

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
SEDE QUITO**

**CARRERA  
INGENIERÍA MECÁNICA**

**Trabajo de Titulación previo a la obtención del Título de  
INGENIEROS MECÁNICOS**

**TEMA**

**ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO EN  
EL PROCESO DE EMBUTIDO PARA UNA LÁMINA DE ALUMINIO ASTM  
A 1200 DE ESPESOR DE 0,5 MM.**

**AUTORES**

**DIEGO RICARDO SANDOVAL FIGUEROA  
KLÉVER OMAR CAIZA HIDALGO**

**TUTOR**

**LUIS CHRISTIAN JUIÑA QUILACHAMÍN**

**Quito, febrero del 2017**


### Cesión de derechos de autor

Nosotros, Klever Omar Caiza Hidalgo con documento de identificación N° 1724356447 y Diego Ricardo Sandoval Figueroa con documento de identificación N° 1721876223, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Trabajo de Titulación: “ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO EN EL PROCESO DE EMBUTIDO PARA UNA LÁMINA DE ALUMINIO ASTM A 1200 DE ESPESOR DE 0,5 MM”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el Título de Ingenieros Mecánicos, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



.....  
Diego Ricardo Sandoval Figueroa  
C.I.: 1721876223




.....  
Klever Omar Caiza Hidalgo  
C.I.: 1724356447

Quito, febrero del 2017.

### **Declaratoria de coautoría del docente tutor**

Yo, declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Trabajo de Titulación: “ANÁLISIS Y SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO EN EL PROCESO DE EMBUTIDO PARA UNA LÁMINA DE ALUMINIO ASTM A 1200 DE ESPESOR DE 0,5 MM”, realizado por Klever Omar Caiza Hidalgo y Diego Ricardo Sandoval Figueroa, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerada como Trabajo Final de Titulación.

Quito, febrero del 2017.



.....

Luis Christian Juiña Quilachamín  
C.I.: 1713704508

## **Dedicatoria**

A mis padres, a mi hermano y a mis hermanas, porque ellos estuvieron a mi lado brindándome su apoyo en todo momento, y , sobre todo, por sus consejos para ser una mejor persona.

A todos mis amigos que me apoyaron durante mi carrera universitaria.

Klever Omar Caiza Hidalgo

A mi familia que ha sido el motor de mis éxitos.

Diego Ricardo Sandoval Figueroa

## **Agradecimiento**

Al director del proyecto Ing. Luis Juiña, quien con su predisposición nos asesoró, sus conocimientos, su manera de trabajar, su esfuerzo y dedicación fueron fundamentales para nosotros.

Klever Omar Caiza Hidalgo

De manera especial a nuestro tutor de Tesis Ing. Luis Juiña por su valiosa ayuda en el desarrollo del presente trabajo.

Diego Ricardo Sandoval Figueroa

## Índice

Introducción .....	15
CAPÍTULO 1 .....	16
MARCO TEÓRICO .....	16
1.1. Embutición .....	16
1.2. Proceso de embutición.....	17
1.2.1. Descripción del proceso de embutición .....	18
1.2.2. Herramientas empleadas para el proceso de embutición .....	20
1.2.2.1. El punzón: .....	20
1.2.2.2. Placa matriz: .....	21
1.2.2.3. Pisador o prensachapas: .....	21
1.2.3. Tipos de procesos para la embutición .....	22
1.2.3.1. Embutición de simple efecto.....	22
1.2.3.2. Embutición de doble efecto .....	22
1.2.3.3. Embutición de triple efecto.....	23
1.2.4. Embutición profunda.....	24
1.3. Materiales para usar en el proceso de embutición.....	24
1.4. Defectos de la embutición .....	25
1.5. Determinación de tamaño de disco en forma original.....	26
1.6. Fuerza de embutición .....	28
1.6.1. Método 1 .....	29
1.6.2. Método 2 .....	29
1.6.3. Método 3 .....	29
1.6.4. Método 4 .....	31
1.7. Fuerza en el prensachapas .....	32
1.7.1. Método 1 .....	32
1.7.2. Método 2 .....	32
1.7.3. Método 3 .....	33
1.7.4. Método 4 .....	34
1.8. Velocidad de embutición.....	35
1.9. Lubricación en la embutición .....	36
CAPÍTULO 2 .....	37
EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS .....	37
2.1. Sistemas discretos.....	37
2.2. Elementos finitos (MEF) .....	37

2.3.	Formulación básica matricial de un elemento .....	39
2.3.1.	Fuerzas .....	40
2.3.2.	Desplazamientos .....	40
2.3.3.	Tensiones en función de los desplazamientos relación característica..	40
2.3.4.	Tensiones .....	41
2.4.	Formulación directa de las características de un elemento finito tipo placa	42
2.4.1.	Desplazamientos para un sistema tipo placa .....	43
2.4.2.	Teoría de la elasticidad.....	45
2.4.3.	Deformaciones .....	45
2.4.4.	Tensiones .....	46
CAPÍTULO 3 .....		48
INTRODUCCIÓN AL ANSYS MECHANICAL MÓDULO APDL .....		48
3.1.	Desarrollo de un ejercicio en ANSYS módulo APDL tipo “Shell” .....	48
3.1.1.	Descripción del problema .....	48
3.1.2.	Desarrollo del ejercicio planteado.....	49
CAPÍTULO 4 .....		62
PROCESO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DE LA EMBUTICIÓN		62
4.1.	Ensayos de tracción en probetas.....	62
4.2.	Forma y dimensionamiento de la pieza a obtener .....	62
4.2.1.	Cálculo del diámetro inicial del material para los ensayos de embutición .....	63
4.3.	Cálculo de fuerza de embutición .....	64
4.3.1.	Método 1 .....	64
4.3.2.	Método 2 .....	64
4.3.3.	Método 3 .....	65
4.3.4.	Método 4 .....	66
4.4.	Cálculo de fuerza para prensachapas.....	67
4.4.1.	Método 1 .....	67
4.4.2.	Método 2 .....	67
4.4.3.	Método 3 .....	68
4.4.4.	Método 4 .....	69
4.5.	Simulación del comportamiento de la embutición en ANSYS módulo APDL	70
4.5.1.	Simulación .....	70
4.5.2.	Tipo de elemento.....	71

4.5.3.	Constantes reales .....	73
4.5.4.	Geometría de la simulación.....	74
4.5.4.1.	Propiedades del material .....	75
4.5.5.	Mallado .....	77
4.5.5.1.	Propiedades del mallado .....	78
4.5.6.	Partes, contactos y parámetros de carga.....	79
4.5.6.1.	Partes.....	79
4.5.6.2.	Contactos .....	79
4.5.6.3.	Parámetros de carga .....	80
4.5.7.	Opciones de solución .....	81
4.5.8.	Tiempo de solución .....	82
4.5.9.	Análisis de espesores.....	82
4.5.10.	Simulación final .....	84
CAPÍTULO 5 .....		85
RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS OBTENIDOS .....		85
5.1.	Resultados .....	85
5.1.1.	Resultados de pruebas del laboratorio S.A.V. ....	85
5.1.2.	Resultados de espesores de láminas embutidas .....	85
5.1.3.	Resultados de esfuerzos máximos en las láminas embutidas.....	87
5.1.4.	Resultado de las fuerzas del punzón y prensachapas .....	89
5.1.5.	Cálculos de errores .....	90
5.1.5.1.	Cálculo de error absoluto de espesores.....	90
5.1.5.2.	Cálculo de error absoluto de esfuerzos máximos .....	91
5.1.5.3.	Cálculo de error absoluto de fuerzas del punzón y prensachapas.	91
CONCLUSIONES .....		92
RECOMENDACIONES .....		93
BIBLIOGRAFÍA .....		94
ANEXOS .....		96

## Índice de Tablas

Tabla 1. Tabla de cálculo de diámetro inicial de piezas cilíndricas.....	28
Tabla 2. Velocidades de embutición. ....	35
Tabla 3. Lubricantes a usar en la embutición en frío, en relación al material a deformar. ....	36
Tabla 4. Datos principales para el cálculo de fuerzas de embutición. ....	64
Tabla 5. Datos principales para el cálculo de fuerzas en el prensachapas. ....	67
Tabla 6. Tabla de fuerzas para el punzón y prensapachas .....	70
Tabla 7. Tabla de Profundidad de embutición de 15 mm. ....	85
Tabla 8. Tabla de Profundidad de embutición de 20 mm. ....	86
Tabla 9. Tabla de Profundidad de embutición de 25 mm. ....	86
Tabla 10. Tabla de comparación de esfuerzo máximo a 15 mm.....	87
Tabla 11. Tabla de comparación de esfuerzo máximo a 20 mm.....	88
Tabla 12. Tabla de comparación de esfuerzo máximo a 25 mm.....	89
Tabla 13. Tabla de valores de fuerza de embutición para el punzón. ....	90
Tabla 14. Tabla de valores de fuerza para el prensachapas. ....	90

## Índice de figuras

Figura 1. Embutición en forma de copa. ....	16
Figura 2. Representación de fuerzas que se producen en el proceso de embutición. ....	17
Figura 3. Fases de la deformación del material en el proceso de embutido.....	19
Figura 4. Esquema de embutición de simple efecto.....	22
Figura 5. Esquema de embutición de doble efecto. ....	22
Figura 6. Etapas de la embutición de doble efecto con expulsor. ....	23
Figura 7. Etapas de la embutición de triple efecto. ....	24
Figura 8. Defectos comunes en las partes de piezas embutidas. ....	25
Figura 9. Desarrollo de un recipiente cilíndrico.....	27
Figura 10. Diagrama de fuerzas de embutición según Siebel y Oehler. ....	30
Figura 11. Diagrama para determinar la fuerza de embutir en kgf. ....	31
Figura 12. Diagrama de la fuerza necesaria del prensachapas. ....	33
Figura 13. Diagrama para la determinación de presión del pisador.....	34
Figura 14. Ejemplos de sistemas divididos en elementos finitos.....	38
Figura 15. Estructura típica formada por elementos interconectados. ....	39
Figura 16. Región sometida a tensión plana dividida en elementos finitos. ....	43
Figura 17. Analogía con una placa plana. ....	43
Figura 18. Teoría de la elasticidad. ....	45
Figura 19. Descripción del problema con datos del material.....	48
Figura 20. Aplicación de una fuerza puntual sobre el material a utilizar. ....	48
Figura 21. Ingreso al programa Mechanical APDL 16.2. ....	49
Figura 22. Sistema de unidades en el software. ....	49
Figura 23. El preprocesador. ....	50
Figura 24. Tipo de problema físico. ....	51
Figura 25. Propiedades mecánicas del material. ....	52
Figura 26. Definición de capas para el material.....	53
Figura 27. Ploteo de capas orientas del ejercicio. ....	54
Figura 28. Ploteo de secciones orientas. ....	54
Figura 29. Puntos de figura en el plano cartesiano. ....	55
Figura 30. Definición del contorno por líneas. ....	56
Figura 31. Definición del área total del material.....	56
Figura 32. Mallado o meshing de la figura a resolver. ....	57

Figura 33. Definición de Restricciones en la figura.....	58
Figura 34. Definición de fuerza puntual constante de 100 kgf en el centro.....	59
Figura 35. Solución del problema propuesto. ....	60
Figura 36. Cuadro dinámico para la deformación visual. ....	60
Figura 37. Visualización de deformación de una prueba. ....	61
Figura 38. Forma de probeta para ensayos de tracción.....	62
Figura 39. Dimensiones de la forma final de la embutición. ....	63
Figura 40. Cálculo de fuerza de embutición según Siebel y Oehler. ....	65
Figura 41. Cálculo para determinar la fuerza de embutir en kgf. ....	66
Figura 42. Cálculo de fuerza del prensachapas en kgf.....	68
Figura 43. Cálculo de presión del pisador.....	69
Figura 44. Diagrama de flujo del proceso de simulación.....	71
Figura 45. Definición del tipo de elemento.....	72
Figura 46. Sistema de unidades a utilizar.....	72
Figura 47. Constantes reales a utilizar, en este caso constante dos para herramientas. .....	73
Figura 48. Vistas de piezas a utilizar para la simulación en el software.....	74
Figura 49. Definición de propiedades para el punzón, prensachapas y matriz. ....	75
Figura 50. Definición de las propiedades de la lámina de aluminio. ....	76
Figura 51. Grafica Esfuerzo vs Deformación del aluminio ASTM A1200 de espesor 0,5 mm. ....	77
Figura 52. Propiedades de mallado de placa y de herramientas. ....	78
Figura 53. Mallado de todas las piezas de la simulación. ....	78
Figura 54. Ventana de creación de partes, lista de partes con sus propiedades. ....	79
Figura 55. Ventana para la definición de parámetros de contactos entre piezas.....	80
Figura 56. Ventana para la definición de parámetros físicos. ....	81
Figura 57. Primer método para el análisis del espesor de la lámina de aluminio. ....	82
Figura 58. Segundo método para el análisis del espesor de la lámina de aluminio. ...	83
Figura 59. Proceso de simulación de la embutición en una lámina de aluminio. ....	84

## **Índice de Anexos**

ANEXO 1: Norma de ensayos de tracción

ANEXO 2: Probetas para ensayo de tracción

ANEXO 3: Resultado de ensayos de tracción

ANEXO 4: Tabla de resultados del ensayo esfuerzo-deformación, media aritmética entre las 5 probetas

ANEXO 5: Curva esfuerzo- deformación realizado en matlab

ANEXO 6: Ecuación polinómica de grado 5 aproximada del diagrama esfuerzo-deformación

ANEXO 7: Tabla de módulo de young de las 5 probetas

ANEXO 8: Tabla de los valores de espesores de láminas embutidas

ANEXO 9: Datos técnicos de la prensa hidráulica para el conformado de chapas metálicas

ANEXO 10: Láminas embutidas a diferente profundidad

## Resumen

El presente proyecto trata de predecir el comportamiento de una lámina de aluminio de 0,5 mm de espesor en un proceso de embutición en Ansys (software especializado) para luego contrastar los resultados con pruebas reales.

Para comenzar se describe el método de los elementos finitos, herramienta principal de Ansys para resolver problemas. Posteriormente, se hace referencia a la teoría de embutición, donde se aclara el proceso físico; además, se desglosan los diferentes métodos para el cálculo de fuerzas y desplazamientos de las diferentes herramientas que conforman el proceso de embutición. En el siguiente apartado se resuelve un ejercicio básico en Ansys de una lámina con carga puntual para familiarizarse con las diferentes opciones del software y ver el proceso necesario para más adelante simular la lámina de aluminio. Una vez que se ha avanzado a este punto se harán ensayos de tracción para obtener características del material, los cuales serán de suma importancia para realizar los cálculos teóricos y la consiguiente simulación. Finalmente, se obtendrán resultados fruto de la comparación entre los ensayos reales y la simulación en Ansys. Características importantes como espesores, esfuerzos y fuerzas serán analizadas oportunamente.

**Palabras claves:** análisis, simulación, comportamiento mecánico, proceso, embutido, lámina de aluminio

## **Abstract**

The present project tries to predict the behavior of a sheet of aluminum of 0.5 mm of thickness in a process of stamping in Ansys (specialized software) and then to contrast the results with real tests.

To begin, we describe the finite element method, Ansys's main tool for solving problems. Subsequently, refers to the theory of stamping, which clarifies the physical process. Also the different methods for the calculation of forces and displacements of the different tools that make up the stamping process are broken down. In the next section, a basic Ansys exercise is solved with a punctual loaded sheet for familiarize with the different options of the software and see the process necessary to later simulate the aluminum sheet. Once advanced at this point, tensile tests will be done to obtain characteristics of the material, which will be of utmost importance to perform the theoretical calculations and the resulting simulation. Finally, results will be obtained from the comparison between the actual tests and the simulation in Ansys, important characteristics as thicknesses, stresses and forces will be analyzed.

**Keywords:** analysis, simulation, mechanical behavior, process, stamping, aluminum foil.

## **Introducción**

La necesidad de un software que permita predecir procesos físicos a nivel industrial, facilitándose el ahorro de material y tiempo, permite abrir el campo para una investigación sobre los beneficios de Ansys como alternativa de solución a este problema.

En el país la correlación entre software y proceso físico es todavía exclusivo a empresas grandes, por sus mayores posibilidades de inversión en innovación de procesos. El objetivo de este trabajo es demostrar la viabilidad y el ahorro para las PYMES al utilizar softwares en el mejoramiento de sus procesos.

Permitirá al lector comprender los diferentes parámetros físicos, tales como esfuerzo de fluencia, módulo de tangencia, módulo de elasticidad, que necesita un software, en este caso Ansys, para simular un proceso de embutición y así predecir fallas de diseño en las herramientas de embutición y mejorarlos siguiendo parámetros técnicos y no empíricos.

Se pretende observar la efectividad y aplicabilidad de las fórmulas y métodos de fuerzas y desplazamientos recomendados por los referentes bibliográficos y netgráficos citados.

Finalmente, se busca fomentar la investigación, romper paradigmas y tecnificar los procesos de la industria.

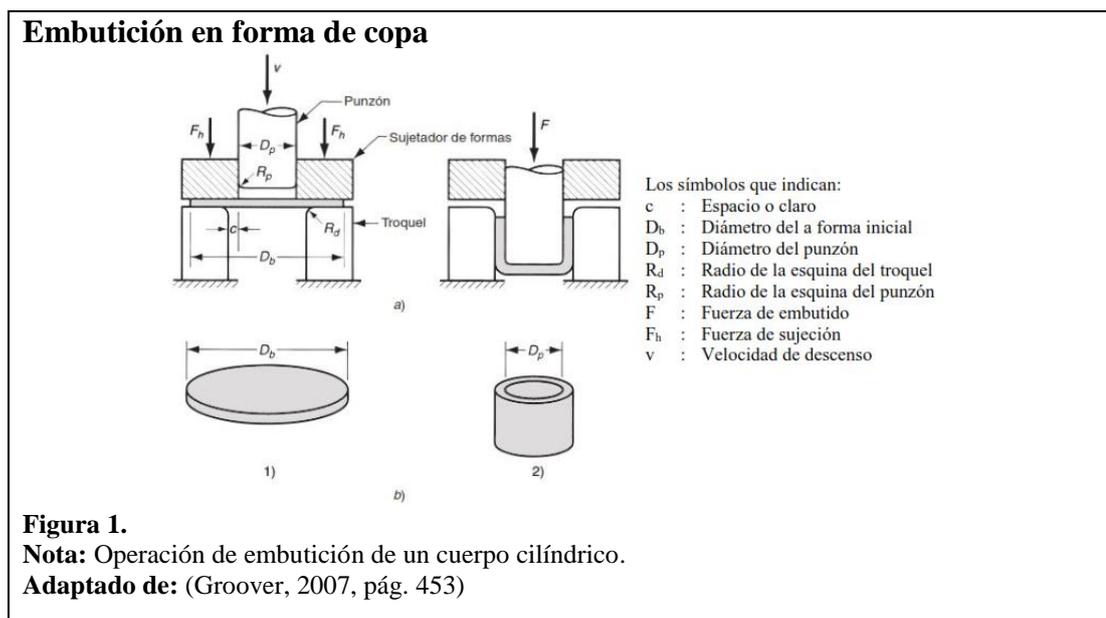
# CAPÍTULO 1

## MARCO TEÓRICO

### 1.1.Embutición

El termino embutidora no es perfectamente explicito; deriva del verbo embutir, que significa rellenar de una cierta substancia en recipiente cerrado; delimitado por paredes flojas, para hincharlo y modificar su configuración (como los colchones). Sin embargo, en el caso de la chapa no se verifica exactamente un rellamamiento con otra substancia; la chapa plana en origen, solamente se hincha con el fin de obtener un objeto de forma hueca, como, por ejemplo, un cubilete, una vasija, una copa, etc. Se puede emplear el término embutido para indicar la operación mediante la cual se somete a una chapa bajo la forma de un cuerpo hueco (Rossi, 1979, pág. 66)

La embutición es el proceso de moldeo de láminas metálicas en frío o en temperatura ambiente; también se puede desarrollar en caliente donde se efectúa una sola operación creando piezas con forma de copa o piezas con formas huecas más complejas a través de la deformación plástica de un material.



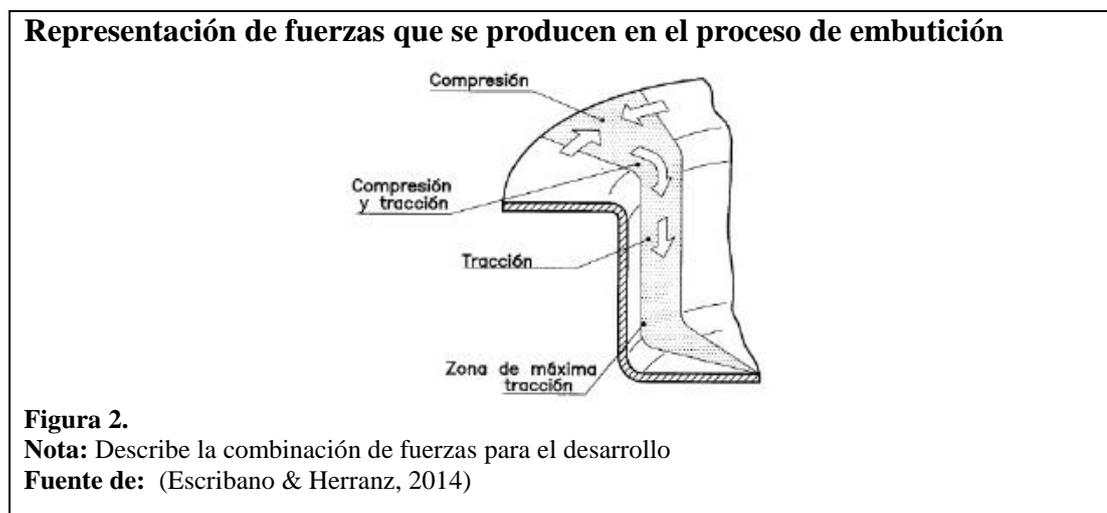
Este proceso es relativamente rápido con la ayuda de determinadas máquinas como una prensa hidráulica y de varias herramientas auxiliares como son las matrices, punzones, prensachapas o dados.

Este tipo de manufacturados se emplean en considerables sectores industriales como son en la construcción de partes de automóviles, en la fabricación de objetos de uso cotidiano.

Normalmente, se realiza esta deformación con materiales a temperatura ambiente porque facilita excelentes durezas y resistencias mecánicas con mejores acabados y con una precisión dimensional. Todo este proceso de embutición se realiza regularmente con espesores bajos, es decir menores a 15 milímetros por su facilidad para el desarrollo de la embutición.

## 1.2. Proceso de embutición

El proceso de embutición implica la deformación de una lámina o chapa metálica utilizando la combinación de fuerzas de tracción y compresión conservando el espesor de su pared constante.



Dado que en el transcurso de la embutición puede ocasionarse arrugas en las chapas metálicas se debe utilizar un pisón o sujetador de chapas para evitar las rugosidades aplicando fuerzas de compresión normales, las cuales no deben excederse porque se provoca el estiramiento de la chapa o lámina.

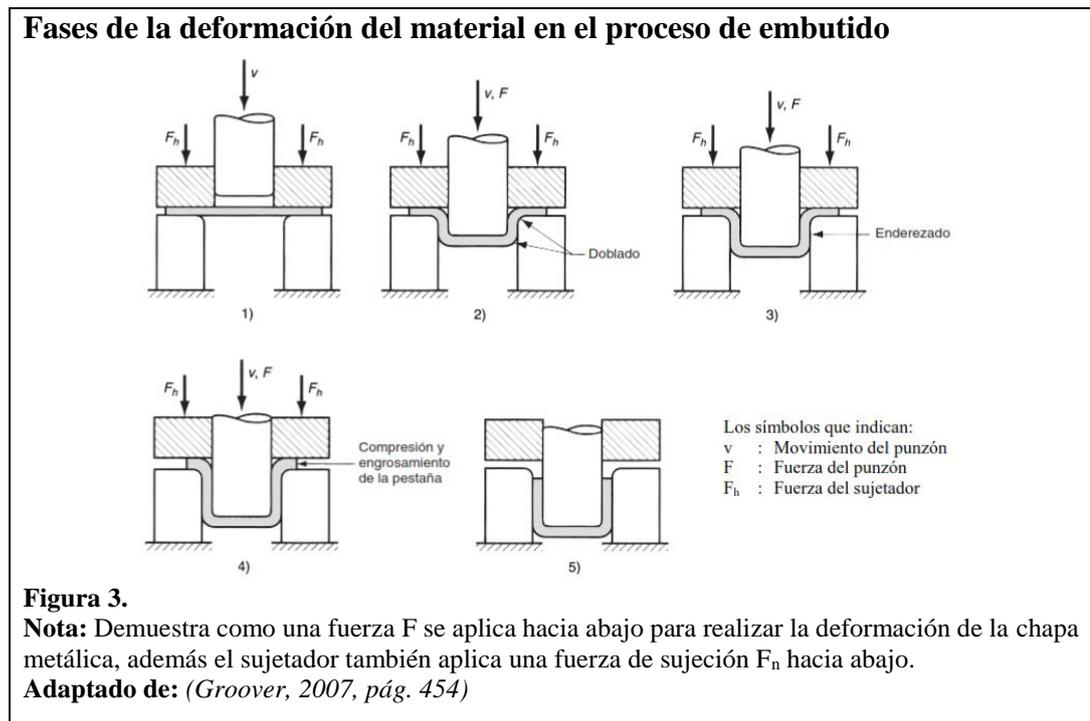
Para el proceso de embutición, se deben determinar varios factores como:

- a) La geometría de las herramientas: Deben tener la forma adecuada para poder distribuir las fuerzas de tensión acorde a la forma deseada. Un mal diseño puede ocasionar fisuras en la pieza final.
- b) Las características del material: Las propiedades mecánicas del material deben ser las idóneas para su selección.
- c) El comportamiento a la fricción: Se debe considerar una buena lubricación para lograr un buen funcionamiento de herramientas y una deformación homogénea del material. El uso de materiales con buenos acabados garantiza piezas con buenos terminados.
- d) La relación entre fuerza y máquina-herramienta: Se debe calibrar la fuerza que se aplica en la máquina, en las matrices de diseño y de la pieza final, cuando se excede en la medición de fuerza, ocasionan los defectos en las piezas finales.

### **1.2.1. Descripción del proceso de embutición**

La embutición es una operación que transforma una chapa metálica plana en una forma o cuerpo de revolución. Se debe tratar de no modificar el espesor de la lámina en el proceso, además permite la obtención de diferentes piezas que son empleadas en todos los campos de la industria. Para realizar este proceso se utiliza el punzón, la matriz y el pisador que se detallarán más adelante.

La fricción se debe tener en cuenta porque el material se deslizará entre el punzón y el dado o matriz, ya que esto comprime las cargas para el desarrollo del proceso. Como se describió en la sección de embutición, esta operación desarrolla piezas de forma de copa o de un vaso cilíndrico, partiendo de un disco plano de un diámetro específico. La acción del proceso mecánico la realiza el punzón sobre la matriz con la ayuda del pisador para que no exista el pandeo del disco o lámina.



Las etapas de la deformación del material a utilizar en el proceso del embutido profundo son:

1. El punzón entra en contacto con la placa
2. Comienza el doblado del material
3. El proceso de enderezado
4. Se muestra la fricción y la compresión
5. Final del proceso toma la forma de copa

En el transcurso de la deformación, el punzón se desplaza hacia abajo con una determinada fuerza y velocidad, mientras que el sujetador o prensachapas aplica una fuerza para sostener el material, para que no se produzcan arrugas al momento del conformado. La lámina que se deforma experimenta una desproporción gradual durante todas las etapas hasta que toma la forma de punzón y del dado o la matriz. El número determinado de etapas de deformación para la operación se relaciona con varios factores como son:

- a) el espesor de la chapa y el tipo de material
- b) la forma de la pieza final y la profundidad que se necesita
- c) las dimensiones de la pieza a embutir
- d) el juego que existe entre punzón y matriz
- e) la correcta lubricación y la velocidad del punzón

### **1.2.2. Herramientas empleadas para el proceso de embutición**

Como afirma Fuentes Quisaguano & Mullapa Rumipamba (2008) “Los bordes de los punzones o matrices se hacen redondeado y el tamaño de los mismos influyen en el esfuerzo de embutición, grado de formación, posibilidad de la formación de pliegues en la brida” (pág. 25)

Para realización de la operación de embutición se necesita:

#### ***1.2.2.1.El punzón:***

- a) Es el elemento o herramienta que transfiere hacia la chapa o lámina una fuerza determinada para crear la deformación.
- b) Debe tener bien definido la resistencia a la tracción, el límite elástico, la dureza y la resistencia al desgaste.

- c) Su forma geométrica se escoge según el empleo y la forma, es decir pueden ser cilíndricas, esféricas, rectangulares, etc.
- d) Los bordes de los punzones deben ser redondos, ya que estos influyen en la fuerza de embutición y de la formación de los pliegues de la pieza final.

#### ***1.2.2.2.Placa matriz:***

- a) Este elemento trabaja como guía o molde con la ayuda del punzón cuando este presiona la lámina hacia la matriz.
- b) La chapa puede fluir ya que los bordes internos de la matriz tiene un chaflán de forma redonda.
- c) Cuando las placas matrices son muy grandes se divide en varias partes para su fácil mecanizado y tratamientos térmicos.
- d) Los aceros de herramientas en templado y revenidos son considerados como materiales para la construcción de las placas matrices.

#### ***1.2.2.3.Pisador o prensachapas:***

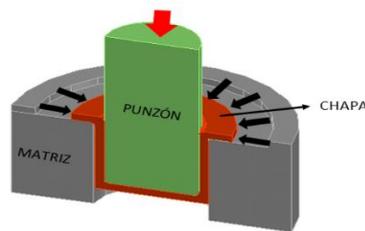
- a) Es también conocido como prensachapas o sujetachapas.
- b) Su función principal de este elemento o herramienta es de sujetar la chapa o lámina durante todo el proceso contra la matriz.
- c) La finalidad del pisador es evitar las ondulaciones o pliegues de la lámina ayudado con una fuerza determinada.
- d) Tiene el control de la fluencia del material entre el punzón y la matriz, el motivo es para que no exista ningún cambio en el espesor de la lámina a trabajar.

### 1.2.3. Tipos de procesos para la embutición

#### 1.2.3.1.Embutición de simple efecto

Este proceso también se lo conoce como embutición sin sujetachapas, se utiliza para piezas embutidas de poca profundidad, es decir la altura es limitada, las herramientas que las conforman son el punzón y la matriz como indica la figura 4.

#### Esquema de embutición de simple efecto



**Figura 4.**

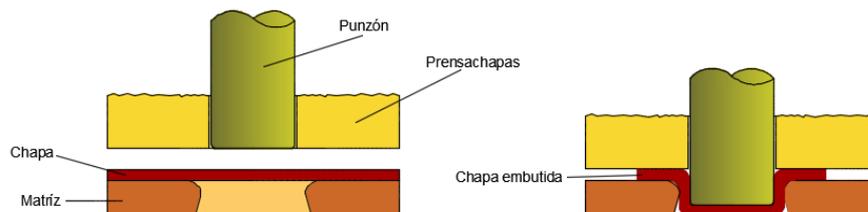
**Nota:** Proceso del desarrollo de la embutición de simple efecto, no utiliza sujetachapas.

**Elaborado por:** (Caiza y Sandoval, 2016)

#### 1.2.3.2.Embutición de doble efecto

En este tipo de embutición, el proceso se logra por medio de una prensa mecánica o hidráulica, donde los elementos que se utilizan son: el punzón, el pisador y la matriz. Como se explicó en los puntos anteriores, el pisador evita la formación de los pliegues, además se aplica al principio de la operación y debe tener una presión adecuada durante todo el procedimiento.

#### Esquema de embutición de doble efecto

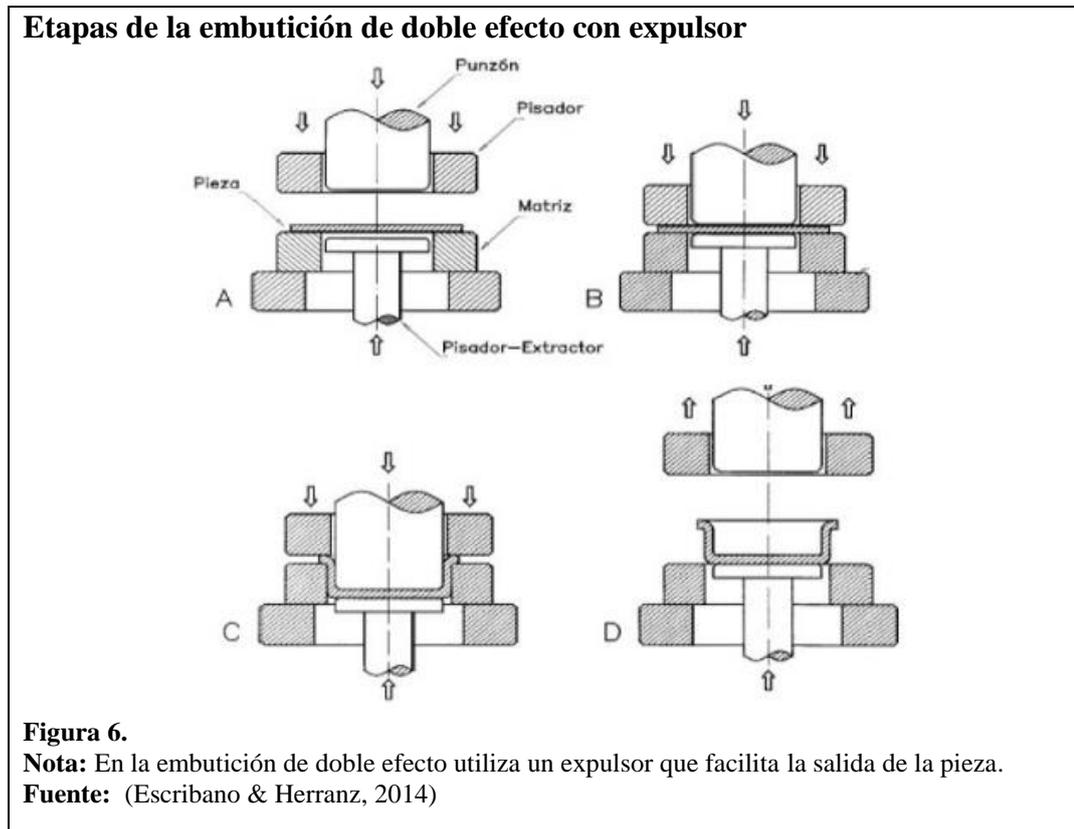


**Figura 5.**

**Nota:** Desarrollo el proceso de embutición de doble con usos respectivas partes.

**Elaborado por:** (Caiza y Sandoval, 2016)

En la embutición de doble efecto, la mayoría de alturas son hipotéticamente operables. En el pisador la presión que se ejerce sobre la chapa debe calcularse cuidadosamente, ya que si se excede puede provocar un alargamiento del material y si es insuficiente la presión hace que el material se engruese y forme pliegues.

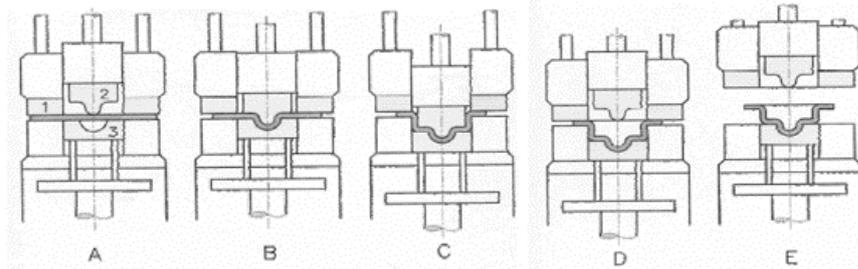


### 1.2.3.3.Embutición de triple efecto

Se denomina de triple efecto a este tipo de embutición, por la realización de la operación con el apoyo de prensas de doble efecto y con el auxilio de un cojín neumático o hidráulico.

Se utiliza este tipo de embutición en piezas de gran tamaño donde se requiere un gran esfuerzo del pisador, el cual es difícil de lograr por medio de resortes o cilindros neumáticos, por lo cual será más fácil la regulación por medio de la misma prensa hidráulica.

### **Etapas de la embutición de triple efecto**



**Figura 7.**

**Nota:** Son etapas en el desarrollo de un proceso de embutición de triple efecto que utiliza expulsores para la salida del material embutido.

**Fuente:** (Escribano & Herranz, 2014)

### **1.2.4. Embutición profunda**

Kalpakjian (2008), “Aunque al proceso generalmente se le llama *embutido profundo* por su capacidad para producir partes profundas, también se utiliza para fabricar partes poco profundas o que tienen una profundidad moderada” (pág. 452)

La embutición profunda utiliza el pisón o sujetachapas, con la ayuda de prensas hidráulicas o mecánicas. Es uno de los procesos más manejados en la embutición de láminas o chapas metálicas para la fabricación de lavaplatos en las cocinas, tanques de combustible tanto para vehículos livianos como pesados, contenedores de alimentos. También se aplica en la fabricación de piezas para carrocerías.

### **1.3. Materiales para usar en el proceso de embutición**

Para una deformación permanente o una deformación plástica en la operación es conveniente usar materiales con un límite elástico bajo, es decir, requiere que el material no regrese a su forma original. Se debe utilizar una fuerza que supere el límite elástico del material.

Algunas características deben cumplirse sin perder sus propiedades mecánicas originales para su posterior uso. A continuación se describe las propiedades que deben cumplir:

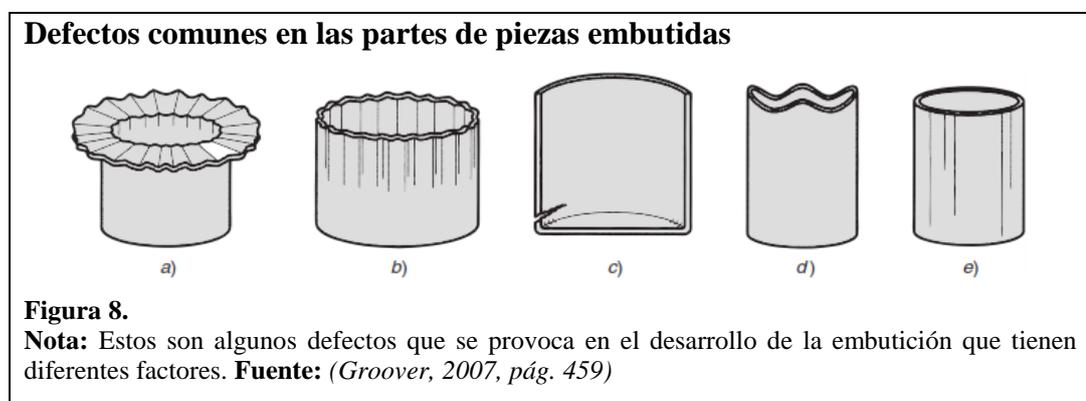
- a) dúctiles
- b) maleables
- c) de alto porcentaje de deformabilidad

Los tipos de materiales más utilizados generalmente en la embutición son:

- a) aceros laminados en frío, para la embutición con 0.08-0.15% C; 0.02-0.6% Mn
- b) aleaciones de aluminio-cobre
- c) aceros inoxidables de tipo AISI 304 Y AISI 316
- d) el latón, por sus buenas características

#### 1.4. Defectos de la embutición

“El embutido de lámina metálica es una operación más compleja que el corte o el doblado; por tanto, hay más cosas que pueden fallar. Pueden presentarse numerosos defectos en un producto embutido” (Groover, 2007, pág. 458), a continuación en la figura 8 se mostrará algunos defectos:



- a) El arrugamiento en la pestaña: Es provocado por el pandeo por compresión, se forma en la parte no embutida de la pieza.
- b) El arrugamiento en la pared: Aparecen en las paredes verticales de la pieza embutida a causa de los pliegues anteriormente mencionados.
- c) El desgarramiento: Se produce cerca de la base de la pieza embutida el cual es ocasionado por los altos esfuerzos de tensión, estos esfuerzos causan estas rupturas.
- d) El orejeado u orejas: Estas deformaciones se forman en los bordes superiores de la pieza embutida, ocasionada por la anisotropía en la lámina, para que existan las orejas el material a embutir debe ser isotrópico
- e) Rayados superficiales: Se produce cuando las superficies del punzón y de la placa matriz no están completamente lisas, también por la falta de lubricación es una de las causas.

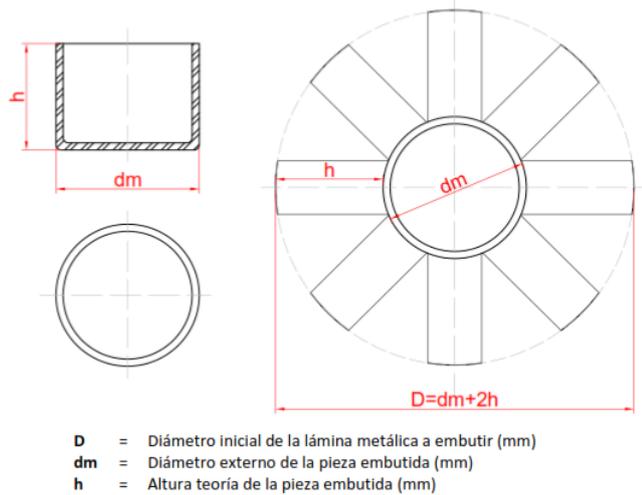
### **1.5.Determinación de tamaño de disco en forma original**

López Navarro (1976), “Uno de los problemas más importantes en la embutición es el de determinar las dimensiones de la chapa y su figura, para que una vez embutida proporcione el objeto deseado, con el mínimo empleo de material” (pág. 127)

Existen algunos métodos que han pasado por varios ensayos y pruebas para poder determinar de una forma fácil y sencilla de aplicar, para poder encontrar las dimensiones originales de una chapa, pero esto solo se aplica en figuras que tiene una geometría regular de líneas rectas o de sección circular.

De acuerdo con López Navarro (1976), “Un método elemental para efectuar el cálculo de un desarrollo es considerar éste como una superficie equivalente de la pieza desarrollada, y no como un valor lineal de la misma” (pág. 128)

### Desarrollo de un recipiente cilíndrico



**Figura 9.**

**Nota:** La sección (a) muestra las vistas de una pieza embutida con sus dimensiones y en la sección (b) la descomposición de la pieza para determinar el diámetro inicial.

**Adaptado de:** (López Navarro , 1976, pág. 128)

Una forma para encontrar el diámetro inicial de la pieza a embutir es:

- Área del diámetro inicial:

$$A = \pi \times \frac{D^2}{4} \quad [1.1]$$

- Área del exterior del cilindro:

$$A = \pi \times \frac{D^2}{4} + (\pi \times dm \times h) \quad [1.2]$$

- Al igualar las áreas de las ecuaciones [1.1] y [1.2] se obtiene:

$$D^2 = dm^2 + (4 \times dm \times h) \quad [1.3]$$

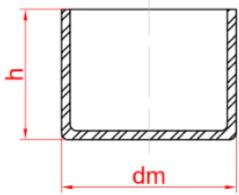
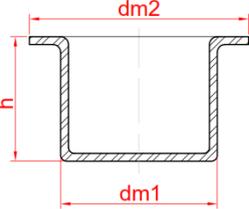
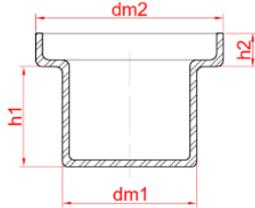
- Diámetro inicial de la pieza a embutir es:

$$D = \sqrt{dm^2 + (4 \times dm \times h)} \quad [1.4]$$

A continuación se muestra una tabla con algunas formas de piezas con sus respectivas fórmulas para calcular su diámetro inicial.

**Tabla 1**

**Tabla de cálculo de diámetro inicial de piezas cilíndricas**

Diámetro del pieza inicial	Forma del recipiente
$D = \sqrt{dm^2 + 4 \times dm \times h}$	
$D = \sqrt{dm2^2 + 4 \times dm1 \times h}$	
$D = \sqrt{dm2^2 + 4 \times (dm1 \times h1 + dm2 \times h2)}$	

**Nota:** La tabla 1, detalla fórmulas y figuras de piezas básicas para la embutición.  
**Adaptado de:** (López Navarro , 1976, pág. 132)

### 1.6.Fuerza de embutición

Es una de las variables más importantes para la embutición, su cálculo es sencillo cuando se tiene un cuerpo cilíndrico. La fuerza es complicada de obtener en piezas de cuerpos irregulares. La fuerza aumenta con rapidez al iniciarse el proceso de embutición y alcanza su valor máximo cuando el punzón provoca la profundidad o la altura deseada en el material. A continuación se indicará cuatro métodos para la obtención de la fuerza o presión que se debe ejercer en el punzón.

### 1.6.1. Método 1

Groover (2007), utiliza esta ecuación para la obtención de la fuerza de embutido, el valor de 0,7 es un factor de corrección para la fricción (pág. 456):

$$F = \pi \times D_p \times t \times (TS) \times \left( \frac{D_b}{D_p} - 0,7 \right) \quad [1.5]$$

Donde:

F	=	Fuerza de embutido	N	lbf
t	=	Espesor original del material o la lámina	mm	plg
TS	=	Resistencia a la tensión del material a usar	MPa	lbf/plg <sup>2</sup>
D <sub>b</sub>	=	Diámetro del disco en forma inicial	mm	plg
D <sub>p</sub>	=	Diámetro del punzón	mm	plg

### 1.6.2. Método 2

Kalpakjian (2008, pág. 453) expresa la ecuación para la obtención de la fuerza. El valor de 0,7 es un factor constante para fricción:

$$F_{m\acute{a}x} = \pi \times D_p \times T \times (UTS) \times \left( \frac{D_o}{D_p} - 0,7 \right) \quad [1.6]$$

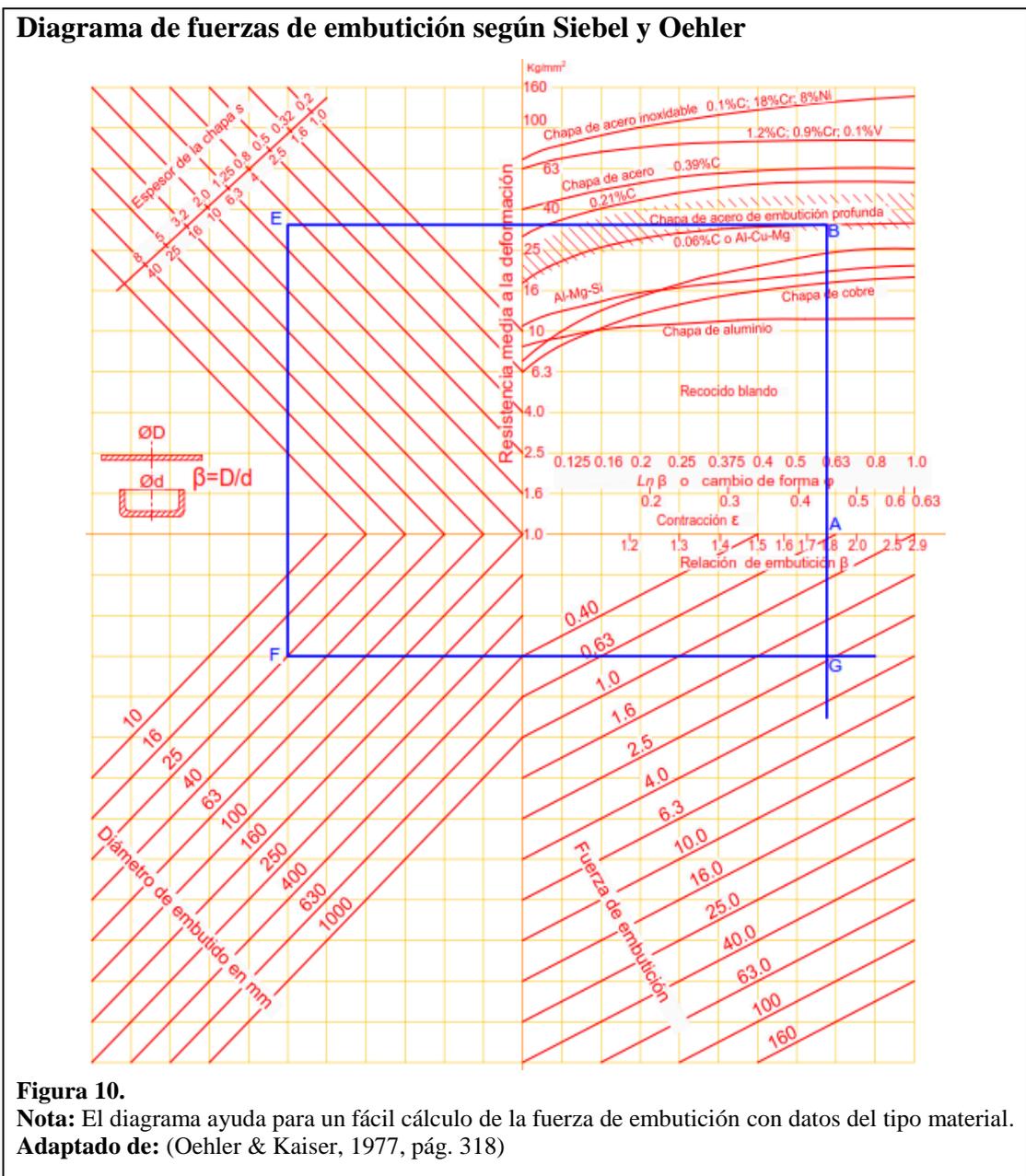
Donde:

F <sub>máx</sub>	=	Fuerza de embutido	N	lbf
T	=	Espesor del material a usar	mm	plg
UTS	=	Resistencia a la tensión del material a usar	MPa	lbf/plg <sup>2</sup>
D <sub>o</sub>	=	Diámetro del disco en forma inicial	mm	plg
D <sub>p</sub>	=	Diámetro del punzón	mm	plg

### 1.6.3. Método 3

De acuerdo con Oehler y Kaiser, para la obtención de la fuerza de embutición es más fácil de obtener por métodos gráficos. (1977, pág. 317)

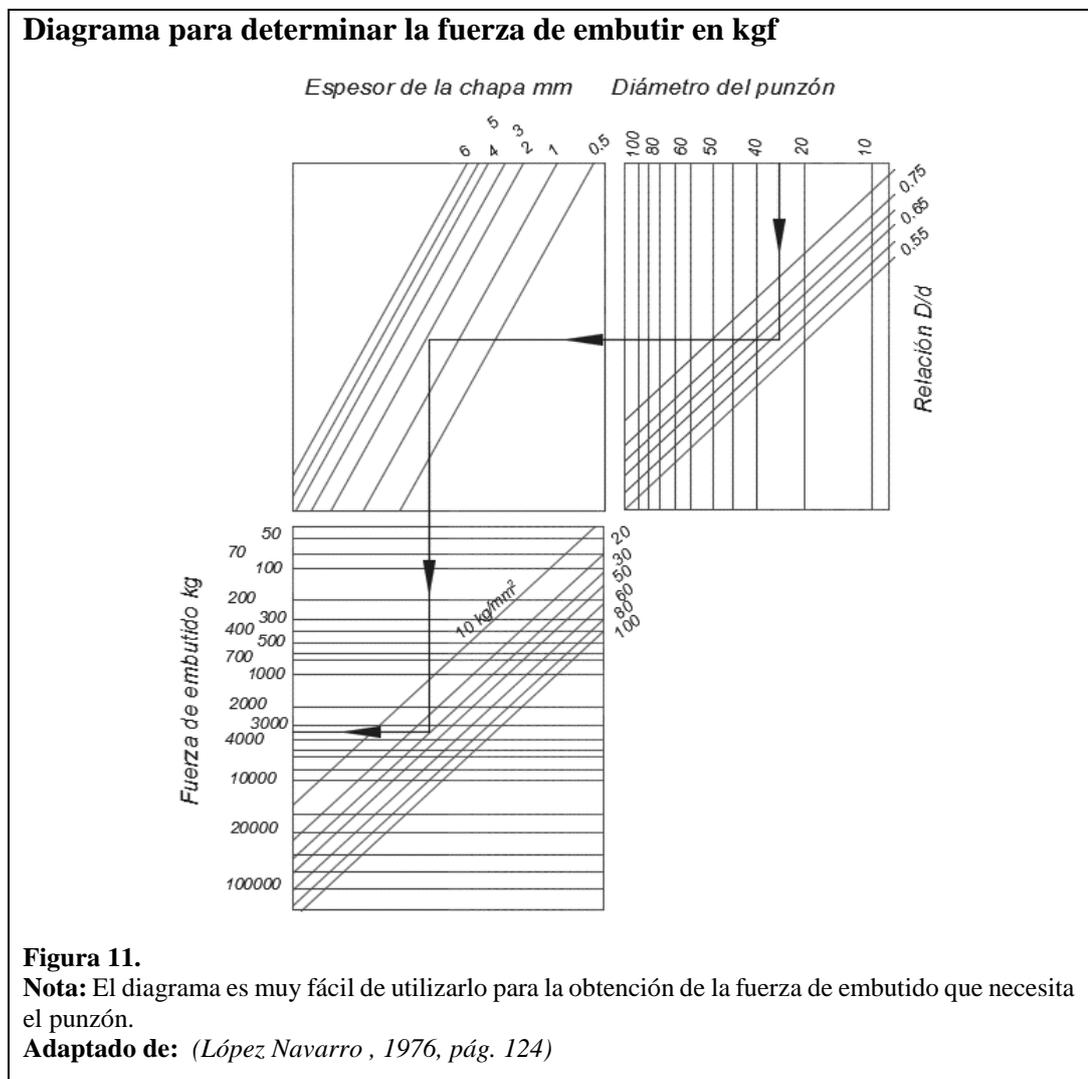
La fuerza de embutición está expresada en el monograma en kN; se obtiene por medio de líneas poligonales. Se inicia desde la relación de embutición [A], de allí crea una intersección con la propiedad del material [B], luego se proyecta hacia los espesores de chapas [E]; consecutivamente, por el diámetro del embutido [F] y finaliza en [G] donde se encuentra la fuerza de embutición de forma rápida y práctica. Se reitera que la exactitud hacia la respuesta no es la más apropiada, es decir depende del lector.



#### 1.6.4. Método 4

Otro método gráfico, es determinado por López Navarro (1976, pág. 124), como se muestra en la figura 11.

El primer punto se representa con el diámetro del punzón, se baja vertical hasta la intersección con la línea diagonal de relación  $d/D$ , desde ese punto se realiza una horizontal hasta la intersección con la diagonal del espesor de la chapa, de allí se efectúa una vertical hasta cortar con la diagonal de la resistencia del material y de allí con una horizontal hasta tener una intersección con la fuerza para embutir.



## 1.7. Fuerza en el prensachapas

En la operación de embutido, la fuerza del prensachapas o sujetador se le atribuye una gran importancia; es decir, si la presión es insuficiente causa arrugas y pliegues, pero si la presión es excesiva provoca la rotura o el estiramiento de la lámina. A continuación se detallará cuatro métodos para el cálculo de la fuerza o presión que debe ejercer el sujetador.

### 1.7.1. Método 1

Groover (2007, pág. 456), expresa esta ecuación para la obtención de la fuerza, el valor de 0.015 es una constante de la resistencia a la fluencia de la lámina de metal:

$$F_h = 0,015 \times Y \times \pi \times [D_b^2 - (D_p + 2.2t + 2R_d)^2] \quad [1.7]$$

Donde:

$F_h$	=	Fuerza de sujeción en la embutición	<b>N</b>	<b>lbf</b>
$Y$	=	Resistencia a la fluencia de la lámina	<b>MPa</b>	<b>lbf/plg<sup>2</sup></b>
$t$	=	Espesor original del material o la lámina	<b>mm</b>	<b>plg</b>
$R_d$	=	Radio de la esquina del troquel	<b>mm</b>	<b>plg</b>
$D_b$	=	Diámetro del disco en forma inicial	<b>mm</b>	<b>plg</b>
$D_p$	=	Diámetro del punzón	<b>mm</b>	<b>plg</b>

### 1.7.2. Método 2

De acuerdo con Rossi (1979, pág. 104), la presión en el prensachapas se obtiene:

$$P = \frac{\pi}{4} \times (D^2 - d^2) \times p \quad [1.8]$$

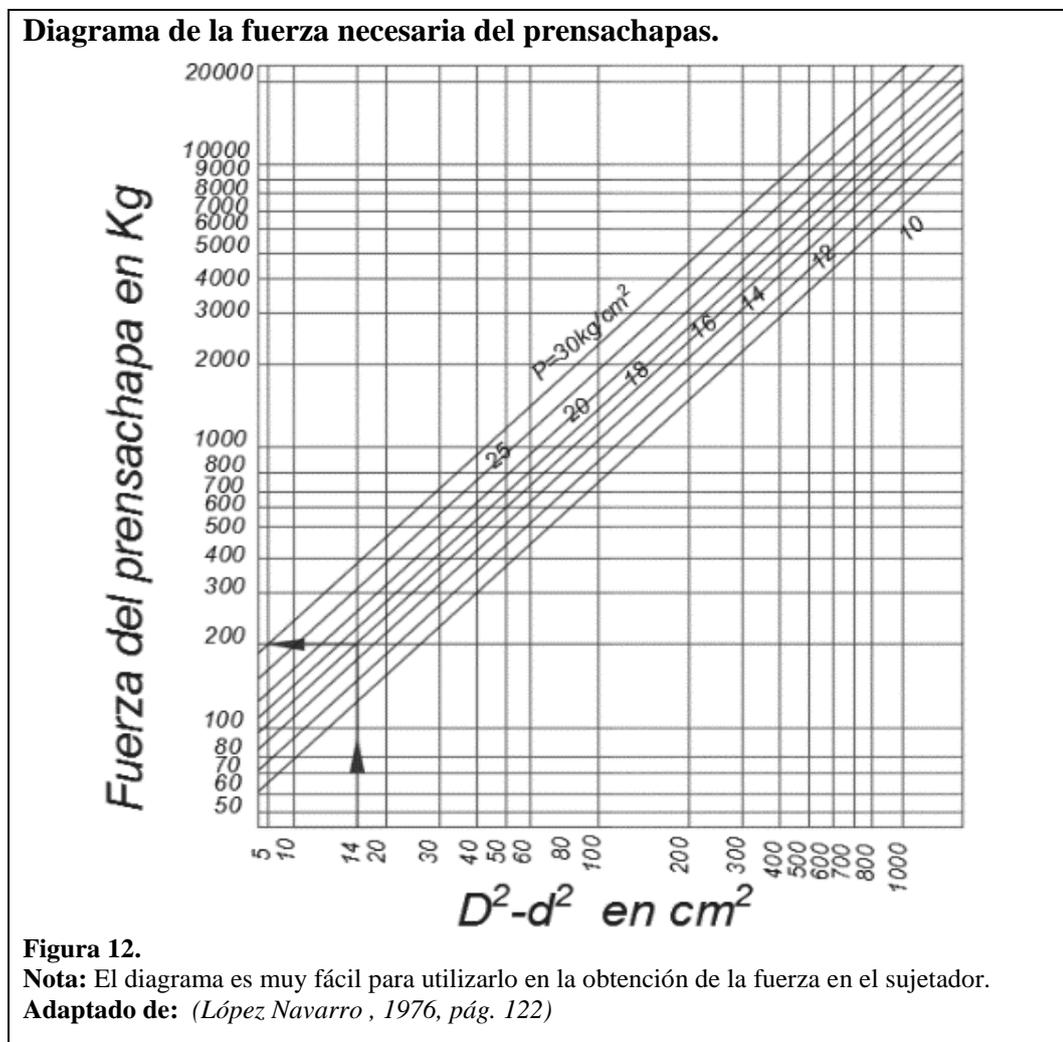
Donde:

$P$	=	Presión total del sujetador	<b>kgf</b>
$D$	=	Diámetro del disco en forma inicial	<b>cm</b>
$d$	=	Diámetro del agujero de la matriz	<b>cm</b>
$p$	=	Presión específica del sujetador	
		Para chapa de hierro esta entre 10 a 20 kgf/cm <sup>2</sup>	<b>kgf/cm<sup>2</sup></b>
		Para chapa de aluminio esta entre 8 a 10 kgf/cm <sup>2</sup>	

### 1.7.3. Método 3

López Navarro (1976), determina por medio del diagrama de la figura 12 la fuerza para el sujetador, en función de la diferencia de los cuadrados del diametro de la chapa desarrollada y del diámetro de la pieza terminada. (pág. 123)

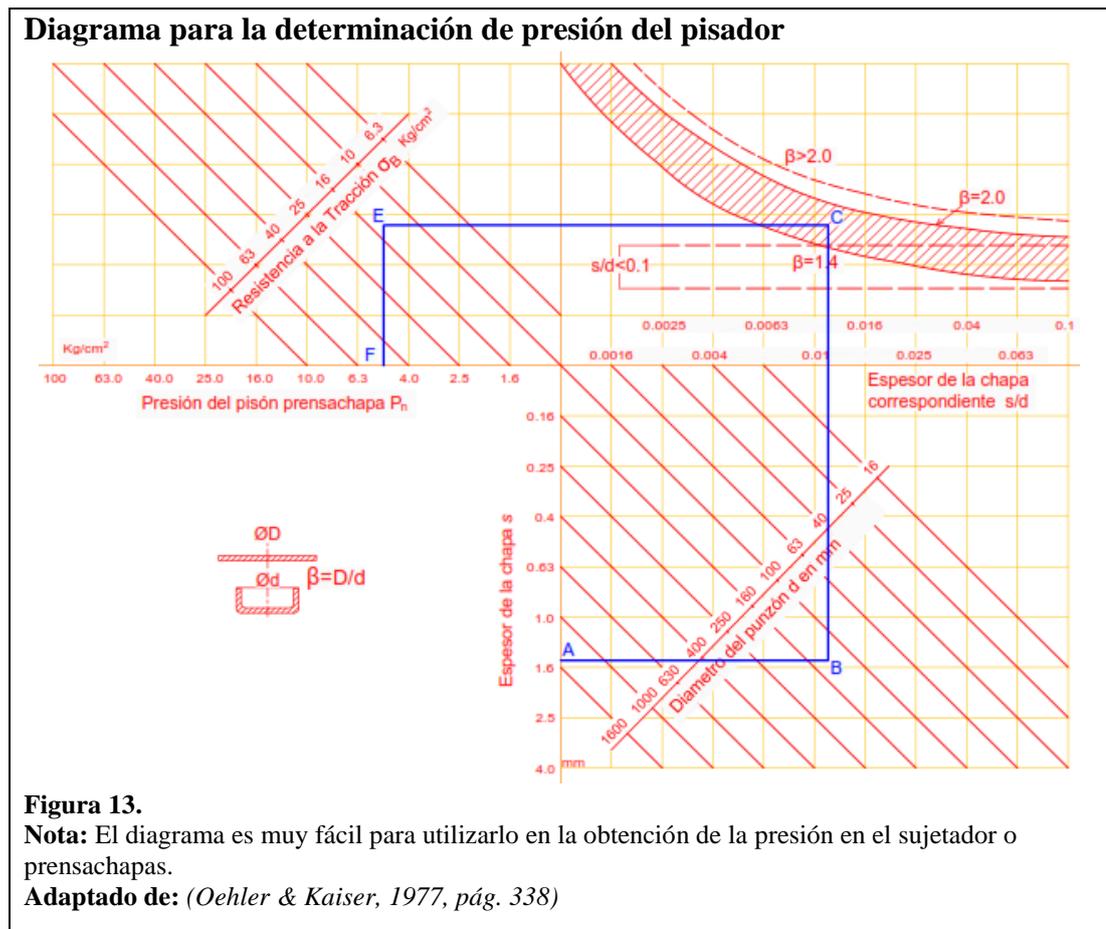
Se debe tener la diferencia de los cuadrados de los diámetros de la chapa desarrollada  $D$  y del diámetro de la pieza terminada  $d$ , donde  $D^2 - d^2$ ; ya conocido ese valor y la resistencia del material en  $\frac{kg}{cm^2}$  se puede determinar la fuerza del prensachapas.



### 1.7.4. Método 4

En base a Oehler y Kaiser (1977), para la obtención de presión en el prensachapas utiliza el diagrama de la figura 13. (pág. 338)

Para la obtención de la presión del prensachapas se empieza desde la parte inferior derecha donde están ubicados los valores del espesor de la chapa [A], se traslada una horizontal hasta las líneas diagonales del diámetro del punzón [B], de allí se realiza una vertical hasta la intersección con la curva del valor de  $\beta$  [C], se proyecta una horizontal hacia el valor de resistencia a la tracción [E] y se realiza una vertical hacia los valores de la presión del pisador [F].



Para la obtención de la fuerza del sujetador  $P_n$ , se calcula partiendo del valor obtenido del monograma de la figura 13 y con la fórmula que se describe a continuación:

$$P_n = p_n \times \frac{\pi}{4} \times [D^2 - (d + 2 \times r)^2] \quad [1.9]$$

Donde:

$P_n$	= Fuerza total del sujetador	<b>kgf</b>
$D$	= Diámetro del disco en forma inicial	<b>cm</b>
$d$	= Diámetro del agujero de la matriz	<b>cm</b>
$p_n$	= Presión específica del sujetador (Figura 13)	<b>kgf/cm<sup>2</sup></b>
$r$	= Radio de la esquina del troquel	<b>cm</b>

### 1.8.Velocidad de embutición

Es la velocidad a la que se desplaza el punzón para realizar el desarrollo de la embutición en la matriz. Existen diferentes velocidades óptimas para cada material. Esto ayuda para que no se produzcan arrugas en las láminas. Las velocidades recomendadas por Juan J. Maluquier (Manual técnico matricero) son:

**Tabla 2.**  
**Velocidades de embutición**

<b>Material</b>	<b>Velocidad (mm/seg)</b>
Zinc y acero inoxidable	200
Acero dulce	280
Aluminio	500
Latón	750

**Nota:** Los valores de la tabla 2 son de materiales que son utilizados con frecuencia para el proceso de la embutición.

**Fuente:** (Villamar Palacios, 2008, pág. 84)

## 1.9.Lubricación en la embutición

El punzón y la matriz están asignados a la función de moldear la chapa metálica por la aplicación de las diferentes fuerzas. La chapa es obligada a extenderse, uniformemente, entre el espacio determinado por el punzón y la matriz. Para reducir el rompimiento de las fibras de la lámina o un excesivo estiramiento es preciso que se lubrique durante todo el proceso de embutición con sustancias que fluyan por toda la superficie de la chapa, además esta lubricación también reduce el desgaste de la estampa y de las herramientas.

**Tabla 3.**

**Lubricantes a usar en la embutición en frío, en relación al material a deformar**

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

**Nota:** La tabla 3 detalla varios lubricantes que deben ser usados para una embutición en los diferentes materiales.

**Adaptado de:** (Rossi, 1979, pág. 73)

## CAPÍTULO 2

### EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

#### 2.1.Sistemas discretos

Los problemas de ingeniería por su complejidad y por la infinidad de variables presentes para poder resolverlos se modelan, es decir, se limita el número de variables presentes y se desprecian las menos importantes, por lo cual es necesaria una medida de error aceptable. Este sistema - modelo se divide en una cantidad finita de elementos a los que se llama problemas de naturaleza discreta. Una vez resuelto el elemento o parte del sistema, se vuelven a armar todos los elementos para analizar el sistema entero. El método de los elementos finitos (MEF), es uno de los tantos métodos de discretización más útiles en la solución de problemas de ingeniería.

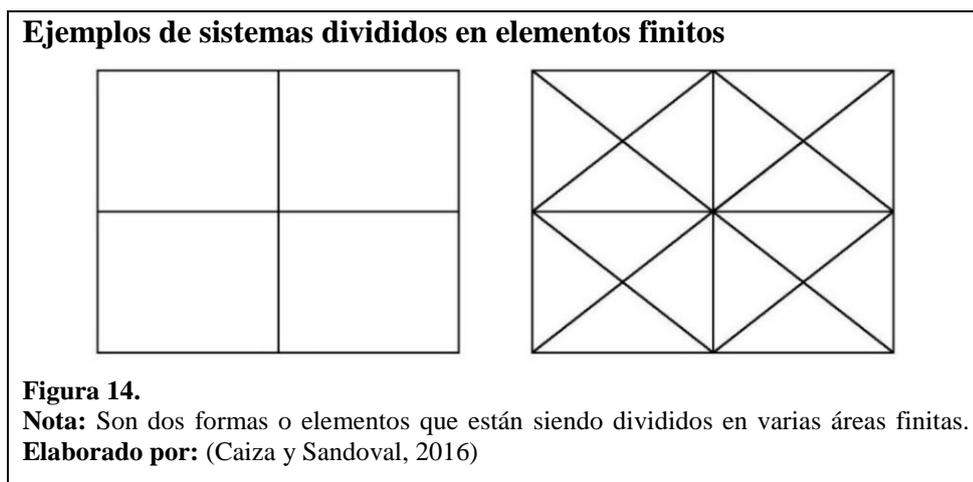
#### 2.2.Elementos finitos (MEF)

El MEF, básicamente es un método de aproximación, que divide a un sistema entero (dominio), en subsistemas (subdominios), que están unidos por nodos en sus contornos. Un dominio puede ser una placa metálica, un fluido laminar dentro de un sistema de fluidos, una viga, entre otros. Se aplica en todo problema donde se desee resultados en particular, al cual se aplica condiciones iniciales y de contorno de fuerza, tensión, deformación, temperatura.

La mayoría de sistemas reales son muy complejos, su comportamiento se modela mediante ecuaciones diferenciales difíciles de solucionar por métodos convencionales. Entonces, el MEF toma estas ecuaciones diferenciales y las reduce a ecuaciones algebraicas, por medio de matrices, que son más simples de solucionar.

El continuo se divide, mediante líneas o superficies imaginarias, en un número de “elementos finitos”. Se supone que los elementos están conectados entre sí mediante un número discreto de puntos, que llamaremos nodos, situados en sus contornos. Los desplazamientos de estos nodos serán las incógnitas fundamentales del problema, tal como ocurre en el análisis simple de estructuras (Zienkiewicz, 2007, pág. 23)

El MEF se basa en una división en elementos finitos figura 14, unidos entre ellos por nodos los cuales poseen cierto grado de libertad. Habrá funciones que definan los desplazamientos de cada elemento. Todo esto basándose en los desplazamientos de cada nodo.



Luego se establece el estado de deformación dentro del elemento finito, que dependerá de las condiciones iniciales y del tipo de material a utilizar, además las tensiones internas serán definidas. Esto sugiere que basándose en condiciones iniciales del problema, como fuerzas iniciales, por ejemplo, la fuerza de gravedad, rozamiento, entre otros, se encontrarán las deformaciones y tensiones internas. Todo esto en equilibrio.

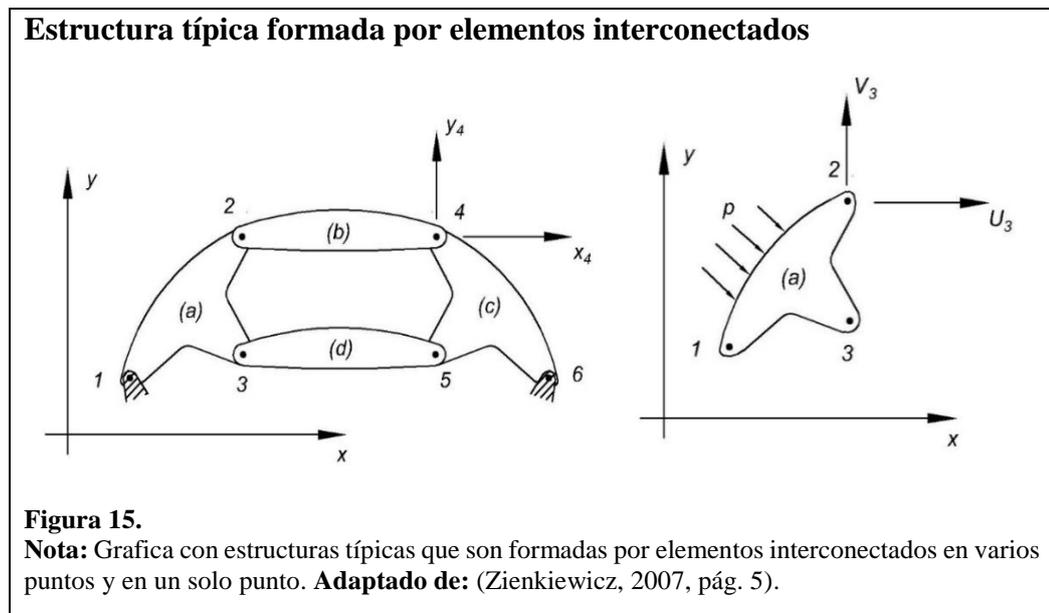
El MEF tiene tres tipos de métodos para solucionar problemas:

- a) Método de desplazamientos.
- b) Método de los residuos ponderados y residuales.
- c) Métodos virtuales.

Se describirá, rápidamente, la solución por métodos virtuales, la más utilizada por los ingenieros. Para poder entender el MEF se ilustrará un ejemplo simple, el que dará a entender cómo el sistema se lo separa en elementos lo suficientemente pequeños para obtener una aproximación adecuada a las necesidades buscadas y lo suficientemente grande para que el ordenador no colapse en los cálculos.

### 2.3. Formulación básica matricial de un elemento

Se tomará una estructura típica conformada por 4 elementos a, b, c y d figura 15, donde se analizará el elemento a, formado por 3 nodos. Las propiedades iniciales del elemento se suponen ya analizadas mediante un experimento en laboratorio.



### 2.3.1. Fuerzas

“El elemento  $a$  en conjunto con la carga distribuida  $p$  y las fuerzas actuantes en los tres nodos 1, 2, 3 representados en forma matricial mediante los ejes  $u$  y  $v$ , se obtiene”.

(Zienkiewicz, 2007, pág. 6)

$$\mathbf{q}^1 = \begin{Bmatrix} \mathbf{q}_1^1 \\ \mathbf{q}_2^1 \\ \mathbf{q}_3^1 \end{Bmatrix}; \mathbf{q}_i^1 = \begin{Bmatrix} U_1 \\ V_1 \end{Bmatrix}, \text{etc.} \quad [2.1]$$

Donde:

- $\mathbf{q}^1$  : Matriz columna de fuerzas en todos los nodos del elemento  $a$ .
- $\mathbf{q}_1^1, \mathbf{q}_2^1, \mathbf{q}_3^1$  : Matriz de fuerzas en cada uno de los nodos 1, 2, 3.
- $U_1, V_1$  : Componentes de fuerza en cada uno de los nodos en los ejes  $u$  y  $v$ .

### 2.3.2. Desplazamientos

A continuación se expresan los desplazamientos nodales como sigue Zienkiewicz, (2007, pág. 6).

$$\mathbf{a}^1 = \begin{Bmatrix} \mathbf{a}_1^1 \\ \mathbf{a}_2^1 \\ \mathbf{a}_3^1 \end{Bmatrix}; \mathbf{a}_i^1 = \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \end{Bmatrix}, \text{etc.} \quad [2.2]$$

Donde:

- $\mathbf{a}^1$  : Matriz de desplazamiento del elemento  $a$ .
- $\mathbf{a}_1^1, \mathbf{a}_2^1, \mathbf{a}_3^1$  : Matriz de desplazamiento en cada uno de los nodos 1, 2, 3.
- $U_1, V_1$  : Componentes de desplazamiento en cada nodo, en los ejes  $u$  y  $v$ .

### 2.3.3. Tensiones en función de los desplazamientos relación característica

Relacionando 2.1 y 2.2, es decir fuerzas, desplazamientos y suponiendo un comportamiento elástico del sistema la relación característica queda (Zienkiewicz, 2007, pág. 6):

$$\mathbf{q}^1 = \mathbf{K}^1 \mathbf{a}^1 + \mathbf{f}_p^1 + \mathbf{f}_{\epsilon_0}^1 \quad [2.3]$$

Donde:

- $\mathbf{q}^1$  : Matriz de fuerzas en todos los nodos del elemento a.
- $\mathbf{K}^1$  : Matriz de rigidez del elemento a
- $\mathbf{a}^1$  : Matriz desplazamiento del elemento a.
- $\mathbf{f}_p^1$  : Matriz de fuerzas nodales necesarias para equilibrar cualquier carga distribuida que actúe sobre el elemento
- $\mathbf{f}_{\epsilon_0}^1$  : Matriz de fuerzas nodales necesarias para equilibrar cualquier deformación inicial.

La matriz de rigidez  $\mathbf{K}^e$ , se obtiene (Zienkiewicz, 2007, pág. 7)

$$\mathbf{K}^e = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{ii}^e & \mathbf{K}_{ij}^e & \dots & \mathbf{K}_{im}^e \\ \vdots & \vdots & 0 & \vdots \\ \mathbf{K}_{mi}^e & \dots & \dots & \mathbf{K}_{mm}^e \end{bmatrix} \quad [2.4]$$

Donde:

- $\mathbf{K}_{ii}^e$  : Submatrices de rigidez de dimensiones  $l \times l$ , donde  $l$  es el número de componentes de fuerza de cada nodo.

Representa las fuerzas nodales necesarias para equilibrar cualquier carga distribuida que actúe sobre el elemento, y  $f_{\epsilon_0}^1$  las fuerzas nodales necesarias para equilibrar cualquier deformación inicial como la que puede ocasionar un cambio de temperatura si los nudos tienen impedido todo desplazamiento. El primer término representa las fuerzas inducidas por los desplazamientos de los nudos (Zienkiewicz, 2007, pág. 6).

### 2.3.4. Tensiones

De igual manera se puede corroborar para las tensiones internas en cualquier punto del elemento, definido como  $\epsilon^1$  (Zienkiewicz, 2007, pág. 6):

$$\epsilon^1 = \mathbf{S}^1 \mathbf{a}^1 + \epsilon_p^1 + \epsilon_{\epsilon_0}^1 \quad [2.5]$$

Donde:

- $\epsilon^1$  : Tensiones internas del elemento en cualquier punto.
- $\mathbf{S}^1$  : Matriz de tensiones del elemento a.
- $\epsilon_p^1$  : Matriz de tensiones nodales necesarias para equilibrar cualquier carga distribuida que actúe sobre el elemento.
- $\epsilon_{\epsilon_0}^1$  : Matriz de tensiones nodales necesarias para equilibrar cualquier carga distribuida que actúe sobre el elemento.

Donde 2.3 y 2.5 se pueden emplear en casos similares para aplicaciones bidimensionales. Ahora se verá las formulaciones directas para desplazamientos, deformaciones y tensiones internas.

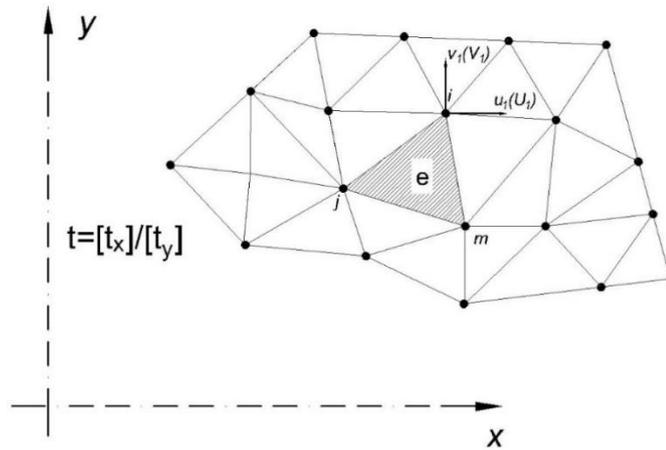
Cabe aclarar que para la embutición del aluminio se tomarán estas fórmulas para el desplazamiento, deformación y tensión, debido a que si se corta la placa a través de ella y se aplica una fuerza, en este caso el punzón de la matriz. Se observa que la placa se deformará en los ejes  $u$  y  $v$ , sin tomar en cuenta un tercer eje, el cual sería notorio en las esquinas. Por lo tanto, será suficiente un análisis bidimensional de tensiones para definir los elementos finitos a utilizar por un software especializado.

#### **2.4. Formulación directa de las características de un elemento finito tipo placa**

Ahora se describirá cómo un software calculará a partir de fórmulas generales el desplazamiento, deformaciones y tensiones nodales, los cuales llegarán a matrices de complejidad sólo viables para su resolución vía ordenador. Para ello se hará uso de un ejemplo de una sección plana tipo rebanada (figura 16), la cual se encuentra sometida a tensión plana. Ésta se encuentra en el plano de coordenadas  $u$  y  $v$ , además será dividida en secciones triangulares, se proporcionarán las relaciones de desplazamiento, tensiones y deformaciones. La placa utilizada más adelante tendrá las mismas características de este ejemplo.

Se tiene un área finita cualquiera delimitada por líneas y sometida a tensión, para ello se lo divide en elementos finitos (en este caso triángulos), se observa claramente la función predominante de los nodos, donde se puede deducir la gran facilidad en la que los grados de libertad influyen. Como una mentalización útil y una abstracción viable, bajo este ejemplo se podrá comprender de manera más clara la finalidad de los elementos finitos.

### Región sometida a tensión plana dividida en elementos finitos



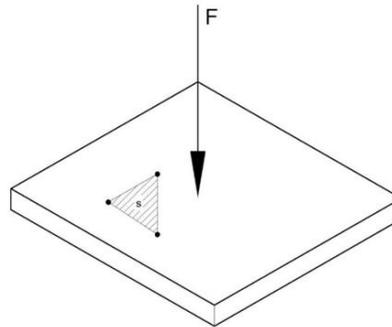
**Figura 16.**

**Nota:** Son áreas finitas que tiene una forma triangular que son sometidas a fuerzas de tensión.

**Adaptado de:** (Zienkiewicz, 2007, pág. 26)

Se puede comparar con una placa plana, que será embutida vía software y experimentos. Se puede ver la similitud entre el ejercicio propuesto y la placa del proyecto de la figura 17.

### Analogía con una placa plana



**Figura 17.**

**Nota:** Placa de experimento aplicando una fuerza puntal para el desarrollo del ejercicio.

**Adaptado de:** (Zienkiewicz, 2007, pág. 28)

#### 2.4.1. Desplazamientos para un sistema tipo placa

Para los desplazamientos  $u$ , bajo un elemento finito común  $e$  y determinada por nodos  $i, j, m$ , etc., todos estos de alguna manera están descritos en la figura 16. (Zienkiewicz, 2007, pp. 25-26) afirma: “Aproximadamente los desplazamientos  $\mathbf{u}$  de cualquier

punto del elemento mediante un vector columna,  $\hat{\mathbf{u}}$  donde las componentes de  $\mathbf{N}$  son en general funciones de posición dadas y  $\mathbf{a}^e$  es un vector formado por los desplazamientos nodales del elemento considerado”.

$$\mathbf{u} \approx \hat{\mathbf{u}} = \sum \mathbf{N}_i \mathbf{a}_i^e = [\mathbf{N}_i, \mathbf{N}_j, \dots] \begin{Bmatrix} \mathbf{a}_i \\ \mathbf{a}_j \\ \cdot \\ \cdot \end{Bmatrix} = \mathbf{N} \mathbf{a}^e \quad [2.6]$$

Donde:

- $\mathbf{u}$  : Desplazamientos del elemento.
- $\hat{\mathbf{u}}$  : Vector columna de desplazamientos.
- $[\mathbf{N}_i, \mathbf{N}_j, \dots]$  : Componentes de  $\mathbf{N}$ , funciones de posición nodales.
- $\begin{Bmatrix} \mathbf{a}_i \\ \mathbf{a}_j \\ \cdot \\ \cdot \end{Bmatrix}$  : Vector formado por los desplazamientos nodales del elemento.
- $\mathbf{N}_i, \mathbf{N}_j$  : Son funciones de posición, estos serán calculados por el software, sería demasiado complejo calcularlos manualmente.

Además, el software los escoge de manera que una vez sustituidos en la fórmula 2.6 se obtendrán los desplazamientos nodales. (Zienkiewicz, 2007, págs. 26,27)

$$\mathbf{u} = \begin{Bmatrix} u(x, y) \\ v(x, y) \end{Bmatrix} \quad [2.7]$$

Donde:

- $\mathbf{u}$  : Matriz de desplazamientos del elemento en un punto cualquiera.
- $\mathbf{u}(x, y), \mathbf{v}(x, y)$  : Desplazamiento de un punto en el elemento en función de  $x$  e  $y$ .

$$\mathbf{a}_i = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \end{Bmatrix} \quad [2.8]$$

Donde:

- $\mathbf{a}_i$  : Matriz columna de desplazamiento del nodo  $i$ .
- $\mathbf{u}_i, \mathbf{v}_i$  : Componentes del nodo  $i$ .

$$\mathbf{N}_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i) = \mathbf{I} \text{ (Matriz unidad)} \quad [2.9]$$

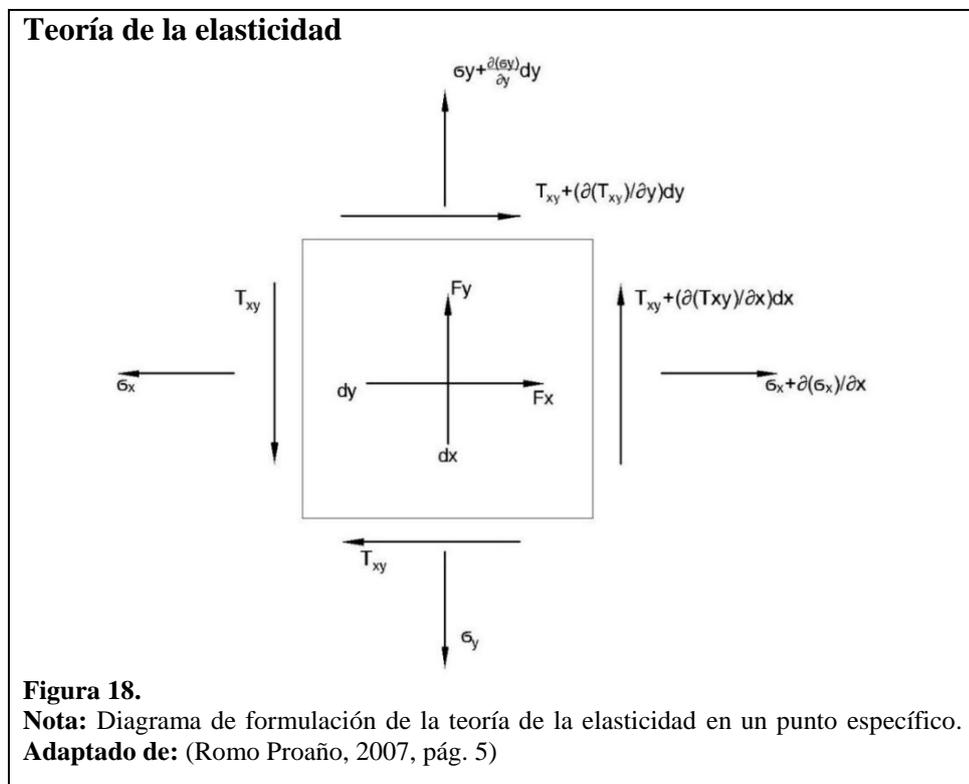
Donde:

- $\mathbf{N}_i$  : Función de desplazamiento en el nodo  $i$ .
- $\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i$  : Componentes del nodo  $i$  en los ejes  $x$  e  $y$ .

Se puede observar aquí detalladamente a  $\mathbf{N}_i$  como una función de desplazamiento, casi imposible de calcular por medios manuales. De ahí la importancia de la utilización de un software para la solución de problemas complejos. Antes de entrar a las deformaciones y tensiones del elemento finito, será necesario definir algunos conceptos sobre la teoría de la elasticidad.

### 2.4.2. Teoría de la elasticidad

Esta teoría se puede explicar mediante un gráfico.



### 2.4.3. Deformaciones

Ya conocidos los desplazamientos para los puntos del elemento. Se calculan las *deformaciones* utilizando la fórmula 2.10 y un operador lineal  $\mathbf{L}$ , donde la relación se puede escribir mediante la siguiente matriz (Zienkiewicz, 2007, pág. 28):

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{L} \times \mathbf{u} \quad [2.10]$$

Donde:

$\boldsymbol{\varepsilon}$  : Matriz de la deformación para cualquier punto del elemento.

$\mathbf{L}$  : Operador lineal.

$\mathbf{u}$  : Vector desplazamiento.

La siguiente fórmula es equivalente al operador  $\mathbf{L}$ , se trata de la matriz de la relación entre desplazamientos y deformaciones unitarias. Las tensiones a las que estará sometida la lámina de este material son perpendiculares al plano, pero se tendrán tensiones a lo largo del eje paralelo de la lámina, esto debido a los apoyos o sujetadores que lo mantendrán en posición mientras sucede el embutido. Adicional a esto, tensiones internas debido a la propia deformación se añadirán a las tensiones del sujetador, por lo cual, la siguiente fórmula sería una base para el software para calcular las deformaciones (Zienkiewicz, 2007, p. 28)

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x'} & 0 \\ 0 & \frac{\partial v}{\partial x} \\ \frac{\partial}{\partial y'} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} \quad [2.11]$$

Donde:

$\boldsymbol{\varepsilon}$  : Matriz de la relación entre desplazamientos y deformaciones unitarias.

#### 2.4.4. Tensiones

Para las tensiones hay diferentes parámetros; todos relacionados con el material, se extraerán muestras que serán enviadas a un laboratorio para obtener datos importantes; es decir, módulo de poisson en los tres ejes  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , módulos de elasticidad, entre otros. Estos parámetros son los que inciden en las tensiones iniciales que se describe a continuación. (Zienkiewicz, 2007, p. 29):

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{D}(\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}_0 + \boldsymbol{\sigma}_0) \quad [2.12]$$

Donde:

- $\boldsymbol{\sigma}$  : Matriz de la tensión para cualquier punto del elemento.
- $\mathbf{D}$  : Matriz de elasticidad, contiene las propiedades del material.
- $\boldsymbol{\varepsilon}_0$  : Deformaciones iniciales debido a cristalizaciones, cambios de temperatura.
- $\boldsymbol{\sigma}_0$  : Tensiones iniciales residuales.

Para una analogía más útil se utilizará nuevamente la teoría de las elasticidades, donde se considera ahora la tensión en sus tres componentes (Zienkiewicz, 2007, pág. 29).

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} \quad [2.13]$$

Donde:

- $\boldsymbol{\sigma}$  : Matriz de la tensión para cualquier punto del elemento
- $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$  : Componentes de la tensión (longitudinal).
- $\tau_{xy}$  : Componente de la tensión (cortante).

La matriz  $\mathbf{D}$  queda definida por (Zienkiewicz, 2007, pág. 29)

$$[\mathbf{D}] = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1-\nu)}{2} \end{bmatrix} \quad [2.14]$$

Donde:

- $E$  : Módulo de elasticidad.
- $\nu$  : Módulo de poisson

## CAPÍTULO 3

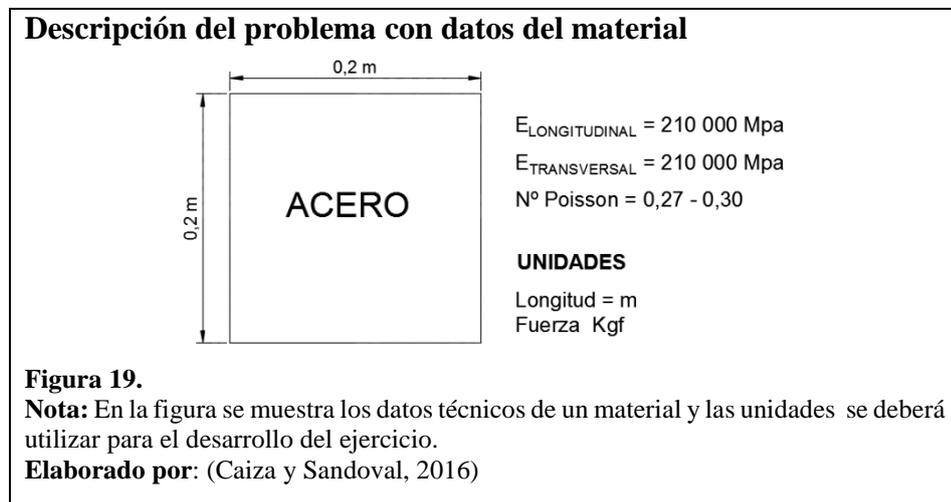
### INTRODUCCIÓN AL ANSYS MECHANICAL MÓDULO APDL

#### 3.1.Desarrollo de un ejercicio en ANSYS módulo APDL tipo “Shell”

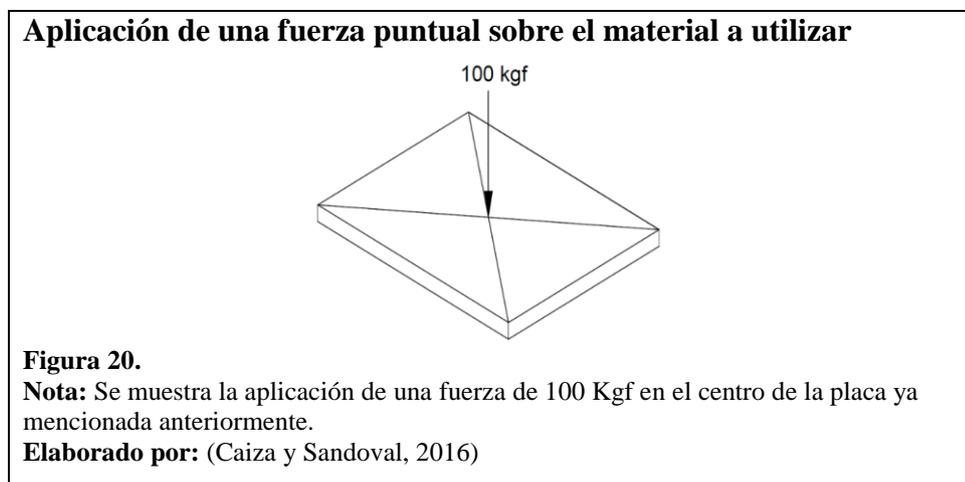
A continuación se describirá un ejercicio práctico en ANSYS APDL.

##### 3.1.1. Descripción del problema

Se simulará las deformaciones y cargas en una placa de  $0,2 \times 0,2 \times 0,008 \text{ mm}$ , de acero, con una carga puntual de 100 kgf.

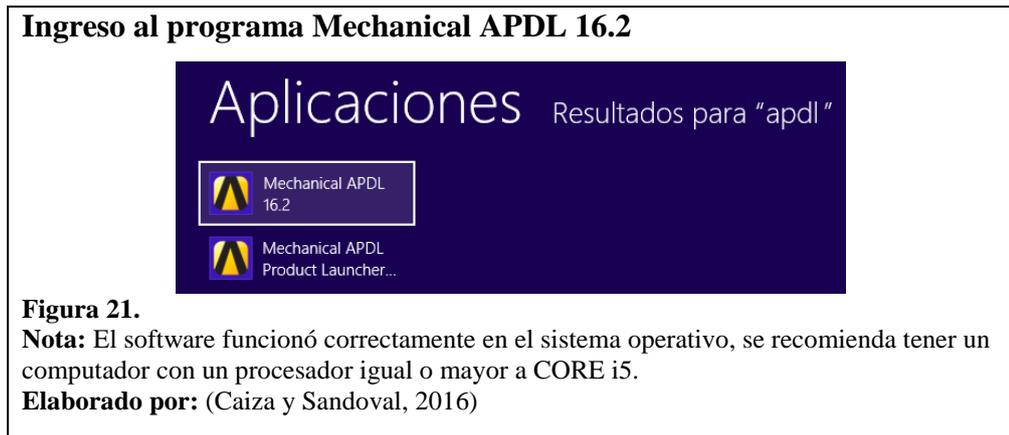


En la figura 20 se detalla la aplicación de una fuerza puntual sobre el material para la simulación.



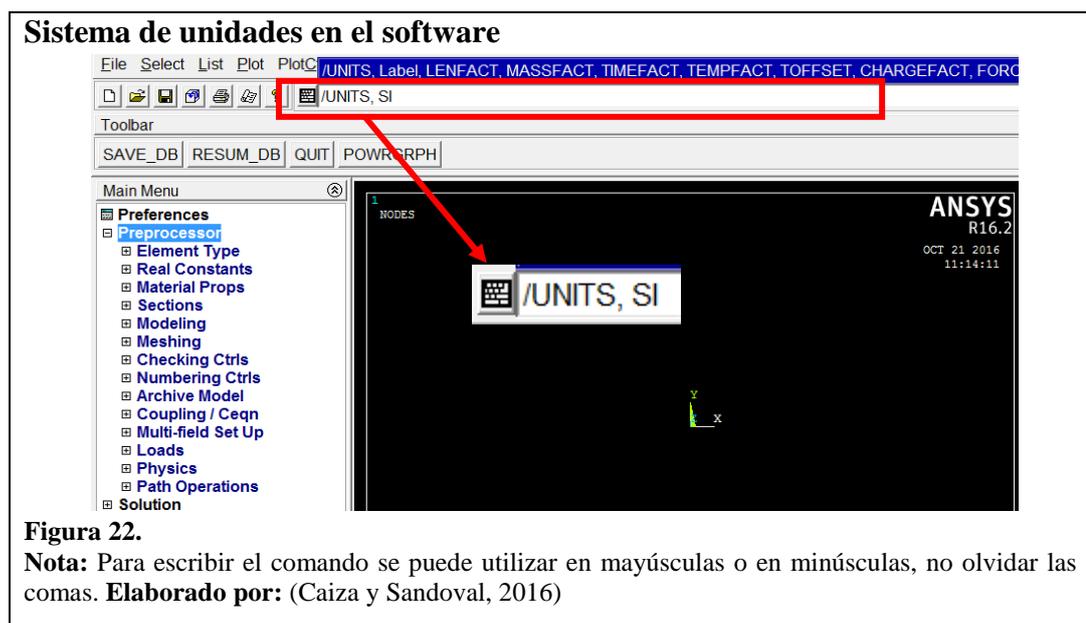
### 3.1.2. Desarrollo del ejercicio planteado

Para el desarrollo del ejercicio propuesto se instaló el software ANSYS versión 16.2 en un computador con sistema operativo *Windows 8*, se utilizará la plataforma o el módulo *Mechanical APDL 16.2* como se muestra en la figura 21.



Una vez abierto el software, se deberá colocar las unidades en las cuales se desea trabajar, en este caso se utilizará unidades en el sistema internacional (SI), para ello se escribe en el panel de comandos la siguiente secuencia:

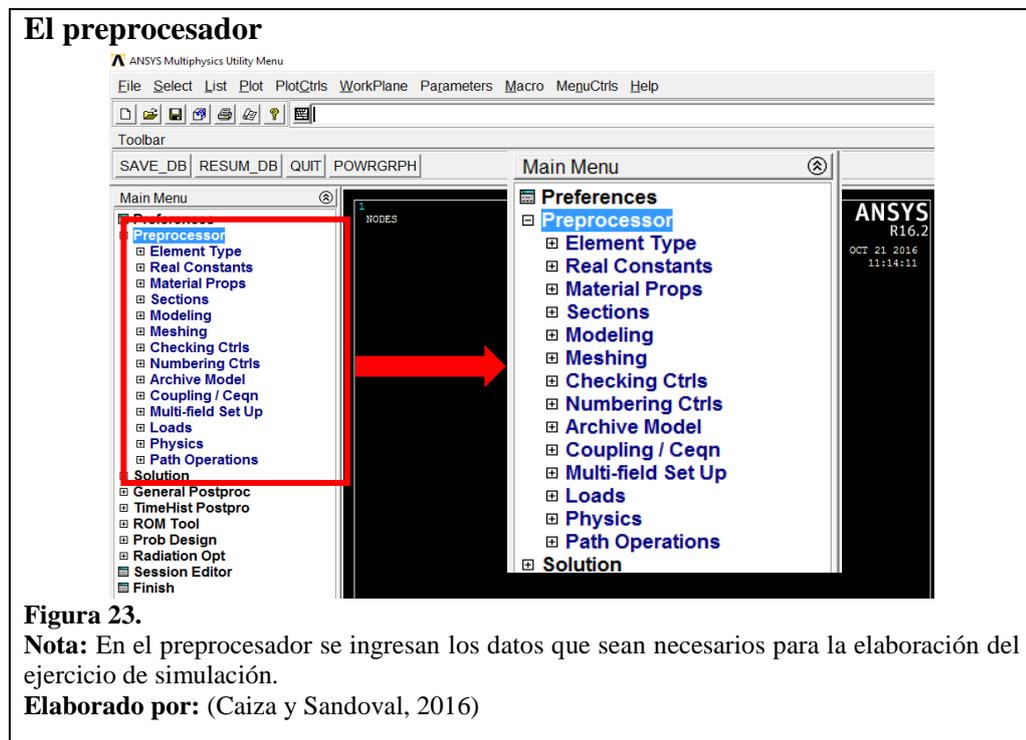
- /UNITS, SI



Se abre la pestaña del Preprocesador que se encuentra en el *Main Menú* que está ubicado en el lado izquierdo de la pantalla, el preprocesador es donde se especifican configuraciones previas al modelado para las piezas, es decir, se detallan los tipos de elementos, propiedades del material, divisiones de malla, constantes, modelamiento, entre otras.

“Es importante destacar que el ejercicio será tratado como material isotrópico, es decir, las propiedades mecánicas de rigidez, elasticidad y coeficiente de poisson variarán por igual en todas las direcciones” (Rodríguez & González, 2012, pág. 31)

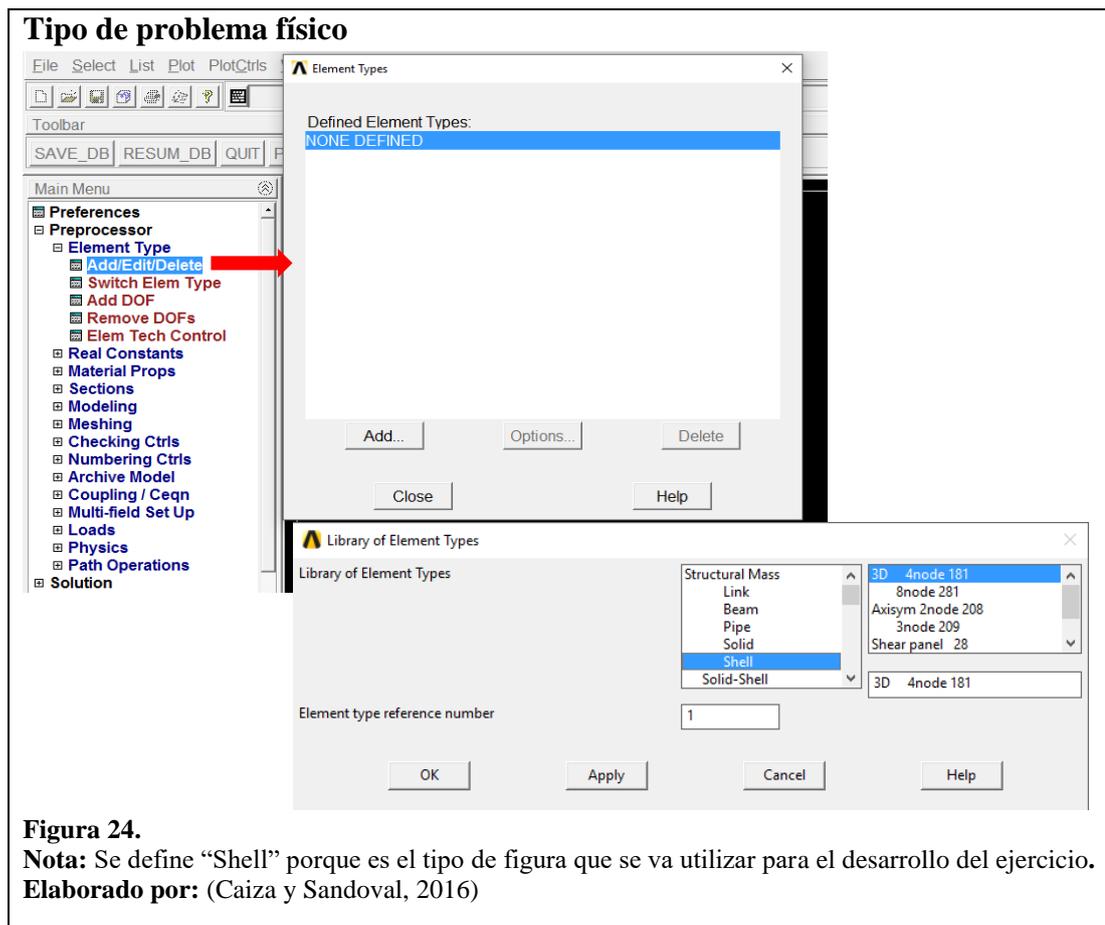
“*Coefficiente de Poisson*: Es la relación existente entre la deformación longitudinal y la transversal, así mismo el área es afectada proporcionalmente” (Rodríguez & González, 2012, pág. 132)



Una vez en el preprocesador, se procede con los siguientes pasos:

Element type, Add/Edit/Delete, Add, Shell, OK, Close

- *Element type*: Se escoge un elemento viga, tubo, sólido, placa según el tipo de aplicación: estructural, de fluidos, termodinámico, entre otras, y con un número de nodos preestablecido.



**Figura 24.**

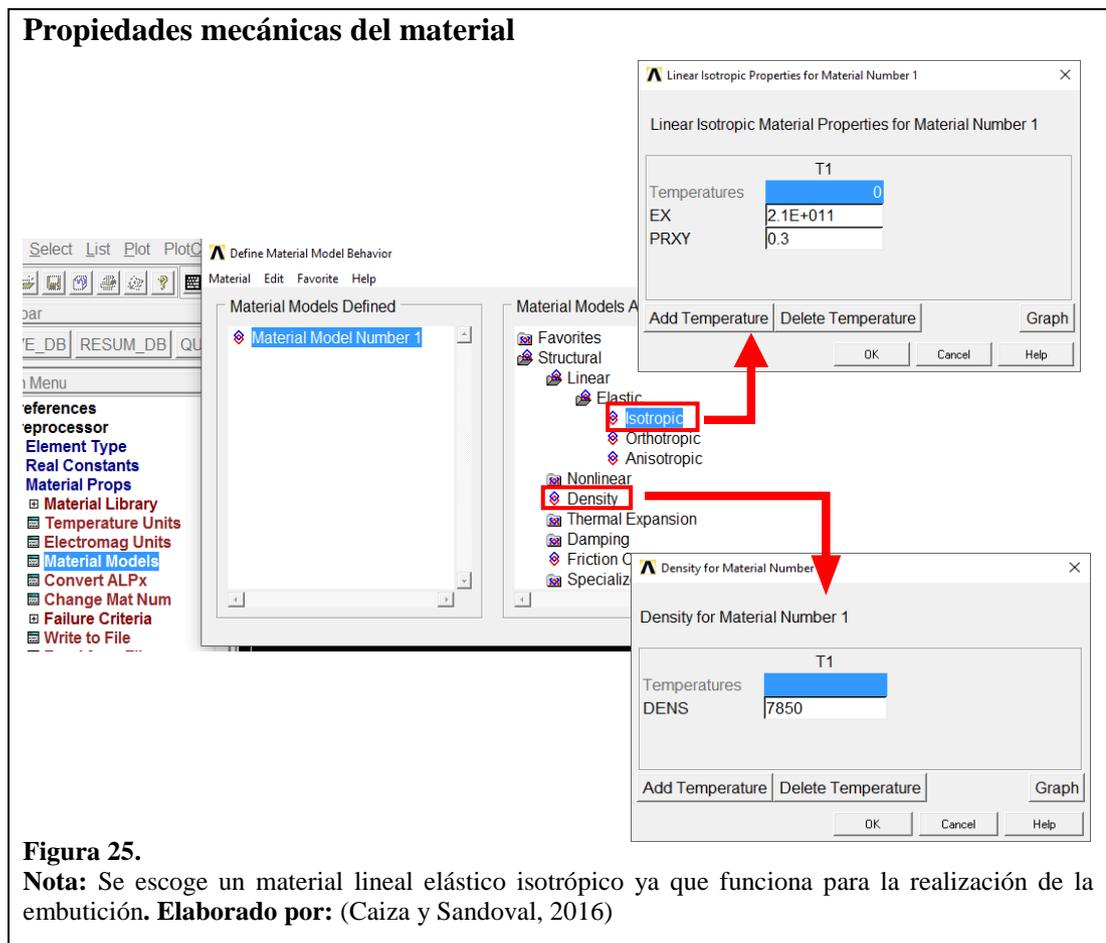
**Nota:** Se define “Shell” porque es el tipo de figura que se va utilizar para el desarrollo del ejercicio.  
**Elaborado por:** (Caiza y Sandoval, 2016)

Luego se definen las características mecánicas, en este caso módulos de elasticidad y constantes de poisson. De igual manera se define la densidad del material en este caso acero.

Material Props, Material Models, Material Model Number 1, Structural, Linear, Elastic, Isotropic

“Módulo de Elasticidad: Es una constante que determina el comportamiento de un material elástico según la dirección en donde se aplique una fuerza” (Rodríguez & González, 2012, pág. 25)

El módulo de elasticidad para el ejercicio es 210000 MPa, pero en la ventana de diálogo se debe colocar “2.1E+011”, de igual manera la densidad del material para el acero es 7850 kg/m<sup>3</sup>, en el cuadro de diálogo se colocará 7850.



Luego se definen las capas que utilizará el software para simular el comportamiento de las fibras internas al momento de la deformación del material. Una característica de ANSYS:

Sections, Shell, Lay-up, Add/Edit.

- *Sections*: Pestaña donde se encuentran parámetros para definir secciones donde se desarrollarán esfuerzos pre tensionados.

En este cuadro didáctico se colocó 4 tipos de secciones con el espesor deseado en este caso de 0,008 m. Además cada sección es orientada a 0°, 45°, 135° y 180°. Se guarda la modificación creada en la sección de láminas.

**Definición de capas para el material**

Layer	Thickness	Material ID	Orientation	Integration Pts	Pictorial View
4	0.0	1	0.0	3	[Pictorial View]
3	0.002	1	45	3	[Pictorial View]
2	0.002	1	45	3	[Pictorial View]
1	0.002	1	0.0	3	[Pictorial View]

Section Offset: Mid-Plane | User Defined Value: [ ]  
 Section Function: None defined | KCN or Node: Global Cartesian

Buttons: Add Layer, Delete Layer, OK, Cancel, Help

**Figura 26.**  
**Nota:** Se debe colocar en “Global Cartesian” para las orientaciones de las secciones del material.  
**Elaborado por:** (Caiza y Sandoval, 2016)

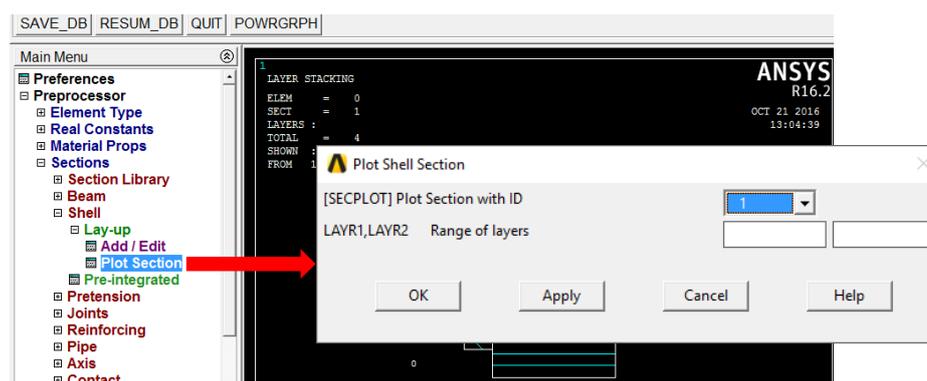
Se procede al ploteo de las capas del material, este parámetro está en la misma sección de Shell:

Sections, Shell, Lay-up, Plot Section, OK

“*Plot Section*: Visualizador donde se muestran los pretensionamientos del material, previamente establecidos”. (ANSYS, 2013, pág. 55)

En la ventana de modelo se visualizarán las 4 secciones que se determinó anteriormente con las orientaciones.

## Ploteo de capas orientas del ejercicio

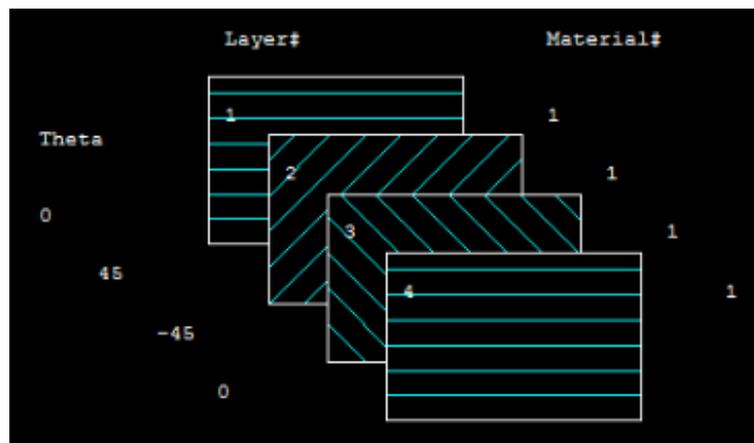


**Figura 27.**

**Nota:** Se busca el número de identidad de la sección del material para la realización del ploteo.

**Elaborado por:** (Caiza y Sandoval, 2016)

## Ploteo de secciones orientadas



**Figura 28.**

**Nota:** En la pantalla principal se ploteo las 4 secciones orientadas del material.

**Elaborado por:** (Caiza y Sandoval, 2016)

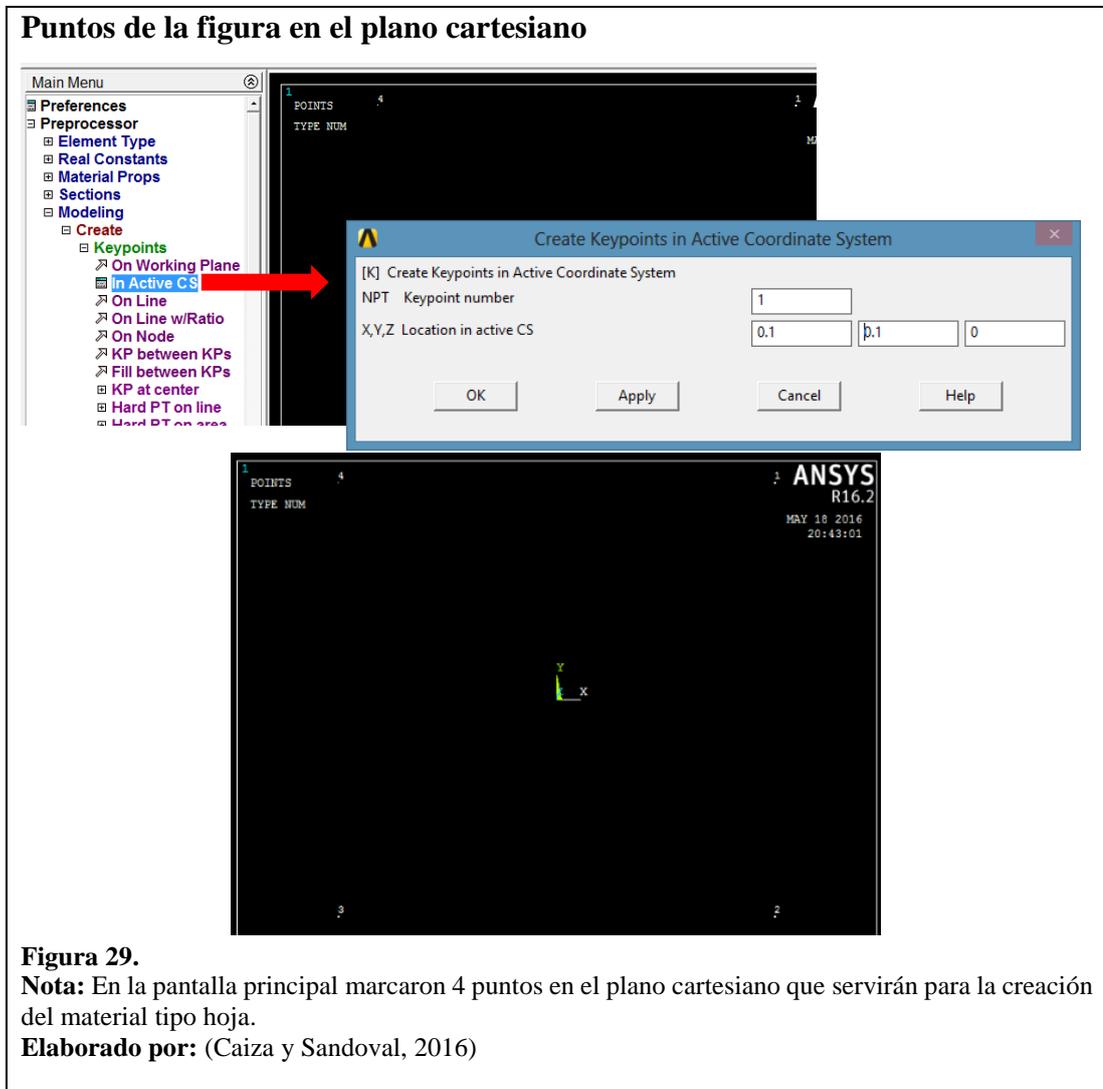
Se colocan los puntos en las esquinas de la pieza creada, su objetivo es para la definición de lugares geométricos en el plano cartesiano de la ventana modelo del software:

Modeling, Create, Keypoints, In Active CS.

- *Modeling*: Define los lugares geométricos en el caso de una dimensión, áreas cuando los cuerpos son de dos dimensiones y volúmenes cuando son de tres.

“Keypoints: Es un método cartesiano donde se definen los puntos en el espacio plano y/o espacial de ANSYS” (ANSYS, 2013, pág. 67).

- *In Active CS*: Plano cartesiano donde se modela la figura deseada.



- *Create*: Menú para la creación de entidades.

- *Straight line*: Genera líneas rectas entre los puntos significativos específicos.

- *Arbitrary*: Menú para la creación de áreas de forma irregular.

Se colocan las líneas y el área de la figura, para la creación de líneas en la ventana modelo es lo siguiente:

Modeling, Create, Lines, Lines, Straight line.

### Definición del contorno por líneas

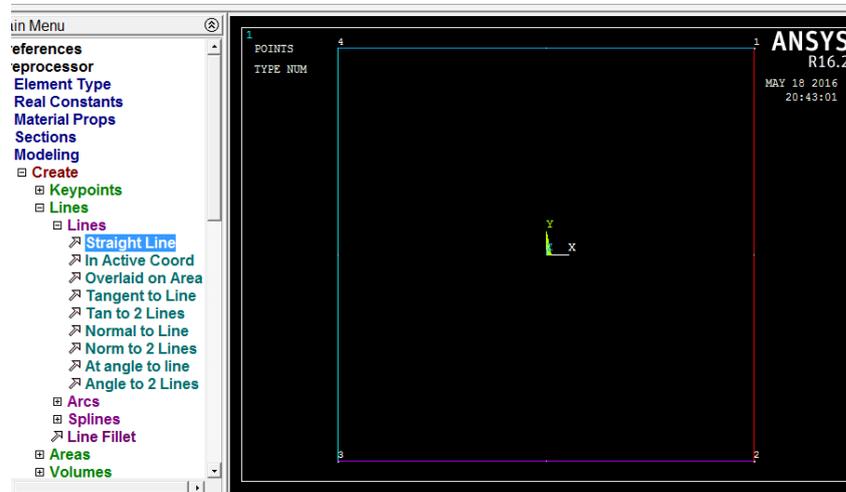


Figura 30.

**Nota:** En la pantalla principal varias líneas que se conectan a través de los puntos ya mencionados creando el contorno del material. **Elaborado por:** (Caiza y Sandoval, 2016)

Para la creación de áreas en la ventana modelo es lo siguiente:

Modeling, Create, Areas, Arbitrary, By lines.

### Definición del área total del material

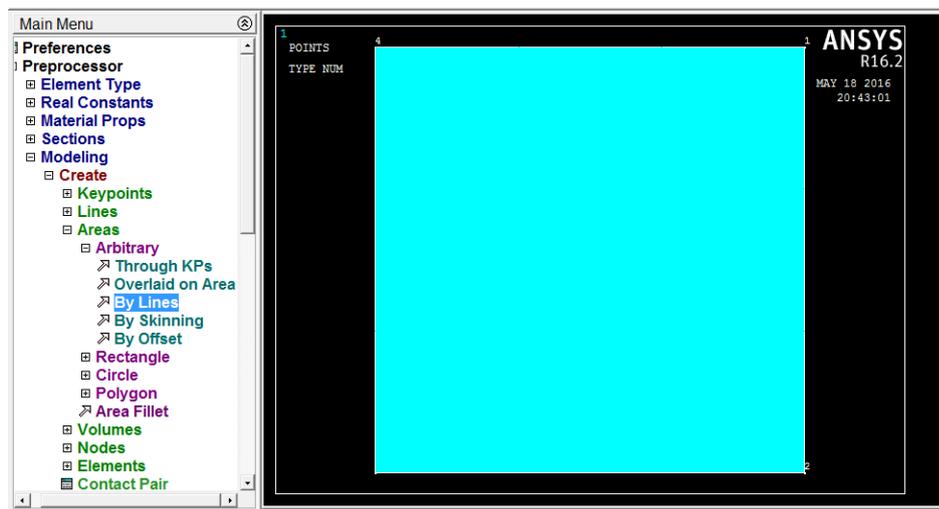


Figura 31.

**Nota:** Se creó el área por medio del contorno que se desarrolló por las líneas de la figura 30. **Elaborado por:** (Caiza y Sandoval, 2016)

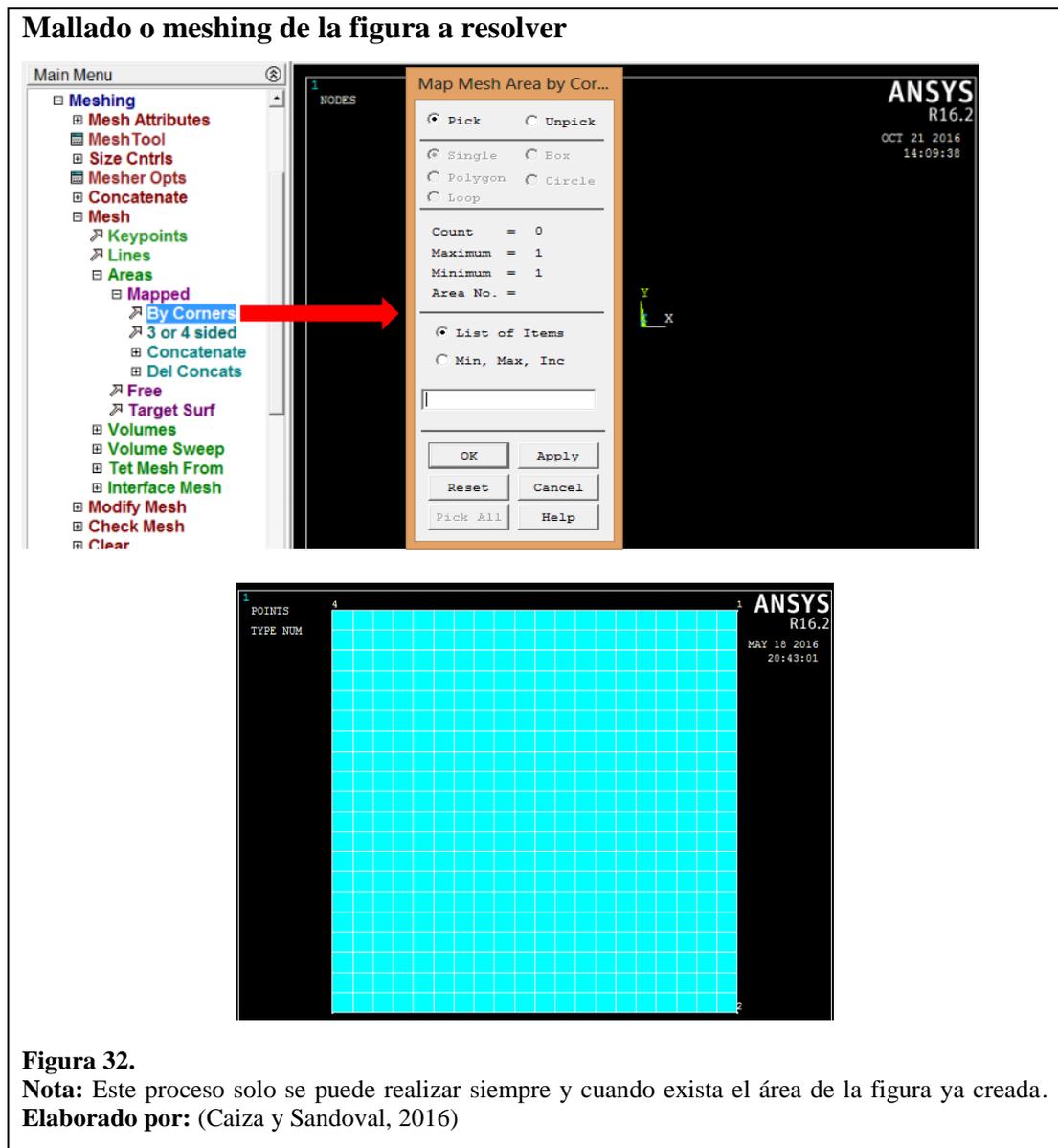
- *Meshing*: Menú para la generación de elementos finitos en el área deseada.

- *Size Cntrls*: Para el uso del control del tamaño de los elementos finitos.

- *Mesh*: Menú para la generación de la malla.

Se utiliza la herramienta *Meshing* para dividir al área en elementos, para ello se da una longitud de mallado.

Meshing, Mesh, Areas, Mapped, By Corners.



El siguiente paso sería definir las restricciones de la placa a analizar, en este proceso se debe definir que no exista ningún desplazamiento en los contornos de la pieza.

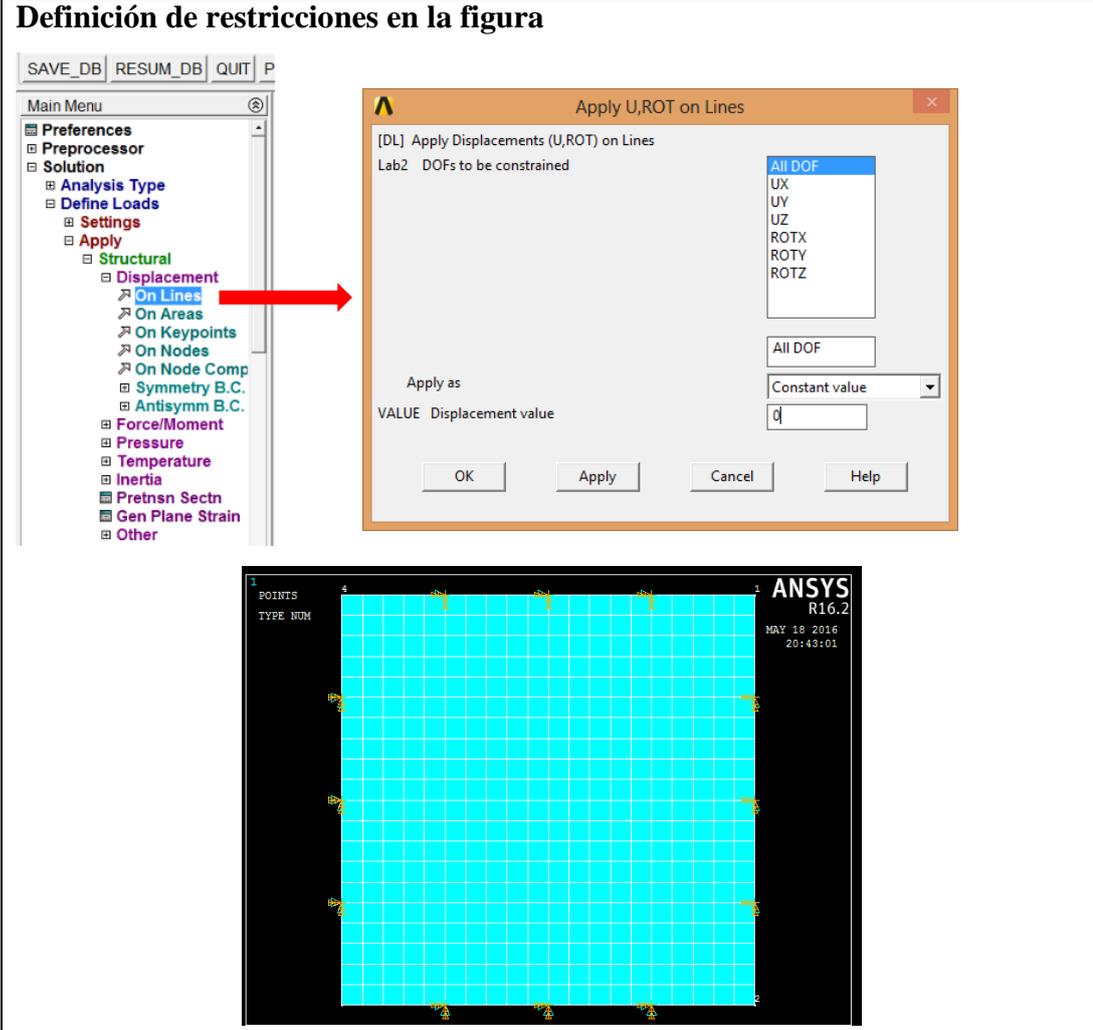
Solution, Define Loads, Apply, Structural, Displacement, On lines.

- *Solution*: Es la entrada al módulo de soluciones.

- *Define Loads*: Lugar donde se definen todo tipo de cargas, presiones, entre otras.

- *Displacement*: Aquí se definen las restricciones al movimiento y rotación en los ejes.

### Definición de restricciones en la figura



The figure illustrates the process of defining constraints in ANSYS. It shows the software interface with the 'Apply U,ROT on Lines' dialog box open. The dialog box is titled 'Apply U,ROT on Lines' and contains the following elements:

- Buttons: SAVE\_DB, RESUM\_DB, QUIT, P
- Main Menu: Preferences, Preprocessor, Solution
- Solution Menu: Analysis Type, Define Loads, Settings, Apply, Structural, Displacement, On Lines, On Areas, On Keypoints, On Nodes, On Node Comp, Symmetry B.C., Antisymm B.C., Force/Moment, Pressure, Temperature, Inertia, Pretnsn Sectn, Gen Plane Strain, Other
- Dialog Box: [DL] Apply Displacements (U,ROT) on Lines, Lab2 DOFs to be constrained, All DOF (UX, UY, UZ, ROTX, ROTY, ROTZ), All DOF, Constant value, VALUE Displacement value, OK, Apply, Cancel, Help

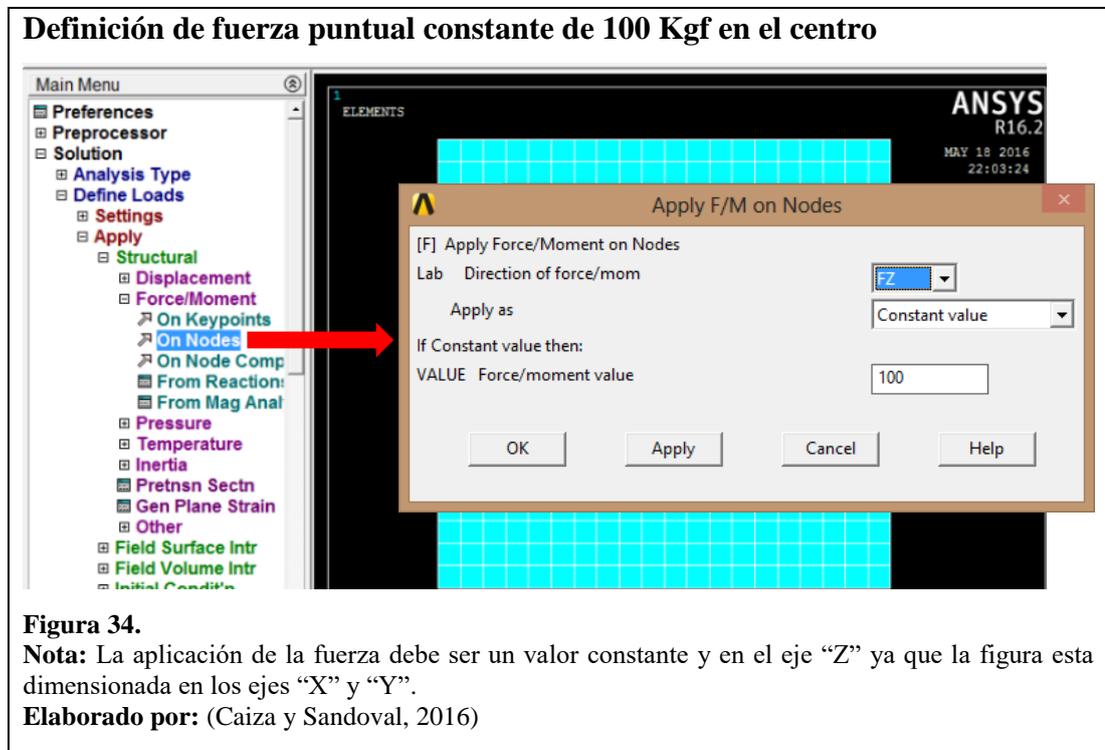
The dialog box is shown with a red arrow pointing to the 'On Lines' option in the Solution menu. Below the dialog box is a screenshot of the ANSYS R16.2 finite element model, showing a grid of nodes and elements with yellow arrows indicating the application of constraints.

**Figura 33.**  
**Nota:** Se define las restricciones del ejercicio con una determinada distancia de separación.  
**Elaborado por:** (Caiza y Sandoval, 2016)

Se define la carga puntual del ejercicio, es decir, 100 kgf que se aplicará en la pieza formada en la ventana modelo.

Solution, Define Loads, Apply, Structural, Force/Moment, On Nodes.

En el visualizador se coloca el valor de la fuerza que se va aplicar en la placa, de igual forma la dirección. Recordar las unidades que se están usando al momento del desarrollo.



Finalmente se resuelve el sistema.

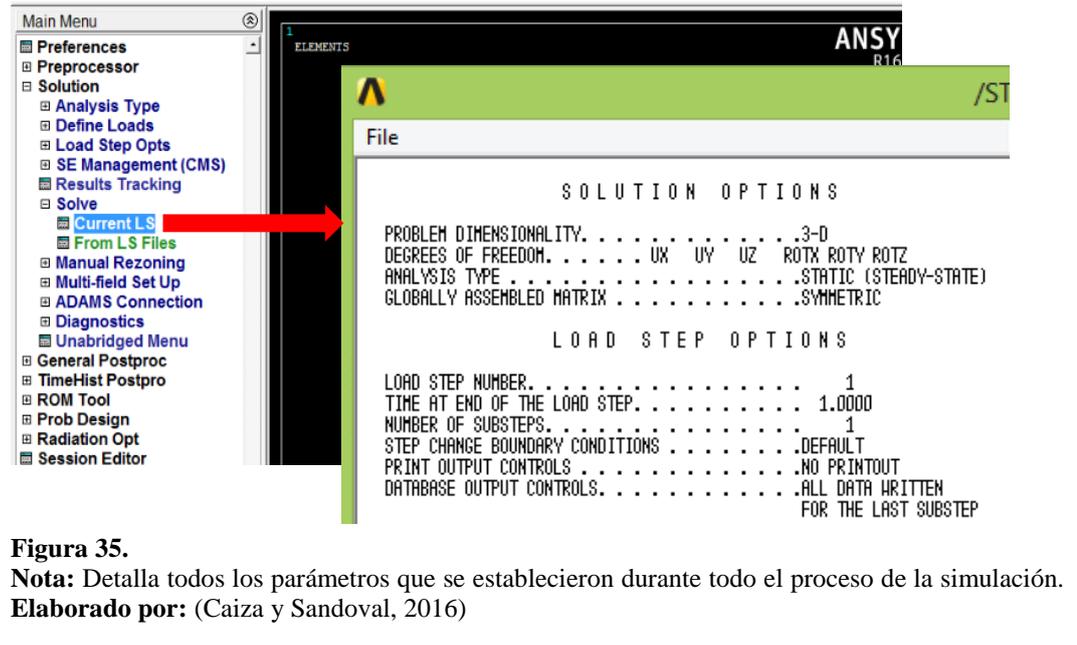
Solution, Solve, Current LS.

El cuadro de diálogo muestra los problemas de dimensionamiento, el tipo de análisis, la matriz ensamblada, entre otros parámetros.

- *Solution*: Módulo para la resolución de los sistemas.

- *Solve*: Indica la resolución de las cargas actuales, o mediante un archivo externo.

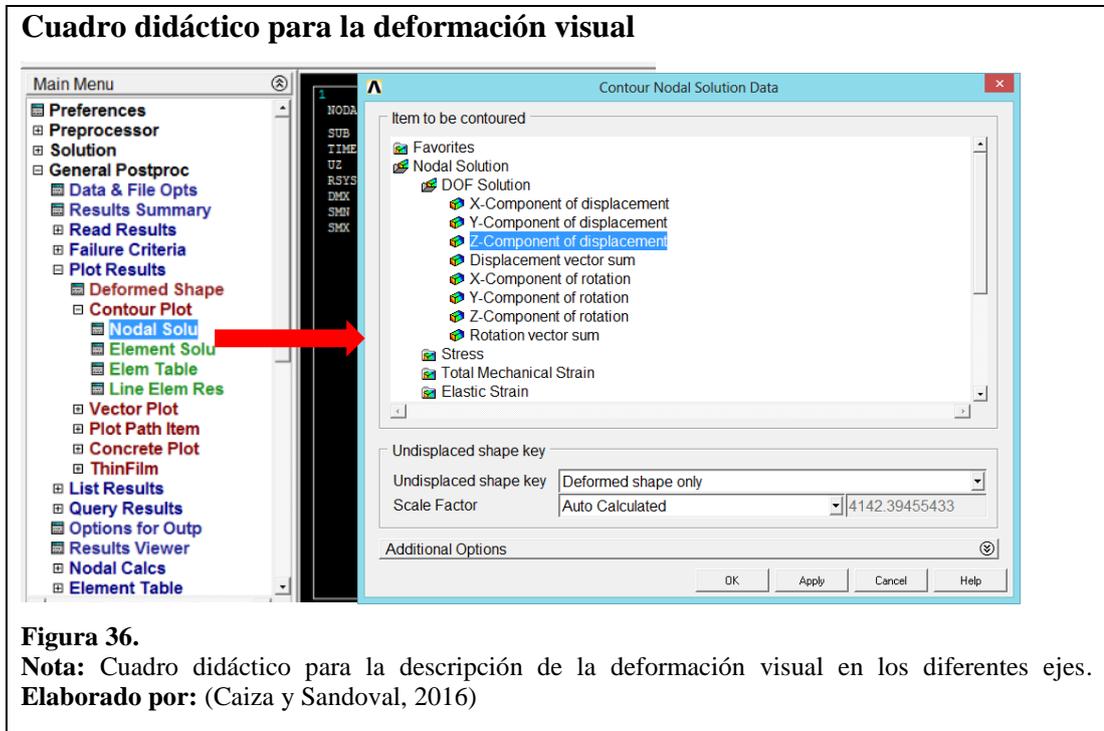
## Solución del problema propuesto



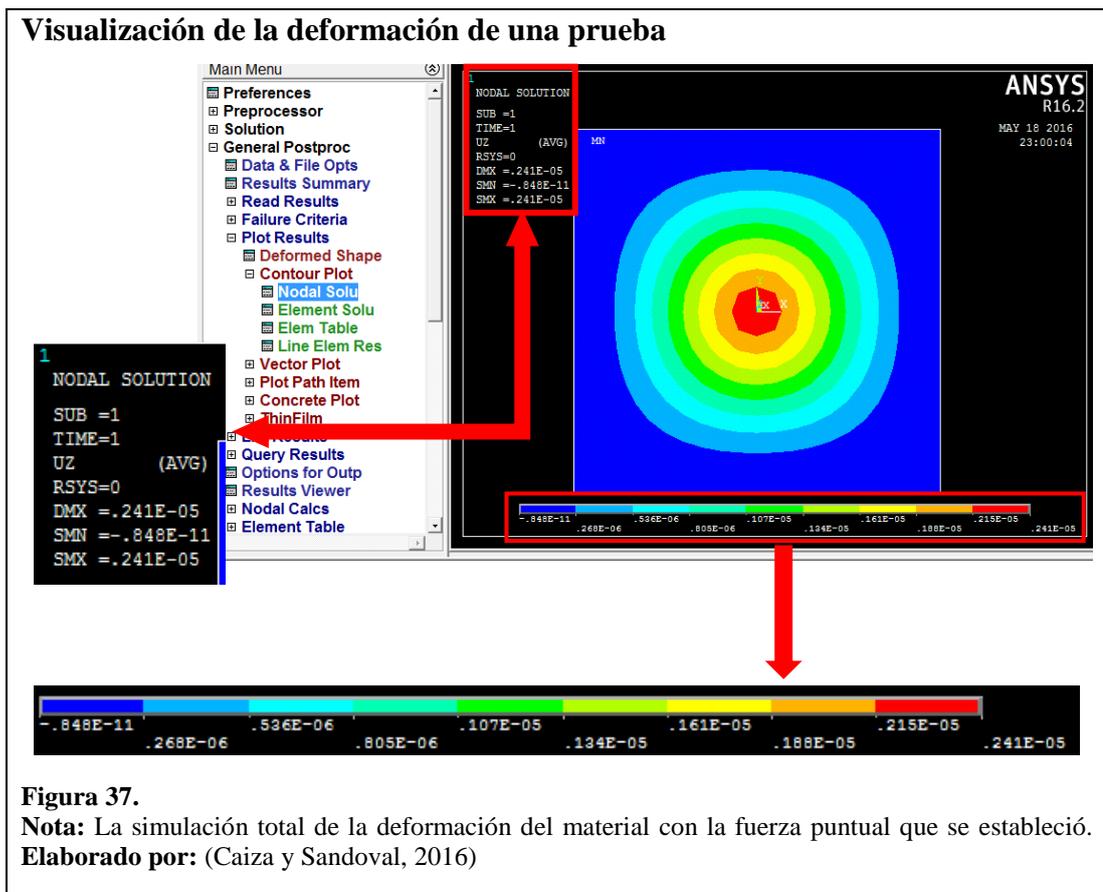
Para poder visualizar la deformación visual, accedemos al post-procesador.

General Postproc, Plot Results, Nodal Solu.

## Cuadro didáctico para la deformación visual



Se puede observar la deformación en diferentes colores, una barra inferior muestra los valores en distintos colores de cómo la deformación está presente en la placa. Para un material de Acero de 210 000 MPa de módulo de elasticidad, a 100 kgf de fuerza puntual en el centro de una placa de 20 centímetros por lado, con módulos de poisson normales, una deformación de 24 centésimas de milímetro este valor es normal y aceptable.



## CAPÍTULO 4

### PROCESO EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DE LA EMBUTICIÓN

#### 4.1. Ensayos de tracción en probetas

Se realizó cinco pruebas de tracción en aluminio ASTM A1200 con un espesor 0,5 milímetros en los laboratorios de análisis de esfuerzos y vibraciones (LAEV) de la Escuela Politécnica Nacional. Las dimensiones de la probeta para los ensayos se desarrollaron según la norma ASTM E8. En el Anexo 3 se detallan los valores de los ensayos de las probetas.

#### Forma de probeta para ensayo de tracción



**Figura 38.**

**Nota:** En la forma (A) se encuentra la probeta sin efectuar el ensayo y en la forma (B) se encuentra la probeta elaborada la prueba de tracción.

**Elaborado por:** (Caiza y Sandoval, 2016)

#### 4.2. Forma y dimensionamiento de la pieza a obtener

La forma de la pieza que se pretende obtener es cilíndrica, para esto se utilizó el troquel de triple efecto de embutido que está ubicado en los laboratorios de procesos de conformado S.A.V. (sin arranque de viruta), de la Universidad Politécnica Salesiana. El punzón que se empleó tiene un diámetro de 48,7 milímetros con una altura máxima de 80 milímetros.

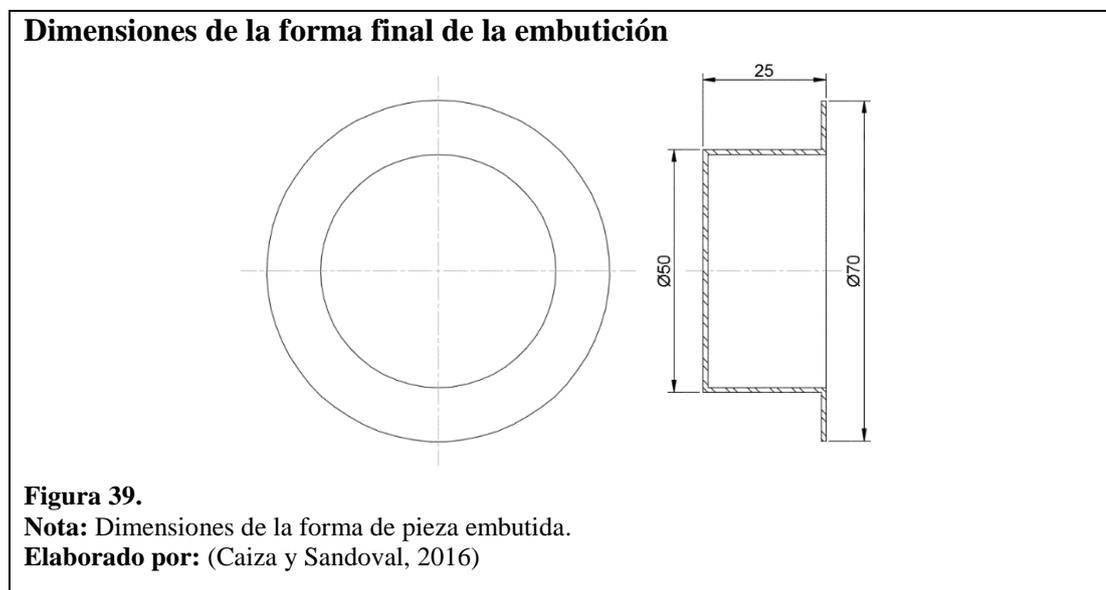
#### 4.2.1. Cálculo del diámetro inicial del material para los ensayos de embutición

Para la obtención de la pieza final embutida como se muestra en la figura 39, se realiza el cálculo con la fórmula del diámetro original que se indica en la Tabla 1.

$$D = \sqrt{dm_2^2 + (4 \times dm_1 \times h)}$$

$$D = \sqrt{70^2 + (4 \times 50 \times 25)}$$

$$D = 99,5 \text{ mm}$$



El diámetro inicial del disco que se debe preparar en la lámina es de 99,5 milímetros. Como se sabe el material a utilizar es aluminio, para distintos cálculos de fuerza de embutición como para la fuerza y presión para el prensachapas, la resistencia a la tensión será un promedio de los resultados de los ensayos del Anexo 3. En el capítulo 1 se describió el procedimiento, paso a paso, de los monogramas de los métodos 3 y 4; para la obtención de la fuerza de embutición como para la fuerza y la presión del prensachapas.

### 4.3. Cálculo de fuerza de embutición

La tabla 4 muestra los valores y las nomenclaturas equivalentes entre los cuatro métodos para las fórmulas.

**Tabla 4.**  
**Datos principales para el cálculo de fuerzas de embutición**

	Método 1	Método 2	Método 3	Método 4	Valor	Unidades
<b>Espesor</b>	t	T	t	t	0,50	mm
<b>Diámetro de forma inicial</b>	$D_b$	$D_o$	D	D	99,5	mm
<b>Diámetro del punzón</b>	$D_p$	$D_p$	-	d	48,7	mm
<b>Diámetro de embutición</b>	-	-	d	-	50,0	mm
<b>Resistencia a la tensión</b>	TS	UTS	-	-	251,09	MPa

Elaborado por: (Caiza y Sandoval, 2016)

#### 4.3.1. Método 1

$$F = \pi \times D_p \times t \times (TS) \times \left( \frac{D_b}{D_p} - 0,7 \right)$$

La fuerza de embutición es:  $F = 25798,44 \text{ N}$   
 $F = 2632,49 \text{ kgf}$

#### 4.3.2. Método 2

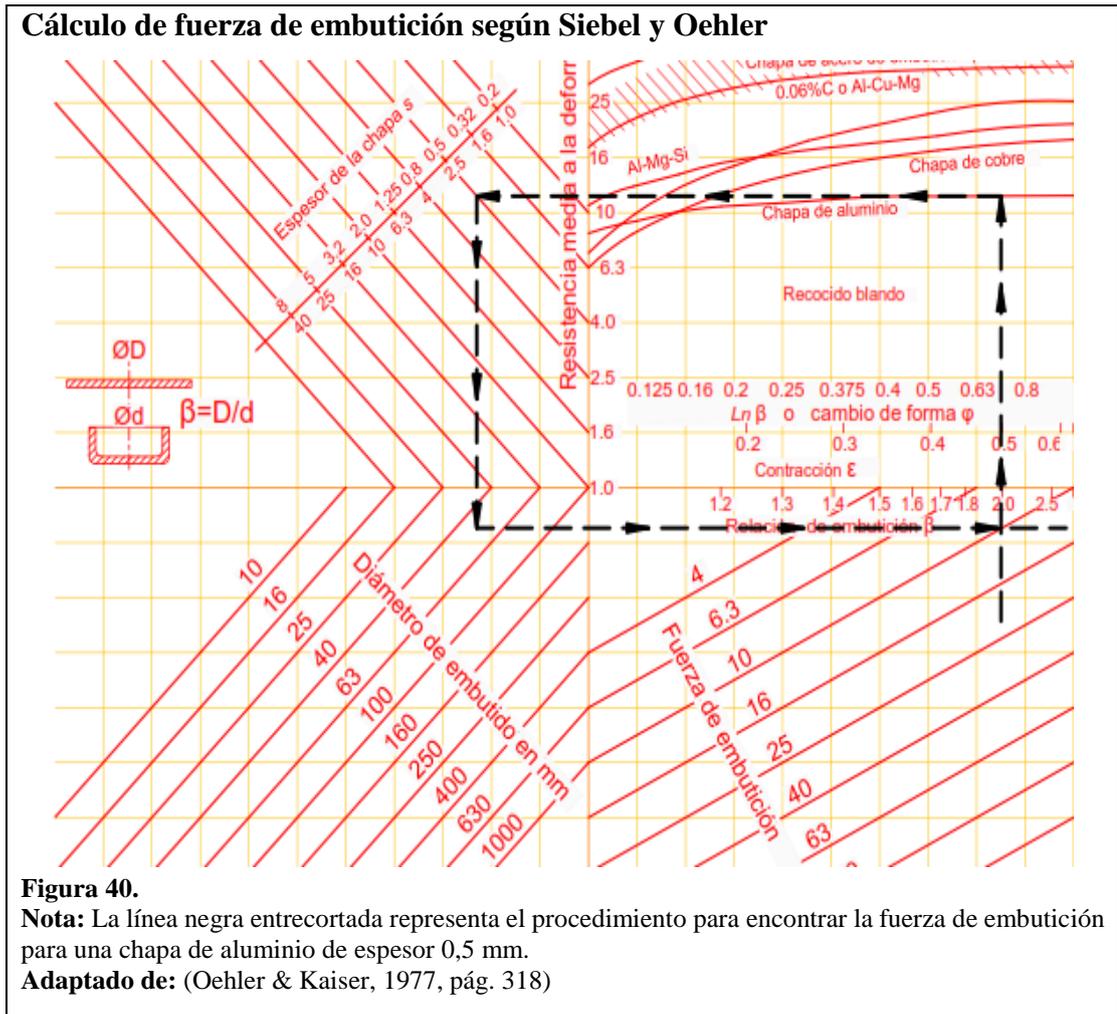
$$F_{\text{máx}} = \pi \times D_p \times T \times (UTS) \times \left( \frac{D_o}{D_p} - 0,7 \right)$$

La fuerza de embutición es:  $F_{\text{máx}} = 25798,44 \text{ N}$   
 $F_{\text{máx}} = 2632,49 \text{ kgf}$

### 4.3.3. Método 3

La fuerza de embutición en el diagrama esta en kN, los datos se expresan a continuación para la relación de embutición:

$$\beta = \frac{D}{d} \quad \beta = \frac{99,5}{50} \quad \beta = 1,99$$



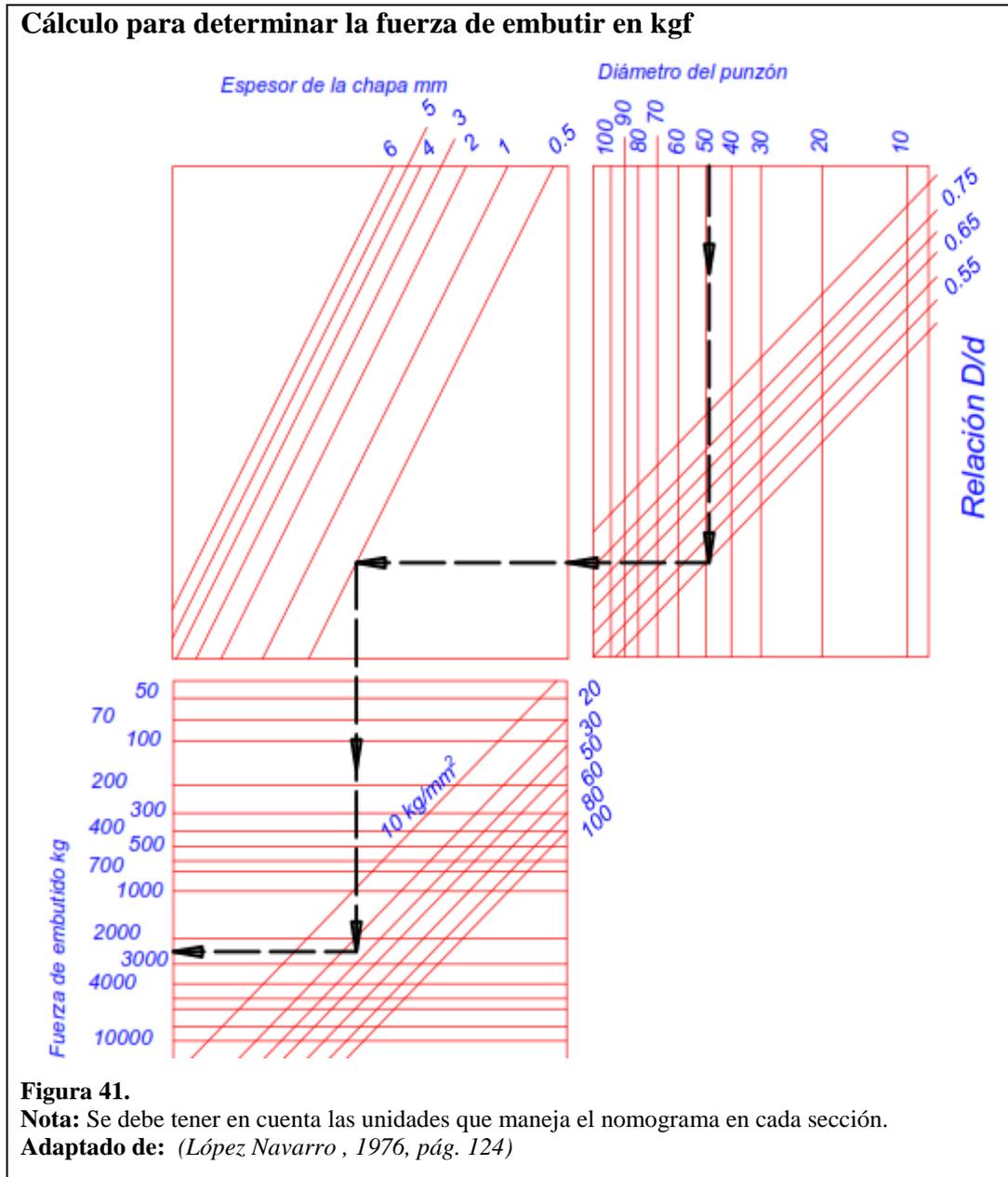
Según el gráfico y la apreciación se obtiene una fuerza de embutición de 10 kN, se debe transformar en kilogramos fuerza para hacer una comparación con los otros métodos.

$$\text{Fuerza de embutición} = 1020,44 \text{ kgf}$$

#### 4.3.4. Método 4

La fuerza de embutición, en el diagrama está en kgf, es decir está representada con una línea negra entrecortada. La relación de diámetros se expresa a continuación:

$$\text{Relación de diámetros} = \frac{d}{D} \quad \alpha = \frac{48,7}{99,5} \quad \alpha = 0,49$$



Según el diagrama y la apreciación se obtiene una fuerza de embutición de 2500 kgf.

#### 4.4. Cálculo de fuerza para prensachapas

La tabla 5 muestra los valores y las nomenclaturas equivalentes entre los cuatro métodos para las fórmulas.

**Tabla 5.**  
**Datos principales para el cálculo de fuerzas en el prensachapas**

	Método 1	Método 2	Método 3	Método 4	Valor	Unidades
Esesor	t	t	T	t	0,50	mm
Diámetro de forma inicial	D <sub>b</sub>	D	D	D	99,5	mm
Diámetro del punzón	D <sub>p</sub>	-	-	-	48,7	mm
Diámetro de embutición	-	d	d	d	50,0	mm
Resistencia a la fluencia	Y	-	-	-	105	MPa
Radio de esquina del punzón	R <sub>d</sub>	-	-	r	2	mm

Elaborado por: (Caiza y Sandoval, 2016)

##### 4.4.1. Método 1

$$F_h = 0,015 \times Y \times \frac{\pi}{4} \times [D_b^2 - (D_p + 2.2t + 2R_d)^2]$$

La fuerza para el prensachapas es:  $F_h = 8666,2 \text{ N}$   
 $F_h = 884,31 \text{ kgf}$

##### 4.4.2. Método 2

Para el cálculo por este método la presión específica para el aluminio que se utiliza es

de  $p = 10 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$

$$P = \frac{\pi}{4} * (D^2 - d^2) * p$$

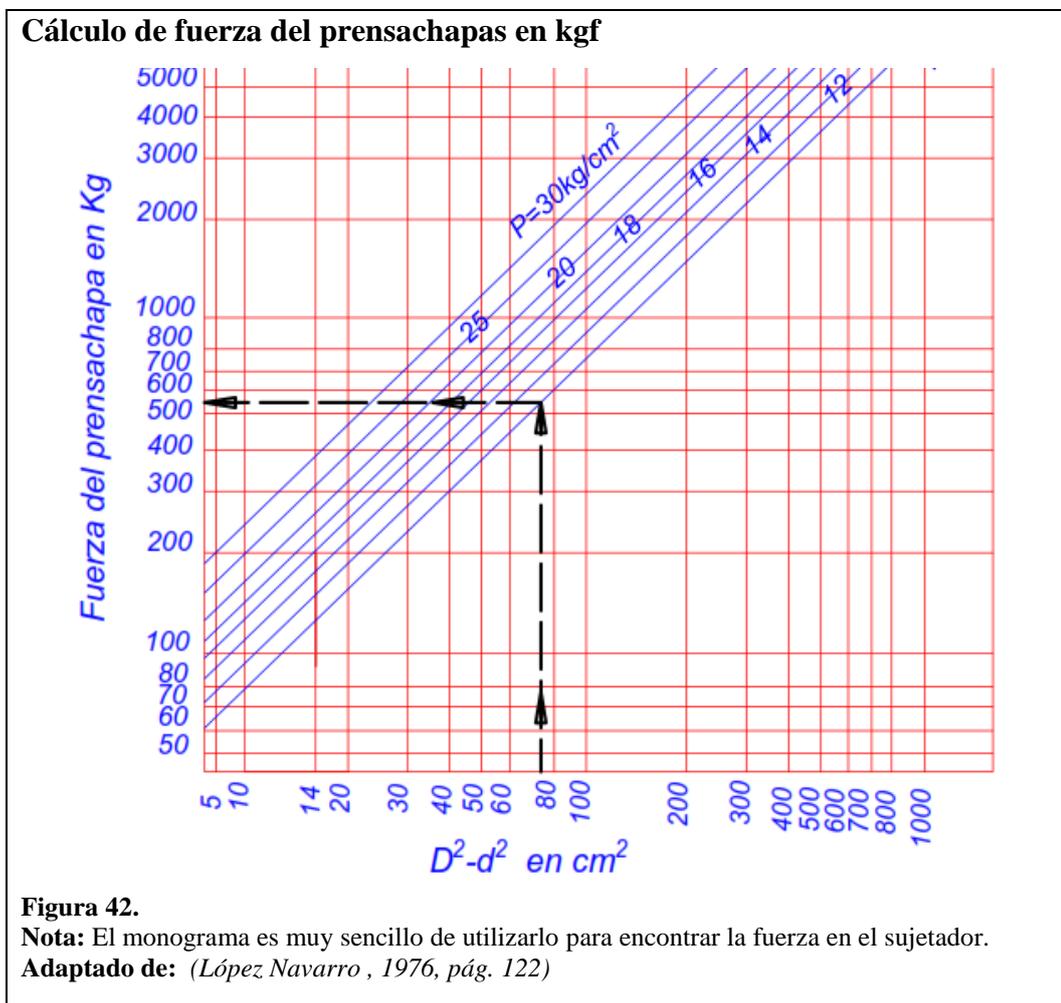
La fuerza para el prensachapas es:  $P = 581,21 \text{ kgf}$

#### 4.4.3. Método 3

Para este método las unidades para la relación de diámetros son en centímetros. La línea negra entrecortada representa el procedimiento para la obtención de la fuerza para el prensachapas, la presión para el aluminio es de  $10 \text{ kg/cm}^2$

$$\text{relación} = D^2 - d^2$$

$$\gamma = 9,95^2 - 5,0^2 \quad \gamma = 74 \text{ cm}^2$$



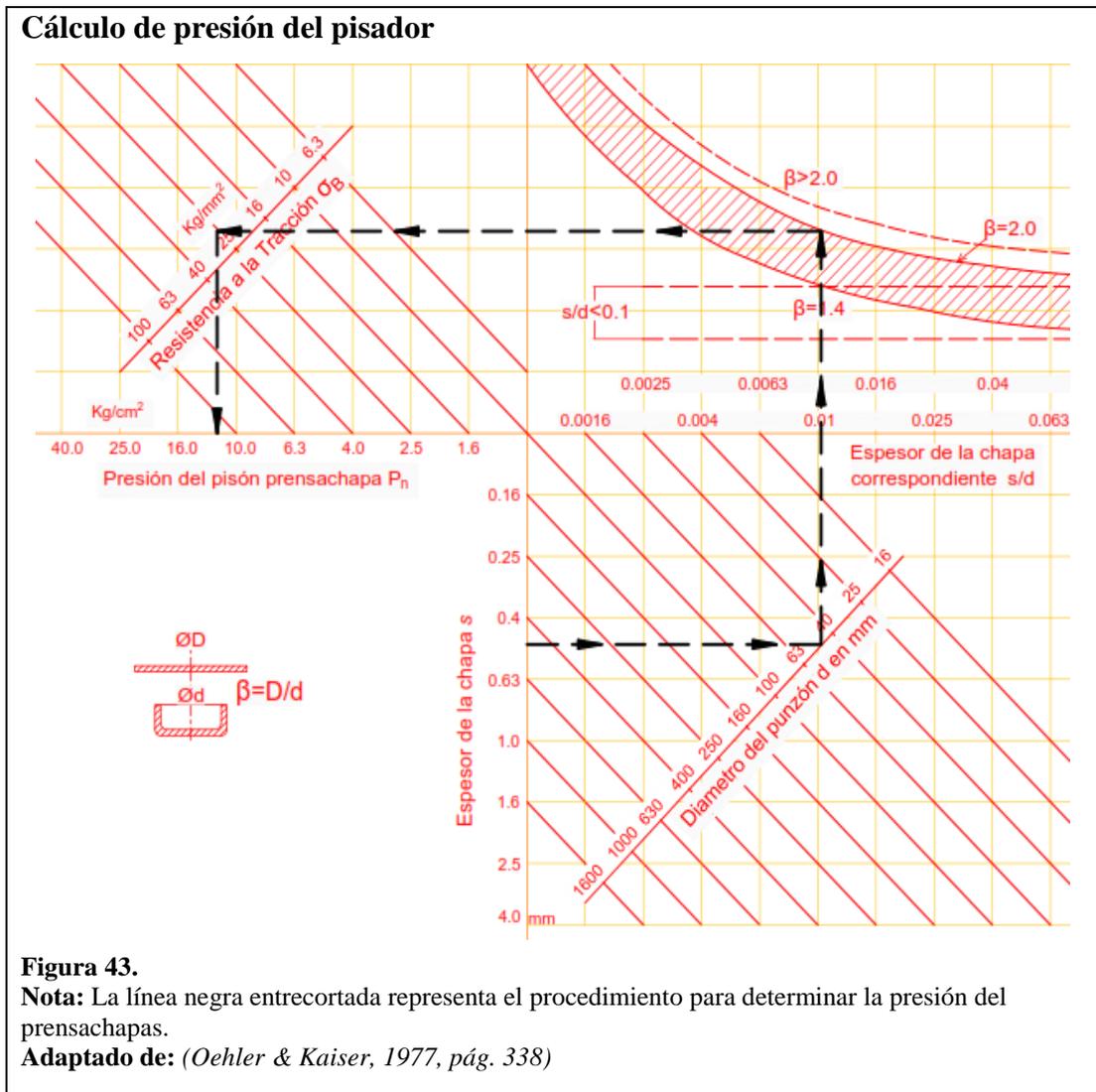
Según el diagrama y la apreciación se obtiene una fuerza de embutición de 550 kgf.

#### 4.4.4. Método 4

La presión del prensachapas en el monograma está en unidades [kgf/cm<sup>2</sup>], los datos se expresan a continuación para la relación de embutición:

$$\beta = \frac{D}{d} \quad \beta = \frac{99,5}{50}$$

$$\beta = 1,99$$



Presión en prensachapas:  $p_n = 12 \frac{\text{kgf}}{\text{cm}^2}$

$$P_n = p_n \times \frac{\pi}{4} \times [D^2 - (d + 2 \times r)^2]$$

La fuerza para el prensachapas es:  $P_n = 671,32$  kgf

A continuación se muestra en la tabla 6, los datos de las fuerzas para la embutición y del prensachapas obtenidas por los métodos analíticos y los monogramas; también se escoge las fuerzas para el desarrollo de las pruebas de embutición en la máquina de procesos de conformado.

**Tabla 6.**

**Tabla de fuerzas para el punzón y prensapachas**

<b>TABLA DE FUERZAS</b>			
<b>PUNZÓN</b>		<b>PRENSACHAPAS</b>	
Método 1	2632,49 [kgf]	Método 1	884,31 [kgf]
Método 2	2632,49 [kgf]	Método 2	581,21 [kgf]
Método 3	1020,44 [kgf]	Método 3	550 [kgf]
Método 4	2500 [kgf]	Método 4	671,32 [kgf]
<b>UTILIZADO</b>	<b>1020,44 [kgf]</b>	<b>UTILIZADO</b>	<b>884,31 [kgf]</b>
<b>Método 3</b>		<b>Método 1</b>	

**Nota:** Las fuerzas escogidas en la tabla 6 se aproximan a las fuerzas reales manifestadas en el proyecto de la elaboración de un embutido de simple efecto.

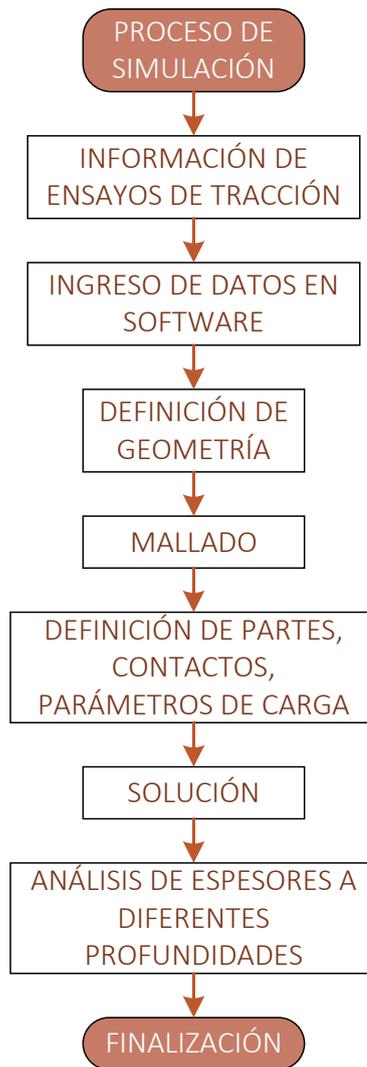
**Elaborado por:** (Caiza y Sandoval, 2016)

#### **4.5.Simulación del comportamiento de la embutición en ANSYS módulo APDL**

##### **4.5.1. Simulación**

A continuación se expone el proceso utilizado en la simulación, para ello se empleó el siguiente diagrama de flujo que se muestra en la figura 44:

### Diagrama de flujo del proceso de simulación



**Figura 44.**  
**Elaborado por:** (Caiza y Sandoval, 2016)

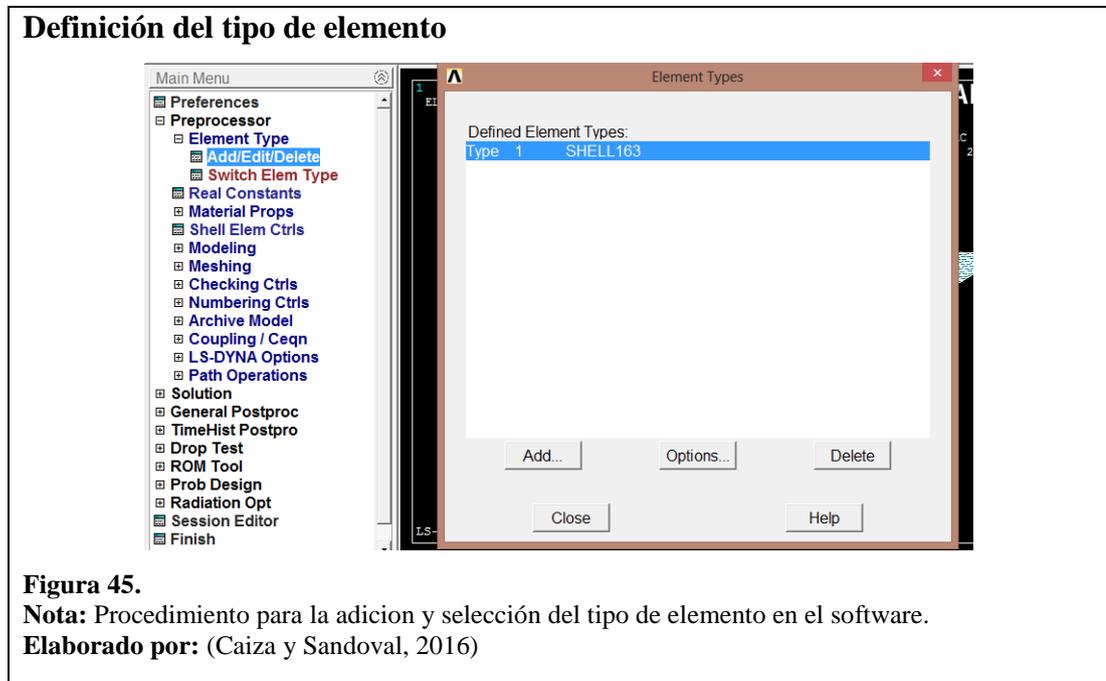
#### 4.5.2. Tipo de elemento

Antes de continuar es necesario aclarar que las órdenes a seguir en el software desde ahora en adelante se llamarán “GUI”, además para la simulación se utilizó las unidades en sistema internacional (SI).

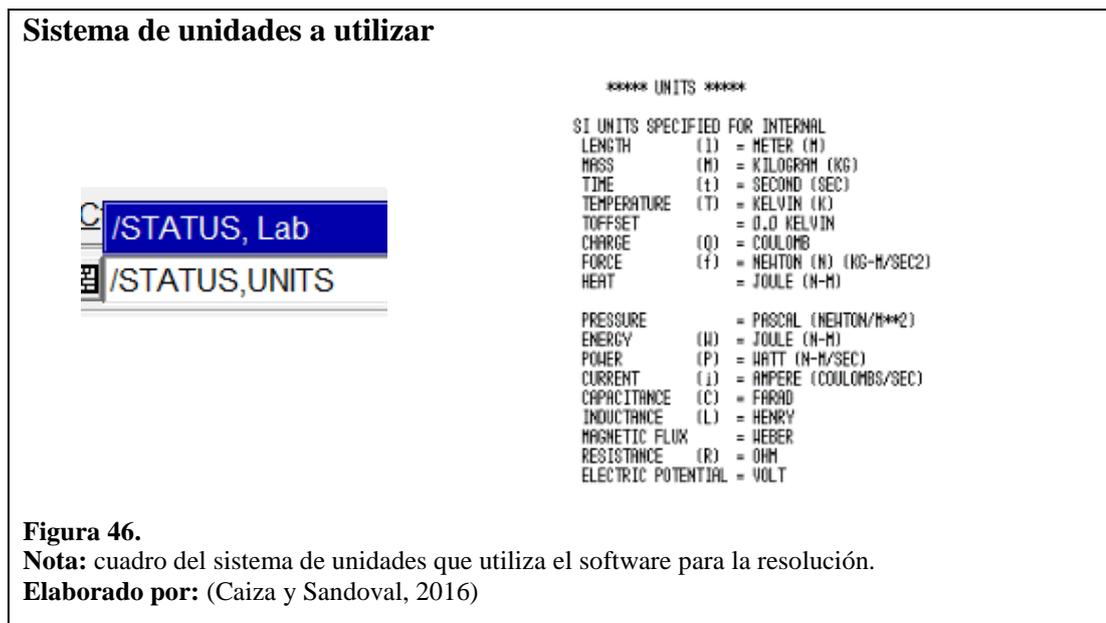
- TIPO DE ELEMENTO: Se refiere a un modelo o sistema que se aproxime al real, en el caso estudiado será tipo placa llamado “SHELL163”.

- SHELL163: Es un tipo de placa de 4 nodos, con 12 grados de libertad, es decir, en traslación, rotación, velocidad y aceleración en los ejes x, y, z.

- GUI (tipo de elemento): PREPROCESSOR, ELEMENT TYPE, SHELL 163.



- GUI (unidades): STATUS, UNITS.



### 4.5.3. Constantes reales

Una constante real es un parámetro que utiliza el programa para determinar el espesor de las placas o Shell, la unidad para las constantes es el metro.

R1= 0,0005; funciona para definir el espesor de la placa o Shell.

R2=0,00001; actúa para la definición del espesor del punzón, la matriz y el prensachapas, el valor debe ser el mínimo ya que sirve para la reducción del tiempo computacional.

- GUI (Constante real): PREPROCESSOR, REAL CONSTANT, ADD/EDIT

**Constantes reales a utilizar, en este caso constante dos para herramientas**

Element Type Reference No. 1		
Shear Factor	SHRF	0
No. of integration pts.	NIP	0
Thickness at node 1	T1	0.0005
Thickness at node 2	T2	0

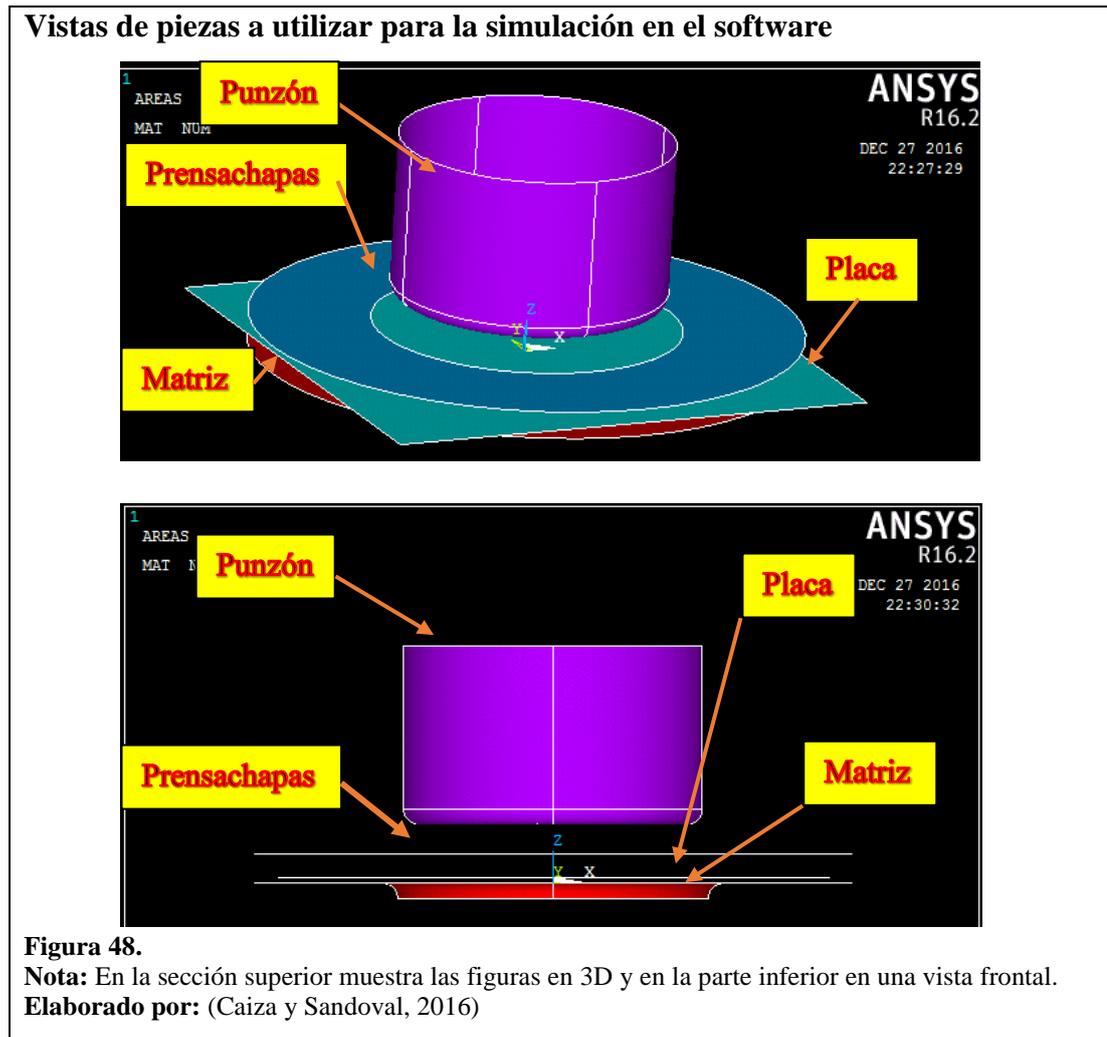
Element Type Reference No. 1		
Shear Factor	SHRF	b
No. of integration pts.	NIP	0
Thickness at node 1	T1	1e-005
Thickness at node 2	T2	0

**Figura 47.**  
**Nota:** El contorno de color rojo define el valor para la constante 1 y el color verde define el valor para la constante 2.  
**Elaborado por:** (Caiza y Sandoval, 2016)

#### 4.5.4. Geometría de la simulación

La simulación constará de 4 piezas que son: el punzón, la matriz, el prensachapas y las placas. Esta última recibirá la fuerza para la deformación.

- GUI (modelado): PREPROCESSOR, MODELING, CREATE.



Todas las figuras de la simulación serán modeladas como ÁREAS del tipo cascarón para aminorar el tiempo computacional en la solución.

Las áreas tipo cascarón representan la geometría de todas las herramientas. La lámina será un área carente de volumen. Esto ayuda al software a disminuir los cálculos por elementos finitos.

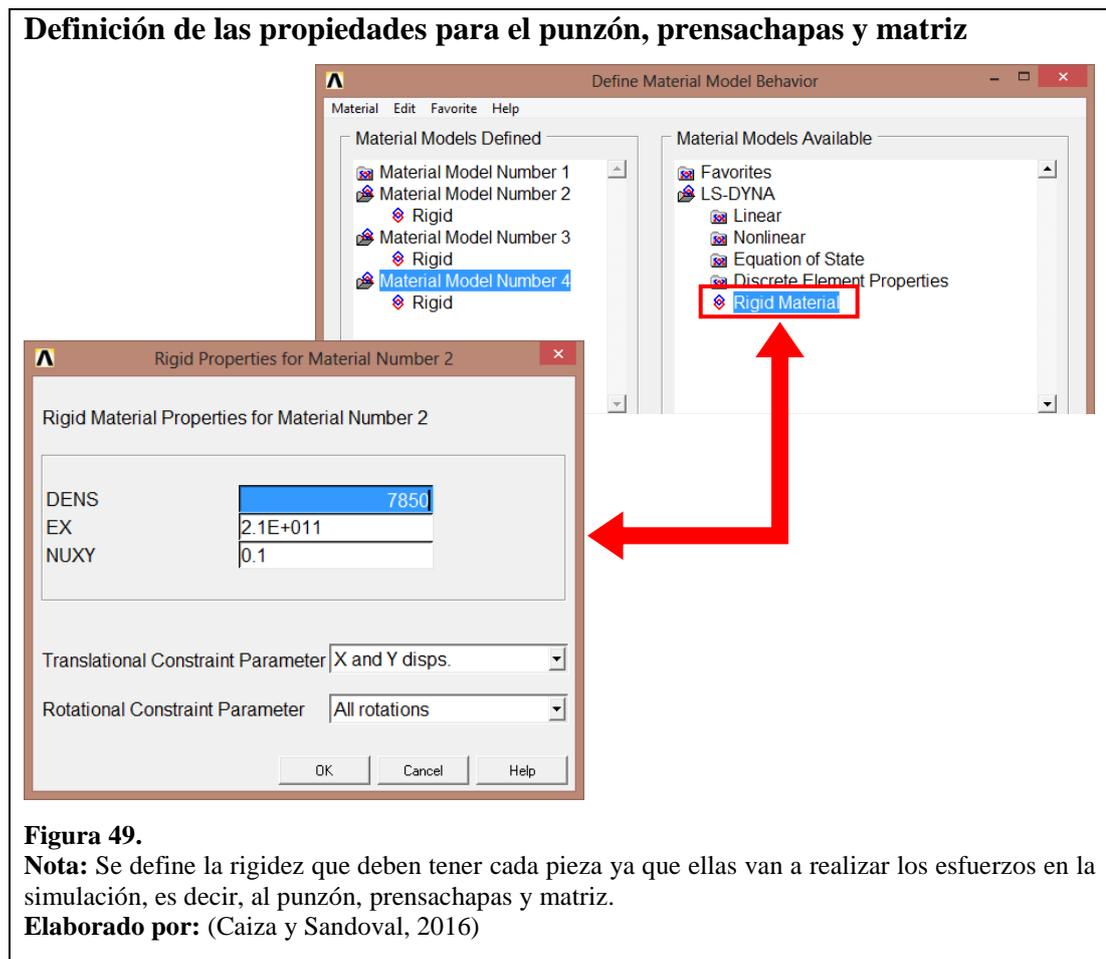
#### 4.5.4.1. Propiedades del material

Se utilizará RIGID SOLID para las tres piezas que en teoría no sufrirán deformación: punzón, prensachapas y matriz.

RIGID SOLID es un modelo de material rígido, a diferencia de los materiales elásticos e inelásticos, no sufrirá deformación alguna durante todo el proceso de embutición, es perfecto para el punzón, prensachapas y matriz.

Es necesario aclarar que mientras RIGID SOLID es un modelo de comportamiento del material, el área tipo cascarón es simplemente la geometría independientemente del tipo de material.

- GUI: PREPROCESSOR, MAT PROPERTIES, LSDYNA, RIGID SOLID.

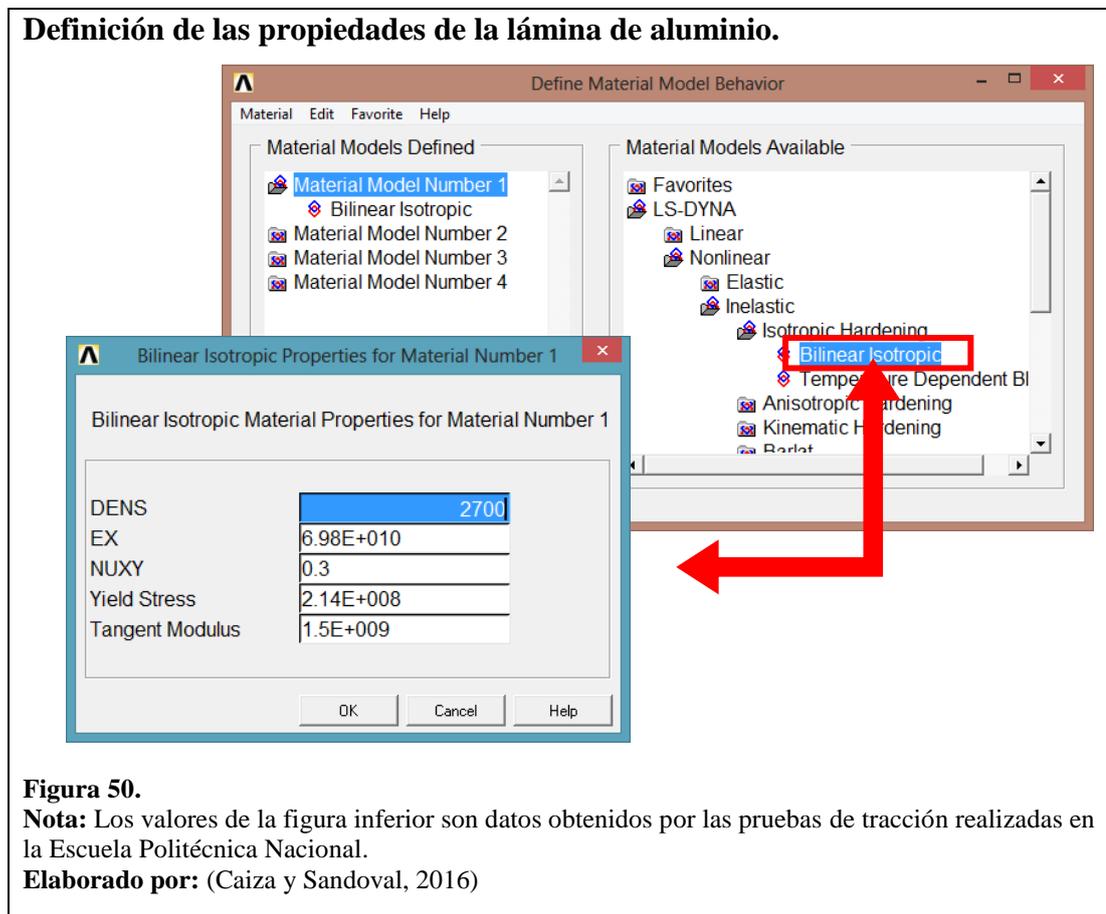


Se restringirán los movimientos a las siguientes piezas:

- a) Punzón: All Rotations, X e Y.
- b) Matriz: All Rotations, All Displacements.
- c) Prensachapas: All Rotations, X e Y.

Se utilizará BILINEAR ISOTROPIC como comportamiento para la placa, según los manuales es ideal para las embuticiones profundas de los diferentes materiales.

- GUI: PREPROCESSOR, MAT PROPERTIES, LSDYNA, NONLINEAR, INELASTIC, ISOTROPIC HARDENING, BILINEAR ISOTROPIC.



El valor del módulo de Young es de  $6,98 \times 10^{10} Pa$ , fue obtenido de los ensayos de tracción realizados, mediante la siguiente fórmula:

$$E = \frac{F}{\frac{A}{\varepsilon}}$$

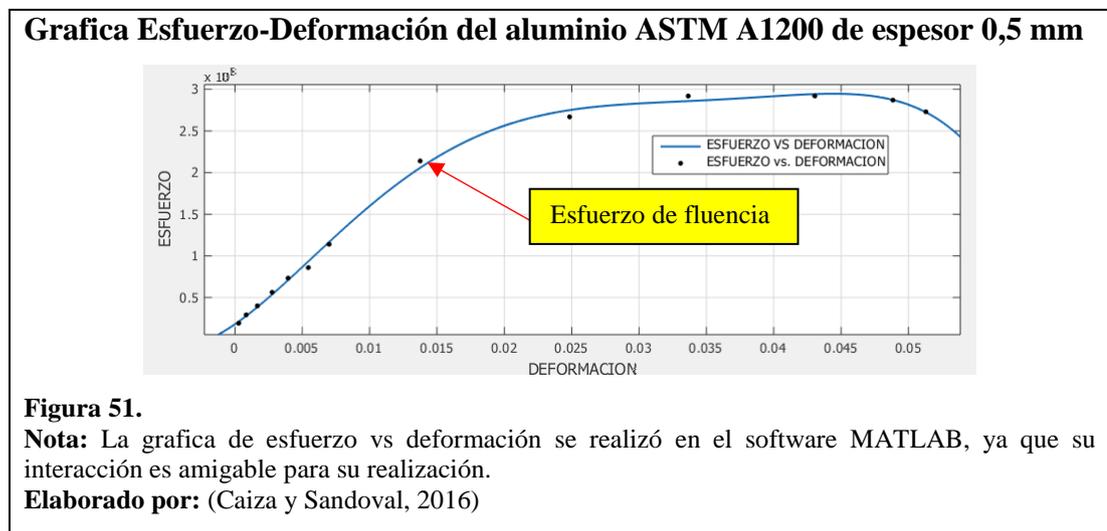
Donde:

E	: Módulo de Young	Pa
F	: Fuerza de aplicación	N
A	: Área de la sección transversal de la probeta	m <sup>2</sup>
ε	: Elongación de la probeta	

Se realizó una tabla para obtener la media aritmética para el módulo de Young que se expresa en el Anexo 7.

El módulo de Poisson 0,3 fue obtenido del valor teórico para el Aluminio. El esfuerzo de fluencia fue obtenido de manera aproximada por medio de la gráfica esfuerzo deformación de las probetas del Anexo 4. El módulo de tangencia al que se llamará T, se obtuvo igualmente en la gráfica mediante la fórmula:

$$T = \frac{\text{esfuerzo último} - \text{esfuerzo de fluencia}}{\text{deformación última} - \text{deformación de fluencia}}$$



#### 4.5.5. Mallado

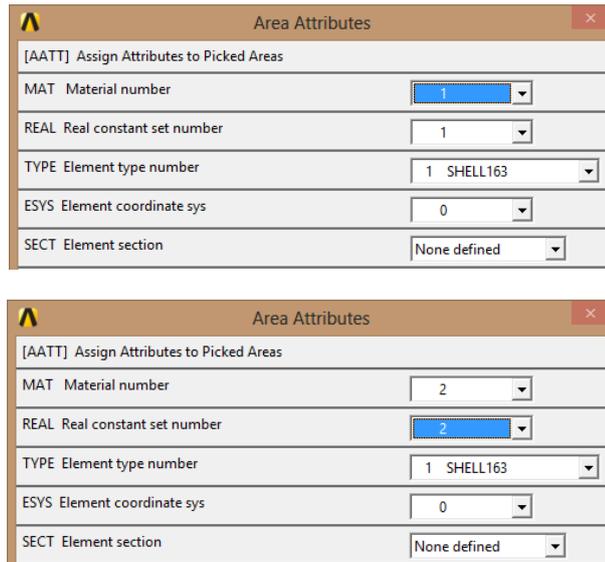
El mallado es un paso muy importante en la simulación, realizado de manera eficiente permite evitar errores de la solución y la disminución del tiempo.

#### 4.5.5.1. Propiedades del mallado

Aquí se definen las propiedades para cada elemento de la simulación: lámina, punzón, prensachapas y matriz.

- GUI: PREPROCESSOR, MESHING, MESH ATTRIBUTES.

#### Propiedades de mallado de placa y de herramientas

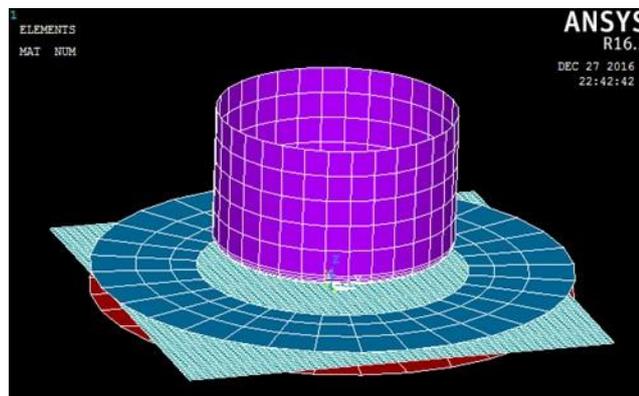


**Figura 52.**

**Nota:** En la figura superior e inferior se detalla las propiedades de mallado de las constantes del material.

**Elaborado por:** (Caiza y Sandoval, 2016)

#### Mallado de todas las piezas de la simulación



**Figura 53.**

**Nota:** Se muestra el mallado que tiene cada figura creada en la simulación con sus respectivos colores para la distinción entre ellas.

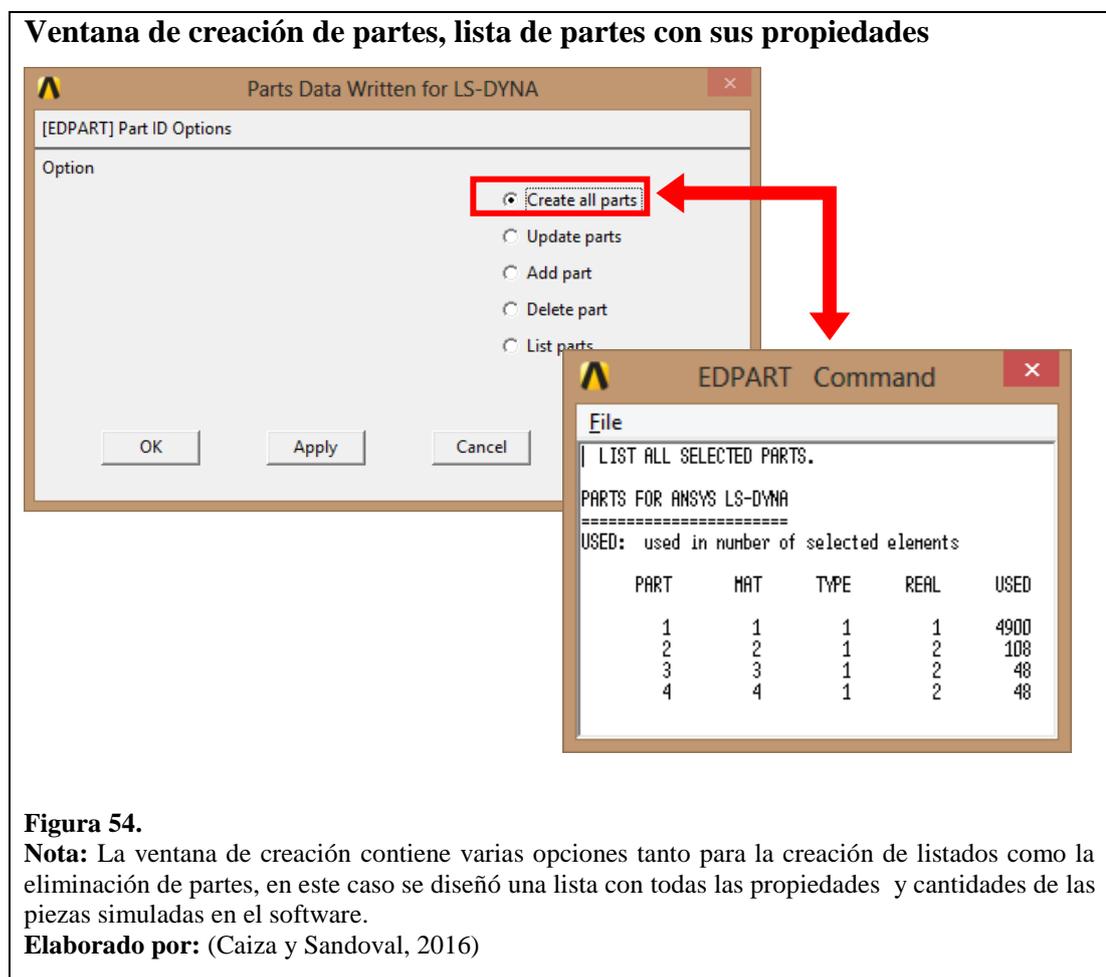
**Elaborado por:** (Caiza y Sandoval, 2016)

## 4.5.6. Partes, contactos y parámetros de carga

### 4.5.6.1. Partes

Cada elemento debidamente mallado, ahora será catalogado como una “parte”. Esto sirve para que el software pueda identificar cada elemento como una entidad independiente.

- GUI: PREPROCESSOR, LS DYNA OPTIONS, PART OPTIONS.

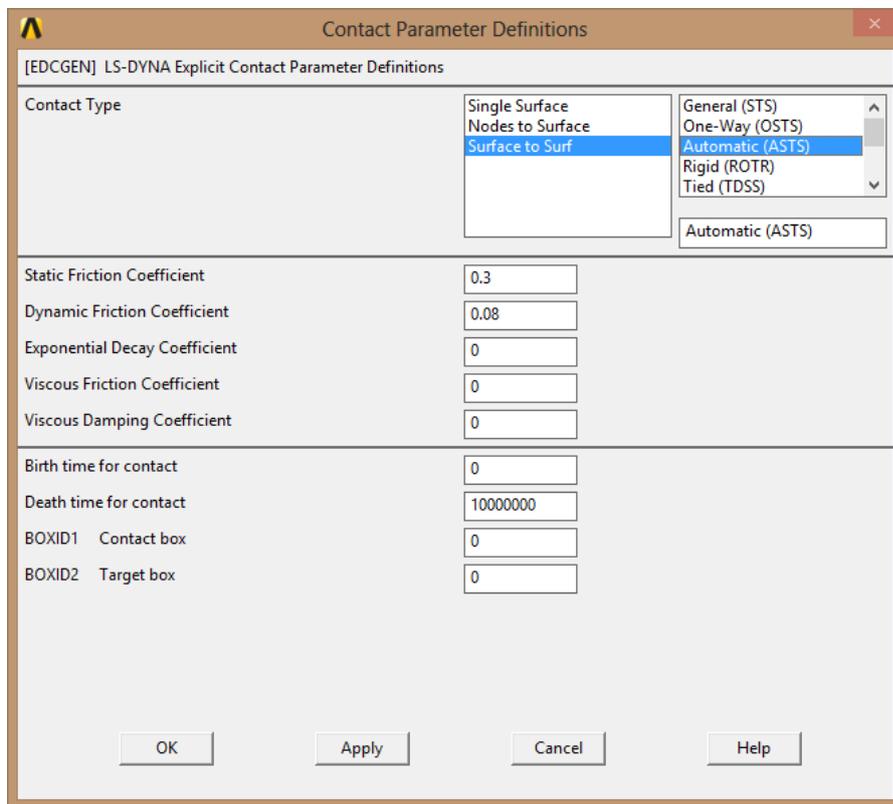


### 4.5.6.2. Contactos

Ahora será necesario indicar al software los contactos entre los elementos, se lo realiza de forma automática así se evitarán errores en la solución.

- GUI: PREPROCESSOR, LS DYNA OPTIONS, CONTACT.

### Ventana para la definición de parámetros de contactos entre piezas



**Figura 55.**

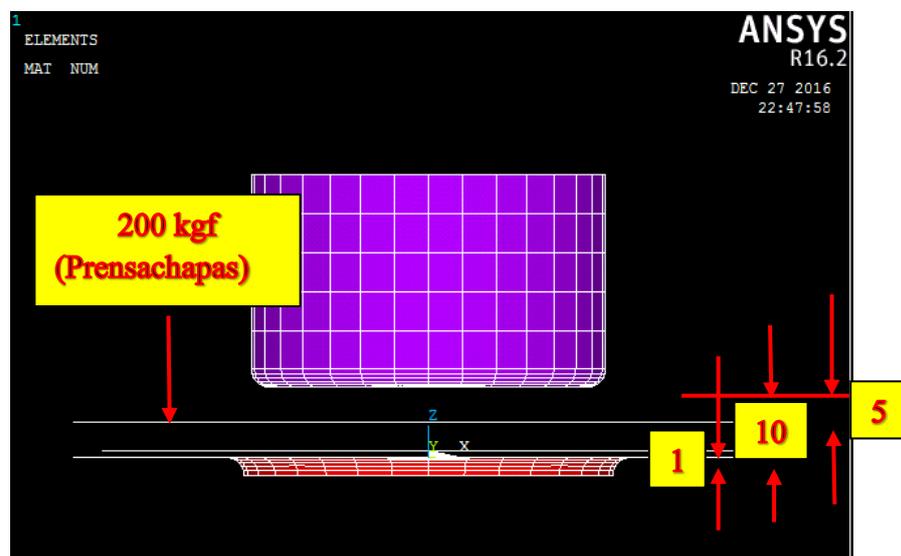
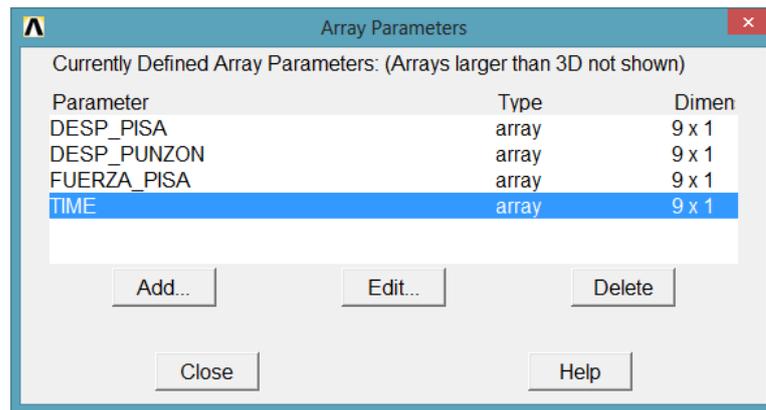
**Nota:** Esta ventana ayuda con la definición de contactos no solo en un solo punto sino en varios puntos a la vez, además tiene otros parámetros para los contactos de las piezas simuladas o formadas.  
**Elaborado por:** (Caiza y Sandoval, 2016)

#### 4.5.6.3. Parámetros de carga

En esta opción, el software permite poner valores a una variable de desplazamiento o fuerza asociado a cada parte. La profundidad de embutición, el tiempo total, el desplazamiento del prensachapas y el desplazamiento del punzón serán colocadas como parámetros.

- GUI: TOOL MENU, PARAMETERS, ARRAY PARAMETERS.

## Ventana para la definición de parámetros físicos



**Figura 56.**

**Nota:** La figura superior define los diferentes parámetros físicos que se aplicaran en el software y en la figura inferior demuestra los parámetros físicos simplificados aplicados ya en la simulación como es la fuerza en el prensachapas.

**Elaborado por:** (Caiza y Sandoval, 2016)

### 4.5.7. Opciones de solución

Básicamente se soluciona el problema mediante el comando SOLVE; de allí se tiene que esperar un tiempo determinado hasta que software muestre una ventana auxiliar con la solución del ejercicio.

- GUI: SOLUTION, SOLVE.

#### 4.5.8. Tiempo de solución

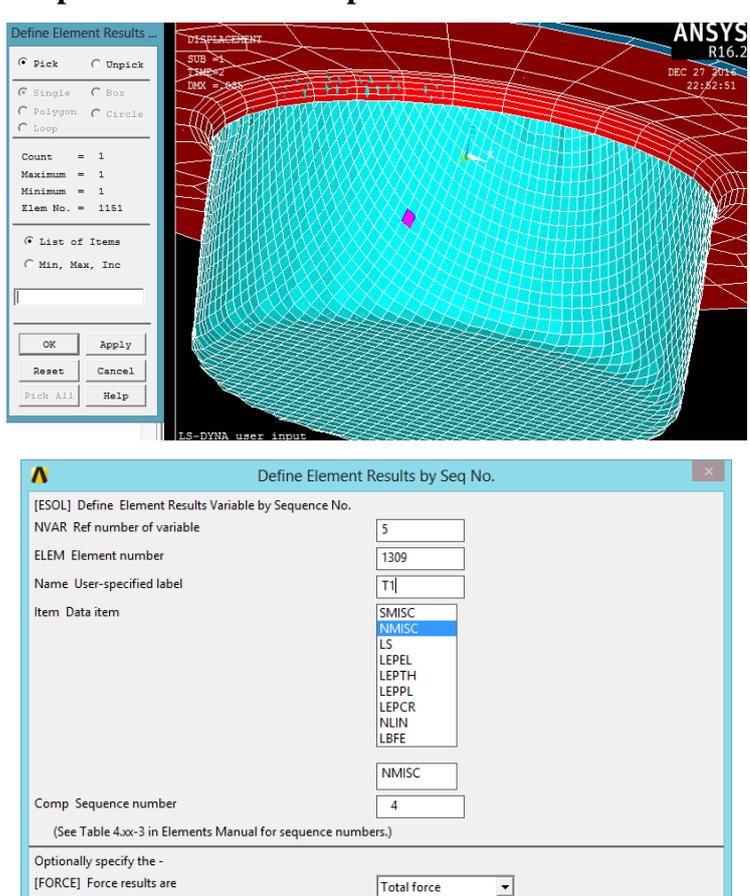
El tiempo que utilizó el para la resolución del problema fue de 22 horas, ya que el computador que se utilizó tiene un procesador Core i5 con una memoria RAM de 4Gb.

#### 4.5.9. Análisis de espesores

El software permite obtener el valor del espesor de la placa para ciertos valores de profundidad y tiempo. Esto se lo realiza por dos métodos:

- Primer método: GUI TIMEHIST POSTPRO, DEFINE VARIABLES

**Primer método para el análisis del espesor de la lámina de aluminio.**

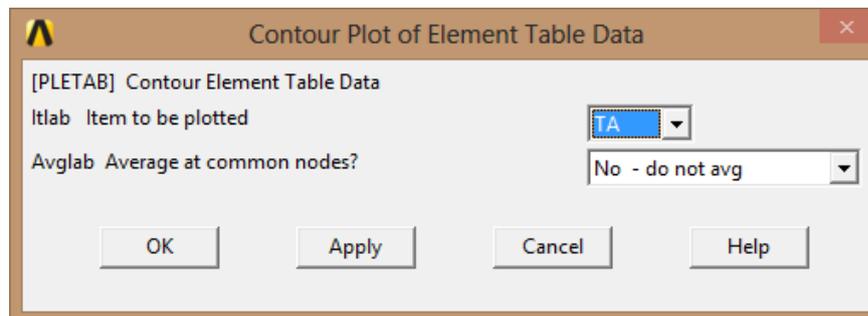
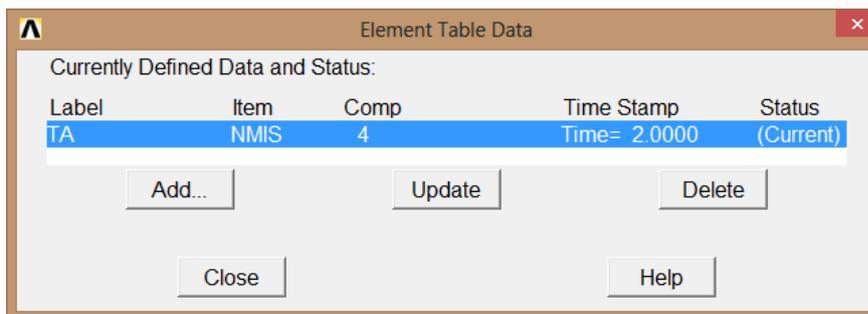
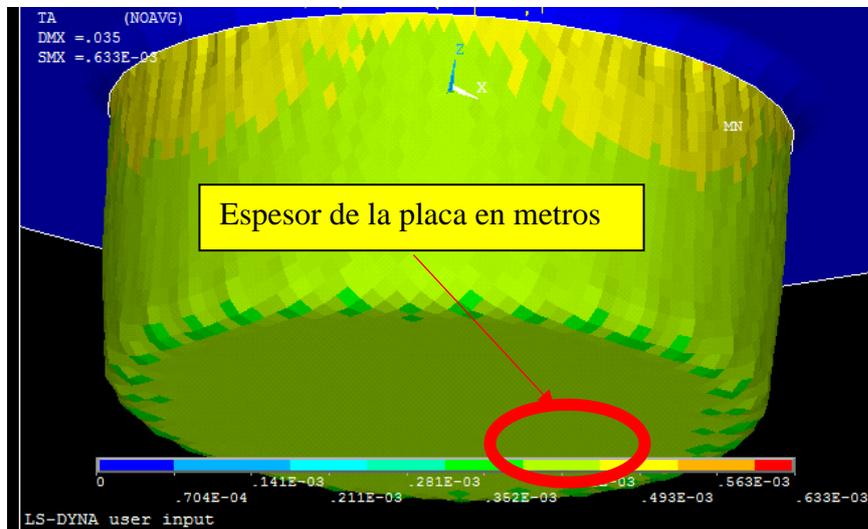


The image displays two screenshots from the ANSYS software interface. The top screenshot shows a 3D finite element mesh of a cylindrical component, with a 'Define Element Results' dialog box open on the left. The dialog box has 'Pick' selected, 'Count = 1', 'Maximum = 1', 'Minimum = 1', and 'Elem No. = 1151'. The bottom screenshot shows the 'Define Element Results by Seq No.' dialog box. It contains the following fields: 'NVAR Ref number of variable' (5), 'ELEM Element number' (1309), 'Name User-specified label' (T1), 'Item Data item' (NMISC), and 'Comp Sequence number' (4). A dropdown menu for 'Force results are' is set to 'Total force'.

**Figura 57.**  
**Nota:** Para el primer método se debe tener en cuenta para el análisis de la medición de espesor de la lámina se debe realizar a cada elemento como muestra la figura inferior.  
**Elaborado por:** (Caiza y Sandoval, 2016)

- Segundo método: GUI GENERAL POSTPRO, ELEMENT TABLE, DEFINE TABLE, PLOT TABLE

### Segundo método para el análisis del espesor de la lámina de aluminio.



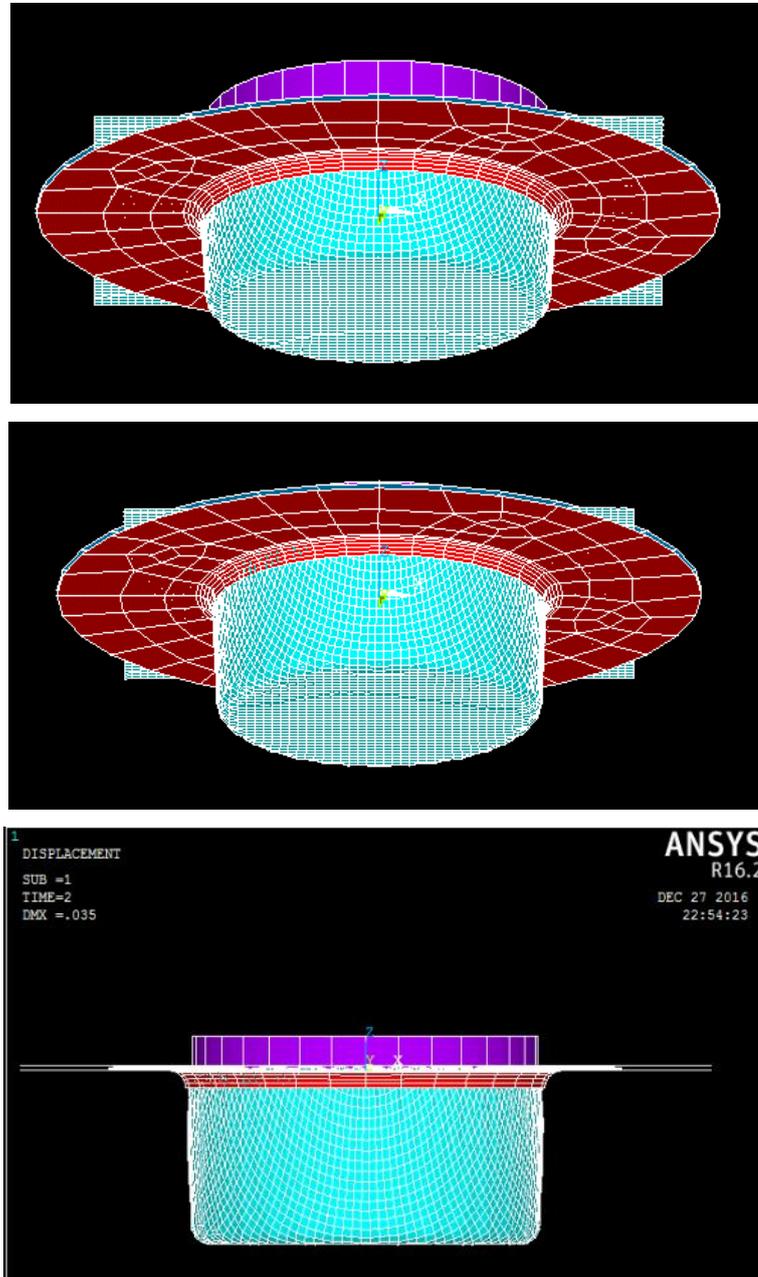
**Figura 58.**  
**Elaborado por:** (Caiza y Sandoval, 2016)

De estos métodos se utilizará el segundo para el análisis de espesores en el capítulo de resultados.

#### 4.5.10. Simulación final

Para una embutición de 25 mm se obtiene la siguiente simulación:

##### Proceso de simulación de la embutición en una lámina de aluminio.



**Figura 59.**

**Nota:** La figura se detalla tres tipos de profundidades, en la parte superior tiene una profundidad de 15 mm, en la mitad tiene una profundidad de 20 mm y la parte inferior tiene la profundidad que se desea de 25 mm.

**Elaborado por:** (Caiza y Sandoval, 2016)

## CAPÍTULO 5

### RESULTADOS Y ANÁLISIS DE DATOS OBTENIDOS

Las pruebas de embutición se realizaron en los laboratorios de S.A.V. de la Universidad Politécnica Salesiana, en el Anexo 9 se detallan los datos técnicos de la máquina.

#### 5.1.Resultados

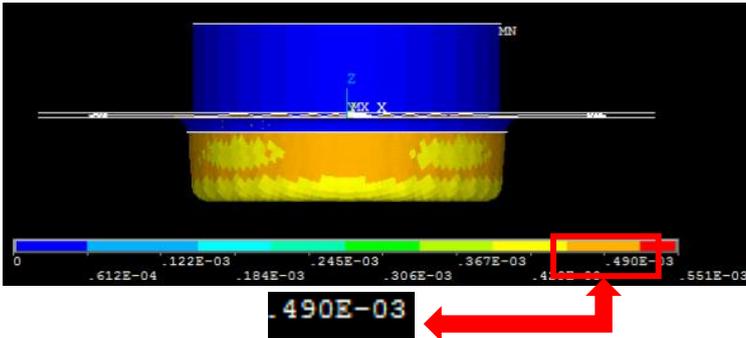
##### 5.1.1. Resultados de pruebas del laboratorio S.A.V.

Se realizaron pruebas en 150 láminas de aluminio de espesor 0,5 mm de las cuales 21 láminas se obtuvieron un embutido sin cortes y sin fisuras en las paredes laterales.

##### 5.1.2. Resultados de espesores de láminas embutidas

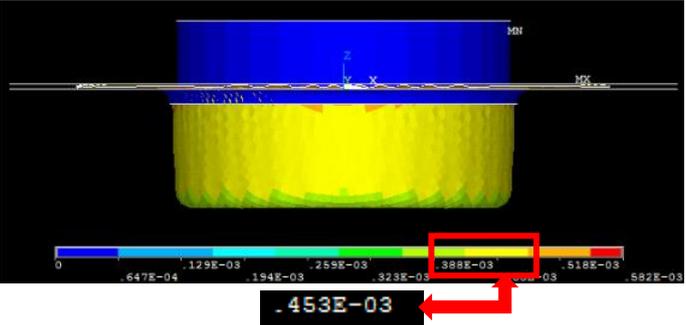
En las siguientes tablas se observará la comparación entre los espesores de la embutición real y la simulación.

**Tabla 7.**  
**Tabla de Profundidad de embutición de 15 mm**

Embutición real	Cant.	Espesor (m)
	7	$0,472 \times 10^{-3}$
Simulación	Cant.	Espesor (m)
	1	$0,490 \times 10^{-3}$

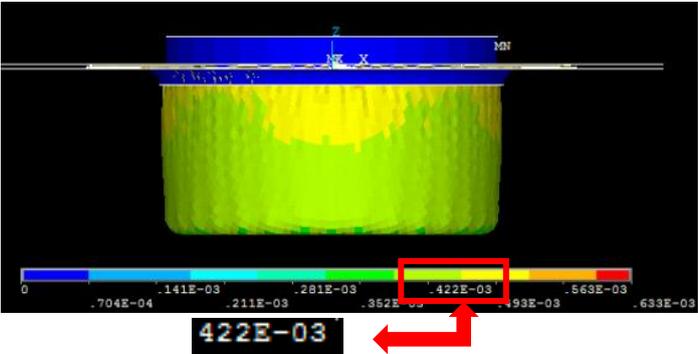
Elaborado por: (Caiza y Sandoval, 2016)

**Tabla 8.**  
**Tabla de Profundidad de embutición de 20 mm**

Embutición real	Cant.	Espesor (m)
	7	$0,456 \times 10^{-3}$
Simulación	Cant.	Espesor (m)
	1	$0,453 \times 10^{-3}$

Elaborado por: (Caiza y Sandoval, 2016)

**Tabla 9.**  
**Tabla de Profundidad de embutición de 25 mm**

Embutición real	Cant.	Espesor (m)
	7	$0,421 \times 10^{-3}$
Simulación	Cant.	Espesor (m)
	1	$0,422 \times 10^{-3}$

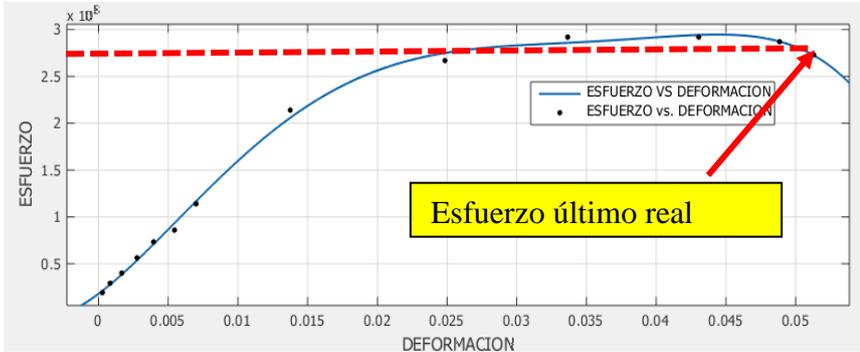
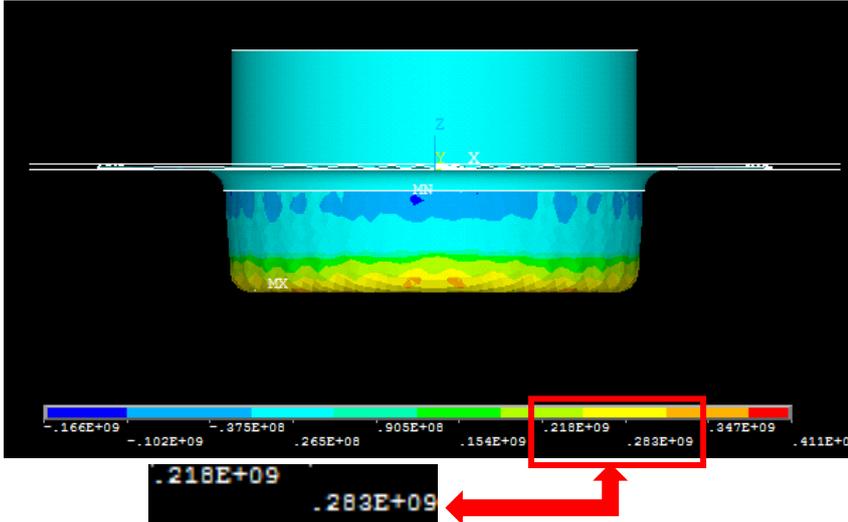
Elaborado por: (Caiza y Sandoval, 2016)

Todos los valores de los espesores de las piezas embutidas fueron obtenidos por medio de la fórmula de medio del valor medio entre las cantidades designadas.

### 5.1.3. Resultados de esfuerzos máximos en las láminas embutidas

En las siguientes tablas se observará la comparación entre el esfuerzo máximo obtenido en la simulación vs el esfuerzo real del ensayo de tracción.

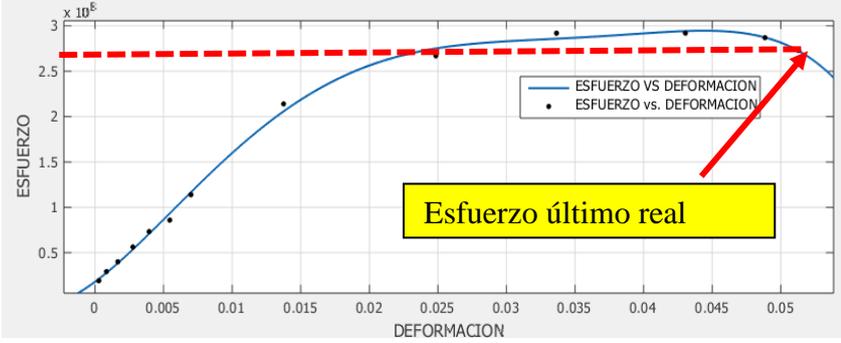
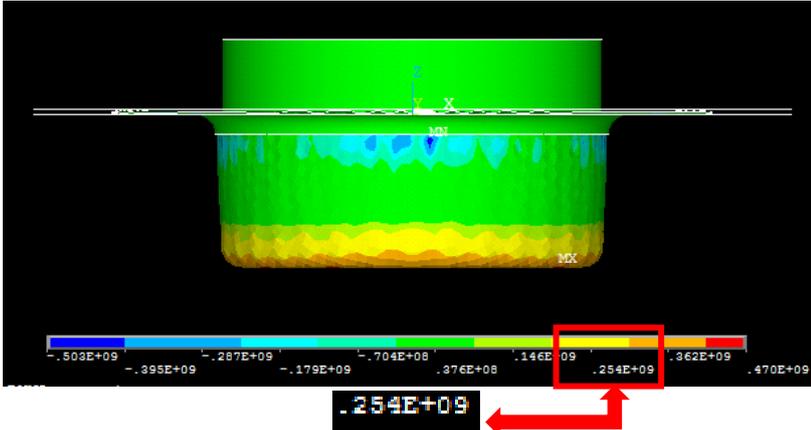
**Tabla 10.**  
**Tabla de comparación de esfuerzo máximo a 15 mm**

Pruebas de tracción	Esfuerzo máximo (Pa)
	$2,75 \times 10^8$
Simulación	Esfuerzo máximo (Pa)
	$2,45 \times 10^8$

Elaborado por: (Caiza y Sandoval, 2016)

**Tabla 11.**

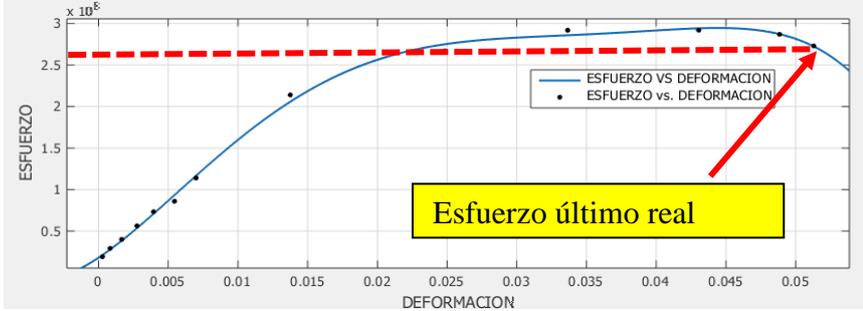
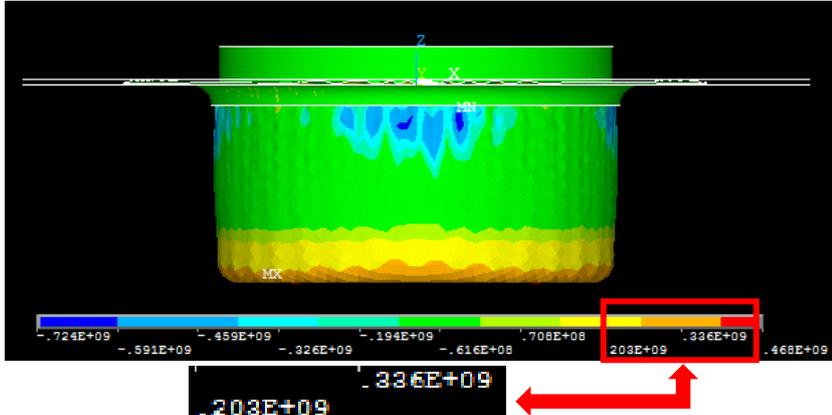
**Tabla de comparación de esfuerzo máximo a 20 mm**

Pruebas de tracción	Esfuerzo máximo (Pa)
	$2,75 \times 10^8$
Simulación	Esfuerzo máximo (Pa)
	$2,69 \times 10^8$

Elaborado por: (Caiza y Sandoval, 2016)

**Tabla 12.**

**Tabla de comparación de esfuerzo máximo a 25 mm**

Pruebas de tracción	Esfuerzo máximo (Pa)
	$2,75 \times 10^8$
Simulación	Esfuerzo máximo (Pa)
	$2,54 \times 10^8$

Elaborado por: (Caiza y Sandoval, 2016)

#### 5.1.4. Resultado de las fuerzas del punzón y prensachapas

En la siguiente tabla se observará la comparación entre la fuerza del punzón analítico vs la fuerza real del punzón.

**Tabla 13.**  
**Tabla de valores de fuerza de embutición para el punzón**

	<b>Presión (Psi)</b>	<b>Fuerza (kgf)</b>
<i>Pruebas de embutición</i>	2200	759
<i>Cálculo analítico</i> <i>(Método 3)</i>	---	1020,44

Elaborado por: (Caiza y Sandoval, 2016)

También se realizó la comparación de fuerza del prensachapas analítico y la fuerza real del prensachapas de las pruebas realizadas.

**Tabla 14.**  
**Tabla de valores de fuerza para el prensachapas**

	<b>Presión (Psi)</b>	<b>Fuerza (kgf)</b>
<i>Pruebas de embutición</i>	40	702
<i>Cálculo analítico</i> <i>(Método 1)</i>	---	884,31

Elaborado por: (Caiza y Sandoval, 2016)

### 5.1.5. Cálculos de errores

#### 5.1.5.1. Cálculo de error absoluto de espesores

Profundidad de embutido de 15 mm:

$$e_{abs} = \frac{0.490 \times 10^{-3}m - 0.472 \times 10^{-3}m}{0.490 \times 10^{-3}m} * 100\% = 3.67\%$$

Profundidad de embutido de 20 mm:

$$e_{abs} = \frac{0.456 \times 10^{-3}m - 0.453 \times 10^{-3}m}{0.456 \times 10^{-3}m} * 100\% = 0,66\%$$

Profundidad de embutido de 25 mm:

$$e_{abs} = \frac{0.422 \times 10^{-3}m - 0.421 \times 10^{-3}m}{0.422 \times 10^{-3}m} * 100\% = 0,24\%$$

#### **5.1.5.2.Cálculo de error absoluto de esfuerzos máximos**

Profundidad de embutido de 15 mm:

$$e_{abs} = \frac{2.75 \times 10^8Pa - 2.45 \times 10^8Pa}{2.75 \times 10^8Pa} * 100\% = 10,9\%$$

Profundidad de embutido de 20 mm:

$$e_{abs} = \frac{2.75 \times 10^8Pa - 2.54 \times 10^8Pa}{2.75 \times 10^8Pa} * 100\% = 7,63\%$$

Profundidad de embutido de 25 mm:

$$e_{abs} = \frac{2.75 \times 10^8Pa - 2.69 \times 10^8Pa}{2.75 \times 10^8Pa} * 100\% = 2,18\%$$

#### **5.1.5.3.Cálculo de error absoluto de fuerzas del punzón y prensachapas**

Punzón

$$e_{abs} = \frac{1020,44kgf - 759kgf}{1020,44kgf} * 100\% = 25,6\%$$

Prensachapas

$$e_{abs} = \frac{884,31kgf - 702kgf}{884,31kgf} * 100\% = 20,6\%$$

## CONCLUSIONES

- Se comparó los resultados obtenidos en la simulación con los resultados del fenómeno real y después de 150 embuticiones a 3 profundidades distintas, de 15mm, otra a 20mm y a 25mm, existe un error de 3,67%, 0,66% y 0,24% de error respectivamente. Es un error bastante pequeño dentro de los parámetros de manufactura, dependerá además del tipo de material a embutir, la dificultad de la geometría de la pieza, la precisión el ensayo de tracción y la experiencia del Ingeniero a cargo de la simulación.
- Otro resultado obtenido fue el error obtenido para el esfuerzo último del material real vs. el esfuerzo máximo de la simulación, estos fueron de 10,9%, 7,63% y 2,18% para las profundidades de 15mm, 20mm y 25mm respectivamente. Son errores que se mantienen pequeños, debido a la exactitud de los datos proporcionados en el ensayo de tracción.
- El error obtenido para la fuerza real utilizada en el punzón vs fuerza calculada según fórmulas fue de 25,6%. Para la fuerza real utilizada en el prensachapas vs fuerza calculada según fórmulas existe un 20,6% de error. Esto podría deberse a la inexactitud propia de las fórmulas, y a la variación de la fuerza de la máquina de laboratorio, debido al diseño del mismo.
- Se aplicó lo estudiado sobre el software para poder modificar los parámetros de la máquina de laboratorio. Estos fueron fuerza en el punzón y prensachapas, lo que se obtuvo fue una disminución en los errores de esfuerzos y fuerzas.

## RECOMENDACIONES

- Es importante ingresar correctamente los parámetros del material al software, de esto dependerá significativamente la variación en los errores en los resultados.
- Las láminas embutidas en su mayoría resultaron con pliegues o rotas, se recomienda calibrar a la máquina de laboratorio.
- Es muy importante realizar el mallado con criterio, si no se lo hace bien puede resultar en soluciones demasiado largas o errores que pueden resultar en el cierre inesperado del software.
- Antes de realizar una simulación en un software es importante conocer el fenómeno físico que va a ocurrir, de lo contrario los resultados obtenidos serán ambiguos y lejanos de los esperados. En este trabajo se tuvo muy en claro el proceso de embutición con fuerzas, desplazamientos y propiedades del material.
- En el desarrollo del presente trabajo se tuvo un poco de dificultad para lograr un equilibrio entre exactitud de resultados vs tiempo computacional. La presente simulación se realizó con una laptop Toshiba Satellite i5 de 4Gb de RAM, con un tiempo de solución de 22 horas, lo cual en un proyecto no es viable, por lo tanto, se recomienda utilizar computadoras de RAM elevado.
- Para lograr experticia en el manejo del software no hubo más fuente que el internet, fue la única que proporcionó información valiosa para avanzar, se consultó foros, papers e incluso docentes nacionales e internacionales, pero ninguno fue de valor significativo, se recomienda al futuro usuario de este software buscar capacitaciones le serán mucho más enriquecedoras.

## BIBLIOGRAFÍA

- ANSYS. (2013). *ANSYS Mechanical APDL Basic Analysis Guide*. Pensilvania: SAS IP.
- Escribano, A. I., & Herranz, R. A. (2014). *DEDUCETU*. Obtenido de DEDUCETU: <http://de-duce-tu.blogspot.com/p/embuticion-2.html>
- Fuentes Quisaguano, M. X., & Mullapa Rumipamba, M. (Enero de 2008). *Matriz de embutición y corte para la implementación del laboratorio de matricería*. Quito. Obtenido de Repositorio Digital EPN: <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2005/1/CD-1202.pdf>
- Groover, M. P. (2007). *Fundamentos de Manufactura Moderna* (Tercera ed.). Mexico: The McGraw-Hill.
- Kalpakjian, S. (2008). *Manufactura, ingeniería y tecnología* (Quinta ed.). Mexico: PEARSON EDUCACIÓN.
- López Navarro , T. (1976). *Troquelado y Estampación* (Quinta ed.). Barcelona: Gustavo Gili, S.A.
- Martin De Los Heros. (1968). *Trabajo de los metales por deformación en frio corte, embutición y formados diversos*. Madrid: BLUME.
- Montalvo, L. (6 de Julio de 2005). *Monografias.com*. Obtenido de Monografias.com: <http://www.monografias.com/trabajos23/embutido-chapas/embutido-chapas.shtml>
- Oehler, G., & Kaiser. (1977). *Herramientas de troquelar, estampar y embutir* (Sexta ed.). Barcelona: Gustavo Gili, S.A.

Osrodala. (9 de Junio de 2012). *Wikimedia Commons*. Obtenido de Wikimedia Commons:

[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EMBUTIDO\\_general.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:EMBUTIDO_general.jpg)

Rodríguez, M., & González, A. (2012). *Elasticidad y resistencia de materiales I*. Madrid: Universidad Nacional de Educación a distancia.

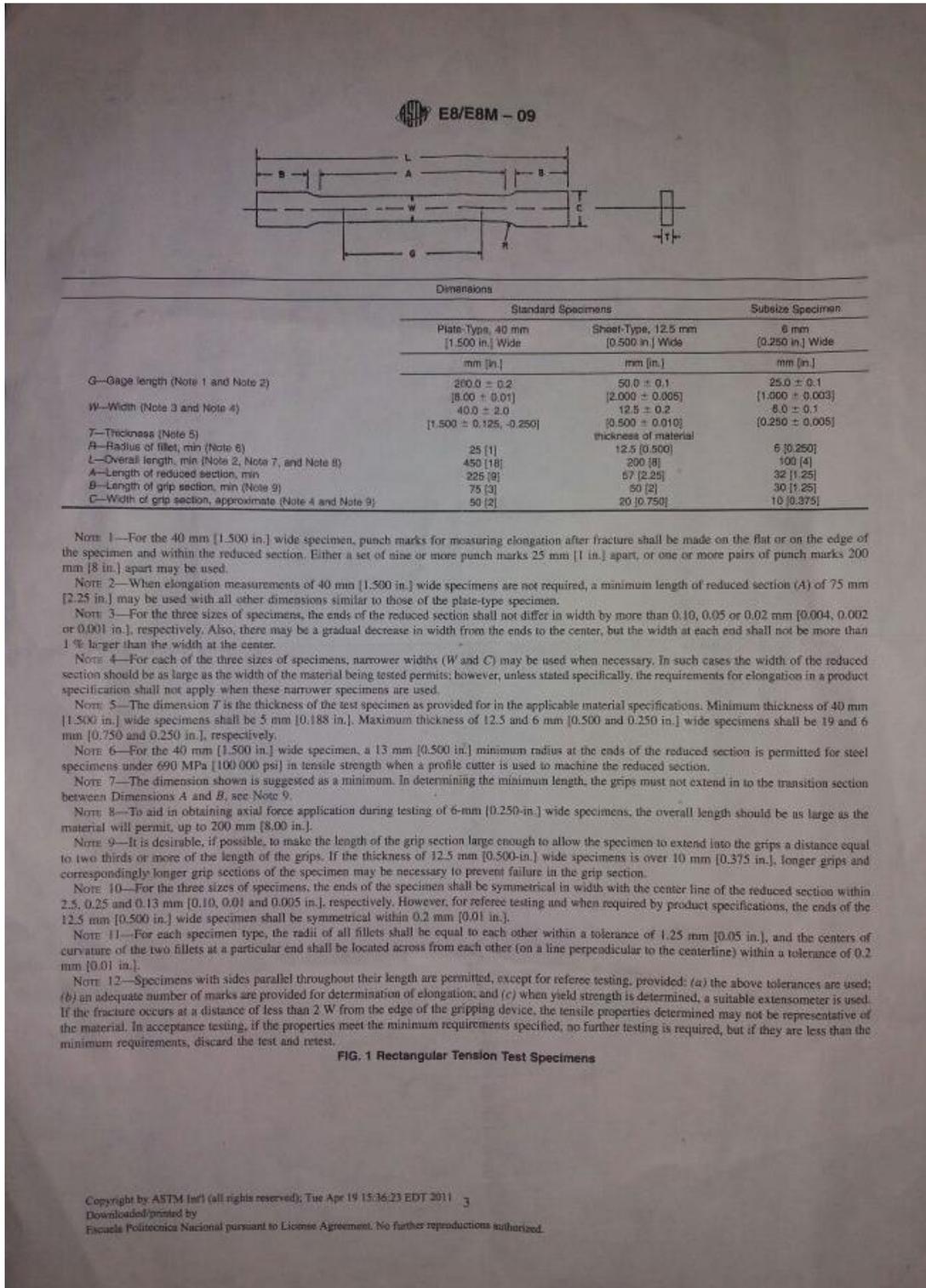
Rossi, M. (1979). *Estampado en frio de la chapa* (Novena ed.). Madrid: DOSSAT, S.A.

Villamar Palacios, V. H. (2008). *Diseño de una prensa hidraulica para elaborar pocetas de acero inoxidable*. Guayaquil.

Zienkiewicz, O. C. (2007). *El método de los elementos finitos*. Barcelona: Reverté.

# ANEXOS

## ANEXO 1: Norma de ensayos de tracción



LABORATORIO DE ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y  
VIBRACIONES



RM LAEV 00014

FICHA RECEPCIÓN DE MUESTRAS

EMPRESA:	UPN S
CONTACTO:	Sr. Omar Caiza

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	CANT.	OBSERVACIONES
1	Probetas planas de Aluminio	5	
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			

RECEPCIÓN POR PARTE DEL LAEV

NOMBRE:	Ing. Karina Cuadrado
FECHA:	12/10/2016
FIRMA:	

NOTAS:

1.- Los ítems ensayados, en caso de existir petición escrita por parte del cliente se conservarán en el Laboratorio hasta 10 días calendario, luego de emitido el informe final, caso contrario el material será desechado.

2.- Los ítems o muestras no ensayadas, que se han dejado en el LAEV y no se ha efectuado el pago correspondiente, se conservarán en las instalaciones del laboratorio hasta 40 días calendario desde la fecha de recepción, pasado este tiempo, el material será desechado.

## ANEXO 2: Probetas para ensayo de tracción



## ANEXO 3: Resultado de ensayos de tracción



ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA  
MECÁNICA



LABORATORIO DE ANÁLISIS  
DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES

### INFORME TÉCNICO

LAEV – OCT.16.11

Quito, 13 de octubre de 2016

TRABAJO SOLICITADO POR: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA  
Ing. Luis Christian Juliña

ORDEN DE TRABAJO N° 0004958

Los resultados contenidos en el presente informe corresponden a ensayos realizados en muestras de aluminio pertenecientes a los señores KLEVER OMAR CAIZA HIDALGO y DIEGO RICARDO SANDOVAL FIGUEROA para el proyecto de titulación "ANÁLISIS Y SIMULACION DEL COMPORTAMIENTO MECANICO EN EL PROCESO DE EMBUTIDO PARA UNA LAMINA DE ALUMINIO ASTM A 1200 PARA UN ESPESOR DE 0,5 MM". Las muestras fueron entregadas en el Laboratorio de Análisis de Esfuerzos y Vibraciones de la Escuela Politécnica Nacional.

#### RESULTADOS

1. **MUESTRAS:** Cinco (5) muestras de aluminio ASTM A 1200 ( $e = 0,5$  mm) para ensayo de tracción bajo norma ASTM E8
2. **ENSAYO DE TRACCION**

En la tabla 1 se muestran los resultados de los ensayos de tracción.

Tabla 1. Resultados del ensayo de tracción realizado en las probetas de aluminio.

Muestra	Ancho promedio	Espesor promedio	Carga máxima registrada		Resistencia a la tracción		% Elongación en 50 mm
	mm	mm	lbf	N	ksi	MPa	
T1	12,01	0,50	331	1.472	35,55	245,12	12,82
T2	12,08	0,51	330	1.466	34,51	237,96	15,48
T3	12,05	0,48	336	1.494	37,46	258,30	14,36
T4	12,09	0,46	333	1.481	38,63	266,31	7,26*
T5	12,02	0,50	335	1.489	35,93	247,76	17,70

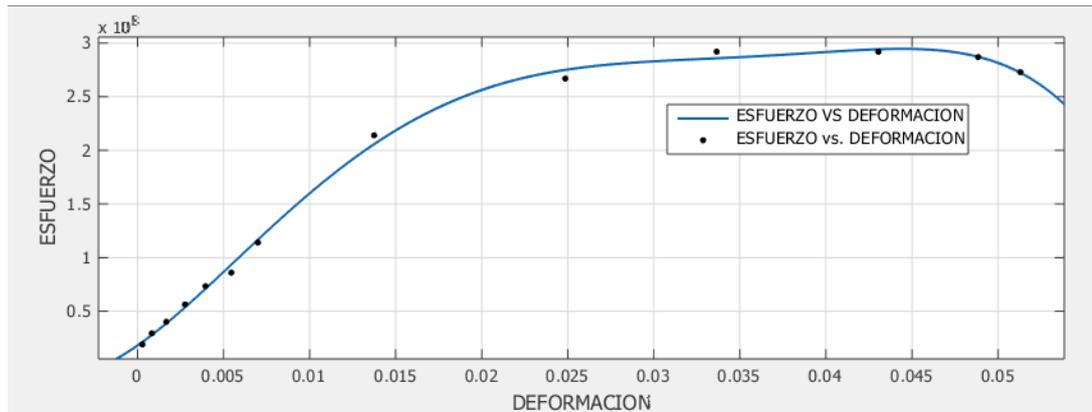
\*Falla fuera de las marcas

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA  
Ing. Jonathan Castro  
JEFE (E) DEL LABORATORIO DE  
ANÁLISIS DE ESFUERZOS Y VIBRACIONES  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA  
LAEV  
ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

**ANEXO 4: Tabla de resultados del ensayo esfuerzo-deformación, media aritmética entre las 5 probetas**

PUNTO	ESFUERZO [Pa]	FUERZA [N]	FUERZA [lb]	AREA [m <sup>2</sup> ]	ELONGACIÓN	TIEMPO [s]
1	1,91E+07	119,60	26,85	0,00000625	0,00028	1
2	2,92E+07	182,72	41,02	0,00000625	0,00083	2
3	4,00E+07	250,17	56,16	0,00000625	0,00167	4
4	5,63E+07	351,87	78,99	0,00000625	0,00276	6
5	7,33E+07	458,42	102,91	0,00000625	0,00395	8
6	8,59E+07	536,64	120,47	0,00000625	0,00545	10
7	1,14E+08	710,28	159,45	0,00000625	0,00699	12
8	2,14E+08	1340,02	300,82	0,00000625	0,01375	20
9	2,67E+08	1670,45	375,00	0,00000625	0,02485	30
10	2,92E+08	1826,36	410,00	0,00000625	0,03365	40
11	2,92E+08	1825,70	409,85	0,00000625	0,04305	50
12	2,87E+08	1792,95	402,50	0,00000625	0,04885	55
13	2,73E+08	1706,09	383,00	0,00000625	0,05130	56

**ANEXO 5: Curva esfuerzo- deformación realizado en matlab**



## ANEXO 6: Ecuación polinómica de grado 5 aproximada del diagrama esfuerzo-deformación

Results	
Linear model Poly5: $f(x) = p1*x^5 + p2*x^4 + p3*x^3 + p4*x^2 + p5*x + p6$	
Coefficients (with 95% confidence bounds):	
p1 =	-1.069e+16 (-1.944e+16, -1.948e+15)
p2 =	1.386e+15 (2.707e+14, 2.501e+15)
p3 =	-6.045e+13 (-1.104e+14, -1.051e+13)
p4 =	7.767e+11 (-1.459e+11, 1.699e+12)
p5 =	1.119e+10 (4.865e+09, 1.751e+10)
p6 =	1.8e+07 (6.549e+06, 2.946e+07)
Goodness of fit:	
SSE:	2.603e+14
R-square:	0.9983
Adjusted R-square:	0.9971
RMSE:	6.098e+06

## ANEXO 7: Tabla de módulo de young de las 5 probetas

PROBETA	E [Pa]	FUERZA [N]	FUERZA [lb]	AREA [m <sup>2</sup> ]	ELONGACIÓN
1	6,66E+10	116,09	26,06	0,00000625	0,000279
2	6,16E+10	117,41	26,357	0,00000625	0,000305
3	7,78E+10	129,28	29,023	0,00000625	0,000266
4	6,09E+10	125,62	28,2	0,00000625	0,00033
5	7,72E+10	173,68	38,99	0,00000625	0,00036

## ANEXO 8: Tabla de los valores de espesores de láminas embutidas

	Profundidad Embutición [mm]		
	15	20	25
Espesor medido	0,481	0,452	0,418
	0,472	0,465	0,424
	0,465	0,443	0,431
	0,455	0,458	0,426
	0,479	0,464	0,420
	0,487	0,452	0,416
	0,465	0,458	0,409
	0,472	0,456	0,421
Media	Media	Media	

**ANEXO 9: Datos técnicos de la prensa hidráulica para el conformado de chapas metálicas**

Motor	<b>3 HP 220 V TRIFÁSICO</b>
Cilindro Hidráulico Prensachapas	<b>2,4 Ton</b>
Cilindro Hidráulico Principal	<b>5 Ton</b>
Pistón Neumático	<b>1681,8 A 1870,2 MPa</b>
Bomba	<b>5,9 litros /min</b>
Manómetro	<b>0 A 3000 Psi</b>

**ANEXO 10: Láminas embutidas a diferente profundidad**

