



FINI Facultad de Ingeniería Mecánica e Industrial

# DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

# **TRABAJO DE DIPLOMA**

# TÍTULO: SIMULACIÓN 2D POR ELEMENTOS FINITOS DEL PROCESO EMBUTICIÓN DEL DISCO DE LA ARMADA DEL RETÉN DE LA CAJA VELOCIDAD DEL CAMIÓN KMAZ

Autor: Miguel Alejandro Piñero Sánchez

UCLV

**Universidad** Central

"Marta Abreu" de Las Villas

Tutor: Dr. C. José R. Marty Delgado. Profesor Titular



Santa Clara, junio de 2019 Copyright©UCLV





# **MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT**

# **DIPLOMA THESIS**

# TITLE: 2D FINITE ELEMENT SIMULATION TO THE SHEET METAL DEEP DRAWING PROCESS ARMED DISK OF THE KMAZ'S SPEED BOX TRUCS

Author: Miguel Alejandro Piñero Sánchez

Advisor: Prof. José R. Marty Delgado. PhD.

Santa Clara, june, 2019 Copyright©UCLV



Este documento es Propiedad Patrimonial de la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, y se encuentra depositado en los fondos de la Biblioteca Universitaria "Chiqui Gómez Lubian" subordinada a la Dirección de Información Científico Técnica de la mencionada casa de altos estudios.

Se autoriza su utilización bajo la licencia siguiente:

# Atribución- No Comercial- Compartir Igual



Para cualquier información contacte con:

Dirección de Información Científico Técnica. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Carretera a Camajuaní. Km 5½. Santa Clara. Villa Clara. Cuba. CP. 54 830 Teléfonos.: +53 01 42281503-1419

# Agradecimientos

- Especialmente a mi madre Saray y a mi padre Orestes,
   por el apoyo incondicional, sacrificio, trabajo e impulso
   para llegar a este día especial y estar en todo momento.
- A mi hermano Alejandro, por estar ahí ante toda situación y acompañarme a lo largo de mi carrera.
- También un agradecimiento especial a mi tutor José R.
   Marty Delgado, por brindarme el apoyo total, dedicación de su tiempo y arduo trabajo e investigación para la realización de este trabajo de diploma.
- A todas aquellas personas que de una manera u otra han influido en la realización de este proyecto.
- A todos los profesores por brindarme los conocimientos para aplicarlos a lo largo de mi carrera.

# Listado de símbolos y caracteres

## **Caracteres latinos**

Do	Diámetro del semiproducto	mm
d	Diámetro final en la pieza	mm
S	Espesor del material	mm
S <sub>R</sub>	Espesor relativo del material	
h	Altura de la pieza embutida	mm
К	Cosntante de plasticidad del material	Ра
n	Coeficiente de endurecimiento	
R	Coeficiente de anisotropía	
R	Valor promedio de la anisotropía	
ΔR	Anisotropía planar	
D <sub>R</sub>	Relación límite de embutición	
D <sub>Rlim</sub>	Relación máxima del límite de embutición	
m <sub>R</sub>	Inverso de la relación límite de embutición	
r <sub>z</sub>	Radio de la matriz	mm
<b>r</b> p	Radio del punzón	mm
Z	Juego u holgura de embutición	
kz	Coeficiente de embutido	
f	Factor de incremento para la fuerza	
K <sub>f</sub>	Resistencia a la conformación de la chapa	Pa

# Caracteres griegos

σ	Tensión real	Ра
3	Deformación (real) logarítmica	
٤1	Deformación verdadera en la dirección longitudinal de la probeta	
ε <sub>2</sub>	Deformación verdadera en la dirección del ancho de la probeta	
ε <sub>3</sub>	Deformación verdadera en la dirección del espesor	
β	Razón para expresar la relación entre las deformaciones principales	

μ	Coeficiente de fricción
Δ	Tolerancia de fabricación de la pieza
$\delta_p$	Tolerancia de fabricación del punzón
$\delta_m$	Tolerancia de fabricación de la matriz.

## Listado de Figuras

tensiones en el plano XY.

Figura 1. Esquema básico para una operación de embutición de doble efecto 7 en una chapa.

Figura 2. Representación esquemática de las fases en una embutición 9 cilíndrica, de simple efecto, sin reborde

Figura 3. Tensiones predominantes durante la embutición de una pieza 11 cilíndrica

Figura 4. Diagrama de deformaciones principales ( $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$ ) mostrando diferentes 13 estados de deformación

Figura 5. Diagrama Límite de Conformado (FLD) esquemático, incluyendo 14 todos los posibles tipos de fallo

Figura 6. Representación esquemática del comportamiento de un material al 17 aplicársele una carga

Figura 7. Diagrama causa efecto de un proceso con las fallas principales en el 21 diseño de una herramienta de embutición

Figura 8. a) disco embutido. b) Detalle del retén de la bomba de inyección del 23 camión kmaz

Figura 9. Componentes de un modelo en el software de mecánica general 33 seleccionado para la simulación

Figura 10. Elementos lineales y cuadráticos	34
Figura 11. Sistema de coordenadas cartesianas usado en el software	35
Figura 12. Perfil 2D de la matriz	38
Figura 13. Perfil 2D del punzón	38
Figura 14. Perfil 2D de la chapa	39
Figura 15. Modelo del conjunto ensamblado	40
Figura 16. Selección del tipo de elemento para el mallado	42
Figura 17. Resultados del análisis de sensibilidad de la malla para la variación	43
del espesor	
Figura 18 a) Momento inicial del proceso de embutición con la distribución de	44

Figura 18 b) Momento intermedio del proceso de embutición con la 45

iii

distribución de tensiones en el plano XY

Figura 18 c) Momento final del proceso de embutición con la distribución de	45
tensiones en el plano XY	
Figura 19. Desplazamiento del punzón en relación al tiempo	
Figura 20. Variación de la fuerza en el punzón	46
Figura 21. Variaciones en el espesor de la chapa	47
Figura 22. Variaciones en el espesor del material. Modelo 1	48

Figura 23.	Variaciones en el espesor del material. Modelo	48

Figura 24. Va	ariaciones en el es	esor del materia	al. Modelo 3	49
---------------	---------------------	------------------	--------------	----

# Listado de Tablas

Tabla 1 Resumen de los criterios mas importantes que aparecen en la	Anexo
literatura sobre modelación por elementos finitos del proceso de embutición	
Tabla 2. Composición química del acero 1020.	24
Tabla3.Propiedades mecánicas del acero 1020	24
Tabla 4. Espesor relativo del semiproducto	27
Tabla 5. Valores de k <sub>z</sub>	29
Tabla 6. Unidades consistentes en el software de mecáncia general	32
utilizado	
Tabla 7. Tipos de elementos sólidos: triangulares, tetraédricos,	35
cuadriláteros y hexaédricos	
Tabla 8. Grados de libertad considerados por el programa de elementos	36
finitos	
Tabla 9. Características de las mallas utilizadas en la simulación	43

# Contenido

Listado de símbolosi
Listado de Figurasiii
Listado de Tablasv
Resumenvii
Abstractvii
INTRODUCCIÓN1
CAPÍTULO I. Fundamentación teórica del proceso de embutición de chapas7
1.1 Mecánica del proceso de embutición de chapas7
1.2 Comportamiento del material en la embutición. Diagrama límite de conformado 12
1.3 Endurecimiento por deformación e índice de anisotropía15
1.4 Defectos más importantes en las piezas embutidas19
1.5 Simulación por elementos finitos del proceso de embutición20
1.5 Conclusiones parciales del Capítulo I22
CAPÍTULO II. Cálculo analítico del proceso de embutición y preparación de la simulación por elementos finitos23
2.1 Definición de la pieza23
2.2 Cálculo de las variables tecnológicas asociadas al proceso de embutición24
2.3 Caracterización y parámetros de trabajo del software utilizado en la simulación.30
2.4 Conclusiones parciales del Capítulo II
Capítulo III. Análisis de resultados38
3.1 Preparación de la simulación
3.2 Simulación del modelo y análisis de los resultados44
3.3 Conclusiones parciales del Capítulo III50
Conclusiones generales51
Recomendaciones
Bibliografía53
Anexosiv

#### Resumen

En el presente trabajo se hace referencia a los procesos de embutición de piezas cilíndricas sin reborde, obtenidas a partir de chapas en los que, aprovechando las capacidades de plasticidad del material inicial, se generan estados tensionales complejos en la pieza para obtener un cuerpo en forma de recipiente cilíndrico, estos procesos son conocidos también como procesos de estirado de chapas. Sobre la base de una amplia revisión bibliográfica, se obtiene un modelo analítico para calcular las variables tecnológicas del proceso de embutición. Con este resultado inicial, se concibe la modelación 2D del proceso con un software de mecánica general. En función de las variables de entrada/salida se analizan los resultados de las simulaciones por el método de los elementos finitos aplicada a la embutición de la pieza armada del retén de la caja de velocidad de los camiones Kmaz.

Palabras claves: procesos de embutición chapas, análisis por elementos finitos

## Abstract

In the present work reference is made to the processes of drawing cylindrical pieces without rims, obtained from sheets in which, taking advantage of the plasticity capabilities of the initial material, complex tension states are generated in the piece to obtain a body in shape of cylindrical cup, these processes are also known as sheet drawing processes. Based on an extensive literature review, and 2D analytical model is obtained to calculate the technological variables of the drawing process. With this initial result, the modeling of the process with general mechanical software is conceived. Based on the input/output variables, the results of the simulations are analyzed by the finite element method applied to the drawing of the armed part of the speed box of Kmaz trucks.

Keywords: Deep Drawing, Finite Element Analysis, Anisotropy, Aluminum Alloys.

## INTRODUCCIÓN

Los procesos mecánicos de conformado de chapas metálicas, gozan de una amplia popularidad asociada a su elevada producción, flexibilidad, bajos costos relativos, bajo consumo relativo de materiales y una alta resistencia mecánica de las piezas terminadas en relación a su peso. Son ampliamente utilizados en las industrias de producción de utensilios domésticos, el transporte, el sector energético y militar; aunque como principales inconvenientes se señalan en [1], el alto costo de las herramientas y el entendimiento de las interacciones entre la geometría de las herramientas y el material de la pieza. El auge de estos procesos en Cuba comienza a partir de la década de los años 60, con la creación de empresas en La Habana, Matanzas, Santa Clara y Santiago de Cuba

Entre los procesos mecánicos de conformación de chapas metálicas se destacan a nivel mundial, los procesos de estirado de chapas por diferentes procedimientos. El término estirado de chapas puede ser aplicado a un gran número de operaciones ejecutadas en una prensa con o sin el uso de matrices y punzones (troqueles). Estos procesos son realizados normalmente en frío y producen piezas de paredes delgadas, partiendo de una chapa metálica plana que sufre alargamientos en por lo menos, una dirección; siendo comprimida en otra dirección principal. Estos son los procesos más complejos desde el punto de vista físico mecánico que se realizan sobre la chapa y han sido estudiados desde diferentes puntos de vista. Los procesos de embutición, clasifican dentro de los procesos de estirado de chapas.

En los procesos de embutición, como se explica en [2], la calidad de la pieza queda determinada, entre otros factores por la variabilidad en las propiedades del material de la chapa, el material de las herramientas, cambios geométricos en la herramienta debido al desgaste, variaciones en las condiciones superficiales, holguras, propiedades del material de la herramienta, temperatura, fuerza en el prensachapas, velocidad del punzón, localización de la herramienta y la rigidez de la prensa, entre otras.

La embutición es el procedimiento más complejo desde el punto de vista físico mecánico; permite obtener una pieza en forma de recipiente a partir de chapas planas. La deformación por embutición es una tecnología de conformado de chapa

metálica que permite la fabricación de grandes series de piezas de geometrías simples y complejas a partir de herramientas denominadas troqueles montados sobre una prensa.

En las operaciones de conformación de la chapa metálica, en que unas zonas están obligadas a no deformarse mientras otras son forzadas a adaptarse a una forma determinada, es necesario que el metal pueda deformarse sin que se produzcan deformaciones extremas localizadas. La aparición de arrugas, ondulaciones, marcas de embutición y el adelgazamiento excesivo, son los principales defectos que se producen en las piezas embutidas.

Analizando la bibliografía disponible, se deduce que la conformabilidad de las chapas metálicas en las operaciones de embutición está influenciada por factores físicos, de los cuales, vinculados al material de la chapa, los más importantes son: el coeficiente de endurecimiento n, la sensibilidad a la velocidad de deformación m, anisotropía plástica planar R, el desarrollo de daño estructural y el camino (trayectoria) de la deformación.

Entender los procesos de embutición de chapas supone la unión de un grupo de conocimientos acerca de ciencia de materiales, procesos de manufactura y el diseño de herramientas. El rápido desarrollo de estos procesos en los últimos años, las demandas de alta precisión dimensional, miniaturización y la disminución de los ciclos de vida de los productos, son la base para que investigadores de diferentes partes del mundo hayan presentado sus resultados en la simulación de piezas cilíndricas ([3-6]) en la creación de sistemas de ayuda al diseño ([7-8]) y en el uso de las herramientas de inteligencia artificial ([9-10]). Estos estudios adolecen de no tener un carácter integrador, al tratar de manera individual cada uno de los tópicos señalados.

Actualmente, como parte de la planeación de los procesos industriales se utilizan programas CAE (*Computer Aided Engineering*) de cálculo por elementos finitos, de propósito general, para el análisis del comportamiento de la pieza en diferentes condiciones, por ejemplo, PAM-STAMP 2G, Abaqus Simula, Stampack, Ansys LS-Dyna y otros.

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 [11]. 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.

El mayor obstáculo para el mejoramiento de la calidad en los procesos de embutición es la variabilidad de las entradas al mismo (variables independientes o entradas) y el cambio constante en las condiciones del proceso. El estudio e interpretación de las variables tecnológicas para garantizar el éxito del proceso, constituye hoy punto de encuentro de números investigadores alrededor del mundo.

Todo lo anterior justifica la **necesidad del presente trabajo** encaminado a contribuir con los estudios sobre el entendimiento de las operaciones de embutición de chapas basados en la simulación por elementos finitos, que integren conceptualmente la influencia de las variables tecnológicas del proceso de embutición, la calidad de la pieza, las fuerzas que se ejercen en el proceso y el comportamiento del material. Ello permite un mejor aprovechamiento de los recursos y capacidades instalados en los talleres con el fin de utilizar racionalmente los materiales y la disminuir el número de piezas defectuosas. Todo lo anterior, como base futura para asimilar los conceptos de Industria 4.0 asociados a los procesos de embutición de chapas.

En este trabajo de investigación se hace referencia al proceso de embutición para el conformado de piezas cilíndricas en frío, basado en tensiones de traccióncomprensión para formar cuerpos cilíndricos a partir de una chapa plana, que requiere generalmente el empleo de máquinas (prensas) y de utillajes (troqueles),

## Planteamiento del problema de investigación

A pesar de las numerosas investigaciones que se reportan en el tema, no existen aún en las condiciones de la producción del país, criterios para caracterizar a priori el proceso de embutido de piezas cilíndricas sin reborde, para determinar las dimensiones del material a elaborar, entender el comportamiento físico mecánico de esos procesos, y la selección del régimen de trabajo, todo lo cual influye en la prevención de defectos en las piezas conformadas.

El **objeto de estudio** lo constituye el proceso embutición de chapas. El campo de acción de la investigación es el proceso de embutición de simple efecto en chapas metálicas para obtener formas cilíndricas sin reborde.

En función de dar respuesta al problema científico antes enunciado, la **hipótesis de la investigación** plantea que: a partir del entendimiento de la influencia de las variables tecnológicas en un proceso de embutición cilíndrica de simple efecto, sin reborde, es posible la modelación 2D de esa operación con un software de mecánica general, si se logran establecer correctamente los valores de esas variables desde el cálculo analítico y la etapa de preproceso, que minimicen la aparición de defectos en las piezas.

## **Objetivo general**

Para resolver el problema anterior se propone el siguiente objetivo general:

Modelar en 2D, mediante el uso de un software de mecánica general, el proceso embutición del disco de la armada del retén de la caja velocidad del camión Kmaz, determinando el comportamiento del proceso, para prevenir posibles defectos en las piezas conformadas.

Para alcanzar el objetivo anterior se plantean los siguientes:

# **Objetivos específicos**

- Estudiar, mediante la revisión de la literatura científica, la interrelación de las variables tecnológicas asociadas al proceso de embutición y su comportamiento en diferentes escenarios tecnológicos.
- Integrar en un modelo analítico el cálculo tecnológico de la operación de embutición de chapas, como base para entender la modelación del proceso de embutición de piezas cilíndricas sin reborde.
- Implementar un procedimiento que permita la utilización de herramientas de simulación 2D en los procesos de embutición cilíndrica sin reborde del disco de la armada del retén de la caja velocidad del camión Kmaz, para analizar el comportamiento del proceso y prevenir posibles defectos en las piezas conformadas.

Para el desarrollo de esta investigación y alcanzar los objetivos previstos, se aplica como **método fundamental de investigación**, el método científico de trabajo, apoyado en otros métodos de investigación científica tales como:

Método teórico inductivo-deductivo, el que permite examinar las relaciones entre los factores tecnológicos del proceso de embutición de chapas y las ecuaciones teóricas para el cálculo de los parámetros del proceso. Mediante este método se elabora la hipótesis y se proponen las líneas de trabajo a partir de los resultados de la revisión bibliográfica.

Se emplea además, el método sistémico para enmarcar el tema de investigación en el objeto de estudio y su campo de acción, que permite aplicar los métodos computacionales de modelado y análisis para encontrar la solución al problema científico planteado.

Métodos teóricos de análisis y síntesis: a partir de la hipótesis de la investigación y siguiendo reglas lógicas deductivas, se determinaron las variables fundamentales del proceso de embutición de simple efecto bajo estudio, organizándose a partir de ahí las fases de la investigación. Mediante el análisis de los resultados se establecieron

las conclusiones sobre las posibilidades de la modelación para entender el comportamiento del proceso.

Existe, por tanto, la necesidad de continuar realizando investigaciones en el campo del estudio y comprensión de los procesos de deformación de la chapa metálica sometida a operaciones de deformación. Lo que justifica el desarrollo del presente trabajo de diploma titulado: "*Simulación 2D por elementos finitos del proceso embutición del disco de la armada del retén de la caja velocidad del camión Kmaz*" como parte de los requisitos para obtener el título de Ingeniero Mecánico.

La implementación futura de estos sistemas, como parte de la informatización de las operaciones industriales, tiene un **valor práctico e impacto económico** favorables, pues permitirá reducir los tiempos de entrega, mejora la calidad integral de los diseños y redunda en la soberanía tecnológica del país. Su empleo, contribuirá a facilitar la toma de decisiones al realizar un análisis del diseño propuesto o dar solución a un determinado problema en la industria.

La tesis está constituida por tres capítulos, conclusiones, recomendaciones, bibliografía y los anexos. El primer capítulo se dedica al marco teórico, donde se abordan los principales aspectos teóricos relacionados con los procesos de embutición de chapas. En el siguiente capítulo se detalla la metodología analítica para el cálculo de una operación de embutición, sus principales parámetros y las principales recomendaciones para la simulación y modelación del proceso. El tercer y último capítulo, presenta los resultados de la simulación por el método de los elementos finitos mediante la utilización de un software de mecánica general, aplicada a la embutición de la pieza armada del retén de la caja de velocidad de los camiones Kmaz.

## CAPÍTULO I. Fundamentación teórica del proceso de embutición de chapas

#### 1.1 Mecánica del proceso de embutición de chapas

En la industria nacional e internacional se presentan un variado número de procesos para el conformado de piezas de chapas. Pese a ser diferentes desde el punto de vista técnico, estos procesos comparten fundamentos comunes. Entre las técnicas y procesos básicos de conformado de chapa están, según [12], el corte, doblado y la embutición. Estos últimos procesos se distinguen por la compleja distribución de tensiones y deformaciones en las diferentes secciones de la pieza conformada.

En el proceso de embutición una lámina de material, inicialmente plana (o preconformada), se sujeta entre la matriz y el prensachapa, ver figura 1. El prensachapa aplica una fuerza que es necesaria para prevenir la formación de arrugas y controlar el flujo de material en la cavidad de la matriz. Entonces, el punzón se empuja en la cavidad de la matriz y transfiere la forma específica del punzón y la matriz, simultáneamente, a la región que se escogió para ello. Durante la fase del conformado el material está sometido a tensiones de compresión-tracción.



Figura 1. Esquema básico para una operación de embutición de doble efecto en una chapa. Fuente: adaptada de [13]

Cuando la fuerza del prensa chapas es muy grande el proceso de embutido profundo se convierte en un proceso de estirado. En el proceso de conformación por estirado, el material es fijo en la región bajo el prensachapas y conlleva a la reducción de los espesores en las partes restantes del espacio conformado en el que las tensiones son tensoras en casi todas las direcciones [14].

La ejecución de un proceso de conformación de chapas por embutición presupone en el material a conformar, cierta capacidad para variar su forma en proporciones satisfactoriamente grandes bajo el efecto de fuerzas exteriores, sin que este pierda su cohesión. Para el éxito del proceso es importante elegir entre los tres procedimientos de embutición que existen [15]:

**A. Embutición de simpe efecto:** es una embutición sin pisador que sólo permite la ejecución de piezas embutidas poco profundas.

Con matrices de embutir, sin pisador de chapa, solamente se pueden embutir piezas que tengan poca profundidad, es decir, con una relación:

$$(\mathsf{D}_{\mathsf{o}}-\mathsf{d}) \le 20 \cdot \mathsf{s} \tag{1}$$

donde:

Do: diámetro inicial en el semiproducto

d: diámetro final en la pieza

s: espesor del material

La altura de pared lateral que puede conseguirse sin pisador está en función del espesor de la chapa y del diámetro de embutición d, y cumple con la siguiente igualdad empírica:

$$h \le 0.3 \sqrt[2]{d^2} \sqrt{s} \tag{2}$$

donde:

h: altura de la pared cilíndrica en la pieza embutida

En la figura 2 se representan las 3 etapas más importantes de una embuticion de simple efecto y la transformación que sufre el material en cada una de ellas



3.-Los pliegues desaparecen.



**B. Embutición de doble efecto:** es una embutición con pisador, el cual, permite producir unas piezas embutidas de mayor profundidad.

En estos procesos la presión del pisador sobre la chapa debe calcularse cuidadosamente, si es excesiva, el metal, muy embridado, se ve sometido a un esfuerzo de tracción considerable que le alarga y puede romperle, si es insuficiente, el metal se engruesa y pueden formase pliegues.

Los útiles de embutición de doble efecto difieren según el tipo de prensa en que se monten, las cuales, pueden ser prensas de simple efecto o prensas de dobles efecto.

C. Embutición de triple efecto: es una embutición con pisador y extractor de la pieza. Se realizan con la ayuda de prensas de doble efecto más la suma de un cojín neumático o hidráulico que realiza el que se denomina tercer efecto. Las embuticiones de triple efecto son muy similares a las de doble efecto, pero se

diferencian de las segundas en que, el pisador está comandado directamente por un pistón hidráulico o una biela de la propia prensa

Los procesos anteriores están limitados a piezas poco profundas. En el caso de necesitar conformar piezas más profundas se recurre a la re-embutición. Para evitar que se produzca el fallo de la chapa al hacer piezas más profundas, es necesario permitir y controlar el flujo de material hacia la matriz. Esto se hace regulando la fuerza de sujeción del prensa-chapa y la fricción con la chapa. Un fallo común de este proceso es el arrugamiento que se produce en la zona de sujeción del prensachapas. Es debido a los esfuerzos de compresión que allí se producen dando lugar a fenómenos de pandeo local (arrugas).

Otras clasificaciones de los procesos de conformación de chapas aparecen en [17]. En esta norma se hace distinción entre la embutición con herramientas (rígidas o deformables) y la embutición con medios activos para transmitir la fuerza necesaria. Esta es una clasificación que implica la visión del desarrollo tecnológico de los procesos de conformación.

Según Macianiak [18], en la práctica, los procesos de conformado están limitados por el fallo de la chapa. Los mecanismos más comunes de fallo son la estricción localizada (o desgarro) y la fractura dúctil.

La aparición de uno u otro depende de la ductilidad del material y del estado de tensiones y deformaciones de la chapa. Se tiene que en el caso de materiales altamente dúctiles la chapa falla normalmente por estricción localizada, este proceso comienza con la concentración de las deformaciones en una estrecha banda de material que evoluciona hacia un cuello donde, finalmente, se produce el desgarro de la chapa. Por el contrario, en el caso de materiales poco dúctiles, es más frecuente la fractura dúctil sin que haya aparecido estricción alguna. Este es el caso de algunas aleaciones de aluminio endurecidas con tratamientos térmicos.

Durante el proceso de embutición, el material se deforma mediante tensiones de compresión-tracción. En el estirado, para la formación de la pared cilíndrica, ocurre una reducción del espesor debido a los esfuerzos de tensión. Las tensiones predominantes en la sección de la pared cilíndrica y el reborde aparecen representadas esquemáticamente en la figura 3.



Figura 3. Tensiones predominantes durante la embutición de una pieza cilíndrica. Fuente: adaptada de [19]

El comportamiento plástico de los materiales y la asociación de las teorías matemáticas y del cálculo tensorial a este fenómeno pueden desarrollarse, según [4], de dos formas diferentes, a) vinculando las tensiones con las deformaciones o b) vinculando las tensiones con la velocidad de deformación. No obstante, existe un grupo de hipótesis comunes a las teorías clásicas de plasticidad; entre estas suposiciones, cuestionadas por sus limitaciones y alcances se encuentran las siguientes:

- 1. El material deformado se considera continuo.
- 2. Los ejes principales de las deformaciones y las tensiones, por lo general, coinciden siempre.
- 3. Los efectos del tiempo se desprecian.
- 4. El volumen del cuerpo permanece constante.

5. Los desplazamientos elásticos debido a la acción de las fuerzas externas, son pequeños en comparación con las dimensiones de los elementos que se traten y son proporcionales además a la carga externa.

# 1.2 Comportamiento del material en la embutición. Diagrama límite de conformado

El diagrama límite de conformado (Forming Limit Diagram, FLD), propuesto inicialmente por Keeler y Backhofen (1963) y Goodwin (1968), se ha convertido en la herramienta más usada para caracterizar la capacidad de conformado de una chapa metálica a nivel industrial. El FLD consiste en una gráfica con la deformación principal mayor en el plano de la chapa ( $\epsilon_1$ ) frente a la menor ( $\epsilon_2$ ). En él se dibuja la curva límite de conformado (Forming Limit Curve, FLC), representa los valores límite de deformación principal máxima y mínima en el plano de la chapa necesarios para producir el fallo de la misma bajo distintas relaciones de deformación.

Por tanto, el FLD representa una frontera entre los estados de deformación que provocan el fallo en el conformado y los que no.

La conformabilidad de la chapa está relacionada con el estado de deformaciones [18]. El estado de deformaciones es la combinación de las deformaciones principales:  $\varepsilon_1$ ,  $\varepsilon_2$ ,  $\varepsilon_3$ . Por la ley de conservación de volumen, su suma es nula.

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0 \tag{3.1}$$

Por tanto, sólo se requieren dos de ellas para especificar el estado de deformaciones. La relación entre estas dos deformaciones es convencionalmente expresado como:

$$\varepsilon_2 = \beta \varepsilon_1 \tag{3.1}$$

Algunos valores de  $\beta$  describen situaciones que son de particular interés por ejemplo:  $\beta=1$ , en este caso  $\epsilon_1=\epsilon_2$ , la deformación es constante en todas las direcciones; este se refiere al estado biaxial (equi-biaxial).

 $\beta$ =0, en este caso en este caso no hay deformación en la segunda dirección principal  $\epsilon_1$ =0 y es llamado deformación plana (plane-strain).

 $\beta$ =-0.5, en este caso este es el estado de la prueba de tensión en un material isotrópico y se denomina uniaxial (uniaxial).

 $\beta$ =-1, en este caso  $\epsilon_1+\epsilon_2=0$  y consecuentemente  $\epsilon_3=0$ ; no hay cambio en el espesor. Este estado se presenta en las bridas de la embutición profunda. Este caso se denomina embutición profunda.

La relación entre las situaciones arribas descritas y el diagrama FLD se representa en la siguiente figura 4.



Figura 4. Diagrama de deformaciones principales (ε<sub>1</sub>, ε<sub>2</sub>) mostrando diferentes estados de deformación. Fuente: adaptada de [18]

El FLD es utilizado para diagnosticar el fallo en procesos de conformado de chapa. Se utiliza en todas las fases de la producción de un producto de chapa, por ejemplo, en la simulación con elementos finitos durante el diseño de un producto y para diseñar el proceso de conformado, en las pruebas con las herramientas conformadoras y en el control de la calidad durante el proceso de producción [20-22]. La forma típica de obtener una curva límite de deformaciones completa es mediante el ensayo Nakazima que implica ensayar probetas con diferentes geometrías (ancho variable y, por tanto,  $\beta$  variable) que son deformadas por un punzón hemisférico

hasta que se produce la rotura, más información sobre este tipo de ensayo, se puede consultar en [23].

De todo lo anterior se deduce que el FLD depende del material y del espesor de chapa que se esté usando. El FLD normalmente presenta una curva en forma de V, decreciente en el lado de la izquierda  $\beta = (d\epsilon_2/d\epsilon_1) < 0$  y creciente en el lado de la derecha  $\beta \ge 0$  (o región de estirado biaxial). Existen además otros factores de influencia sobre el comportamiento del FLD:

- Endurecimiento por deformación
- Velocidad de deformación
- Fractura dúctil
- Imperfecciones

A continuación se muestra en la figura 5 un diagrama representativo de conformado donde se incorpora la influencia de los factores comentados así como los diferentes tipos de fallo que pueden aparecer en función del estado tensional que se alcance en la pieza.



Figura 5. Diagrama Límite de Conformado (FLD) esquemático, incluyendo todos los posibles tipos de fallo. Fuente: adaptada de [18]

## 1.3 Endurecimiento por deformación e índice de anisotropía

Todas las operaciones de deformación están intrínsecamente vinculadas con la plasticidad del material, interesa saber pues, qué tipos de propiedades mecánicas y tecnológicas están relacionadas en la chapa metálica con su plasticidad y a través de qué ensayos se pueden determinar éstas.

Varios investigadores hacen referencia a la importancia del control inicial de las características de formabilidad de los materiales y su vinculación con el éxito de la operación de embutición, [24], [25], [26]. La fundamentación del método de control inicial de los materiales se basa en la predicción del comportamiento de la formabilidad evaluando el factor de endurecimiento (n), el índice de anisotropía (R) y la relación de embutición (D<sub>R</sub>).

Los materiales más usados en calidad de materia prima para la embutición son los aceros (bajos en carbono, de alta resistencia, alta resistencia y baja aleaciónmicroaleados-, aceros de muy alta resistencia), el aluminio y sus aleaciones y las aleaciones de cobre.

#### Endurecimiento por deformación. Modelos Ludwik y Hollomon

El factor de endurecimiento está asociado a la cantidad máxima de deformación que puede soportar un material antes que ocurra su agrietamiento. Queda definido como el aumento continuo de la tensión axial, con la evolución de la deformación axial después de la formación del cuello de la probeta, en el ensayo de tracción.

El fundamento metalúrgico del endurecimiento (o acritud) son los defectos cristalinos lineales -dislocaciones cristalinas- existentes en el interior de los cristales, su multiplicación durante la deformación en frío y las reacciones entre ellas a través del curso de esa deformación [27].

Si el material se conforma a una temperatura tal que se haga poco sensible a la velocidad de deformación, la curva real tensión- deformación, se ajusta bastante bien, en la zona de alargamientos uniformes, al modelo exponencial propuesto por Ludwick (y simplificado posteriormente por Hollomon):

$$\sigma = \sigma_0 + K\varepsilon^n \tag{4}$$

15

Modelo que difiere muy poco de la relación empírica de endurecimiento formulada por Marciniak [18] de la forma:

$$\sigma = K(\varepsilon_0 + \varepsilon)^n \tag{5}$$

En las ecuaciones (4) y (5),

 $\sigma$ : tensión real efectiva (Pa)

K: constante de plasticidad del material (Pa)

 $\varepsilon$ : deformación real

ε<sub>0</sub>: valor de la predeformación

*n* : coeficiente de endurecimiento por deformación, constituye la pendiente de la representación logarítmica doble en estas ecuaciones.

Estos modelos son ampliamente utilizados para estudiar la tracción en los aceros, sin embargo, son criticados en ocasiones por ser empíricos, porque la tensión o esfuerzo  $\sigma$ , crece con el aumento de la deformación  $\epsilon$  y porque n, no es constante. A pesar de estos inconvenientes, los modelos se ajustan con excelentes resultados a pequeñas deformaciones obtenidas en tracción.

Para determinar los coeficientes del modelo de Hollomon se representan los valores de tensión y deformación en escala logarítmica, donde la pendiente de la recta proporciona el coeficiente de endurecimiento n.

$$\log \sigma = \log K + n \log \varepsilon \tag{6}$$

Las tres zonas de la figura 6-a representan esquemáticamente el comportamiento del material al aplicársele una carga, donde: la zona I es la región elástica, la zona II es la región de transición entre el comportamiento elástico y plástico y la zona III el material se comporta de forma totalmente plástico. La figura 6-b representa varias curvas tensión deformación reales para varios materiales obtenidas a temperatura ambiente.



a)

b)

Figura 6. a) Representación esquemática del comportamiento de un material al aplicársele una carga. Fuente: adaptada de [3]. b) Curvas tensión real vs deformación real. Ensayo tracción a temperatura ambiente. Fuente: adaptada de [28]
En [19] quedó demostrado que la máxima profundidad de un conformado depende de los valores máximos que adquiera la deformación y de la homogeneidad de la deformación en todos los puntos de la chapa. Como el alargamiento uniforme es similar al coeficiente de endurecimiento, se puede deducir que se comportará bien durante la deformación un metal con elevado coeficiente de endurecimiento, o lo que es lo mismo, mientras mayor sea el valor de n, mayor deformación aceptará el material antes de la estricción; porque precisamente, el endurecimiento evita que la estricción siga teniendo lugar.

#### Criterio de fluencia de Hill.

La función de Hill, que es efectiva para describir criterios de fluencia en láminas anisotrópicas, según K. Chung [21], es una extensión de la función de Von Mises y se expresa de la siguiente manera:

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

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

# Índice de anisotropía

El factor de anisotropía relaciona las deformaciones en el ancho y el espesor del material. Para poder cuantificar el fenómeno de anisotropía se emplea típicamente el coeficiente de Lankford R. Este coeficiente se obtiene de la razón entre las deformaciones en el ancho y el espesor del material (inicial/final), según la ecuación (6). Así, para determinar el valor de la anisotropía normal, se emplea la fórmula 7,

$$R = \frac{\varepsilon_{ancho}}{\varepsilon_{espesor}} = \frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{33}}$$
(7)

donde

$$\varepsilon_{ancho} = \ln \frac{b_0}{b_f} \tag{8}$$

$$\varepsilon_{espesor} = \ln \frac{s_0}{s_f} \tag{9}$$

$$\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33} = 0 \tag{10}$$

Como la deformación en el espesor de la chapa es relativamente pequeña y la medición del espesor, en las condiciones del laboratorio, puede estar sujeta a errores, el valor de R, pueda calcularse también como:

$$R = \frac{\varepsilon_{ancho}}{\varepsilon_{espesor}} = \frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{33}} = \frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{22} + \varepsilon_{33}}$$
(7.1)

Consecuentemente

$$R = \frac{\ln\left(\frac{l_o}{l_f}\right)}{\ln\left(\frac{l_f \ s_f}{l_o \ s_o}\right)} \tag{7.2}$$

El valor promedio de R,

$$\bar{R} = \frac{R_0 + 2R_{45} + R_{90}}{4} \tag{11}$$

La anisotropía explicada hasta aquí es la anisotropía normal, la cual mide el cambio de propiedades en la longitud orientada hacia el espesor de la lámina, pero también existe la anisotropía planar que mide las diferencias de las propiedades en varias

direcciones dentro del plano de la lámina. El valor de la anisotropía planar ΔR, se calcula como:

$$\Delta R = \frac{R_0 - 2R_{45} + R_{90}}{2} \tag{12}$$

Valores típicos representativos de n y de  $\overline{R}$  pueden encontrarse en [28] en los tomos l y II, respectivamente.

Un factor muy importante en la embutición es la fricción, ya que el material debe deslizarse entre la abertura existente entre el punzón y la matriz, motivo por el cual esta área en contacto con la pieza debe ser bien pulida y utilizar el lubricante adecuado. Otro aspecto a considerar en este proceso son los radios de los bordes de la matriz y el punzón, estos ayudarán al fácil desplazamiento del material y evitarán cortes o roturas en el material.

## 1.4 Defectos más importantes en las piezas embutidas

Agujeros o grietas: Pueden aparecer en cualquier punto de la pieza y suelen estar ocasionados por poros o elementos extraños, se pueden evitar mejorando la limpieza del entorno.

Espesor irregular de chapa: Este defecto indica un desgaste en el utillaje de embutición, luego la solución está en su sustitución.

Desgarre del fondo de la pieza: La solución está en aumentar el radio de redondeo en las aristas de punzón y matriz, pues éste es el origen del problema.

Rotura del fondo: Originado por una relación de embutición muy grande que se soluciona reduciendo la relación de embutición y realizando otra posterior embutición. Otra forma de corregir el problema sería cambiar la chapa utilizada, bien en el material o en el espesor.

Bordes ondulados: En algunas ocasiones al embutir la pieza se obtienen unos bordes ondulados, llamados orejas. Esta ondulación esta ocasionada por la anisotropía plana de la chapa originada por su proceso de fabricación típico, el laminado, que hace que las características de la chapa no sean iguales en todas las direcciones, por tanto, depende del valor  $\Delta R$  de la chapa, si éste es cero no aparecerá este defecto.

Forma abombada: Si se pretende que la pieza tenga paredes rectas y resultan abombadas, significa que el juego de embutición es demasiado ancho y se debe cambiar la matriz o el punzón para reducir este intersticio.

Formación de pliegues y arrugas: Se pueden producir en el ala o en las paredes. En ambos casos, puede producirse por una fuerza insuficiente del prensachapas, en este caso, se debe aumentar la fuerza de este, teniendo en cuenta que aumentará la fricción. Si se produce en las paredes, el origen puede ser una anchura de intersticio demasiado grande y habrá que reducirla sustituyendo alguno de los elementos del utillaje.

#### 1.5 Simulación por elementos finitos del proceso de embutición

Según [3], el significado técnico de la simulación es la descripción y la reproducción de los procesos físicos y técnicos mediante el uso de modelos matemáticos y físicos. En comparación con las pruebas prácticas, la simulación a menudo es más barata y no tan peligrosa.

El proceso de simulación se realiza en un programa especializado, y su sustento matemático lo formula a través del análisis por elementos finitos, que básicamente es un método de aproximación, que divide a un sistema entero (dominio), en subsistemas (subdominios), que están unidos por nodos en sus contornos, donde se desee resultados en particular, al cual se aplica condiciones iniciales y de contorno de fuerza, tensión, deformación, temperatura [11].

En combinación con los métodos modernos de computación, la simulación es una poderosa herramienta que gana cada vez más importancia para la descripción y el desarrollo de nuevos métodos de procesamiento. Debido a los requisitos más altos en la calidad de los productos y tolerancias estrechas de medidas, la optimización, planificación y simulación de procesos de conformado se vuelve más importante. A medida que la potencia de cálculo se ha incrementado durante los últimos años, los métodos numéricos juegan un rol destacado. Donde el método numérico más importante es el método de elementos finitos (FEM).

El modelo del material, así como los valores de las constantes y exponentes son aspectos muy importantes para obtener resultados robustos y confiables en la simulación por elementos finitos del proceso de embutición. En la figura 7 se resumen los principales aspectos que intervienen en el diseño de una herramienta de embutición. El autor de este trabajo propone que la modelación y simulación de la operación pueden efectivamente, jugar un papel clave en el éxito de la operación y resalta el papel que esta ocupa dentro del ciclo de fabricación de la herramienta.



Figura 7. Diagrama causa efecto de un proceso con las fallas principales en el diseño de una herramienta de embutición. Fuente: elaboración propia

En la tabla Nro.1 del Anexo I aparece un resumen con el análisis de la bibliografía en relación a la utilización del MEF en los procesos de embutición, lo cual demuestra que el tema es de interés para la comunidad científica en aras de entender mejor el proceso y prevenir los posibles defectos en las piezas.

# 1.5 Conclusiones parciales del Capítulo I

- 1. La revisión bibliográfica sobre los procesos de embutido demuestra que es un tema de actualidad al nivel nacional e internacional.
- 2. La complejidad física mecánica del proceso de embutición se debe a la existencia de estados tensionales y de deformación complejos y la presencia de variables tecnológicas de importancia para la lograr una pieza satisfactoria. Entre estas variables sobresalen: radio del punzón, radio de la matriz, fuerza en el punzón, relación de embutición, fuerza en el prensachapas, juego de embutición.
- La confiabilidad de los modelos constitutivos del comportamiento del material, está dada principalmente, por la obtención de sus propiedades a través de ensayos mecánicos.
- 4. La simulación del proceso de embutición por elementos finitos constituye una herramienta de trabajo para entender el proceso y predecir los defectos que pueden aparecer en las piezas.

# CAPÍTULO II. Cálculo analítico del proceso de embutición y preparación de la simulación por elementos finitos

#### 2.1 Definición de la pieza

La pieza, figura 8 a), se fabricará de chapas de espesor 1 mm de acero al carbono, específicamente del ASTM 1020, a solicitud del cliente. Con este material se garantizan las funciones para las cuales ha sido elaborada la pieza, que no es más que un componente de la armada del retén de la bomba de inyección del camión Kmaz 8752-79, según se muestra en la figura 8 b).





El plano de la pieza a embutir con el resto de las especificaciones de la pieza se muestra en el Anexo II. Las exigencias actuales demandan que la pieza se fabrique del acero 1020 debido a las condiciones en que trabaja la pieza, posee un contenido bajo de carbono (ver tabla 2), apto para los procesos de conformación por embutición.

Composición Química (% del total)		(%	Min (%del total)		Max (% del total)				
С	Si	MN	Р	S	Cr	Ni	Мо	V	Та
0.18-		0.30-	<0.040	<0.050					
0.23		0.60	≤0.040	≤0.050					
W	N	Cu	Со	Pb	В	Nb	AI	Ti	Otros

Las propiedades mecánicas del material se listan a continuación en la tabla 3.

Tabla3.Propiedades mecánicas del acero 1020. Fuente: adaptada de [29]

Propiedad	Valor	Unidades		
Módulo elástico	205000	N/mm^2		
Coeficiente de Poisson	0.29	N/D		
Módulo de Young´s	210	Gpa		
Yield Stress	200	MPa		
Módulo cortante	80000	N/mm^2		
Densidad de masa	7870 kg/m^3			
Límite de tracción	420	N/mm^2		
Límite de compresión		N/mm^2		
Límite elástico	350	N/mm^2		
Coeficiente de expansión térmica	1.17e-005	/K		
Conductividad térmica	51.9	W/(m·K)		
Calor específico	486	J/(kg⋅K)		
Cociente de amortiguamiento del material		N/D		

# 2.2 Cálculo de las variables tecnológicas asociadas al proceso de embutición

# A. Diámetro inicial en el semiproducto

Según el plano de la pieza que aparece en el Anexo II, el diámetro inicial en el semiproducto (D<sub>o</sub>) se puede calcular igualando las áreas iniciales y finales de la pieza embutida y el disco inicial así, según recomendaciones de [12]:

$$D_o = \sqrt{d^2 + 4 * d * (h + 0.57 * r)}$$
(17)

Donde:

d: Diámetro final en la pieza embutida (mm)

h: Altura de la pared lateral de la pieza (mm)

r: Radio de redondeo interior de la pieza (mm)

Sustituyendo en (17) queda:

$$D_o = \sqrt{95^2 + 4 * 95 * (9.75 + 0.57 * 1)}$$
$$D_o = \sqrt{12946.6}$$
$$D_o = 113.78 \ mm$$

Por razones tecnológicas se selecciona la altura de la pieza, al valor requerido en el plano, incrementar este valor, según recomendaciones prácticas, incrementa el costo total de la pieza.

#### B. Relación límite de embutición

La relación límite de embutición se vincula a la cantidad de pasos necesarios para embutir satisfactoriamente una pieza determinada. Se calcula como la relación entre los diámetros iniciales y finales que intervienen en la embutición, según la ecuación (13)

$$D_R = \frac{D_0}{d} \tag{13}$$

El valor de D<sub>R</sub> representa además, una medida de la deformación que sufre la chapa, según [30], puede expresarse también como:

$$\varepsilon = \ln \frac{D_0}{d} \tag{14}$$

$$m_R = \frac{d}{D_0} \tag{15}$$

$$D_R = \frac{D_0}{d} = \frac{1}{m_R} = e^{\varepsilon} \tag{16}$$

m, es el inverso de la relación límite de embutición

25
En [30] se recomienda que la relación de embutición puede determinarse como:

$$D_R = \frac{D_o}{d}$$
(18)  
$$D_R = \frac{113.78}{95}$$
$$D_R = 1.19 \text{ mm}$$

Sustituyendo en la ecuación (15) queda:

$$m_R = \frac{d}{D_0} = \frac{95}{113.78}$$
  
 $m_R = 0.83$ 

Según Oehler [27], el valor de la relación límite de embutición para un material está asociada a la reducción de diámetros que se pueden lograr en una sola embutición. Esta es la proporción que existe entre el diámetro de la pieza embutida (D<sub>o</sub>) y el diámetro de la pieza final (d), calculable en función del valor del índice de anisotropía de Lankford, por la ecuación (19),

$$\ln D_R = \frac{1}{(1+\mu)} \sqrt{\frac{(\bar{R}+1)}{2}}$$
(19)

Donde:

 µ: Coeficiente de fricción, por lo general se puede asumir para estas operaciones con lubricación entre 0.1 y 0.3

 $\overline{R}$ : Valor promedio del coeficiente de anisotropía. Las recomendaciones de [28], en dependencia del material a utilizar, sugieren tomar valores entre 1.0 y 1.4.

Sustituyendo en (19) queda:

$$\ln D_R = \frac{1}{(1+0.2)} \sqrt{\frac{(1.2+1)}{2}}$$
$$\ln D_R = 0.86$$
$$D_R = 2.35$$

#### C. Determinación de la cantidad de pasos de embutición

La relación máxima del límite de embutición que Oehler [27] recomienda, se determina por:

$$D_{R_{lim}} = 2.15 - \frac{d}{1000 * s}$$

$$D_{R_{lim}} = 2.05$$
(20)

Si  $D_R > D_{Rlim}$  se recomienda realizar el proceso en varios pasos.

Si  $D_R < D_{Rlim}$  se recomienda realizar el proceso un solo paso.

Como  $D_R$ =1.19 y D<sub>Rlím</sub>=2.05,  $D_R < D_{Rlím}$ , se recomienda que el proceso se realice en un solo paso de embutido.

Otros autores [30] recomiendan el cálculo de la cantidad de pasos de embutición en función del espesor relativo del semiproducto ( $s_R$ )

$$s_{R} = \frac{s}{D_{o}} \cdot 100\% = \frac{1}{113.78} \cdot 100\%$$

$$s_{R} = \frac{1}{113.78} \cdot 100\%$$

$$s_{R} = 0.87$$
(21)

Con este valor, tomando como referencia la Tabla 4, se determina la cantidad de pasos del proceso de embutición. Para  $s_R = 0.87$ , la relación de embutición para el primer paso es  $m_1$ =0.53-0.55, que resulta ser menor que  $D_R = 1.19$ , calculado por la fórmula (18). Entonces, la embutición puede realizarse en un solo paso

Relación de embutición	Espesor relativo del semiproducto $SR = \frac{S}{Do} 1.00\%$						
	2.0 - 1.5	1.5 - 1.0	1.0-0.6	0.6 - 0.3	0.3 - 0.15	0.15 - 0.08	
ml=dsl/D	0.48-0.50	0.50-0.53	0.53-0.55	0.55-0.58	0.58-0.60	0.60-0.63	
m2=ds2/ds1	0.73-0.75	0.75-0.76	0.76-0.78	0.78-0.79	0.79-0.80	0.80-0.82	
m3=ds3/ds2	0.76-0.78	0.78-0.79	0.79-0.80	0.81-0.82	0.81-0.82	0.80-0.84	
m4=ds4/ds3	0.78-0.80	0.80-0.81	0.81-0.82	0.80-0.83	0.83-0.85	0.85-0.86	
m5=ds5/ds4	0.80-0.82	0.82-0.84	0.84-0.85	0.85-0.86	0.86-0.87	0.87-0.88	

Tabla 4. Espesor relativo del semiproducto. Fuente: adaptada de [30]

#### D. Radio de la matriz

El radio de la matriz se determina por la fórmula empírica (22) que aparece en [27]

$$r_z = 0.035[50 + (D_o - d)]\sqrt{s}$$
<sup>(22)</sup>

Mientras mayor es el valor del radio de la matriz, menor efecto sobre la fuerza de punzón, pero aumenta también a probabilidad de la formación de arrugas. Mientras menor sea el radio de la matriz, se produce un doblado más severo en la pieza, trayendo consigo que haya menor sección resistente, mayor efecto de la fuerza del punzón y una menor embutibilidad.

Sustituyendo e (22)

$$r_z = 0.035[50 + (113.78 - 71.68)]\sqrt{1}$$

 $r_m = 2.4 mm$ 

#### E. Radio del punzón

$$r_p = (3 \dots 5)r_m$$
 (23)

Otras recomendaciones aconsejan para una sola operación de embutición, se utilice en el punzón, el radio de la pieza el radio de la pieza en cuestión. Por lo que:

 $r_p = 1 mm$ 

#### F. Juego u holgura de embutición (z)

El juego de embutición unilateral se determina por la expresión (24) que aparece en [30]

$$z = s + k_z * \sqrt{10 * s} \tag{24}$$

Donde:

k<sub>z</sub>: es el coeficiente de embutido, según la tabla 5.

Tabla 5. Valores de kz. Fuente: adaptada de [12]

Acero 0.07	
Aluminio 0.02	
Otros materiales ferrosos 0.04	

Sustituyendo en (24) queda:

$$z = 1 + 0.07 * \sqrt{10 * 1}$$

$$z = 1.22 mm$$

#### G. Diámetro del punzón

$$D_p = (d + \Delta - z)^{+\delta_p}$$
<sup>(25)</sup>

Donde:

 $\Delta$ : Tolerancia de fabricación de la pieza. Según el plano de la pieza, las tolerancias de las medidas no acotadas según IT<sub>14</sub>/<sub>2</sub>

 $\delta_p$ : Tolerancia de fabricación del punzón.

Para la fabricación del punzón es recomendable una tolerancia de IT<sub>7</sub>. Sustituyendo en (25):

$$D_p = (95 + 0.435 - 2.44)^{+\delta_p}$$
$$D_p = 92.995 h7 \binom{+0.035}{0} \text{ mm}$$

#### H. Diámetro de la matriz

$$D_m = (d - \Delta)^{+\delta_m} \tag{26}$$

 $\delta_m$ - Tolerancia de fabricación de la matriz.

Para la fabricación de la matriz es recomendable una tolerancia de IT8. Sustituyendo en (26)

$$D_m = (95 - 0.435)^{+\delta_m}$$
$$D_m = 94.565 \,H8 \, \begin{pmatrix} 0 \\ -0.054 \end{pmatrix} \,\text{mm}$$

#### I. Fuerza de embutición

En la literatura existen numerosas recomendaciones empíricas para el cálculo de la fuerza de embutición ver por ejemplo [15, 23, 28, 30]. La mayoría de los autores consideran que este es uno de los parámetros mas importantes en el proceso.

La fórmula que aparece en [12] es:

$$F_e = d * \pi * t * k * f \tag{27}$$

Donde:

f: factor de incremento para la fuerza

Kf: Resistencia a la conformación de la chapa (para acero 20, adquiere un valor entre 441 MPa y 539 Mpa).

Sustituyendo en (27)

$$F_e = 95 * 3.14 * 1 * 0.4 * 49.96$$
$$F_e = 5961.22 Kgf$$
$$F_e = 58455.72 N$$
$$F_e = 58.45 KN$$

#### J. Determinación del uso del prensachapas

Los criterios prácticos establecen que si la relación:

$$(D-d) \ge 22 s \tag{28}$$

Se cumple, entonces se recomienda el uso del prensachapas en la primera operación.

# 2.3 Caracterización y parámetros de trabajo del software utilizado en la simulación

Los criterios de la revisión bibliográfica, indican que el comportamiento plástico de los materiales en la embutición y la asociación de las teorías matemáticas y del cálculo tensorial a este fenómeno pueden desarrollarse, vinculando las tensiones con las deformaciones como aparece en [31-32]; o vinculando las tensiones con la velocidad de deformación, según los autores [1]. No obstante, existen un grupo de hipótesis

comunes a las teorías clásicas de plasticidad; entre estas suposiciones se encuentran las siguientes:

- 1. El material deformado se considera continuo.
- 2. Los ejes principales de las deformaciones y las tensiones, por lo general, coinciden siempre.
- 3. El volumen del cuerpo permanece constante.

Los desplazamientos elásticos debido a la acción de las fuerzas externas, son pequeños en comparación con las dimensiones de los elementos que se traten

En la actualidad, existe una gran oferta de software en el mercado que utiliza el método de los elementos finitos para resolver problemas de ciencias aplicadas e ingeniería. Para utilizar cualquiera de ellos de forma correcta, se hace necesario un profundo manejo del material con el que se trabaja y del método de los elementos finitos. Los programas actuales nos permiten trabajar con facilidad gracias al visor de diseño y de visualización de los resultados, de una forma intuitiva y sencilla.

El programa utilizado en este trabajo para la simulación de la pieza objeto de estudio, es un software de mecánica general. Este software es capaz de solucionar problemas de multitud de campos de trabajo: problemas estructurales, de vibraciones, de sonido, de movimientos sísmicos, de fluidos, etc.

#### Unidades

El programa no especifica las unidades a utilizar, por lo tanto, las unidades elegidas deben ser consistentes entre sí, las unidades utilizadas son las del Sistema Internacional de unidades (SI), se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Unidades consistentes en el software de mecáncia general utilizado. Fuente:

MASS	LENG	TIME	FORCE	STRESS	ENERGY	DENSITY	YOUNG's	35MPH	GRAVITY
								56.33KMPH	
kg	m	s	N	Pa	J	7.83e+03	2.07e+11	15.65	9.806
kg	cm	s	1.0e-02 N			7.83e-03	2.07e+09	1.56e+03	9,81E+05
kg	cm	ms	1.0e+04 N			7.83e-03	2.07e+03	1.56	9,81E-01
kg	cm	us	1.0e+10 N			7.83e-03	2.07e-03	1.56e-03	9,81E-07
kg	mm	ms	KN	GPa	KN-mm	7.83e-06	2.07e+02	15.65	9,81E+00
g	cm	s	dyne	dy/cm²	erg	7.83e+00	2.07e+12	1.56e+03	9,81E+05
g	cm	us	1.0e+07 N	Mbar	1.0e+07 Ncm	7.83e+00	2.07e+00	1.56e-03	9,81E-07
g	mm	s	1.0e-06 N	Pa		7.83e-03	2.07e+11	1.56e+04	9,81E+06
g	mm	ms	N	MPa	N-mm	7.83e-03	2.07e+05	15.65	9,81E+00
ton	mm	s	N	MPa	N-mm	7.83e-09	2.07e+05	1.56e+04	9,81E+06
lbfs2/in	in	s	lbf	psi	lbf-in	7.33e-04	3.00e+07	6.16e+02	386
slug	ft	s	lbf	psf	lbf-ft	1.52e+01	4.32e+09	51.33	32.17
kgfs2/mm	mm	S	kgf	kgf/mm²	kgf-mm	8.02e-10	2.07e+04	1.56e+04	
kg	mm	s	mN	1.0e+03 Pa		7.83e-06	2.07e+08		9,81E+05
g	cm	ms		1.0e+05 Pa		7.83e+00	2.07e+06		

adaptada de [33]

## Definición del modelo

El primer paso para comenzar un análisis con el programa de mecánica ageneral es definir el modelo. La forma de comunicarse es un archivo de datos de entrada, que puede ser creado usando un editor de texto o desde el preprocesador gráfico del programa. En este trabajo de diploma se optó por usar el preprocesador gráfico del programa. Los componentes del modelo se representan en la figura 9. Los datos del modelo definen los nodos, elementos, propiedades, tipo de elemento finito o de usuario a usar, condiciones iniciales, etc.



Figura 9. Componentes de un modelo en el software de mecánica general seleccionado para la simulación. Fuente: adaptada de [34]

Los siguientes datos deben ser incluidos de forma obligatoria dentro del archivo de entrada:

- a) Geometría: La geometría del modelo es definida por los elementos y sus nodos.
- b) Propiedades de los Materiales: Las propiedades de los materiales deben estar asociadas a los elementos y dependen del tipo de elemento finito o de usuario a utilizar.

Como datos opcionales para la definición del modelo se tienen:

- Partes y un ensamblaje: La geometría de un modelo puede ser definida a través del módulo Partes, las cuales son ensambladas unas respecto a las otras.
- 2. Condiciones iniciales: Se pueden especificar condiciones iniciales no nulas de esfuerzos, deformaciones, temperatura o velocidad.
- 3. Condiciones de frontera: Condiciones de borde que son impuestas, tales como condiciones de simetría, desplazamiento o rotaciones.
- 4. Interacciones: Contacto y otras interacciones entre las partes pueden ser definidas.
- 5. Definición de Amplitud: Curvas de amplitud pueden ser definidas para casos en los que se tiene cargas que dependen del tiempo o condiciones de contorno.

6. Continuación del análisis: Es posible usar los resultados de un análisis previo y continuar el análisis con un nuevo modelo o historia de datos

#### Tipos de elementos

Los elementos axisimétricos se usan para modelar cuerpos de revolución bajo condiciones de cargas simétricas axiales, como las de los procesos de embutición. Se tienen en el software elementos axisimétricos regulares que permiten, para aplicaciones estructurales, solo cargas axiales y radiales, las propiedades del material pueden ser isotrópicas u ortotrópicas.

Cada elemento finito tiene un único nombre que caracteriza su comportamiento, a través de las siguientes definiciones:

- a) Familia
- b) Grados de libertad
- c) Números de nodos
- d) Formulación
- e) Integración

El orden de interpolación es determinado por el número de nodos usados en el elemento, por ejemplo, los elementos que tienen nodos solo en las esquinas usan interpolación lineal y son llamados elementos lineales o elementos de primer orden, figura 10a. En el software de mecánica general los elementos con nodos intermedios usan interpolación cuadrática y son llamados elementos cuadráticos o elementos de segundo orden, figura 9b. Los elementos triangulares o tetraédricos modificados, usan interpolación de segundo orden modificado. Las características de los tipos de elementos sólidos triangulares, tetraédricos, cuadriláteros y hexaédricos s listan en la tabla 7.



Figura 10. Elementos lineales y cuadráticos. Fuente: adaptada de [33]

Tabla 7. Tipos de elementos sólidos: triangulares, tetraédricos, cuadriláteros y hexaédricos. Fuente: adaptada de [33]

Elementos triangulares y tetraédricos	Elementos cuadriláteros y hexaédricos			
Son usados para formas geométricas	Tienen una mejor tasa de			
complejas. Son menos sensibles a la	convergencia que los triángulos y los			
forma inicial del elemento.	tetraedros.			
Los de primer orden requieren una	Los de primer orden funcionan mejor			
malla muy refinada para obtener	si su forma es aproximadamente			
buenos resultados.	rectangular			

El sistema coordenado usado por el programa de elementos finitos es el sistema cartesiano, cuyo convenio de signo positivo se muestra en la figura 11, y debe coincidir con la regla de la mano derecha. El software de mecánica general permite elegir otro sistema localmente, ya sea para las salidas referidas a variables nodales (desplazamiento, aceleración, esfuerzos, etc.), condiciones de carga, restricciones y especificaciones de material de las secciones.



Figura 11. Sistema de coordenadas cartesianas usado en el software. Fuente. Adaptada de [33]

#### Grados de libertad

El programa considera los grados de libertad que se muestran en la tabla 8. Los grados de libertad sólo son activados cuando el análisis lo requiere, ya que cada elemento finito usa los grados de libertad requeridos. Por ejemplo, para elementos sólidos en dos dimensiones 2D, se usa únicamente los grados de libertad 1 y 2. Los grados de libertad asociados a cada nodo se refieren exclusivamente a los del elemento finito usado.

Tabla 8. Grados de libertad considerados por el programa de elementos finitos.

(1)	Desplazamiento en x
(2)	Desplazamiento en y
(3)	Desplazamiento en z
(4)	Rotación a través del eje x
(5)	Rotación a través del eje y
(6)	Rotación a través del eje z
(7)	Warping amplitude (para secciones abiertas de elementos
	beams).
(8)	Presión de poros
(9)	Potencial eléctrico
(10)	No usado
(11)	Temperatura (ó concentración normalizada en análisis de difusión de masa)
(12)	Segunda temperatura (para elementos Shell o Beams)
(13)	Tercera temperatura (para elementos Shell o Beams)
(14)	Etc

Fuente. Adaptada de [33]

## Tiempo

Se consideran dos medidas de tiempo: tiempo del paso de análisis y tiempo total. El tiempo del paso del análisis es medido desde el comienzo de cada paso partiendo desde cero, mientras que el tiempo total es medido de forma acumulada hasta el último paso del análisis.

## 2.4 Conclusiones parciales del Capítulo II

- El estudio analítico de los procesos de embutición de chapas demuestra que hasta el momento no existe una expresión analítica que describa las relaciones funcionales entre los parámetros tecnológicos del proceso y el dimensionamiento e integración de los elementos constitutivos de la herramienta.
- Se calcularon a partir de las fórmulas empíricas y recomendaciones de los especialistas los principales parámetros del proceso de embutición para la pieza que intervienen en la simulación por elementos finitos.

## Capítulo III. Análisis de resultados

## 3.1 Preparación de la simulación

Los modelos de elementos finitos usados para describir las operaciones de embutido de chapa generalmente realizan una descripción Lagrangiana del proceso [26]. Dada la fuerte no linealidad del problema, debida principalmente al comportamiento plástico del material y al contacto entre los diferentes elementos, se emplea una formulación de grandes deformaciones.

En este momento del desarrollo del trabajo, para ser consecuente con los resultados de la revisión bibliográfica, los objetivos de la investigación y las posibilidades del equipamiento técnico disponible, se decide optar por la simulación 2D, por tener menor costo computacional y adaptarse bien a las exigencias de la pieza a simular.

## Generación de las geometrías

En la creación del modelo, primero se conceptúan, a partir de las dimensiones calculadas en el capítulo anterior, cada una de las partes que intervienen en el proceso de embutición, chapa, punzón y matriz. La matriz (figura 12) y el punzón (figura 13) se consideran elementos rígidos.



Figura 12. Perfil 2D de la matriz.



Figura 13. Perfil 2D del punzón.

Mientras que, para la chapa metálica (figura 14), se supone un comportamiento elasto-plástico con endurecimiento por deformación de tipo isotrópico. Se supone, además, un modelo de plasticidad asociativa isótropo e independiente de la velocidad de deformación. Esta aproximación es válida siempre que la anisotropía de la chapa no sea muy elevada.



Figura 14. Perfil 2D de la chapa.

En este módulo se generan las geometrías a partir de las cuales se obtuvieron las herramientas con los que se trabajó. Importante prestar atención a los radios de redondeo de esas herramientas.

#### Ensamble

Una vez obtenida la geometría de cada parte, y asignadas las propiedades del material a cada elemento del modelo, se ensambla el modelo, como se muestra en la figura 15. En el módulo ensamble se unen las piezas antes creadas para posicionarlas en la forma más conveniente para realizar la simulación.



Figura 15. Modelo del conjunto ensamblado.

## **Materiales**

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

Es necesario añadir un criterio de daño para complementar la parte plástica del proceso de manufactura, para lo cual se decidió utilizar el criterio de Hill, ya que es el que describe de mejor manera el comportamiento de aceros suaves y convencionales. En 1950, Hill sugirió un criterio de rendimiento anisotrópico como una generalización del criterio de Huber-Mises [35]. La anisotropía plástica que se explicó en el capítulo anterior, es la dependencia de las propiedades del material en

la dirección de la prueba de ensayos [24]. En los resultados de salida son valorados en esta tesis, entre otros, los esfuerzos de von Mises.

#### Condiciones frontera

En este punto de la simulación se crean las condiciones de frontera para cada paso de la embutición. Con el fin de entender mejor el movimiento del troquel en su modo de trabajo de simple efecto se aclara que la matriz se fija en la mesa de la prensa y en la parte superior de la prensa, se ajusta el punzón al carro de la prensa. El punzón, en su carrera de trabajo, descienden hasta su punto máximo, en el cual, penetra en la matriz embutiendo la chapa como se desea. La fuerza del punzón se calculó en el capítulo II.

#### Declaración de pasos

En el módulo Step se declaran los pasos que va a seguir la simulación, así como su duración y el factor de escalamiento de masa. Para determinar un correcto factor de escalamiento de masa, se comienza con uno muy grande y se va disminuyendo hasta obtener uno que tenga la mejor relación entre exactitud de los resultados y tiempo de cómputo. Para este trabajo se crearon dos pasos:

- a) Paso de embutición o aplicación de la carga
- b) Paso de recuperación para que al retirar la carga y el punzón regresa a su punto inicial.

#### Interacciones entre cuerpos.

En este módulo se declaran como son las interacciones entre cada cuerpo involucrado en la simulación. Todas las interacciones son del tipo contacto superficie con superficie y se utiliza un coeficiente de fricción para cada situación, siendo matriz-chapa, punzón-chapa. El coeficiente de fricción varía dependiendo la zona de contacto entre el punzón, la chapa y la matriz, sin embargo, de acuerdo con la investigación realizada por Wang et al en 2017 [36], se puede utilizar un coeficiente de fricción que describa todo el proceso de embutido, por lo que se tomó para este caso el valor  $\mu$ =0.3

## Restricciones de desplazamiento para herramientas.

Se crearon restricciones de empotramiento en la base de las matrices de tal forma que no exista movimiento ni deformación.

#### Malla.

Con el fin de obtener una malla que permita disminuir el tiempo de cómputo sin sacrificar precisión en los resultados se experimentó con el tamaño de éstas en l embutición. Éste experimento consistió en utilizar 3 mallas con elementos diferentes en cada simulación para identificar de esta forma una tendencia en el valor de los resultados.

La selección de los elementos del mallado de la chapa se realiza conforme se muestra en la figura 16.

Element Library	Family	
) Standard 💿 Explicit	Acoustic Beam Section	3
ieometric Order ) Linear () Quadratic	Cohesive Coupled Temperature-Displacement	
Quad Tri		
Element Controls		
Second-order accuracy:	⊖ Yes ● No	^
Distortion control:	● Use default ○ Yes ○ No	
	Length ratio: 0.1	
Hourglass control:	Use default 🔘 Enhanced 🔘 Relax stiffness 🔘 Stiffness 🔘 Viscous 🔘 Combined	
	Stiffness-viscous weight factor: 0.5	
Element deletion:	● Use default ○ Yes ○ No	
	Oller defende O Carrier	~

Figura 16. Selección del tipo de elemento para el mallado. Fuente: elaboración propia

En la tabla 9 se dan las características de las mallas utilizadas en la simulación.

Tabla 9. Características de las mallas utilizadas en la simulación. Fuente: elaboración

propia

Modelo	Nro. de nodos	Nro. elementos	Tipo de	Orden
			elemento	geométrico
1	2107	1800		Lineal
				Cuadrático
2	4059	3600	CPS4R	Culturality
-	0014	6000		
3	6611	6000		

El análisis de sensibilidad de la malla se realizó para valores de la variación del espesor y se muestran en la figura 17.



Figura 17. Resultados del análisis de sensibilidad de la malla para la variación del espesor. Fuente: elaboración propia.

El error máximo del modelo 1 en relación al 2 es de 3.6%. El error máximo del modelo 1 en relación al 3 es de 4.4 %, en ningún caso mayor del 5% recomendado. Siendo el modelo 1 adecuado para desarrollar la simulación. El mismo consta de 1800 elementos planos de 4 nodos para el estado plano de deformaciones.

## 3.2 Simulación del modelo y análisis de los resultados

## Aplicación de las cargas

En este paso se seleccionó un tipo de carga como concentrada en el punzón, asumido previamente como elemento rígido. La carga calculada en el capítulo anterior como fuerza de embutición, se aplica en el punto de referencia (RP) seleccionado en el punzón, según se muestra en la figura 15.

En la figura 18 a), b), c) se muestra los resultados de las tensiones para diferentes momentos del proceso de embutición.



Figura 18 a) Momento inicial del proceso de embutición con la distribución de

tensiones en el plano XY.



Figura 18 b) Momento intermedio del proceso de embutición con la distribución de tensiones en el plano XY.



Figura 18 c) Momento final del proceso de embutición con la distribución de tensiones en el plano XY.

Como se observa, en consecuencia con la anisotropía asumida en la chapa, los esfuerzos se distribuyen de una manera no uniforme variando en la dirección del plano XY como se muestra en las figuras. Se pude observar en las figuras anteriores, la zona más cargada en la pieza.

En la figura 19 se muestra el comportamiento del desplazamiento del punzón (en mm) a lo largo del tiempo (en segundos). La pendiente de esa curva, representa la velocidad del punzón.



Figura 19. Desplazamiento del punzón en relación al tiempo

En la figura 20 se representan las variaciones de la fuerza y desplazamiento en el tiempo para el punzón.



Figura 20. Variación de la fuerza en el punzón

Debido al espesor tan delgado de la chapa simulada (s=1 mm), es importante considerar el espesor de ésta a través del proceso, dado que fluye dentro del herramental y se somete a esfuerzos que hacen que varíe el espesor en diferentes puntos de la pieza a lo largo del tiempo como se muestra en la figura 21.



Figura 21. Variaciones en el espesor de la chapa

La mayor variación de espesor de la lámina fue en el punto donde se dobla y desdobla la chapa sobre el radio de la matriz. Esto se debe al flujo del material en sentido radial hacia estas zonas al realizarse el embutido, ver resultados en el Anexo III referentes a la variable de salida STH. En este mismo Anexo aparecen, para el modelo 1, las variables de salida que se consideraron: tensión, fuerza, variación en el espesor, desplazamiento, deformación equivalente.

Estas variaciones en el espesor se pueden representar para cada modelo como aparece en las figuras siguientes, correspondiendo la mayor variación del espesor para el modelo 3.



Figura 22. Variaciones en el espesor del material. Modelo 1



Figura 23. Variaciones en el espesor del material. Modelo 2



Figura 24. Variaciones en el espesor del material. Modelo 3

Para comprobar los resultados del modelo se realizó una corrida adicional con las características en la malla que se muestran a continuación. Obteniendo resultados similares a los aquí descritos, lo cual puede sugerir la poco influencia del tipo de elemento sobre los resultados.

Modelo	Nro. de nodos	Nro. elementos	Tipo de	Orden
			elemento	geométrico
4	2107	3600	CPS3	Lineal
				triangular

## 3.3 Conclusiones parciales del Capítulo III

- 1. Se preparó la simulación y se corrió el modelo 2D de forma adecuada.
- 2. Los resultados obtenidos se corresponden para el modelo y están en correspondencia con lo planteado en la bibliografía.
- 3. Los cambios de espesores obtenidos con la simulación en algunos puntos fueron congruentes con la teoría, hubo adelgazamientos mayores a lo esperado en la teoría (0.9 \* s), por lo que sería importante estudiar con detalles esos puntos, al igual que aquellos donde ocurre un engrosamiento de la chapa ((1.3 ... 1.4) \* s)

## **Conclusiones generales**

- Se modeló en 2D, mediante el uso de un software de mecánica general, el proceso embutición del disco de la armada del retén de la caja velocidad del camión Kmaz, determinando el comportamiento del proceso
- 2. El cálculo analítico de la operación tecnológica se tomó como base para la modelación del proceso de embutición, los valores de los parámetros se corresponden con las recomendaciones de los especialistas. Las fuerzas obtenidas por cálculos teóricos son menores que las obtenidas por paquetería del programa de mecánica general.
- Los resultados obtenidos permiten suponer la confiabilidad del modelo de simulación desarrollado, ya que los resultados coinciden con la literatura consultada, por lo anterior el modelo sirve como base para simular el proceso de embutición cilíndrica y analizar la distribución de espesores y tensiones generados en el modelo 2D.
- 4. Los cambios de espesores obtenidos con la simulación en algunos puntos fueron congruentes con la teoría, hubo adelgazamientos mayores a lo esperado en algunos puntos, por lo que sería importante estudiar el remallado de la lámina.

## Recomendaciones

Continuar profundizando los estudios del modelo de la pieza embutida y pasar a la simulación en 3D valorando los efectos de la anisotropía del material

#### Bibliografía

- [1] J. N. Mistri, *et al.*, "Experimental and Simulation study of Deep drawing process-A review," *International Journal of Advance Engineer ing and Research Development*, vol. 1, pp. 1-12, 2014.
- [2] J. R. Marty-Delgado, *et al.*, "Planeación de procesos de embutición basada en estrategias de información," *Revista Cubana de Ingeniería*, vol. 3, pp. 53-58, 2011.
- [3] R. Febles García, "Simulación del proceso de embutido del cilindro de gas de 10Kg," Tesis Presentada como requisito parcial para la obtención del título de Máster en Ingeniería Asistida por Computadora, Facultad de Ciencias Técnicas, Universidad de Matanzas., Matanzas, 2017.
- [4] A. Purushotham, "Simulation studies on Deep Drawing Process for the Evaluation of Stresses and Strains," *International Journal of Computational Engineering Research*, vol. 03, 2013.
- [5] M. Firat, "A finite element modeling and prediction of stamping formability of a dual-phase steel in cup drawing," *Materials & Design*, vol. 34, pp. 32-39, 2012.
- [6] A. T. Čikmiš, et al., "Finite Element Analysis of Deep Drawing," in 14th International Research/Expert Conference "Trends in the Development of Machinery and Associated Technology" TMT 2010, Mediterranean Cruise, 2010.
- [7] S. Kumar and S. R., "A knowledge-based system for selection of progressive die components," *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, vol. 20, pp. 475-478, 2007.
- [8] S. B. Tor, et al., "Indexing and Retrieval in Metal Stamping Die Design Using Case-based Reasoning," *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, vol. 3, pp. 353-362, 2003.
- [9] M. Kardan, et al., "Experimental and Finite Element Results for Optimization of Punch Force and Thickness Distribution in Deep Drawing Process," Arabian Journal for Science and Engineering and Technologie, pp. 1-14, 2017.

- [10] S. Kashid and S. Kumar, "Applications of Artificial Neural Network to Sheet Metal Work - A Review " American Journal of Intelligent Systems vol. 2, pp. 168-176, 2012.
- [11] O. C. Zienkiewicz, *El método de los elementos finitos*: Reverté, S. A, 1982.
- [12] M. Mallo Gallardo, *Conformación de Materiales*, 1987 ed. vol. I. Ciudad de la Habana: Pueblo y Educación, 1987.
- [13] J. R. Marty-Delgado, et al., "Control de parámetros técnicos en la embutición de chapas mediante el empleo de herramientas de inteligencia artificial," in 70 COBEF - Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Penedo, Itatiaia, RJ, 2013.
- [14] M. Rossi, Estampado en frío de la chapa. Estampas. Matrices. Punzones. Prensas y Máquinas, 9na Edición. Renovada y ampliada ed.: Editorial Dossat, S. A., 1979.
- [15] T. López Navarro, *Troquelado y Estampación con aplicaciones al punzonado, doblado embutición y extrusión*. Barcelona: Gustavo Pili, S.A, 1976.
- [16] Fudación-ASCAMM, Teoría de la embutición: Centre Tecnologic.
- [17] DIN-8582-2003-09, "Manufacturing processes forming under combination of tensile and compressive conditions," in *Part 3: Deep drawing; Classification, subdivision, terms and definitions*, ed. Germany: DIN, 2003.
- [18] Z. Marciniak, et al., Mechanics of Sheet Metal Forming. Oxford, 2002.
- [19] J. R. Marty-Delgado, "Procedimientos metodológicos para determinar las características de formabilidad en las chapas metálicas," Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas, Departamento de Procesos Tecnológicos, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, Santa Clara. Villa Clara. Cuba, 1999.
- [20] M. Emad Hosseini, et al., "Theoretical FLD prediction based on M-K model using Gurson's plastic potential function for steel sheets," Procedia Engineering, vol. 183 pp. 119 - 124, 2017.

- [21] K. Chung, et al., "Forming limit criterion for ductile anisotropic sheets as a material property and its deformation path insensitivity. Part I: Deformation path insensitive formula based on theoretical models," *International Journal of Plasticity*, vol. 58, pp. 3-34, 2014.
- [22] J. R. Marty-Delgado and Y. Bernal-Aguliar, "A review of recent advances in forming limit curve," in Anais, 1a ediçao. 29 SENAFOR. 13<sup>a</sup> Conferencia Internacional de Chapas, Porto Alegre. Brasil, 2009, pp. 229-237.
- [23] L. Schaeffer, *Conformação de Chapas Metálicas*. Porto Alegre. Rio Grande do Sul. Brazil: Imprensa Livre Editora Ldta, 2004.
- [24] J. R. Marty-Delgado, *et al.*, "Método integral para la determinación y valoración de la formabilidad de chapas metálicas," *Centro Azucar*, vol. I, pp. 31-34, 2000.
- [25] DIN-50145, "Testing of metallic materials," ed. Germany: DIN, 1988.
- [26] E. F. Bacallao-Mena, "Determinación de la anisotropía plástica de chapas para procesos de conformación," Tesis presentada en opción al grado académico de Master en Ciencias, Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, Santa Clara. Villa Clara. Cuba, 2013.
- [27] O. Oehler, *Herramientas de troquelar, estampar y embutir*. Barcelona: Gustavo-Gili S. A, 1977.
- [28] S. Kalpakjian and S. R. Schmid, *Manufactura, Ingeniería y tecnología* vol. II. La Habana: Felix-Varela, 2010.
- [29] Steel-Grade, "The Steel Grade Sharing Plataform. Steel Grade ASTM 1020," ed: ASTM. Datasheet, 2019.
- [30] V. Boljanovic, Sheet metal forming processes and die design. Tennessee.Estados Unidos de América: Industrial Press. New York, 2004.
- [31] M. Firat, "Computer aided analysis and design of sheet metal forming processes: Part II – Deformation response modeling," *Materials and Design*, vol. 28, pp. 1304-1310, 2007.

- [32] M. Firat, "Computer aided analysis and design of sheet metal forming processes: Part III: Stamping die-face design " *Materials and Design* vol. 28, pp. 1311-1320, 2007.
- [33] Dassault-Systèmes-Simulia-Corp. (2011). *Abaqus 6.1. ABAQUS/CAE User's Manual*. Available: <u>http://www.simulia.com/locations/locations.html</u>.
- [34] Dassault-Systèmes. (2011). Abaqus 6.11. Abaqus/CAE User's Manual.
- [35] R. Hill, *The Mathematical Theory of Plasticity*: Oxford, Clarendon Press, 1950.
- [36] X. Wang, et al., "Review: state of the art of stamping forging process with sheet metal blank," *Journal of Harbin Institute Technology (New Series)*, vol. 24, 2017.
- [37] M. lordache, et al., "Identification of sheet metal plastic anisotropy, and optimization of initial blank shape in deep drawing " Annals of "Dunărea de Jos" University of Galaţi vol. Fascicle V, Technologies in Machine Building, pp. 149-154, 2011.
- [38] S. Raju, et al., "Influence of variables in deep drawing of AA 6061 sheet " *Trans. Nonferrous Met. Soc. China*, vol. 20, pp. 1856-1862, 2010.
- [39] F. Djavanroodi and A. Derogar, "Experimental and numerical evaluation of forming limit diagram for Ti6Al4V titanium and Al6061-T6 aluminum alloys sheets," *Materials & Design*, vol. 31, pp. 4866-4875, 2010.
- [40] M. Volk and B. Nardin, "Application of Numerical Simulations in the Deep-Drawing Process and the Holding System with Segments' Inserts," *Journal of Mechanical Engineering*, vol. 57, pp. 697-703, 2011.
- [41] M. Reza Foudeh, et al., "Investigating aluminum sheet wrinkling during the deep drawing process," *Transactions of FAMENA*, vol. XXXVII, pp. 43-54, 2013.
- [42] K. Bouchaala, et al., "Prediction of earing in cylindrical deep drawing of aluminum alloys using Finite Element Analysis," in *Proceedings of Academics World International Conference*, Rabat, Morocco, 2018.

- [43] M. Ahmed, "Adaptive finite element simulation of sheet forming process parameters," *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*, vol. 30, pp. 259-265, 2018.
- [44] L. C. Juiña, et al., "Modelado y simulación de la deformación plástica del aluminio ASTM a1200 durante el proceso de conformado mecánico," Enfoque UTE, vol. 10, pp. 128-140, 2019.

## Anexos

## Anexo I

## Tabla Nro.1 Resumen de los criterios mas importantes que aparecen en la literatura sobre modelación por elementosfinitos del proceso de embutición

Autor	Año	Tipo embutición analizada	Resultado	Detalles FEM y modelo del material
Mónica Iordache. Mihaela Teaca Isabelle. Charpentier Marion Martiny. Gérard Ferron [37]	2009	Embutición cilíndrica Material: Interstitial Free (IF) steel aluminum alloy (A 5086 H111)	Comportamiento plástico anisotrópico de chapas combinando resultados del ensayo de tracción y un ensayo biaxial	Abaqus/Explicit
S. Raju G. Ganesan R. Karthikeyan [38]	2010	Embutición cilíndrica Material: AA 6061 Espesor: 0.80 mm	Usando un plan experimental del tipo TAGUCHI se determinó la influencia del radio de la matriz (66.49%) y de la fuerza en el prensachapas (29.16%) y el radio del punzón (9.23	No se tratan
F. Djavanroodi A. Derogar [39]	2010	Embutición cilíndrica. Material: Ti6Al4V titanio Al6061-T6 aluminio	Obtuvieron el FLD experimental y por medio de la simulación para investigar la formabilidad, el modo de fractura y la distribución de las deformaciones en un proceso de hidroforming	ABAQUS/Standard Hill-Swift and NADDRG
M. Volk and B. Nardin M. Volk and B. Nardin [40]	2011	Embutición rectangular Material: DC04. Espesor: 0.7 mm.	Optimización de la fuera en el presensachapas	Pam-Stamp software Hill48 with orthotropic anisotropy Aproximación dinámica- explícita

## Tabla Nro.1 Continuación

Autor	٨ño	Tipo embutición	Resultado	Detalles FEM y modelo
Autor	Allo	analizada	Resultato	del material
M. Fira [5]	2012	Embutición rectangular Embutición cilíndrica. Material: dual-phase steel, DP600 steel Espesor: 1 mm	Calcular el FLC y las condiciones de formabilidad para la formación de arrugas	Ls-Dyna Swift's diffuse necking and Hill's localized necking
A. Purushotham [4]	2013	Embutición cilíndrica. Materiales: steel and copper Espesor: 0.82 mm	Estimar los valores y la distribución de la tensión y deformación, bajo diferentes condiciones de fuerza del prensachapa y coeficiente de fricción.	Abaqus/Standard 4-node reduced-integration axisymmetric quadrilateral, CAX4R
M. Reza Foudeh, S. Daneshmand, and H. Ibrahim Demirci [41]	2013	Embutición: rectangular Materiales: A6111-T4, AA5754-O and Al-1050	Considerar el efecto de diferentes parámetros del proceso (fuerza en el prensachapas) sobre la formación de arrugas	ABAQUS/EXPLICIT the blank elements: S4R type
R. Febles García[3]	2017	Embutición cilíndrica. Material: JIS 3116-255 Espesor: 2,2mm.	Caracterización del proceso de fabricación del cilindro y los parámetros adecuados para su fabricación. También se construyó una curva de comportamiento de la fuerza de embutido, a lo largo del proceso, con sus respectivos límites de confiabilidad.	DEFORM-3D

## Tabla Nro.1 Continuación

			Predecir la formación de arrugas	ABAQUS/EXPLICIT
K Pouchaola E			Verificar la variación en el espesor de	Hill48
R. Douchadia, E.		Embutición cilíndrica.	la chapa en cada material en relación a	anisotropic yield criterion
Chanamah M Eagir	2018	Material: AA1050 and	la anisotropía	Blank which is considered
and M Moziano [42]		AA1100		deformable, was modelled
				using reduced integration
				shell element (S4R
		Embutición: axi-	Refinado de la malla para distintas	
	2018	symmetric sheet forming	condiciones geométricas del proceso	
M. Ahmed [43]		process		No se tratan
		Espesor 1 mm, 2 mm		
		and 3 mm		
L. C. Juiña, V. H.		Material: ASTM A1200	Evaluar el comportamiento de un	
Cabrera, N. V. Moreno,	2019	Aspesor 0.5 mm	material al ser sometido a una	No se tratan
and C. A. Anrango [44]			deformación plástica.	


## \*\*\*\*\*\*

## Field Output Report, written Fri Jun 14 01:06:40 2019

## Source 1

-----

ODB: C:/Temp/Corrida\_1\_malla300\_6.odb Step: unload Frame: Increment 43710: Step Time = 1.000

Loc 1 : Integration point values from source 1

Output sorted by column "Element Label".

Field Output reported at integration points for part: CHAPA-1

Element		MISESMAX	PEEQ	PEEQMAX	S.Mises	STH
Label		F@Loc 1	@Loc 1	@Loc 1	@Loc 1	@Loc 1
			 2 20F 01		2 905 02	
1	1	2.80E-02	2.38E-01	2.38E-01	2.80E-02	1.1844
2	1	8.04E-02	2.74E-01	2.74E-01	8.04E-02	1.24115
3 ⊿	1	6.10E.02	2.09E-01	2.09E-01	3.49E-02	1.25374
4	T	0.19E-02	2.43E-01	2.43E-01	0.19E-02	1.231/3
5	1	3.95E-02	2.21E-01	2.21E-01	3.95E-02	1.21012
6	1	4.93E-02	2.01E-01	2.01E-01	4.93E-02	1.19029
7	1	4.34E-02	1.84E-01	1.84E-01	4.34E-02	1.17259
8	1	4.61E-02	1.67E-01	1.67E-01	4.61E-02	1.15538
9	1	3.51E-02	1.51E-01	1.51E-01	3.51E-02	1.13896
10	1	3.59E-02	1.36E-01	1.36E-01	3.59E-02	1.12472
11	1	3.19E-02	1.22E-01	1.22E-01	3.19E-02	1.10991
12	1	2.53E-02	1.06E-01	1.06E-01	2.53E-02	1.09542
13	1	2.42E-02	9.12E-02	9.12E-02	2.42E-02	1.08147
14	1	1.27E-02	7.78E-02	7.78E-02	1.27E-02	1.06875
15	1	1.08E-02	6.26E-02	6.26E-02	1.08E-02	1.05482
16	1	2.08E-02	4.83E-02	4.83E-02	2.08E-02	1.04163
17	1	2.02E-02	3.41E-02	3.41E-02	2.02E-02	1.02719
18	1	4.26E-02	1.87E-02	1.87E-02	4.26E-02	1.01351
19	1	5.96E-02	8.98E-03	8.98E-03	5.96E-02	1.00334
20	1	6.25E-02	5.70E-03	5.70E-03	6.25E-02	1.00E+00
21	1	4.83E-02	7.65E-03	7.65E-03	4.83E-02	9.98E-01
22	1	6.45E-02	2.05E-02	2.05E-02	6.45E-02	9.94E-01
23	1	7.60E-02	3.77E-02	3.77E-02	7.60E-02	1.002
24	1	1.50E-01	8.44E-02	8.44E-02	1.50E-01	1.03925
25	1	6 82F-02	2 47F-01	2 47F-01	6 82F-02	1 18463
26	1	3 13F-02	3 59F-01	3 59F-01	3 13F-02	1 27604
_0 27	1	4 22F-02	/ 27F_01	/ 27F_01	1 22F-02	1 37/05
28	1	1 89F-02	4 25F-01	4 25F-01	1 89F-02	1 38157
26 27 28	1 1 1	3.13E-02 4.22E-02 1.89E-02	3.59E-01 4.27E-01 4.25E-01	3.59E-01 4.27E-01 4.25E-01	3.13E-02 4.22E-02 1.89E-02	1.27604 1.37495 1.38157

29	1	2.91E-02	2.22E-01	2.22E-01	2.91E-02	1.1623
30	1	3.15E-02	1.96E-01	1.96E-01	3.15E-02	1.1043
31	1	4.45E-02	1.84E-01	1.84E-01	4.45E-02	1.10272
32	1	3.79E-02	1.38E-01	1.38E-01	3.79E-02	1.02307
33	1	5.28E-02	4.43E-02	4.43E-02	5.28E-02	9.90E-01
34	1	4.00E-02	2.35E-02	2.35E-02	4.00E-02	9.90E-01
35	1	4.08E-02	2.28E-02	2.28E-02	4.08E-02	1.00813
36	1	6.27E-02	1.52E-02	1.52E-02	6.27E-02	1.00173
37	1	5.69E-02	2.60E-02	2.60E-02	5.69E-02	1.00918
38	1	8.15E-02	2.22E-02	2.22E-02	8.15E-02	1.01008
39	1	6.53E-02	1.77E-02	1.77E-02	6.53E-02	1.00653
40	1	4.00E-02	1.50E-02	1.50E-02	4.00E-02	1.00554
41	1	1.98E-02	1.04E-02	1.04E-02	1.98E-02	1.00141
42	1	3.30E-02	1.06E-02	1.06E-02	3.30E-02	1.00072
43	1	3.21E-02	9.84E-03	9.84E-03	3.21E-02	1.00E+00
44	1	3.11E-02	9.70E-03	9.70E-03	3.11E-02	1
45	1	1.35E-02	1.00E-02	1.00E-02	1.35E-02	1.00E+00
46	1	1.03E-02	1.00E-02	1.00E-02	1.03E-02	1.00008
47	1	1.20E-02	9.67E-03	9.67E-03	1.20E-02	1.00E+00
48	1	2.46E-02	9.90E-03	9.90E-03	2.46E-02	1.00E+00
49	1	2.73E-02	9.20E-03	9.20E-03	2.73E-02	1.00E+00
50	1	5.05E-02	9.36E-03	9.36E-03	5.05E-02	1.00E+00
51	1	5.50E-02	9.97E-03	9.97E-03	5.50E-02	9.99E-01
52	1	2.54E-02	8.93E-03	8.93E-03	2.54E-02	9.99E-01
53	1	2.79E-02	8.99E-03	8.99E-03	2.79E-02	1.00E+00
54	1	1.20E-02	8.95E-03	8.95E-03	1.20E-02	1.00E+00
55	1	7.03E-03	9.61E-03	9.61E-03	7.03E-03	1.00E+00
56	1	5.18E-03	8.68E-03	8.68E-03	5.18E-03	9.99E-01
57	1	7.94E-03	7.93E-03	7.93E-03	7.94E-03	9.99E-01
58	1	6.99E-03	7.84E-03	7.84E-03	6.99E-03	9.99E-01
59	1	1.11E-02	7.57E-03	7.57E-03	1.11E-02	9.99E-01
60	1	1.68E-02	7.67E-03	7.67E-03	1.68E-02	1.00E+00
61	1	1.15E-02	7.38E-03	7.38E-03	1.15E-02	1.00006
62	1	7.86E-03	6.77E-03	6.77E-03	7.86E-03	1.00E+00
63	1	4.90E-03	6.92E-03	6.92E-03	4.90E-03	1.00015
64	1	8.96E-03	6.72E-03	6.72E-03	8.96E-03	1.00E+00
65	1	6.24E-03	7.04E-03	7.04E-03	6.24E-03	1.00E+00
66	1	3.61E-03	7.49E-03	7.49E-03	3.61E-03	1.00E+00
67	1	1.53E-02	6.83E-03	6.83E-03	1.53E-02	1.00E+00
68	1	1.05E-02	6.80E-03	6.80E-03	1.05E-02	1.00E+00
69	1	2.27E-02	8.20E-03	8.20E-03	2.27E-02	1.00E+00
70	1	3.37E-02	7.88E-03	7.88E-03	3.37E-02	1.00E+00
71	1	3.09E-02	5.87E-03	5.87E-03	3.09E-02	1.00017
72	1	2.45E-02	6.55E-03	6.55E-03	2.45E-02	1.00201
73	1	1.91E-02	8.98E-03	8.98E-03	1.91E-02	1.00423
74	1	2.40E-02	9.79E-03	9.79E-03	2.40E-02	1.00524
75	1	4.02E-02	1.09E-02	1.09E-02	4.02E-02	1.0057

76	1	3.00E-02	1.13E-02	1.13E-02	3.00E-02	1.00607
77	1	1.27E-02	1.19E-02	1.19E-02	1.27E-02	1.00719
78	1	6.23E-03	1.32E-02	1.32E-02	6.23E-03	1.00761
79	1	7.93E-03	1.32E-02	1.32E-02	7.93E-03	1.00653
80	1	1.11E-02	1.19E-02	1.19E-02	1.11E-02	1.00563
81	1	2.45E-02	1.05E-02	1.05E-02	2.45E-02	1.00431
82	1	3.94E-02	8.34E-03	8.34E-03	3.94E-02	1.00348
83	1	5.10E-02	6.28E-03	6.28E-03	5.10E-02	1.00205
84	1	2.84E-02	4.95E-03	4.95E-03	2.84E-02	1.0013
85	1	4.47E-02	5.37E-03	5.37E-03	4.47E-02	1.00058
86	1	4.57E-02	5.37E-03	5.37E-03	4.57E-02	1.00055
87	1	3.64E-02	4.31E-03	4.31E-03	3.64E-02	1.00043
88	1	1.69E-02	3.71E-03	3.71E-03	1.69E-02	1.00054
89	1	1.23E-02	3.71E-03	3.71E-03	1.23E-02	1.00007
90	1	1.34E-02	4.66E-03	4.66E-03	1.34E-02	1.00E+00
91	1	2.92E-02	5.72E-03	5.72E-03	2.92E-02	1.00E+00
92	1	3.09E-02	5.97E-03	5.97E-03	3.09E-02	1.00004
93	1	2.40E-02	6.99E-03	6.99E-03	2.40E-02	1.00E+00
94	1	6.76E-03	5.53E-03	5.53E-03	6.76E-03	1.00E+00
95	1	7.73E-03	5.39E-03	5.39E-03	7.73E-03	1.00028
96	1	9.40E-03	4.95E-03	4.95E-03	9.40E-03	1.00071
97	1	1.74E-02	5.69E-03	5.69E-03	1.74E-02	1.00075
98	1	1.62E-02	5.41E-03	5.41E-03	1.62E-02	1.00E+00
99	1	1.55E-02	4.47E-03	4.47E-03	1.55E-02	1.00E+00
100	1	1.95E-02	3.85E-03	3.85E-03	1.95E-02	1
101	1	3.86E-02	4.42E-03	4.42E-03	3.86E-02	1.00064
102	1	2.72E-02	4.60E-03	4.60E-03	2.72E-02	1.00E+00
103	1	9.45E-03	4.59E-03	4.59E-03	9.45E-03	1.00016
104	1	1.01E-02	4.13E-03	4.13E-03	1.01E-02	1.00025
105	1	1.64E-02	4.64E-03	4.64E-03	1.64E-02	1.00022
106	1	2.11E-02	5.44E-03	5.44E-03	2.11E-02	1.00026
107	1	3.25E-02	5.72E-03	5.72E-03	3.25E-02	1.00007
108	1	3.22E-02	3.15E-03	3.15E-03	3.22E-02	1.0001
109	1	3.65E-02	3.11E-03	3.11E-03	3.65E-02	1.00E+00
110	1	1.42E-02	3.83E-03	3.83E-03	1.42E-02	1.00022
111	1	1.05E-02	4.90E-03	4.90E-03	1.05E-02	1.00068
112	1	1.41E-02	4.82E-03	4.82E-03	1.41E-02	1.00082
113	1	1.50E-02	4.12E-03	4.12E-03	1.50E-02	1.00063
114	1	2.10E-02	4.26E-03	4.26E-03	2.10E-02	1.00075
115	1	2.69E-02	3.95E-03	3.95E-03	2.69E-02	1.00109
116	1	1.49E-02	4.14E-03	4.14E-03	1.49E-02	1.00161
117	1	2.54E-02	4.25E-03	4.25E-03	2.54E-02	1.00197
118	1	3.43E-02	5.46E-03	5.46E-03	3.43E-02	1.00227
119	1	3.06E-02	6.19E-03	6.19E-03	3.06E-02	1.00302
120	1	9.82E-03	6.08E-03	6.08E-03	9.82E-03	1.00355
121	1	1.02E-02	6.80E-03	6.80E-03	1.02E-02	1.00359
122	1	1.25E-02	7.51E-03	7.51E-03	1.25E-02	1.00352

123	1	1.40E-02	7.81E-03	7.81E-03	1.40E-02	1.00443
124	1	1.96E-02	8.17E-03	8.17E-03	1.96E-02	1.00492
125	1	2.54E-02	7.18E-03	7.18E-03	2.54E-02	1.00397
126	1	1.61E-02	8.38E-03	8.38E-03	1.61E-02	1.00506
127	1	1.19E-02	8.14E-03	8.14E-03	1.19E-02	1.00504
128	1	1.34E-02	8.59E-03	8.59E-03	1.34E-02	1.00545
129	1	2.74E-02	8.03E-03	8.03E-03	2.74E-02	1.00566
130	1	2.75E-02	7.86E-03	7.86E-03	2.75E-02	1.00584
131	1	1.67E-02	8.42E-03	8.42E-03	1.67E-02	1.00566
132	1	5.01E-03	9.16E-03	9.16E-03	5.01E-03	1.00546
133	1	1.04E-02	8.69E-03	8.69E-03	1.04E-02	1.00458
134	1	1.58E-02	8.14E-03	8.14E-03	1.58E-02	1.00402
135	1	2.01E-02	6.87E-03	6.87E-03	2.01E-02	1.00304
136	1	2.94E-02	7.10E-03	7.10E-03	2.94E-02	1.00302
137	1	2.09E-02	5.33E-03	5.33E-03	2.09E-02	1.00227
138	1	9.42E-03	4.68E-03	4.68E-03	9.42E-03	1.00158
139	1	1.68E-02	5.64E-03	5.64E-03	1.68E-02	1.00174
140	1	1.82E-02	5.01E-03	5.01E-03	1.82E-02	1.00162
141	1	1.12E-02	4.80E-03	4.80E-03	1.12E-02	1.00217
142	1	1.32E-02	5.40E-03	5.40E-03	1.32E-02	1.00278
143	1	7.21E-03	7.89E-03	7.89E-03	7.21E-03	1.0042
144	1	1.31E-02	8.53E-03	8.53E-03	1.31E-02	1.00542
145	1	2.96E-02	9.76E-03	9.76E-03	2.96E-02	1.00633
146	1	2.53E-02	9.09E-03	9.09E-03	2.53E-02	1.00673
147	1	1.77E-02	8.22E-03	8.22E-03	1.77E-02	1.0061
148	1	3.67E-02	1.08E-02	1.08E-02	3.67E-02	1.00745
149	1	4.80E-02	1.00E-02	1.00E-02	4.80E-02	1.00694
150	1	2.47E-02	9.54E-03	9.54E-03	2.47E-02	1.00629
151	1	2.85E-02	1.11E-02	1.11E-02	2.85E-02	1.00717
152	1	2.86E-02	1.09E-02	1.09E-02	2.86E-02	1.00753
153	1	3.69E-02	1.19E-02	1.19E-02	3.69E-02	1.00799
154	1	3.69E-02	1.06E-02	1.06E-02	3.69E-02	1.00718
155	1	2.13E-02	8.82E-03	8.82E-03	2.13E-02	1.00631
156	1	5.33E-03	9.30E-03	9.30E-03	5.33E-03	1.00586
157	1	7.28E-03	8.89E-03	8.89E-03	7.28E-03	1.00558
158	1	9.35E-03	7.38E-03	7.38E-03	9.35E-03	1.00489
159	1	9.72E-03	5.36E-03	5.36E-03	9.72E-03	1.00365
160	1	3.82E-03	5.07E-03	5.07E-03	3.82E-03	1.00218
161	1	1.68E-02	5.50E-03	5.50E-03	1.68E-02	1.00191
162	1	1.99E-02	4.97E-03	4.97E-03	1.99E-02	1.00188
163	1	1.96E-02	5.78E-03	5.78E-03	1.96E-02	1.00205
164	1	1.26E-02	5.34E-03	5.34E-03	1.26E-02	1.00178
165	1	4.23E-03	4.93E-03	4.93E-03	4.23E-03	1.00256
166	1	1.25E-02	6.49E-03	6.49E-03	1.25E-02	1.00327
167	1	2.06E-02	7.44E-03	7.44E-03	2.06E-02	1.00455
168	1	2.10E-02	8.78E-03	8.78E-03	2.10E-02	1.00528
169	1	2.50E-02	8.48E-03	8.48E-03	2.50E-02	1.00557

_CF:Magnitu		_UT:Magnitu		
de PI: PUNZ		de PI: PUNZ		
X ON-1 N: 1	Х	ON-1 N: 1		
0, 0,	0	0		
50,E-03 27,1E-03	5.00E-02	1.39E-02		
100,E-03 200,E-03	1.00E-01	1.03E-01		
150,E-03 623,E-03	1.50E-01	3.20E-01		
200,E-03 1,36	2.00E-01	6.95E-01		
250,E-03 2,42	2.50E-01	1.24		
300,E-03 3,82	3.00E-01	1.96		
350,E-03 5,50	3.50E-01	2.82		
400,E-03 7,43	4.00E-01	3.81		
450,E-03 9,52	4.50E-01	4.88		
500,E-03 11,7	5.00E-01	6		
550,E-03 13,9	5.50E-01	7.12		
600,E-03 16,0	6.00E-01	8.19		
650,E-03 17,9	6.50E-01	9.18		
700,E-03 19,6	7.00E-01	10		
750,E-03 21,0	7.50E-01	10.8		
800,E-03 22,0	8.00E-01	11.3		
850,E-03 22,8	8.50E-01	11.7		
900,E-03 23,2	9.00E-01	11.9		
950,E-03 23,4	9.50E-01	12		
1, 23,4	1	12		
1, 0,	1	12		
1,05 27,1E-03	1.05	12		
1,1 200,E-03	1.1	11.9		
1,15 623,E-03	1.15	11.7		
1,20 1,36	1.2	11.4		
1,25 2,42	1.25	11		
1,30 3,82	1.3	10.4		
1,35 5,50	1.35	9.65		
1,40 7,43	1.4	8.83		
1,45 9,52	1.45	7.93		
1,5 11,7	1.5	7		
1,55 13,9	1.55	6.07		
1,60 16,0	1.6	5.18		
1,65 17,9	1.65	4.35		
1,7 19,6	1.7	3.63		
1,75 21,0	1.75	3.04		
1,80 22,0	1.8	2.58		
1,85 22,8	1.85	2.27		
1,9 23,2	1.9	2.09		
1,95 23,4	1.95	2.02		
2, 23,4	2	2		