tres nodos para problemas de 3D de chapas delgadas.

- Elemento hexaédrico de seis nodos para problemas de 3D de chapas con espesor considerable.

Para el caso de la discretización del problema tridimensional planteado en el trabajo se utiliza el elemento triangular tipo lámina, el cual presenta tres nodos multicapas, un comportamiento elastoplástico como material base y uno isotrópico compresible como material estructural lo cual brinda las ventajas de una definición sencilla del problema y una mayor rapidez de cálculo. Dicho elemento permite la discretización de las herramientas deformables (chapas o prensachapas) la representación gráfica en tres dimensiones del elemento es la representada en la figura 2.7.

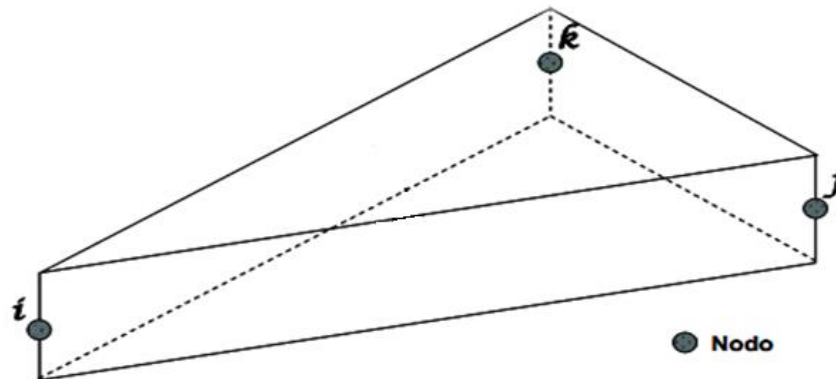


Figura 2.7: Elemento triangular de lámina.

El mallado se realizó con una malla no estructurada para toda la geometría de la pieza. La chapa se malló con 10528 elementos triangulares de 3mm de longitud como se muestra en la figura 2.8, tratando de que fuera lo más simétrica posible para lograr mejores resultados, el prensachapas con 290 elementos también triangulares, pero no deformables de 20 mm y con una distribución uniforme de la fuerza de prensado. El mallado de la matriz y el punzón se realizó con elementos triangulares no deformables de 20 mm (15866 y 11808 respectivamente). La geometría de las herramientas se representa en la figura 2.9. El mallado de las herramientas no es necesario que sea pequeño ya que las mismas se consideran cuerpos no deformables (rígidos), solo se refinan los radios de redondeo pues intervienen directamente en la forma final de la chapa.

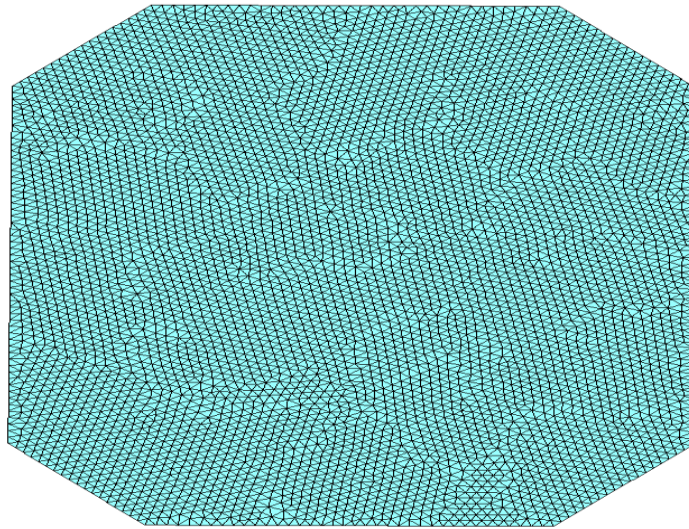


Figura 2.8: Mallado del semiproducto.

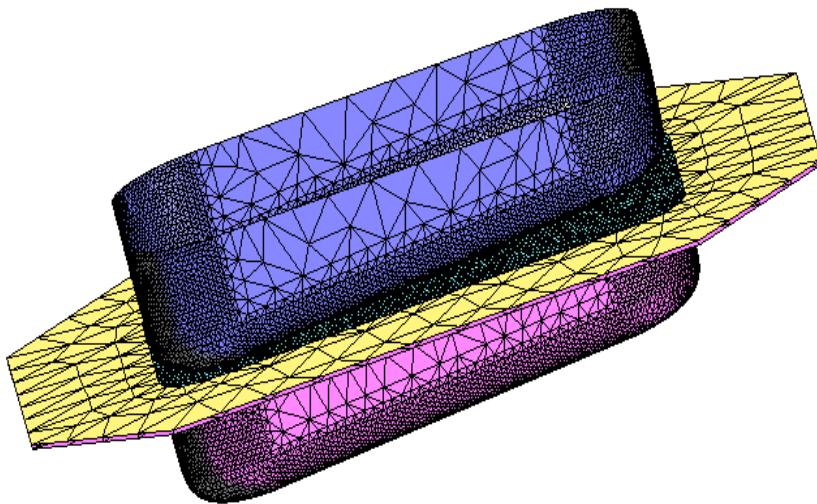


Figura 2.9: Mallado del conjunto.

Incremental .gid

En este paso se le declara al software el tipo de problema que el usuario requiere, en este caso es un problema Incremental el cual permite el acceso al menú donde se le asignaran los parámetros típicos de un proceso de estampado de chapas a la malla de elementos finitos.

Características generales.

En este paso se definen algunas generalidades sobre el problema a resolver como es el tipo de proceso que se desea simular (en nuestro caso el embutido de chapas), el sistema de unidades con el que se desea trabajar que en nuestro caso es el sistema internacional (SI), el valor numérico de la constante de la gravedad (9.81) y la dirección que la misma tendrá (+Z) , definir si el problema es en 2D o en 3D y si en la geometría existe alguna simetría por alguno de sus ejes.

Definir el material.

El software Stampack contempla una serie de materiales los cuales permiten una modelización fiel al comportamiento de los materiales reales empleados en los procesos de conformación de chapas, los mismos se dividen en dos niveles o etapas:

- Un primer nivel que contienen propiedades de material básicas (Módulo de Young, Densidad y Coeficiente de Poisson). Denominado MATERIAL BASE.
- Un segundo nivel donde se apunta al material base previamente definido y añade aspectos estructurales relacionados con la formulación del tipo de elementos (Espesor, Número de Layers, Integración de variables entre otras) denominado MATERIAL ESTRUCTURAL

El material de la chapa a simular en el presente trabajo es acero inoxidable AISI 304 para embutidos extra profundos, debido a sus propiedades anticorrosivas y su acabado brillante son muy empleados en la industria alimenticia y química, en la producción de utensilios domésticos, médicos y en contenedores. El modelo constitutivo utilizado en la simulación se rige por un comportamiento elastoplástico como se muestra en la figura 2.10 y una ley de endurecimiento no lineal Isotropic- Nadai la cual incluiría una variación en la curva correspondiente a la componente plástica de la figura anteriormente mencionada. Los resultados de las pruebas de calidad realizadas al material luego de ser suministrado por el proveedor se exponen en la tabla 2.1 y 2.2.

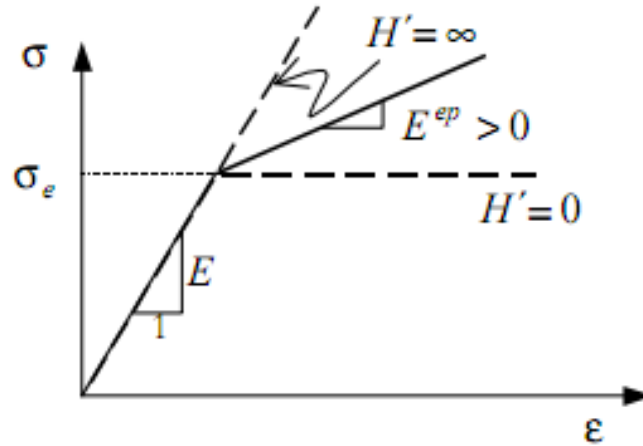


Figura 2.10: Curva tensión-deformación ideal con endurecimiento por deformación.

Tabla 2.1: Composición química del acero inoxidable.

Componente	C (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Si (%)	Cr (%)	Ni (%)	N (%)
Especificaciones (ASME, AISI)	< 0.08	< 2.00	< 0.045	< 0.030	< 0.75	18.00-20.00	8.00-10.50	< 0.01
Prueba	0.080	1.10	0.0036	0.0035	0.51	18.10	8.06	0.006

Tabla 2.2: Propiedades mecánicas del acero inoxidable.

Parámetro	Densidad (Kg/m ³)	Módulo de Young (GPa)	Límite elástico (MPa)	Tensión de fluencia (MPa)	Elongación (%)	Dureza (HV)
Especificaciones (ASME, AISI)	8030	183	>515	> 205	> 40	< 201
Prueba	8030	183	755	359	46	189

La curva de relación tensión-deformación del material obtenida a partir de los cálculos realizados por el software una vez introducidos los datos obtenidos del proveedor se muestra en la siguiente figura.2.11

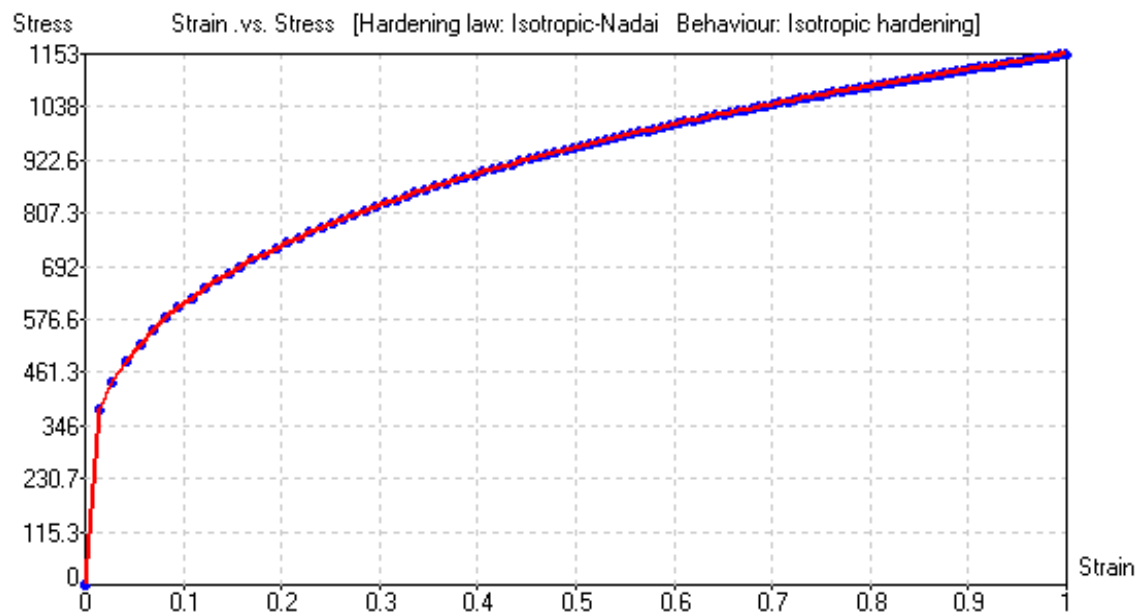


Figura 2.11: Curva de tensión-deformación del material a simular

Condiciones de contorno.

Todos los grados de libertad de la matriz, en cuanto al movimiento, han sido restringidos de forma tal que la misma permanezca inmóvil, mientras que al punzón y al prensachapa solo le es permitido desplazarse verticalmente hasta un límite previamente determinado por el autor. El contacto entre las superficies de todas las herramientas y la chapa se modeló con un coeficiente de fricción tanto estático como dinámico de 0.15, esto se justifica mediante el uso de un suministro constante de lubricante conjuntamente con el valor de resistencia al movimiento entre dicho par friccional y un coeficiente de penalización de 0.30 obedeciendo las recomendaciones dadas por el software para procesos de conformación de chapas metálicas.

Estos datos son de vital importancia ya que rigen el algoritmo de contacto del software los cuales se basan en el método de penalización. La fricción se rige por la ley de Coulomb. En contactos tridimensionales las superficies se discretizan mediante porciones triangulares o de forma cuadrilátera definiéndose una como superficie “Slave” (esclavo) y otras como “Master” (amo). El algoritmo de contacto controla la penetración de los

nodos esclavos dentro de la superficie “master”, y cuando se detecta penetración se aplica una fuerza de repulsión entre ese nodo esclavo y el nodo master más cercano. La magnitud de la fuerza es proporcional al valor de la penetración y es función del coeficiente de penalización.

Cargas aplicadas al sistema.

Se definió un desplazamiento para el punzón de 120 mm en la dirección $-Z$ coincidente con la profundidad real de conformación, el mismo está gobernado por una determinada curva de velocidad definida por el autor, al prensachapas se le aplicó una carga uniformemente distribuida en toda su geometría, con un valor constante de 70 ton (carga aplicada en el proceso real), no siendo necesaria la introducción de cierta amortiguación en dicha fuerza para asegurar una presión constante sobre la chapa, ya que el software introduce dicha amortiguación automáticamente. El desplazamiento del prensachapas no es necesario su descripción mediante una curva de velocidad ya que se considera que el mismo se encuentra en contacto con la chapa al inicio del proceso.

Definición de los parámetros de salida y solución del problema.

Todas las operaciones anteriormente realizadas preparan el modelo para la entrada en el módulo de cálculo que presenta el software, el cual permite seguir mediante una ventana de texto los avances o errores que se producen durante el proceso de resolución del problema. Al mismo se le definen las diferentes solicitudes exigidas por cada problema en particular y en que etapas se van a desarrollar. Para el caso objeto de estudio de este trabajo de diploma se definen en correspondencia con los objetivos planteados al iniciarse el mismo las siguientes solicitudes de salida:

- Espesor relativo
- Desarrollo de la chapa
- Las tensiones
- Las deformaciones
- Los desplazamientos totales

- La zona de conformación
- Coeficientes de la curva del límite de conformación.

Revisión y análisis de los resultados mediante el post-processor.

Como casi todos los softwares de elementos finitos el Stampack también posee un módulo cuyo objetivo es la visualización de los resultados, el mismo permite la revisión y procesamiento de los resultados obtenidos en la simulación mediante la posibilidad de generación de gráficos de dependencia entre las variables del proceso predefinida por el usuario, permite visualizar el transcurso del proceso en sus diferentes etapas así como la evolución de la deformación en la chapa. El módulo de post-processor se empleará en el capítulo III del presente trabajo con el objetivo de analizar los resultados obtenidos por el autor al finalizar el proceso de simulación.

2.4.- Conclusiones parciales.

1. La metodología analítica establecida para el cálculo de piezas rectangulares permitirá obtener de una forma ordenada y lógica los parámetros técnicos necesarios que servirán de referencia para su posterior empleo en la simulación por elementos finitos del proceso de conformación del fregadero rectangular que se lleva a cabo en la INPUD.
2. Se definió una secuencia lógica de pasos a seguir que garantiza la correcta realización de la simulación mediante el software Stampack, la cual servirá de guía para realizar el análisis por el método de los elementos finitos del proceso objeto de estudio y además constituirá una base para posteriores estudios sobre el tema.
3. La definición en conjunto de ambas metodologías garantiza una disminución del tiempo destinado a la preparación geométrica del modelo computacional gracias a la obtención de los principales parámetros constructivos de los troqueles (radios de la matriz y punzón, juego de embutición, etc.). Además permite conocer parámetros tecnológicos de referencia como la fuerza de embutición total, fuerza del prensachapas, la fuerza de rozamiento entre los pares friccionales matriz-chapa y chapa-punzón, entre otros; lo que facilita una comparación entre los resultados obtenidos mediante las ecuaciones empíricas expuestas por varios autores y los métodos numéricos empleados en la actualidad.

CAPÍTULO III

ANÁLISIS Y VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN

CAPÍTULO III: ANÁLISIS Y VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS EN LA SIMULACIÓN.

3.1.- Generalidades.

En el desarrollo del presente capítulo se expondrán los resultados obtenidos en el cálculo realizado mediante el método analítico y la simulación numérica por el método de los elementos finitos de la pieza rectangular con pestaña objeto de estudio (fregadero rectangular) producida por la empresa INPUD “1ero de Mayo” de Santa Clara. Mediante la exposición de los mismos se busca la validación de las metodologías generadas en los capítulos anteriores y así demostrar la valía de estas herramientas de modelado y simulación en la predicción del comportamiento del material bajo diferentes condiciones tecnológicas de fabricación.

Dentro de los resultados de mayor interés tanto en la simulación como en los cálculos analíticos se encuentran la distribución de tensiones, la variación del espesor, la gráfica del límite de conformabilidad, la gráfica de la fuerza máxima de embutido, la presión en el prensachapas, la fuerza de rotura del material y la zona de conformabilidad.

Para la validación práctica de los resultados al no contarse para este trabajo de la instrumentación necesaria para la medición de alguna de estas variables se realiza una comparación en la variable profundidad de embutido la cual constituye un parámetro fácilmente medible y de vital importancia a la hora de definir la calidad del producto terminado.

3.2.- Cálculo de los parámetros fundamentales en los procesos de embutición rectangular.

Para la realización de este epígrafe se empleó el desarrollo de las ecuaciones planteadas en la metodología de cálculo analítico para piezas rectangulares expuesta en el capítulo anterior usándose desde la ecuación 2.1 hasta la ecuación 2.34.

1. Diámetro equivalente de la pieza

$$A_c = \frac{\pi D_e^2}{4} = \frac{3.1416 \cdot (800)^2}{4}$$

$$A_c = 502656 \text{ mm}^2$$

$$D_e = 2 \sqrt{\frac{AB}{\pi}} = 2 \sqrt{\frac{800 \cdot 625}{3.1416}}$$

$$D_e = 797.88 \text{ mm} \approx 800 \text{ mm}$$

2. Diámetro equivalente medio de la pieza.

$$d_e = 0.5 D_e = \sqrt{\frac{ab}{\pi}}$$

$$d_e = \sqrt{\frac{558 \cdot 358}{3.1416}}$$

$$d_e = 252.16 \text{ mm} \approx 260 \text{ mm}$$

3. Altura permisible de la copa cilíndrica equivalente

$$A_R = AB = 800 \cdot 625$$

$$A_R = 500000 \text{ mm}^2$$

$$(h_{perm})_c = \frac{3}{4} \sqrt{\frac{AB}{\pi}} = \frac{3}{4} \sqrt{\frac{800 \cdot 625}{3.1416}}$$

$$(h_{perm})_c = 299.21 \text{ mm} \approx 300 \text{ mm}$$

4. Altura permisible para el recipiente rectangular

$$(h_{perm})_R = \frac{\pi d_e (h_{perm})_c + \frac{\pi d_e^2}{4} - ab}{2(a+b)}$$

$$(h_{perm})_R = \frac{3.1416 \cdot 260 \cdot 300 + \frac{3.1416 \cdot (260)^2}{4} - (558 \cdot 358)}{2(558 + 358)}$$

$$(h_{perm})_R = 53.69 \text{ mm} \approx 54 \text{ mm}$$

5. Área de la copa cilíndrica equivalente.

$$A_{cc} = \pi d_e (h_{perm})_c + \frac{\pi d_e^2}{4}$$

$$A_{cc} = 3.1416 \cdot 260 \cdot 300 + \frac{3.1416 \cdot (260)^2}{4}$$

$$A_{cc} = 298137.84 \text{ mm}^2$$

6. Área del recipiente rectangular.

$$A_{RR} = ab + (2a + 2b)(h_{perm})_R$$

$$A_{RR} = 558 * 358 + (2 * 558 + 2 * 358) * 54$$

$$A_{RR} = 298692 \text{ mm}^2$$

7. Cálculo de la relación de embutido.

$$\beta_0 = \frac{D_e}{d_e} = \frac{800}{260}$$

$$\beta_0 = 3.07 \approx 3$$

$$D = \left(0.77 * \frac{D_e}{d_e} + 0.23 \right) * d_e$$

$$D = \left(0.77 * \frac{800}{260} + 0.23 \right) * 260$$

$$D = 675.8 \text{ mm} \approx 680 \text{ mm}$$

$$\beta = \frac{D}{d_e} = \frac{680}{260}$$

$$\beta = 2.62$$

8. Cálculo del radio de la matriz.

$$r_m = 0.0035[50 + (D_e - d_e)]\sqrt{t_0}$$

$$r_m = 0.0035[50 + (800 - 260)] * \sqrt{0.6}$$

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

$$r_m = (5 \dots 10)t_0$$

$$r_m = 5 * 0.6$$

$$r_m = 3 \text{ mm}$$

$$r_m = (5 \dots 10)t_0$$

$$r_m = 10 * 0.6$$

$$r_m = 6 \text{ mm}$$

9. Cálculo del radio del punzón.

$$r_p = (3 \dots 5)r_m$$

$$r_p = 3 * 1.6$$

$$r_p = 4.8 \text{ mm}$$

$$r_p = (3 \dots 5)r_m$$

$$r_p = 5 * 1.6$$

$$r_p = 8 \text{ mm}$$

10. Cálculo del juego de embutido.

$$z = t_0 \sqrt{\frac{D_e}{d_e}} = 0.6 \sqrt{\frac{800}{260}}$$

$$z = 1.05 \text{ mm}$$

$$z = t_0 + k \sqrt{10 t_0}$$

$$z = 0.6 + 0.07 * \sqrt{10 * 0.6}$$

$$z = 0.77 \text{ mm}$$

11. Cálculo de la presión del prensachapas.

$$p_{pc} = 0.0025 \left[(\beta_0 - 1)^2 + 0.5 \frac{d_e}{100 t_0} \right] \sigma_u$$

$$p_{pc} = 0.0025 \left[(3 - 1)^2 + 0.5 \frac{260}{100 * 0.6} \right] 582$$

$$p_{pc} = 8.97 \text{ N/mm}^2$$

12. Cálculo de la fuerza de rotura del material.

$$F_{cr} = \pi D_e t_0 \sigma_u$$

$$F_{cr} = 3.1416 * 800 * 0.6 * 582$$

$$F_{cr} = 877637.38 \text{ N} \approx 87.7 \text{ ton}$$

13. Cálculo de la fuerza máxima de embutido.

$$F_{id} = \left[D k f m \ln \frac{D}{d_e} \right]$$

$$F_{id} = \left[680 * 540 * \ln \frac{680}{260} \right]$$

$$F_{id} = 353030 \text{ N} \approx 35.3 \text{ ton}$$

$$F_{APC} = \left[D * \mu * p_{pc} \frac{d_e}{t_0} * \frac{\beta_0^2 - 1}{2\beta} \right]$$

$$F_{APC} = \left[680 * 0.15 * 8.97 * \frac{260}{0.6} * \frac{(3)^2 - 1}{2 * 2.62} \right]$$

$$F_{APC} = 605292 \text{ N} \approx 60.5 \text{ ton}$$

$$F_{AR} = \left[\ell^{\frac{\mu \pi}{2}} - 1 * (F_{id} + F_{APC}) \right]$$

$$F_{AR} = \left[\ell^{0.15 * \frac{3.1416}{2}} - 1 * (353030 + 605292) \right]$$

$$F_{AR} = 254618 \text{ N} \approx 25.4 \text{ ton}$$

$$F_{RE} = \left[\pi * Dt_0 k f_1 \frac{t_0}{4r_m} \right]$$

$$F_{RE} = \left[3.1416 * 680 * 0.6 * 540 * \frac{0.6}{4 * 1.6} \right]$$

$$F_{RE} = 64889 \text{ N} \approx 6.4 \text{ ton}$$

$$F_{\text{máx}} = F_{id} + F_{APC} + F_{AR} + F_{RE}$$

$$F_{\text{máx}} = 353030 \text{ N} + 605292 \text{ N} + 254618 \text{ N} + 64889 \text{ N}$$

$$F_{\text{máx}} = 1277829 \text{ N} \approx 128 \text{ ton}$$

14. Tensión radial máxima.

$$\sigma_{rd} = k f m \ln \frac{D}{d_e}$$

$$\sigma_{rd} = 540 * \ln \frac{680}{260}$$

$$\sigma_{rd} = 519.16 \text{ MPa}$$

15. Tensión radial debido al rozamiento.

$$\sigma_{RA} = \mu * p_{pc} \frac{d_e}{t_0} * \frac{\beta_0^2 - 1}{2\beta}$$

$$\sigma_{RA} = 0.15 * 8.97 * \frac{260}{0.6} * \frac{(3)^2 - 1}{2 * 2.62}$$

$$\sigma_{RA} = 890.14 \text{ MPa}$$

16. Tensión de fricción en el radio de la matriz.

$$\sigma_{AR} = \frac{F_{AR}}{\pi D t_0} = \frac{254618}{3.1416 * 680 * 0.6}$$

$$\sigma_{AR} = 198.64 \text{ MPa}$$

17. Tensión total.

$$\sigma_A = \sigma_{RA} + \sigma_{AR}$$

$$\sigma_A = 890.14 + 198.64$$

$$\sigma_A = 1088.8 \text{ MPa}$$

18. Tensión de retorno elástico.

$$\sigma_{RE} = kf_1 \frac{t_0}{4r_m}$$

$$\sigma_{RE} = 540 * \frac{0.6}{4 * 1.6}$$

$$\sigma_{RE} = 50.63 \text{ MPa}$$

19. Tensión total de embutición.

$$\sigma_{total} = \sigma_{rd} + \sigma_A + \sigma_{RE}$$

$$\sigma_{total} = 519.16 + 1088.8 + 50.63$$

$$\sigma_{total} = 1658.59 \text{ MPa}$$

20. Deformaciones.

$$\varphi_1 = \ln \sqrt{\beta_0^2 + 1 - \beta^2}$$

$$\varphi_1 = \ln \sqrt{(3)^2 + 1 - (2.62)^2}$$

$$\varphi_1 = 0.57$$

$$\varphi_2 = \ln \left(\frac{D_e}{d_e} \right)$$

$$\varphi_2 = \ln \left(\frac{800}{260} \right)$$

$$\varphi_2 = 1.12$$

$$\varphi_3 = -(\varphi_1 + \varphi_2)$$

$$\varphi_3 = -(0.57 + 1.12)$$

$$\varphi_3 = -1.69$$

3.3- Resultados obtenidos de la simulación para la pieza rectangular

Una vez implementada la metodología de simulación de la pieza rectangular expuesta en el capítulo II se pasa a analizar los resultados arrojados por la misma y su posterior validación comparándose los mismos con los resultados obtenidos en el proceso real. La prensa que se utilizó para la fabricación de la pieza fue una prensa ONA-PRES de 200

toneladas la cual se muestra en el anexo 2, única prensa disponible en la INPUD en relación a las características y dimensiones de la pieza.

- **Análisis de la forma final obtenida.**

La superposición de la forma inicial y final de la chapa mostrada en la figura 3.1 indica un desarrollo lógico de la forma final de la deformada simulada. Los resultados obtenidos en la forma de la malla de elementos finitos se comparan con el modelo real del producto obtenido en la prensa ONA-PRES como se muestra en la figura 3.2 en la cual se puede apreciar a simple vista que sus diferencias en cuanto a la forma geométrica no son significativas, lo que posteriormente se corroborará con un análisis estadístico.

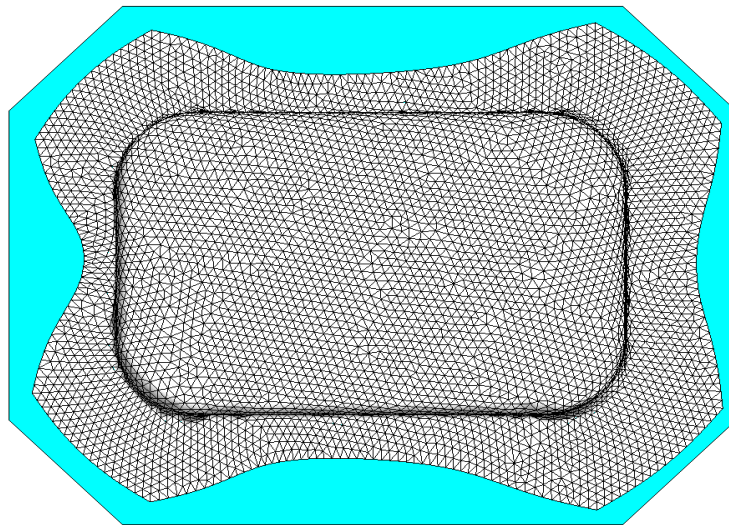


Figura 3.1: Malla deformada sobrepuesta a la forma inicial.

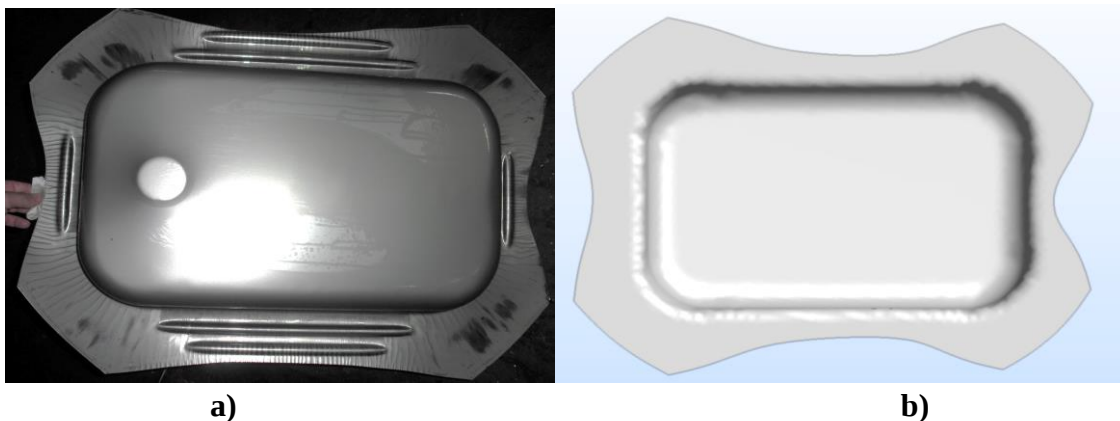


Figura 3.2: Comparación entre la pieza deformada real (a) y la pieza simulada (b).

- **Análisis de la variación del espesor.**

Otro de los resultados de interés en el presente trabajo es la variación en el espesor de la chapa simulada, el cual constituye un parámetro de interés para la calidad del producto final. En la imagen del modelo mostrada en la figura 3.3, se observa un adelgazamiento en el espesor de la chapa ubicado en las esquinas y en los radios de redondeos, debido a las elevadas tensiones de tracción y compresión generadas en esas zonas por el flujo del material al pasar por los radios de la matriz y al elevado nivel de estiramiento que sufre el mismo por la profundidad del embutido que exigen dichas zonas. Las variaciones ocurridas en el borde o pestaña no son de interés ya que el mismo se recorta en la operación de corte, posterior al embutido.

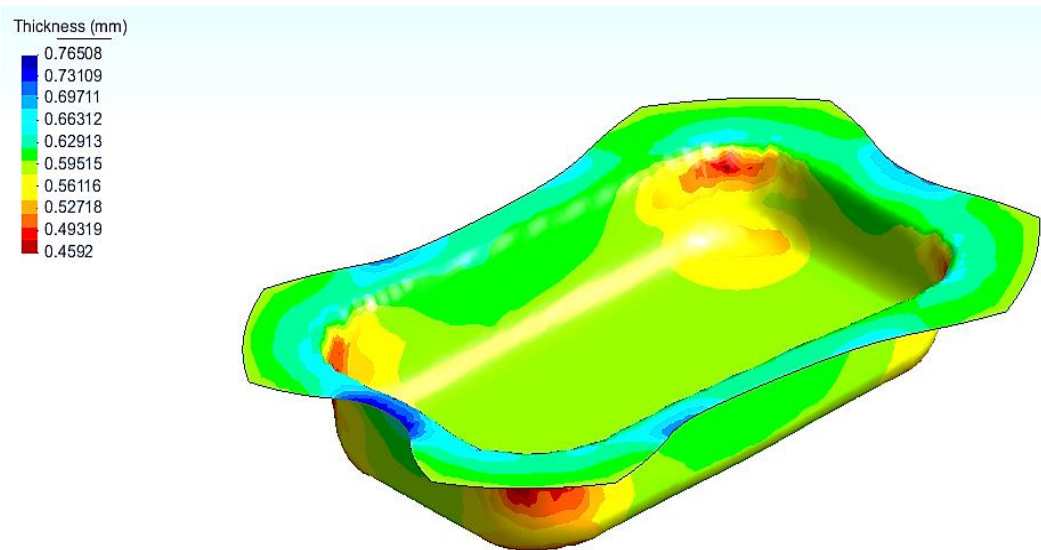


Figura 3.3: Variación del espesor en la pieza embutida simulada.

- **Análisis del surgimiento de arrugas en el material.**

Al analizar la zona de conformación de la pieza simulada se encuentran varias zonas propensas al surgimiento de arrugas y otras donde estas arrugas son más frecuentes, esto se debe a que la fuerza en el prensachapas no es suficiente como para evitar que durante el flujo del material el mismo tienda a alabearse. Al comparar visualmente la pieza simulada con la pieza al finalizar el proceso real se pueden observar a lo largo de la

pestaña el surgimiento de pequeños pero frecuentes pliegues en el material como se representa en las figuras 3.4 y 3.5, los cuales atentan contra la satisfacción del cliente.

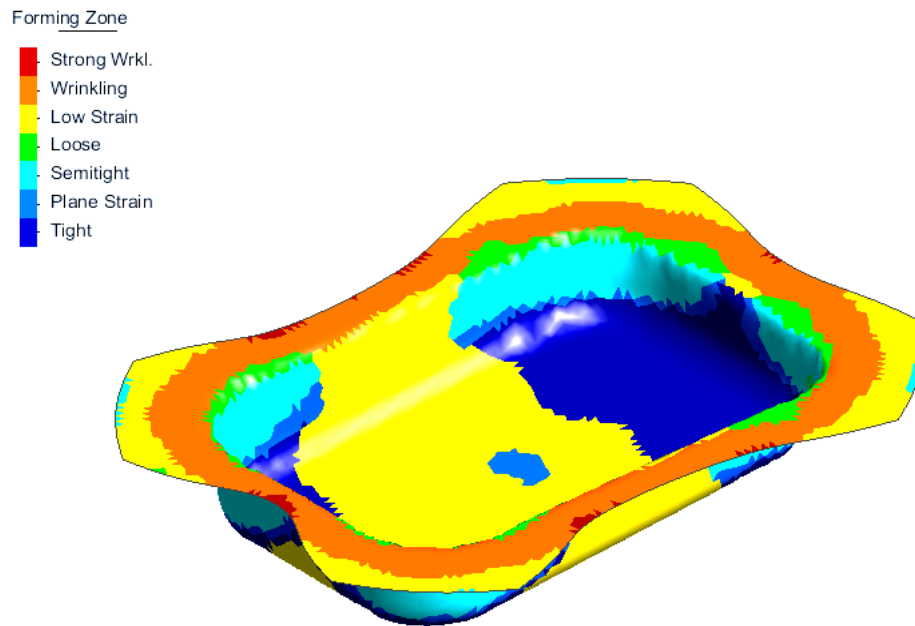


Figura 3.4: Zonas de deformación en la pieza embutida rectangular simulada.



Figura 3.5: Zonas de deformación en la pieza rectangular real embutida.

- **Análisis del diagrama límite de conformabilidad.**

El diagrama límite de conformabilidad (DLC) obtenido de la simulación se muestra en la figura 3.6 el cual nos permite conocer la relación entre el estado de tensión-deformación y la obtención de zonas seguras en la pieza simulada. Al analizar el diagrama obtenido se observa un desplazamiento de la nube de puntos hacia la zona negativa del diagrama lo cual representa una tendencia a la formación de arrugas en la pieza. La mayoría de los puntos de la nube están por debajo del valor del coeficiente de endurecimiento del material, lo que significa que el material presenta poca tendencia a la rotura, aunque existen puntos que sobrepasan la curva debido a la relación entre dos factores; la profundidad del embutido y el endurecimiento del material debido a la deformación plástica.

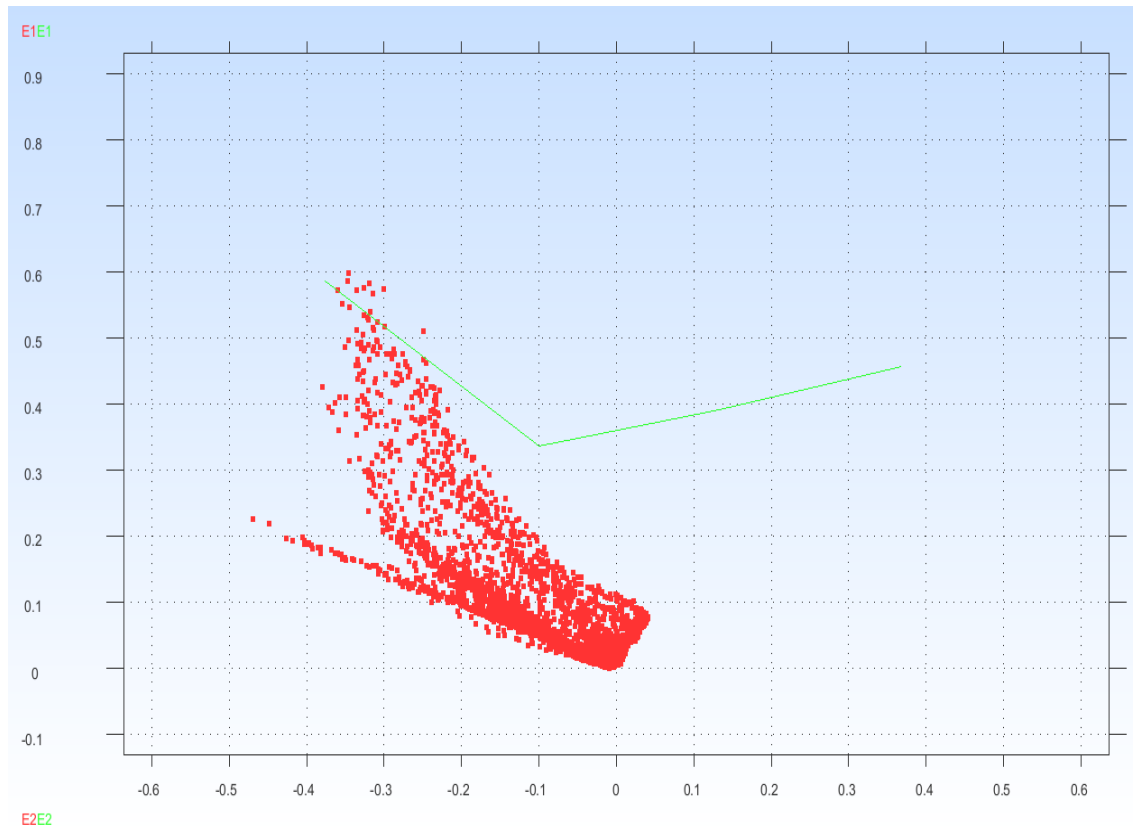


Figura 3.6: Diagrama del límite de conformabilidad.

- **Análisis de la distribución de las tensiones.**

El análisis de la distribución de las tensiones en la pieza mostrado en la figura 3.7 revela una alta concentración de tensiones en las esquinas de la pieza simulada debido a que en dichas zonas convergen las mayores componentes de las tensiones de tracción y compresión provocadas por la profundidad del embutido y el endurecimiento del material luego de la deformación plástica. El surgimiento de estas tensiones pueden provocar la rotura de la chapa debido a que las mismas alcanzan un elevado valor (1164.2 MPa) y las mismas están localizadas en las zonas donde el espesor se ha adelgazado peligrosamente.

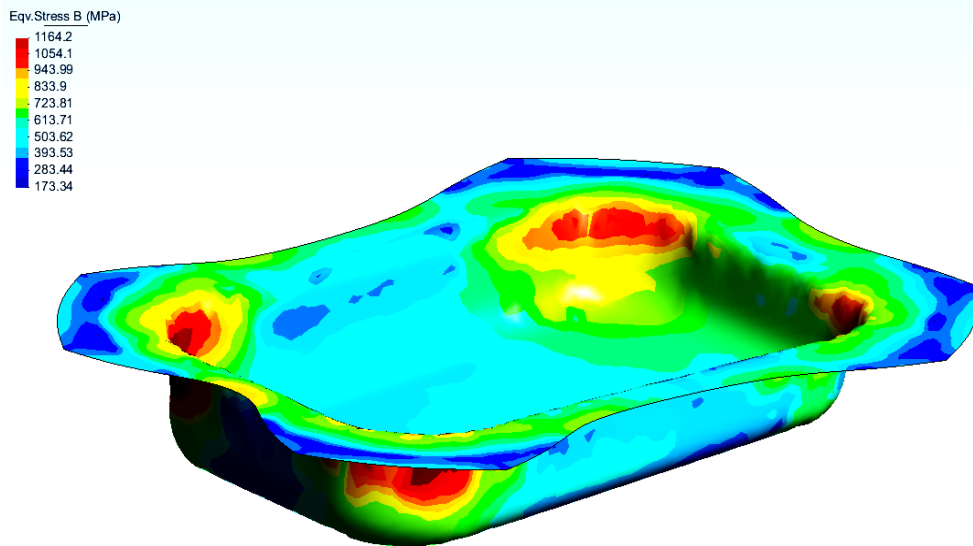


Figura 3.7: Análisis de tensiones en la pieza simulada.

- **Curva de fuerza-recorrido del punzón.**

Como se observa en la figura 3.8 la curva de fuerza en función del recorrido del punzón, valida la fuerza utilizada en el proceso real observándose que la fuerza de embutido máxima es de 50 ton. La curva posee una tendencia creciente debido al endurecimiento plástico del material a medida que la profundidad de embutido aumenta. Esta curva permite principalmente poder seleccionar correctamente la prensa a utilizar en la embutición y poder evitar las sobrecargas.

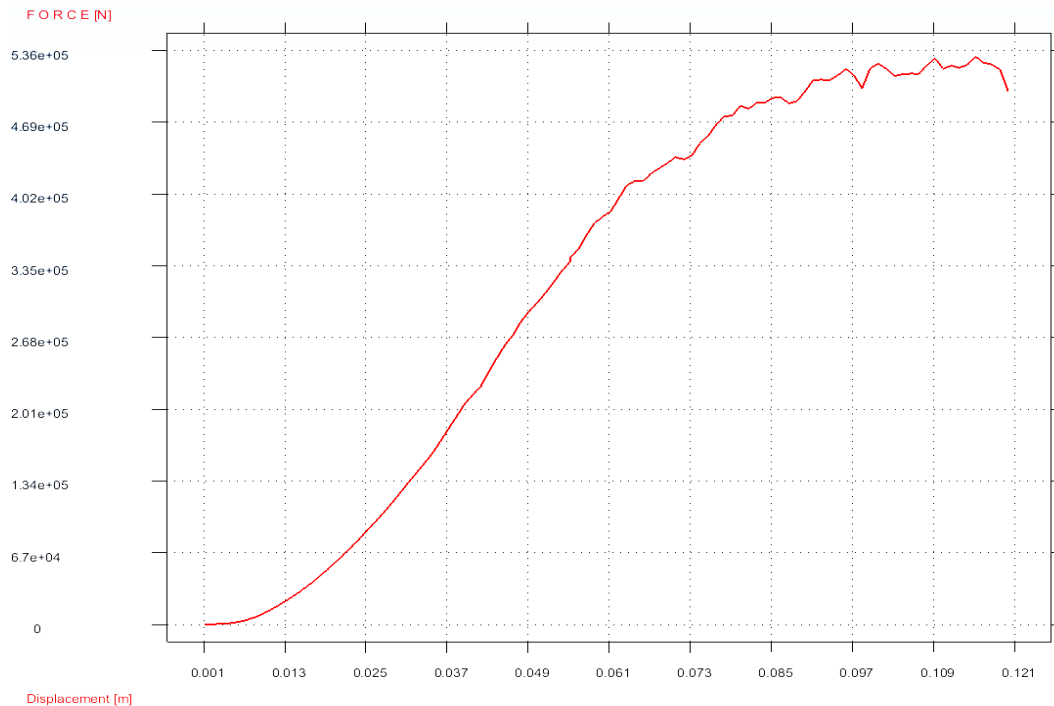


Figura 3.8: Curva de fuerza del punzón en función del recorrido.

3.4 – Validación práctica de los resultados de la simulación.

Para la validación práctica del trabajo se emplea la comparación de un parámetro fácilmente medible y muy importante en la calidad de la pieza real terminada, seleccionándose así el desplazamiento a lo largo del eje de embutición (Y). Como guía para las mediciones se trazan líneas en diferentes direcciones, en este estudio solo se tiene en cuenta la línea (AB) a lo largo de la pieza ya que esta es la dirección de mayor interés como se puede observar en la figura 3.10.

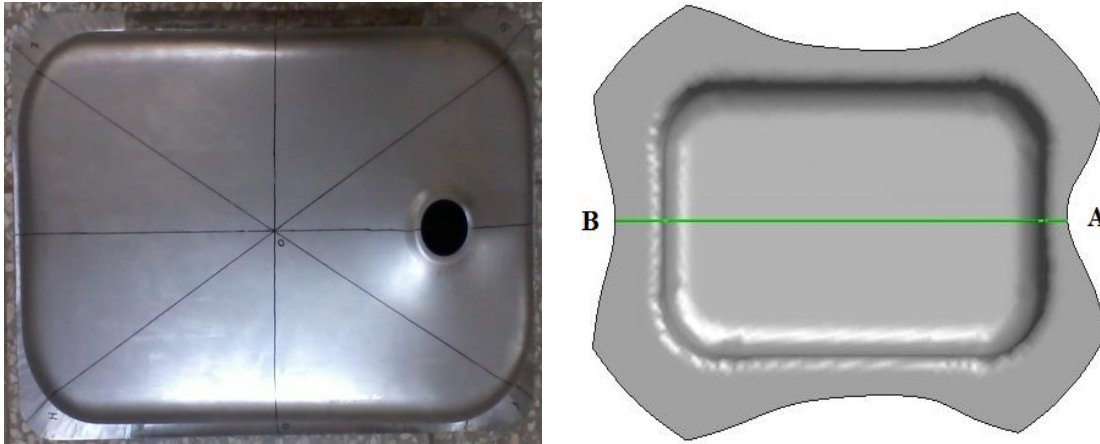


Figura 3.10: Guía para las mediciones y línea AB, dirección de mayor interés.

Concluida la simulación se ejecutan una serie de medidas sobre la pieza simulada que permiten validar los resultados obtenidos (ver anexo 3) en comparación con las medidas reales de la pieza real embutida. Con el fin de comparar más fácilmente las mediciones simuladas con las reales para el caso de la profundidad de embutido, la pieza real se secciona usando como guía la línea AB, se imprime la huella de la sección transversal y posteriormente se define como punto de origen el punto A a partir del cual se comienzan a realizar las mediciones como se observa en la figura 3.11. Las mediciones se realizan primero en el software Stampack y luego en la pieza real con el objetivo de emplear un único sistema de coordenadas y mediante un gráfico de dispersión superponer ambas mediciones y compararlas.

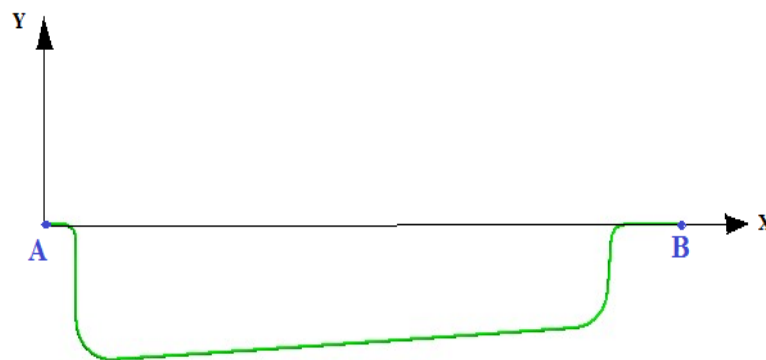


Figura 3.11: Huella de la sección transversal de la pieza real.

Resultados de las mediciones.

La hoja de cálculo se muestra en el anexo 3 donde se exponen los resultados de las mediciones tanto para la pieza real como para la simulada en dependencia de la coordenada X definida en el software Stampack. Mediante el gráfico de dispersión mostrado en la figura 3.12 se comparan los resultados obtenidos entre las mediciones realizadas a ambas piezas (real y simulada), se logra obtener la línea de tendencia de la nube de puntos, su ecuación de regresión y el coeficiente de correlación de ajuste de la curva.

Al comparar las curvas que generan los valores medidos entre el caso real y el simulado se puede observar que las diferencias en la profundidad de embutición entre los dos perfiles generados no son significativas y que las diferencias existentes se pueden atribuir a:

- El error humano y del instrumento de medición en cuanto a la precisión en las medidas tomadas sobre impresión de la huella de la pieza real.
- Las diferencias entre la geometría de los troqueles reales y simulados.
- Las simplificaciones hechas durante la simulación (fuerza constante en el prensachapas) cuando en la realidad esto no ocurre (fuerza progresiva mediante resortes de compresión).
- El modelo constitutivo puede no representar correctamente el comportamiento real del material.
- En la simulación no se tuvo en cuenta el segundo embutido al cual se somete la chapa con el objetivo de definir el agujero de descarga del fregadero.

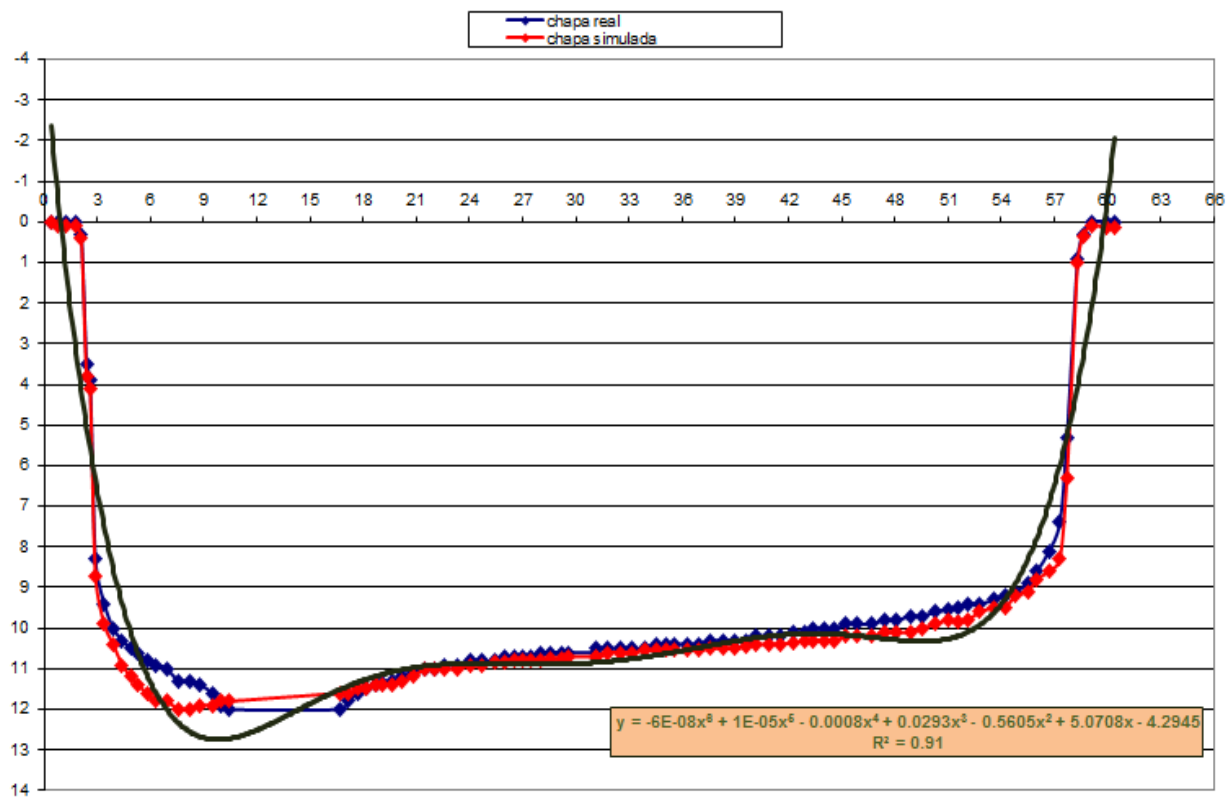


Figura 3.12: Comparaciones entre las mediciones de la pieza real y la pieza simulada.

3.5.- Conclusiones parciales.

1. Se observa que los valores de la profundidad de embutición de ambos productos finales tanto mediante la simulación como en el proceso real no poseen diferencias significativas, lo que valida el modelo empleado para la representación del sistema real.
2. Existe un adelgazamiento en el espesor de la chapa ubicado en las esquinas y en los radios de redondeos, debido a las elevadas tensiones de tracción y compresión generadas en esas zonas por el flujo del material al pasar por los radios de la matriz y al elevado nivel de estiramiento que sufre el mismo por la profundidad del embutido que exigen dichas zonas.
3. Se detectaron varias zonas propensas al surgimiento de arrugas y otras donde estas arrugas son más frecuentes, esto se debe a que la fuerza en el prensachapas

- no es suficiente como para evitar que durante el flujo del material el mismo tienda a alabearse.
4. Al analizar el diagrama obtenido se observa una tendencia a la formación de arrugas en la pieza y el material presenta poca tendencia a la rotura.
 5. La pieza presenta una alta concentración de tensiones en las esquinas debido a que en dichas zonas convergen las mayores componentes de las tensiones de tracción y compresión provocadas por la profundidad del embutido y el endurecimiento del material luego de la deformación plástica. El surgimiento de estas tensiones provoca la rotura de la chapa debido a que las mismas alcanzan un elevado valor (1164.2 MPa)
 6. La curva de fuerza en función del recorrido del punzón, valida la fuerza utilizada en el proceso real (50 ton) observándose que la fuerza de embutido máxima es de alrededor de 50 ton.

CONCLUSIONES GENERALES

CONCLUSIONES GENERALES

1. De la información recopilada es fácil percatarse que en la actualidad el problema fundamental de la industria del conformado de chapas es la predicción del comportamiento del material de la chapa, para ello se emplean potentes softwares desarrollados que tienen como base de la teoría de la plasticidad basándose en diferentes criterios planteados por varios autores consultados en el trabajo.
2. La definición en conjunto de ambas metodologías garantizan una disminución del tiempo destinado a la preparación geométrica del modelo computacional gracias a la obtención de los principales parámetros constructivos de los troqueles, además permitirá conocer parámetros tecnológicos de referencia, lo que facilitará una comparación entre los resultados obtenidos mediante las ecuaciones empíricas expuestas por varios autores y los métodos numéricos empleados en la actualidad.
3. Se detectan varias zonas propensas al surgimiento de arrugas y otras donde estas arrugas son más frecuentes, esto se debe a que la fuerza en el prensachapas no es suficiente como para evitar que durante el flujo del material el mismo tienda a alabearse.
4. Existe un adelgazamiento en el espesor de la chapa ubicado en las esquinas y en los radios de redondeos, debido a las elevadas tensiones de tracción y compresión generadas en esas zonas por el flujo del material al pasar por los radios de la matriz y al elevado nivel de estiramiento que sufre el mismo por la profundidad del embutido que exigen dichas zonas.
5. La pieza presenta una alta concentración de tensiones en las esquinas debido a que en dichas zonas convergen las mayores componentes de las tensiones de tracción y compresión provocadas por la profundidad del embutido y el endurecimiento del material luego de la deformación plástica. El surgimiento de estas tensiones provoca la rotura de la chapa debido a que las mismas alcanzan un elevado valor (1164.2 MPa).
6. Se observa que los valores de la profundidad de embutición de ambos productos finales tanto mediante la simulación como en el proceso real no poseen diferencias significativas, lo que valida el modelo empleado para la representación del sistema real.

RECOMENDACIONES

RECOMENDACIONES

1. Realizar un análisis económico que determine el impacto en los costos para una empresa del empleo de una herramienta de simulación, con el fin de optimizar el proceso de fabricación de una pieza. Para ello, sería necesario tener en cuenta los asociados a la fabricación de troqueles de prueba incluyendo sus ensayos antes de fabricar los definitivos y el derroche de material en los semiproducto defectuosos, frente a los costos asociados a las horas de ingeniería que supondría utilizar el software de simulación más la inversión en las licencias de los programas de Elementos Finitos.
2. Aplicar en la industria cubana actual estas novedosas herramientas de simulación, no solo al proceso de embutición de chapas rectangulares sino también a la amplia familia de procesos de conformación de metales.

BIBLIGRAFÍA

BIBLIOGRAFÍA

1. Kalpakjian, S.y.S.R.S., ed. *Manufactura, Ingeniería y tecnología*. 2010: La Habana.
2. KOBAYASHI, S., OH, I. S., ALTAN, T., , *Metal Forming and the Finite-Element Method*. 1989.
3. Mallo Gallardo, M., ed. *Conformación de Materiales*. 1987: Ciudad de la Habana.
4. ALTAN, T., OH, S. I., GEGEL, H., “, *Metals Forming: Fundamentals and Applications*. 1983.
5. MARCINIAK, Z., DUNCAN J. L., “, *The Mechanics of Sheet Metal Forming*. 1992.
6. Ballesteros, S., ed. *Tecnología de proceso y transformación de materiales*. 2005.
7. Blangino, E., *Teorías de la Elasticidad y Plasticidad* 2008.
8. CHEN, W.F., HAN, D. J., “, ed. *Plasticity for Structural Engineers*”, . 1988. : New York.
9. D.C. Drucker, R.E.G.y.D.J.H., *Mechanics and work hardening theories of plasticity*. 1957.
10. JOHNSON, W., MAMALIS, G, *Aspects of the Plasticity Mechanisms of Some Sheet Metal Forming Processes*. 1978.
11. Schaeffer, L., ed. *Conformação de Chapas Metálicas*. Editora Ltda. p. 200 ed. 2004: Porto Alegre. Rio Grande do Sul.
12. Sidebottom, R.J.S.O.M., ed. *Advanced Mechanics of Materials*”. 5ª ed. 1993. .
13. Karabegović, I.y.E.H., ed. *Mathematic modelling and the deep drawing force simulation with the wall thickness thinning experiment application*. 2012.
14. Hill, R., ed. *the Mathematical Theory of Plasticity*. 1950.

15. YANG, D.Y., CHUNG, W. J., SHIM, H. B. , *Rigid Plastic Finite Element Method of Sheet Metal Forming Processes with Initial Guess Generation*”, International Journal of Mechanical Science, 1990.
16. García, C.M.D.J.C.E., ed. *Simulación numérica y validación experimental del proceso de embutición profunda: aplicación a un caso industrial*. ed. M.C.B. Blanca. 2003.
17. Cardoso, R.P.y.R.A.V., ed. *Simulação de processos de conformação plástica de chapa recorrendo ao método dos elementos finitos: Parte II*. 2002.
18. FILHO, E.G.O., *Análise de estampagem de chapas pelo método de elementos finitos: Estudo de influência taxa de sensibilidade*. 2003.
19. Carvalho, M.y.J.L.A. (2003) *Simulación Numérica de los procesos de estampado de chapas metálicas. Modelación Mecánica y Métodos numéricos. Volume*,
20. Roll, K., *Simulation of sheet metal forming- Necessary Developments in the future, in LS-DYNA*. 2008.
21. WANG, N.M., BUDIANSKY, B, *Analysis of Sheet Metal by a Finite Element Method*. Journal of Applied Mechanics, 1978.
22. TOH, C.H., “*Process Modeling of Sheet Metal Forming of General Shapes by the Finite Element Method Based on Large Strain Formulation*”. 1983, University of California: Berkeley.
23. MEGUID, S.A., REFAAT, M. H, *Finite Element Analysis of Deep Drawing Process Using Variational Inequalities*. 1997.
24. AGUILAR, Y.B., *Planeación asistida y simulación numérica para la optimización de los procesos de embutición de chapas*, in *Departamento de Ingeniería Mecánica 2013*, Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas: Santa Clara
25. (2013) *World Steel Association. Volumen II*

26. Numisheet 2014, in *The 9th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes* 2013
27. Arnaiz, C.M., *El Método de los Elementos Finitos en el Análisis Estructural*. 1998.
28. Cura, M.S.d., *Simulación de un proceso de embutición mediante LS-DYNA*. 2007: Madrid.
29. FUKUI, S., KUDO, H., YOSHIDA, K., OKAWA, H., *A Method for Testing of Deep-Drawability of Sheet Metals*, University of Tokyo.
30. García-Zugasti, P.d.J.P.R.-P., *Embutido de productos rectangulares empleando el concepto de diámetro equivalente* 2007.
31. GHOSH, A.K., *Influence of Strain Hardening and Strain Rate Sensitivity on Sheet Metal Forming*. 1977.
32. Grigorov, N., ed. *Guía para la proyección de troqueles de estampado en frío* 1972: Santa Clara.
33. HU, P., LIU, Y. Q., WANG, J. C., *Numerical Study of The Flange Earring of Deep Drawing Sheets With Stronger Anisotropy*". *International Journal of Mechanical Sciences*, 2001.
34. HUANG, Y.M., Liu, C. H., "A, lysis of the Square-cup Stretching Process",. *Journal of materials Processing Technology*, 1993.
35. Lajarin, S.F.J.S.F.M., *Numerical and experimental true strain assessment on sheet forming using mapped versus free meshing*. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2011.
36. Marty Delgado, J.R., *Procedimientos metodológicos para determinar las características de formabilidad en las chapas metálicas*. 1999.
37. Marty-Delgado, J.R.Y.B.-A. (2011) *Planeación de procesos de embutición basada en estrategias de información*. **Volume,**

-
38. MEHTA, H.S., KOBAYASHI, S, *Finite Analysis and Experimental Investigation of Sheet Metal Stretching* 1971, University of California.
39. NAKAMACHI, E., *A Finite Element Simulation of the Sheet Metal Forming Process*. International Journal of Numerical Methods an Engineering, , 1988.
40. OH, S.I., REBELO, N. , KOBAYASHI, S., “Finite, *Finite Formulation for the Analysis of Plastic Deformation of Rate-Sensitive Materials in Metal Forming*. 1979.
41. Oñate, E.C.A.d.-S., *Análisis por elementos finitos de procesos de embutición de chapa mediante un modelo viscoplastico con degradación por huecos*. Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería, 1990.
42. Ranganath, J.R.H., *Finite Element Modeling For Simulation of a Rectangular Tank with an Integral Flange for Automotive Application*. International Journal of Engineering Research & Technology, 2012.
43. Sivasankaran, S.R.N., *Modeling of wrinkling in deep drawing of different grades of annealed commercially pure aluminum sheets when drawn through a conical die using artificial neural network* 2009.
44. Tisza, M.Z.L., *ntegrated process simulation and die-desing in sheet metal Forming*, in *International Deep-drawing Research Group International Conference*. 2007: Győr-Hungary.
45. TOH, C.H., KOBAYASHI, S, *Deformation Analysis and Blank Design in Square Cup Drawing* International Journal of Machine Tool Design, 1985.

ANEXOS

Anexo 1: Clasificación de los procesos de conformación de metales, según [3]

		Operaciones Básicas	Operaciones Simples
Procesos de Conformación de Metales	Separación de Partes	Corte	Corte Simple
			Punzonado
			Recortado
			Repasado
			Corte Parcial
			Rotura
			Sacabocado
	Traslación de Partes	Doblado	Doblado Simple
			Enrollado
			Rebordeado
			Engrampado
		Embutido	Embutido Simple
			Embutido con Estricción
			Repujado
			Rebordeado de agujero
			Expansionado
			Reducción
			Conformación Tensionada
			Repulsado
		Enderezado	Enderezado
		Acuñado	Acuñado
		Extrusión	Simple
			Revertida
			Combinada
			Lateral
		Otros	



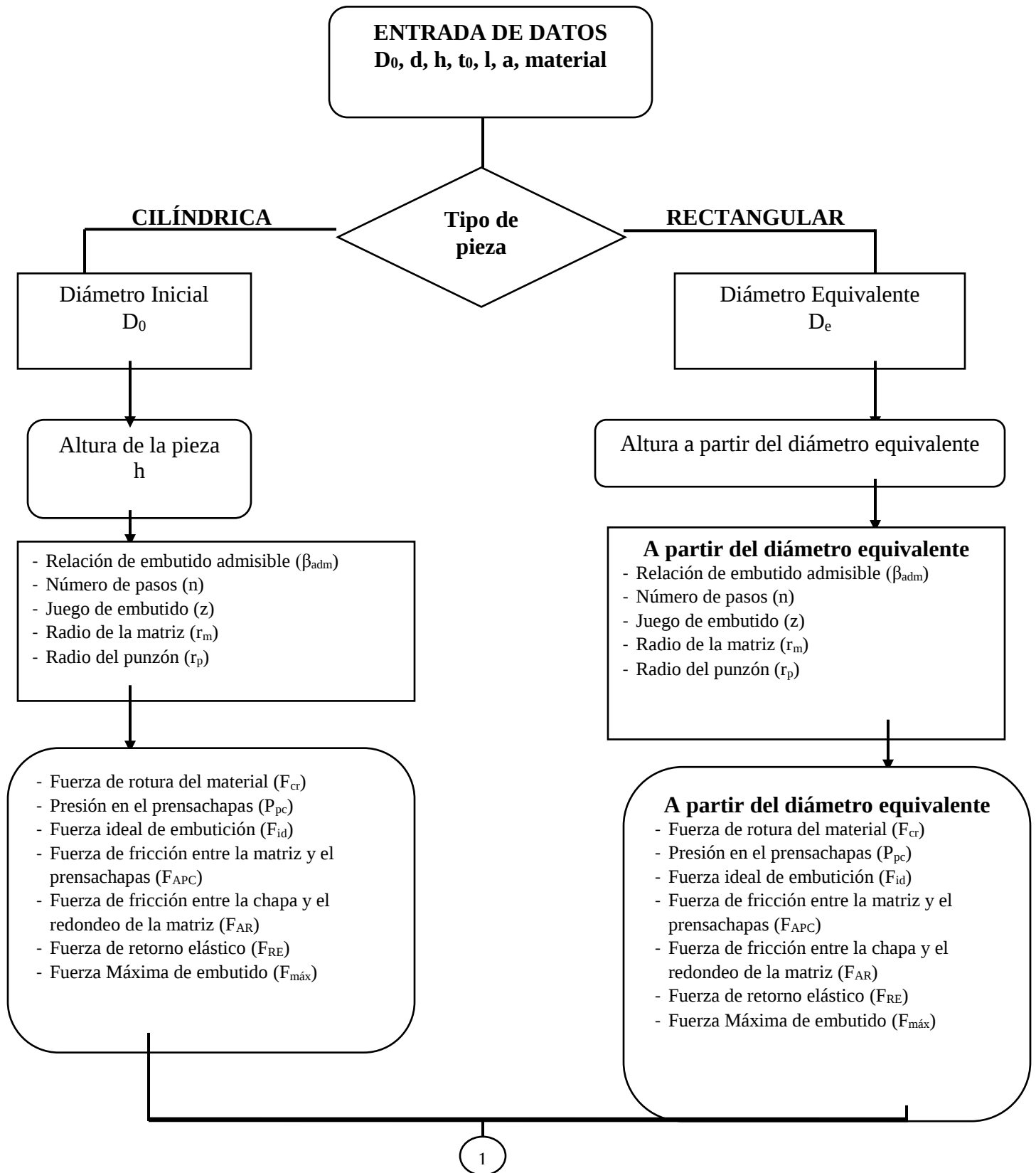
Anexo 2: Prensa utilizada para la embutición de la pieza rectangular.

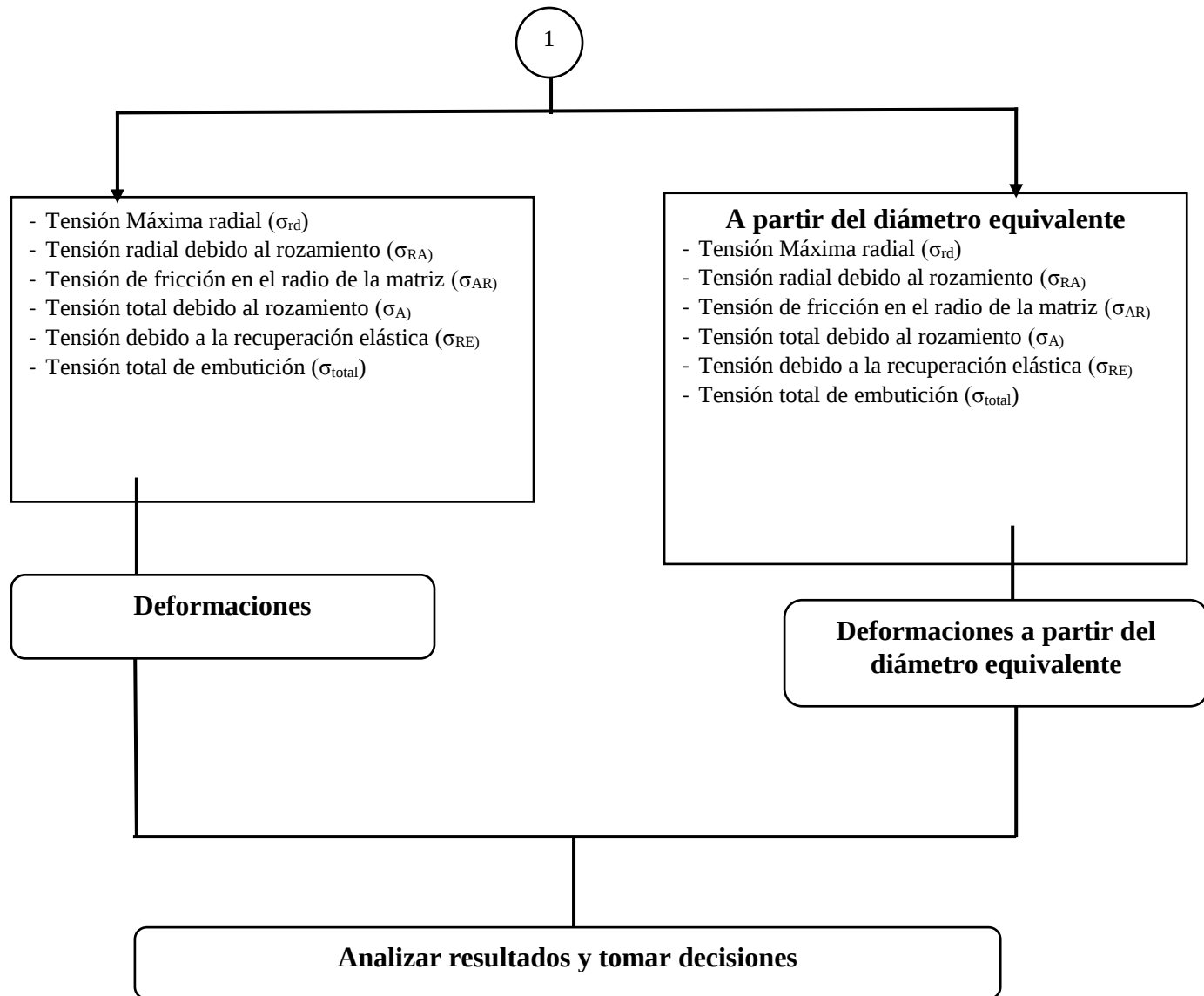
Anexo 3: Resultados de las mediciones (cm), para la pieza real y para la simulada en dependencia de la coordenada X definida en el software STAMPACK.

Nro	Coordenada x	Profundidad de embutido de la pieza real	Profundidad de embutido de la pieza simulada
1	0.4	0	0
2	0.8	0	0.1
3	1.2	0	0.1
4	1.8	0	0.1
5	2.1	0.3	0.4
6	2.4	3.5	3.8
7	2.6	3.9	4.1
8	2.9	8.3	8.7
9	3.4	9.4	9.9
10	3.9	10	10.4
11	4.4	10.3	10.9
12	4.9	10.5	11.2

13	5.3	10.6	11.4
14	5.8	10.8	11.6
15	6.3	10.9	11.8
16	6.9	11	11.8
17	7.6	11.3	12
18	8.2	11.3	12
19	8.8	11.4	11.9
20	9.5	11.6	11.9
21	10.01	11.9	11.8
22	10.4	12	11.8
23	16.7	12	11.6
24	17.2	11.8	11.6
25	17.7	11.6	11.5
26	18.2	11.5	11.5
27	18.7	11.4	11.4
28	19.1	11.35	11.4
29	19.6	11.3	11.4
30	20.2	11.2	11.3
31	20.8	11.1	11.2
32	21.5	11	11
33	22	11	11
34	22.55	10.9	11
35	23.3	10.9	11
36	24.1	10.8	10.9
37	24.7	10.8	10.9
38	25.4	10.8	10.85
39	26	10.7	10.85
40	26.5	10.7	10.8
41	27	10.7	10.8
42	27.5	10.7	10.8
43	28	10.6	10.8
44	28.6	10.6	10.75
45	29.2	10.6	10.75
46	29.6	10.6	10.7
47	31.1	10.6	10.7
48	31.1	10.5	10.7
49	31.8	10.5	10.6
50	32.5	10.5	10.6
51	33.2	10.5	10.6
52	33.9	10.5	10.55
53	34.5	10.4	10.55
54	35.1	10.4	10.55
55	35.6	10.4	10.55
56	36.3	10.4	10.55
57	36.9	10.4	10.55

58	37.6	10.3	10.5
59	38.3	10.3	10.5
60	39	10.3	10.5
61	39.6	10.3	10.45
62	40.2	10.2	10.4
63	40.9	10.2	10.4
64	41.5	10.2	10.4
65	42.3	10.1	10.35
66	42.9	10.1	10.3
67	43.4	10	10.3
68	44	10	10.3
69	44.6	10	10.3
70	45.2	9.9	10.2
71	45.9	9.9	10.2
72	46.7	9.9	10.2
73	47.4	9.8	10.1
74	48.1	9.8	10.1
75	48.9	9.7	10.1
76	49.5	9.7	10
77	50.3	9.6	9.9
78	51	9.55	9.8
79	51.6	9.5	9.85
80	52.1	9.4	9.8
81	52.8	9.4	9.6
82	53.6	9.3	9.5
83	54.2	9.2	9.5
84	54.8	9.1	9.2
85	55.5	8.9	9.1
86	56	8.6	8.8
87	56.7	8.1	8.6
88	57.3	7.4	8.3
89	57.7	5.3	6.3
90	58.3	0.9	1
91	58.6	0.3	0.35
92	59.1	0	0.1
93	59.9	0	0.12
94	60.4	0	0.12





Anexo 4: Diagrama general concebido por [24] para el cálculo analítico de piezas embutidas rectangulares y cilíndricas.