



# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**



## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

### **“ANÁLISIS NUMÉRICO CON VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL PROCESO DE EMBUTICIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE UNA PIEZA CÓNCAVA HUECA RECTANGULAR DE ACERO DE BAJO CARBONO”**

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE  
INGENIERO MECÁNICO**

**LLAMBO DELGADO MAURO ALEJANDRO**

**mauro.llambo@epn.edu.ec**

**SALGADO ROMERO CARLOS ALBERTO**

**carlos.salgado01@epn.edu.ec**

**DIRECTOR: Ing. MONAR MONAR WILLIAM LEOPOLDO, M.Sc.**

**william.monar@epn.edu.ec**

**CODIRECTOR: Ing. GUACHAMÍN ACERO WILSON IVÁN, Ph.D.**

**wilson.guachamin@epn.edu.ec**

**QUITO, MARZO 2018**

## CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por **MAURO ALEJANDRO LLAMBO DELGADO** y **CARLOS ALBERTO SALGADO ROMERO**, bajo nuestra supervisión.

---

Ing. William Monar, M.Sc.  
**DIRECTOR DEL PROYECTO**

---

Ing. Wilson Guachamin, Ph.D.  
**CODIRECTOR DEL PROYECTO**

## DECLARACIÓN

Nosotros, **MAURO ALEJANDRO LLAMBO DELGADO** y **CARLOS ALBERTO SALGADO ROMERO**, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

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

---

Mauro Alejandro Llambo Delgado

---

Carlos Alberto Salgado Romero

## DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico a mis padres Efraín Ll. y Betty D., por la confianza y aliento que me ha convertido en la persona que soy, por estar siempre junto a mí a pesar la gran distancia física que nos ha separado. A mis hermanos Paulo, Omar y Samira, por existir y por el apoyo incondicional a largo de toda mi vida. A mi abuelito Antonio, quien por muchos años fue el pilar fundamental de la familia Llambo.

Te lo dedico a ti, Johanna Y., una gran mujer y admirable ser humano, por el apoyo de estos últimos años, por ser la clase de persona que eres, por ser quien comparte su vida conmigo y por el lugar que ocupas en la mía.

A mi abuelita Georgina y Eufemia, y toda mi familia en general, por la confianza depositada, el cariño brindado, por los buenos consejos y deseos a lo largo de estos años, y la ayuda incondicional desde que tengo memoria.

Y finalmente, a mis amigos, con quienes se ha vivido experiencias acordes a las exigencias del momento, en particular a los perros, con quienes he compartido estos años en la facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional, y a quienes con gusto hoy puedo llamar colegas. Y mención especial a mis amigos de Hamulus, con quienes he dado forma a mi álter ego musical. Salud.

Y a los dos más grandes amigos que he tenido en la vida, Leo y Fidel.

*Mauro*

## DEDICATORIA

A mi madre Fabi, por ayudarme en los momentos más difíciles de mi vida. A mi padre Segundo por inculcar en mí la pasión por la mecánica. Gracias a mis padres aprendí el valor del trabajo duro. A mi hermano Jaime por ser el mejor ejemplo en la vida y enseñarme los beneficios de seguir el camino correcto. A mi hermana Belén por siempre ayudarme desinteresadamente sin ninguna objeción. Gracias a Toda mi familia.

A mi esposa Vero, por compartir su vida conmigo desde que empezamos a vivir en un pequeño cuarto con una cama y un armario nada más, eso definitivamente es amor. A las estrellas de mi vida mis hijos: Matías, Carlitos y Abby espero que cumplan todas sus metas y sobre todo sean ganadores y exitosos.

A todos mis compañeros de la facultad que conocí en el transcurso de la carrera, quienes nunca olvidaremos la época gloriosa donde nos paseábamos con los rivales. A Juan e Iván mis amigos de toda la vida. A Juan V. y Jairo por acompañarme en el emprendimiento #5 (el primero no fallido).

*Carlos S.*

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios, por brindarnos fuerza de voluntad ante las adversidades, por darnos salud y la oportunidad de cumplir nuestros objetivos de convertirnos en un profesional.

A la Escuela Politécnica Nacional por dejarnos ser miembros de tan espectacular comunidad. A la mejor Facultad del mundo Ingeniería Mecánica

A todos los profesores que impartieron sus conocimientos profesionales en las aulas. Al Ing. William Monar y al Ing. Wilson Guachamin por confiar y guiarnos durante el desarrollo de este proyecto.

*Mauro y Carlos.*

# ÍNDICE

CERTIFICACIÓN.....	i
DECLARACIÓN.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	v
ÍNDICE.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xi
RESUMEN.....	xii
ABSTRACT.....	xiii
INTRODUCCIÓN.....	1
Objetivo general.....	2
Objetivos específicos.....	2
1. MARCO TEÓRICO.....	3
1.1. Procesos de conformado mecánico.....	3
1.2. Embutición.....	4
1.2.1. Procedimiento de embutición.....	4
1.2.2. Parámetros principales en el proceso de embutición.....	4
1.3. Análisis numérico mediante el método de elementos finitos.....	7
1.3.1. Tipos de sistemas.....	7
1.3.2. Parámetros para la formulación del MEF el proceso de embutición.....	8
1.3.3. Condiciones de contorno.....	13
1.3.4. Métodos numéricos usados para el proceso de embutición.....	13
1.4. Software para simulación de procesos de embutición.....	14
2. METODOLOGÍA.....	15
2.1. General.....	15
2.2. Proceso de embutición.....	17
2.2.1. Procedimiento real de embutición.....	22
2.3. Método para la obtención de resultados.....	24
2.4. Método para el análisis numérico.....	26
2.4.1. Modelo geométrico.....	26
2.4.2. Condiciones de contorno.....	28
2.4.3. Criterios para el refinamiento y convergencia de la malla.....	31

2.4.4.	Simulación numérica .....	33
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	35
3.1.	Resultados de la experimentación .....	35
3.1.1.	Resultados en las líneas de referencia .....	35
3.1.2.	Resultados en nodos medios.....	39
3.1.3.	Arrugas en la placa embutida.....	40
3.2.	Resultados del análisis numérico .....	41
3.2.1.	Calibración del modelo numérico.....	41
3.2.2.	Resultados de las líneas de referencia del modelo numérico.....	41
3.2.3.	Deformación media residual.....	44
3.2.4.	Esfuerzos generados en la embutición .....	45
3.2.5.	Desplazamiento direccional en el eje Y .....	47
3.2.6.	Desplazamiento direccional en el eje X.....	48
3.2.7.	Desplazamiento direccional en el eje Z .....	50
3.2.8.	Desplazamiento direccional de los nodos medios.....	51
3.3.	Validación del análisis numérico .....	51
3.4.	Discusión de resultados.....	53
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	56
4.1.	Conclusiones.....	56
4.2.	Recomendaciones .....	57
	Bibliografía.....	58
	Anexos.....	61



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Parámetros principales que intervienen en el proceso de embutición .....	5
Tabla 2. Propiedades del material ASTM A-36 .....	18
Tabla 3. Parámetros geométricos del utillaje de embutición .....	27
Tabla 4. Parámetros geométricos del utillaje de embutición .....	29
Tabla 5. Valores de refinamiento del mallado .....	31
Tabla 6. Parámetros geométricos del utillaje de embutición .....	32
Tabla 7. Deformaciones lineales experimentales en las líneas de referencia .....	35
Tabla 8. Deformaciones lineales experimentales en los elementos .....	36
Tabla 9. Deformaciones lineales numérico en las líneas de referencia .....	41
Tabla 10. Deformaciones lineales numéricas en los elementos .....	42
Tabla 11. Desplazamientos direccionales numéricos de los nodos medios. ....	51
Tabla 12. Comparación cualitativa entre resultados experimentales y numéricos .....	51
Tabla 13. Comparación cuantitativa entre resultados experimentales y numéricos.....	52

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama esfuerzo deformación unitaria .....	3
Figura 2. Proceso de embutición profunda.....	4
Figura 3. Ejemplo de un sistema.....	7
Figura 4. Discretización de un sistema continuo a un sistema discreto. ....	8
Figura 5. Coordenadas nodales (i, j, m) del elemento e.....	9
Figura 6. Fuerzas que intervienen en el equilibrio de un elemento. ....	10
Figura 7. Reducción de la matriz de rigidez .....	13
Figura 8. Diferenciación central para determinar la ecuación general de movimiento.....	14
Figura 9. Metodología para estudio experimental y numérico de piezas embutidas.....	16
Figura 10. Prensa de engranajes del Laboratorio de conformado mecánico EPN.....	17
Figura 11. Chapa metálica cortada en dimensión requerida.....	19
Figura 12. Mallado de 5mm en la placa metálica .....	19
Figura 13. Utillaje para embutición.....	20
Figura 14. Posición inicial y final de elementos del utillaje de embutición .....	21
Figura 15. Medición del desplazamiento mediante la longitud de los resortes .....	21
Figura 16. Paralelismo entre caras de la chapa y la matriz .....	23
Figura 17. Probetas conformadas.....	23
Figura 18. Eje de referencia en la probeta conformada .....	24
Figura 19. Primer método para medir deformaciones .....	25
Figura 20. Segundo método para medir deformaciones .....	25
Figura 21. Método para el análisis numérico.....	26
Figura 22. Geometría dibujada en software CAD.....	26
Figura 23. Importación del archivo CAD al software ANSYS LS - DYNA.....	27
Figura 24. Asignación de material y tipo de cuerpo .....	28
Figura 25. Propiedades mecánicas del material Structural Steel NL.....	28
Figura 26. Condiciones de contorno .....	30
Figura 27. Elementos vs Deformación direccional Y.....	32
Figura 28. Mallado de la chapa metálica y utillajes de embutición .....	33
Figura 29. Módulos para el análisis numérico de embutición en ANSYS .....	34
Figura 30. Ubicación de ejes y líneas de referencia para la medición de deformaciones.	35
Figura 31. Función de distribución normal para las líneas de referencia .....	37
Figura 32. Áreas de deformaciones máximas y mínimas.....	38
Figura 33. Desplazamientos de los nodos medios.....	39
Figura 34. Arrugas generadas en la placa embutida.....	40

Figura 35. Distribución normal de las deformaciones unitarias del análisis numérico .....	43
Figura 36. Áreas de mayor deformación media residual en el modelo numérico.....	44
Figura 37. Áreas de mayor deformación media residual en el modelo numérico.....	45
Figura 38. Esfuerzo equivalente de los nodos Q y R vs tiempo.....	46
Figura 39. Desplazamiento direccional en el eje Y .....	47
Figura 40: Desplazamiento direccional en el eje Y vs tiempo .....	48
Figura 41. Desplazamiento direccional en el eje X .....	49
Figura 42. Desplazamiento direccional en el eje X vs tiempo.....	49
Figura 43. Desplazamiento direccional en el eje Z.....	50
Figura 44. Desplazamiento direccional en el eje Z vs tiempo .....	50

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Impronta de las líneas medias de las placas embutidas .....	61
Anexo 2. Diagrama fuerza del prensa chapas vs carrera del émbolo de embutido .....	62
Anexo 3. Valores de $x$ y $f(x)$ para la función de distribución normal de las deformaciones unitarias correspondientes a la experimentación .....	63
Anexo 4. Valores de $x$ y $f(x)$ para la función de distribución normal de las deformaciones unitarias correspondientes al análisis numérico .....	64
Anexo 5. Resultado del análisis numérico ANSYS MECHANICAL LS/DYNA.....	65
Anexo 6. Diagrama esfuerzo deformación para un acero ASTM A 36 .....	66
Anexo 7. Guía de prácticas del proceso de embutición para la obtención de una pieza cóncava hueca rectangular de acero de bajo carbono.....	67

## RESUMEN

El presente trabajo estudia experimentalmente el proceso de embutición para la obtención de una pieza cóncava hueca rectangular de acero de bajo carbono para la validación de un modelo numérico que utiliza el método de elementos finitos. La embutición es un proceso de conformado mecánico de gran importancia industrial debido al gran ahorro de materia prima que involucra distribuciones complejas de flujo y fuerza en el material. La metodología utilizada se conformó por tres procesos: experimental, numérico y validación. La fase experimental permitió caracterizar parámetros como: propiedades mecánicas del material, geometría de la matriz, émbolo y placa metálica de 43 probetas ensayadas. Las fuerzas de embutición y de la prensa chapa se calcularon analíticamente. La fase numérica consistió simular el proceso usando los parámetros medidos anteriormente, se despreció parámetros como la temperatura y lubricación. La fase de la validación consistió en comparar las deformaciones experimentales y numéricas en 3 líneas diferentes (OX, AB y CD) y los desplazamientos direccionales en tres nodos (A, K y D). Las longitudes medidas fueron tabuladas y se calculó las deformaciones para realizar gráficas de distribución normal, cuyos parámetros se compararon con los resultados numéricos. El mayor error en las deformaciones del ancho de la placa fue del 87 % y en los elementos del 42 %. Se concluyó que el modelo numérico describe el experimento adecuadamente por zonas. Sin embargo, el modelo numérico permite evaluar parámetros como deformaciones, esfuerzos y transiciones lo cual es muy importante para complementar la guía de práctica del proceso de embutición realizado en el laboratorio de conformado mecánico de la Escuela Politécnica Nacional.

**Palabras clave:** Conformado mecánico, embutición, análisis numérico, deformación unitaria, elementos finitos.

## ABSTRACT

The present work carries out experimental test of the metal forming process to obtain a concave work – piece. This work is done to validate the corresponding numerical model carried out in the software LS / DYNA. Metal forming is important in industry because it allows saving material in the manufacturing process by controlling complex stress and strain levels at different flow rates. Forty-three specimens were tested. The metal forming requires force were assessed analytically and used as input for the numerical model. The numerical model did not include parameters such as temperature and lubrication. Deformation of meshed elements located in three lines (OX, AB and CD) were compared with those obtained experimentally. The longest errors for deformation along the width was 87%, and for a single element was 42 %. It is concluded the actual numerical model reflect the experiment in areas. This is because important parameters such as lubrication were not included. However, the numerical model offers an important and necessary complement for the experimental laboratory guide.

**Keywords:** Metal forming, deep drawing, numerical analysis, strain, finite elements

# **ANÁLISIS NUMÉRICO CON VALIDACIÓN EXPERIMENTAL DEL PROCESO DE EMBUTICIÓN PARA LA OBTENCIÓN DE UNA PIEZA CÓNCAVA HUECA RECTANGULAR DE ACERO DE BAJO CARBONO**

## **INTRODUCCIÓN**

La mayor parte de objetos que se utilizan en la vida cotidiana se obtienen de una materia prima a través de algún proceso de fabricación. Todos los ensambles están hechos de una serie de pequeños componentes montados en el producto terminado. La fabricación de piezas y componentes terminados a partir de materias primas es uno de los pasos más importantes en la producción. Los procesos de conformado mecánico son operaciones de fabricación muy importantes y de gran importancia industrial entre diversas operaciones de producción debido a ventajas como rentabilidad, operaciones flexibles, mayor productividad y considerable ahorro de material.

Con el fin de cumplir los requisitos y exigencias modernas de la industria, el ingeniero tiene que elegir variables como: material y el equipo idóneo para la fabricación, de manera que el costo, tiempo y energía de producción sean mínimos. También se debe considerar variables como: impacto ambiental, contaminación del aire, eliminación de residuos y seguridad industrial.

Los conceptos modernos de manufactura, control, fabricación, tecnología, entre otros tienen una influencia considerable en la reducción de costos y en la mejora de la calidad de los productos. Las computadoras y los robots juegan un papel importante en las técnicas modernas de fabricación. El modelado y la simulación del proceso antes de la producción en masa ayudan al ingeniero a controlar los principales parámetros operativos, por lo tanto, lograr el producto terminado al máximo nivel de calidad y rentabilidad.

Un proceso de fabricación es el de embutición, que se realiza como práctica en el laboratorio de conformado mecánico, para la obtención de una pieza cóncava hueca rectangular de acero de bajo carbono. La práctica no permite estudiar varios parámetros que caracterizan este proceso de fabricación, es decir, actualmente la práctica no posibilita evaluar parámetros como esfuerzos y deformaciones. La práctica de embutición que se realiza está desactualizada, se la ejecuta usando métodos empíricos, dando como resultado un análisis con un alcance limitado.

Por lo expuesto anteriormente es necesario complementar la práctica del proceso embutición con resultados numéricos que proporcionen información complementaria. Esto es posible mediante el método de elementos finitos. Este proyecto estudia el proceso de embutición usando métodos numéricos y tomando como base los fundamentos teóricos de los procesos de manufactura y las propiedades mecánicas de los materiales, específicamente en la zona plástica. Los resultados experimentales sirven como base para validar el método numérico y por lo tanto constituyen un importante elemento en la elaboración de la guía de práctica.

## **Objetivo general**

Estudiar experimentalmente el proceso de embutición para la obtención de una pieza cóncava hueca rectangular de acero de bajo carbono para complementar la práctica que se realiza en el laboratorio de conformado mecánico, mediante la simulación del proceso utilizando el método de los elementos finitos.

## **Objetivos específicos**

- Investigar el proceso de embutición y los fundamentos teóricos relacionados a deformación plástica para la obtención de piezas mecánicas.
- Analizar el proceso de embutición para la obtención de una pieza cóncava hueca rectangular de acero de bajo carbono de 1 [mm] de espesor mediante el método de los elementos finitos.
- Validar los resultados obtenidos mediante el método de elementos finitos con un ensayo al proceso de embutición para la obtención de una pieza cóncava hueca rectangular de acero de bajo carbono de 1 [mm] de espesor.
- Elaborar una guía adecuada para la práctica, la cual estará basada en experimentación y resultados de simulación numérica por ordenador para la obtención de una pieza cóncava hueca rectangular de acero de bajo carbono.



# 1. MARCO TEÓRICO

## 1.1. Procesos de conformado mecánico

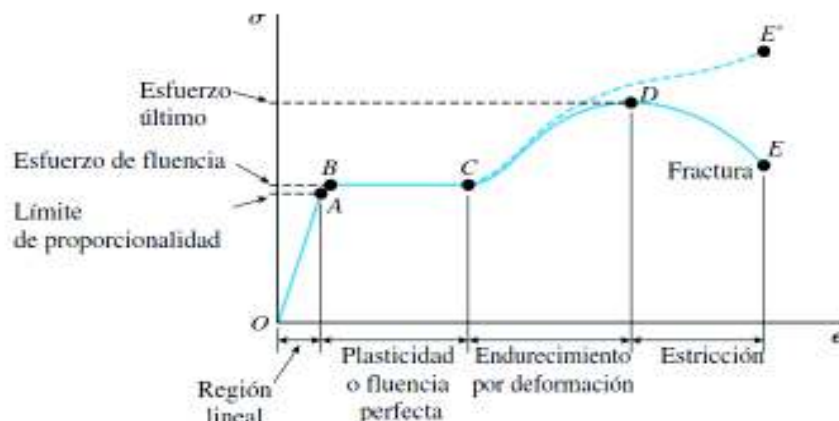
La figura 1 muestra el diagrama esfuerzo deformación unitaria para un material metálico dúctil sometido a cargas de tracción. Cuando se aplica una fuerza que no supera el límite de proporcionalidad (región lineal), la longitud cambia ligeramente una distancia que se puede expresar como deformación ( $\epsilon$ ), pero el material vuelve a su estado original una vez que se libera de la carga aplicada, a este tramo **OA** se llama deformación elástica. [1] [2] La ecuación (1) define a la deformación como la relación entre la diferencia de las longitudes con respecto a la longitud inicial. [3]

$$\epsilon = \frac{l_f - l_i}{l_i} \quad (1)$$

Donde  $l_f$  y  $l_i$  son las longitudes inicial y final respectivamente.

Una vez que la fuerza aplicada supera el límite elástico **A**, comienza a sufrir deformación plástica **BC**. En la deformación plástica, el cambio geométrico no es directamente proporcional a la fuerza y el material no recupera su forma original. El metal se endurece si se deforma plásticamente; esto se observa en el tramo **CD** y se denomina endurecimiento por deformación o trabajo. El endurecimiento por deformación es un factor muy importante en los procesos de conformado mecánico. [1] [2]

Los procesos de conformado mecánico se caracterizan porque el material se deforma plásticamente para obtener una geometría deseada. Para deformar plásticamente un metal, debe aplicarse una fuerza que exceda el límite fluencia **B** ( $S_y$ ) del material. [1] [2]



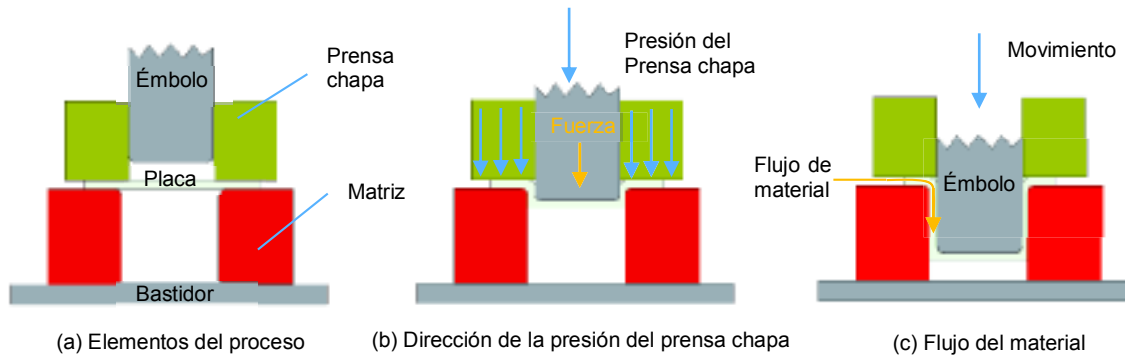
**Figura 1.** Diagrama esfuerzo deformación unitaria  
**Fuente:** (Gere, 2009, p.19)

## 1.2. Embutición

Un proceso de conformado mecánico es la embutición, que se utiliza ampliamente para la fabricación de objetos huecos como ollas, recipientes, piezas del automóvil, paneles, tanques de gas, entre otros. A medida que aumenta la complejidad geométrica de la pieza hueca, las dificultades de fabricación aumentan. [4] [5]

### 1.2.1. Procedimiento de embutición

En la figura 2 se muestra el proceso de embutición de una chapa metálica que se realiza con un émbolo y una matriz. El émbolo tiene la forma deseada de la base de la pieza, una vez estirada (ver figura 2 (a)). La cavidad de la matriz coincide con el émbolo y es un poco más ancha para permitir su paso, así como la separación. La chapa metálica a ser conformada se denomina pieza en bruto y se coloca sobre la abertura de la matriz. En la figura 2(b) la prensa chapa aplica presión a toda la superficie de la pieza en bruto, manteniendo la chapa plana contra la matriz, y luego el émbolo se desplaza hacia el espacio en blanco. Después de poner en contacto los elementos, el émbolo presiona a la chapa metálica y la deforma plásticamente como se muestra en la figura 2(c). [2] [4] [5]



**Figura 2.** Proceso de embutición profunda.  
**Fuente:** (Koninck & Gutter, 1982)

### 1.2.2. Parámetros principales en el proceso de embutición

La embutición es un proceso de conformado de chapa metálica que involucra distribuciones complejas de flujo y fuerza en el material. Las condiciones ideales para la embutición incluyen: Uso de un metal de trabajo con calidad para la embutición, piezas simétricas de gravedad relativamente leve, lubricación adecuada, herramientas de carburo de precisión, presión controlada y prensas que mantienen un alto nivel de precisión. Los principales parámetros que se consideran para el proceso de embutición se clasifican en tres grupos como se muestra en la tabla 1. [6] [7]

**Tabla 1.** Parámetros principales que intervienen en el proceso de embutición

<b>Propiedades del material</b>	<b>Proceso</b>	<b>Geometría</b>
Densidad de la chapa	Temperatura	Radios de acuerdo
Límite de fluencia	Fuerza de embutición	Forma de la matriz
Límite último a la tracción	Presión en el prensa chapas	Tipo de embutición
Coefficiente de fricción	Lubricación	

**Fuente:** (Dwivedi & Agnihotri, 2016)

### **1.2.2.1. Propiedades del material**

La placa comienza a ocupar la cavidad del molde cuando se supera el límite de fluencia del material, esto se conoce como tensión de flujo. Los aceros laminados de bajo contenido de carbono son los materiales que más comúnmente se usan en embutición, por ejemplo, en la industria automotriz. Los materiales como el acero 1006 y 1008 tienen un límite elástico típico en el rango de 172 a 241 MPa y alargamientos de 35 a 45% en 50 mm. Estos materiales tienen una excelente conformabilidad y están disponibles en laminación en frío y caliente con diversos niveles de calidad y una amplia gama de espesores. [6]

El tamaño del grano afecta la capacidad de estiramiento de los materiales y puede afectar la selección de un grado más grueso que puede dar como resultado una rugosidad superficial excesiva, así como una capacidad de embutición reducida. El acabado superficial también influye en la capacidad de estiramiento. El acabado opaco normalmente suministrado en aceros para embutición está diseñado para contener lubricantes y para mejorar la capacidad de embutición. Se pueden requerir acabados más brillantes si, por ejemplo, las piezas deben ser galvanizadas. [6]

### **1.2.2.2. Proceso**

**Temperatura:** Un parámetro a considerar dentro del proceso de embutición es la temperatura. Las propiedades mecánicas del material cambian con el aumento de temperatura, lo cual, afecta el proceso de embutición, a pesar de que el rango de temperatura de trabajo es considerado como trabajo en frío. [6]

**Fuerza de embutición:** La fuerza usada para realizar la embutición de chapa metálica debe ser la adecuada para proporcionar la deformación, producir un flujo de metal adecuado y superar la fricción durante el proceso. La magnitud de la fuerza no debe ser demasiado alta o aplicada incorrectamente porque puede producirse fisuras en la chapa metálica. El émbolo y la prensa chapa ejercerán diferentes fuerzas y el análisis de la fuerza se debe hacer para ambos. La ecuación (2) define la fuerza de embutición: [6]

$$F_e = S_y e D_p \left( \frac{D_b}{D_p} - 0.7 \right) \quad (2)$$

Donde,  $S_y$  es el límite de fluencia,  $e$  es el espesor,  $D_b$  es el diámetro de la chapa metálica y  $D_p$  es el diámetro del émbolo. El factor 0.7 es una constante de corrección de la fricción del material en función del espesor.

**Presión en la prensa chapa:** El objetivo de una prensa chapa es evitar que se formen arrugas en la chapa metálica durante la embutición. La formación de arrugas impide la acción de compresión. Se pueden lograr estiramientos más grandes cuando se utiliza una prensa chapa, sin embargo, cuando la presión aplicada es alta se producen fracturas en el material. La ecuación (3) muestra la fórmula más simple para calcular la fuerza que se debe ejercer en la prensa chapa para una placa metálica de un milímetro de espesor. [6]

$$F_a = \frac{1}{3} F_e \quad (3)$$

Donde,  $F_e$  y  $F_a$  son las fuerzas en la prensa chapa y de embutición respectivamente.

**Lubricación:** Cuando dos metales están en contacto deslizante bajo presión, como ocurre en el proceso de embutición, es probable que se produzcan gripado (soldadura a presión), que depende de la fuerza y la composición entre las herramientas y la chapa metálica. Los lubricantes que se utilizan en la mayoría de las operaciones de embutición, varían desde aceite hasta compuestos pigmentados. La selección del lubricante se basa principalmente en la capacidad de evitar la formación de arrugas. También se ve influenciado por la facilidad de aplicación y eliminación de la corrosión. [6]

### 1.2.2.3. Geometría

La geometría de la matriz tiene dos factores principales que permiten al émbolo en embutición formar el metal en la cavidad de la matriz: El primer factor corresponde a los radios de la esquina de la matriz y el émbolo. Un radio en los bordes cambiará la distribución de la fuerza y hará que el metal fluya sobre el radio y dentro de la cavidad de la matriz. El segundo factor es la separación entre la matriz y el émbolo en donde el material debe fluir. La separación en las operaciones de corte es relativamente pequeña, usualmente del 3 % al 8 % del grosor de la chapa. En embutición, si el espacio libre es demasiado pequeño, la chapa puede cortarse o perforarse, a pesar de tener radio de borde. La separación en el proceso de embutición es mayor que el grosor de la chapa, normalmente los valores de separación son del 107 % al 115 % del grosor. [2] [4] [5] [6]

Para cálculos empíricos se considera que el grosor de la chapa permanece constante. Sin embargo, hay cambios de espesor en ciertas áreas debido a las fuerzas involucradas. Para formar las paredes laterales de la pieza, el material debe fluir desde el periférico de la pieza en bruto sobre el radio de la esquina de la matriz, luego en línea recta en la dirección del émbolo. El adelgazamiento máximo ocurrirá muy probablemente en la pared lateral, cerca de la base de la pieza. Una parte correctamente estirada puede tener hasta un 25% de reducción de grosor en algunas áreas. [6]

Otro parámetro a considerar es el material de la matriz, debido a que debe facilitar la fabricación en la forma de la cavidad. También se debe considerar el desgaste debido al uso, por ser un proceso industrial de fabricación en serie de millones de piezas. El aspecto más importante relacionado con el material de la matriz se relaciona a la fuerza de rozamiento que existe con la placa metálica porque este factor influye en el porcentaje de deformación por embutición. [6]

El aspecto final a considerar es el tipo de embutición que se va a realizar en la chapa metálica. Cuando el porcentaje de deformación por embutición es superior al 50 %, la pieza debe conformarse en operaciones múltiples. Cada operación afectará a la siguiente y se debe realizar un análisis para cada paso. Si se realizar una embutición múltiple o profunda en donde es necesario varias operaciones de embutido, entonces la chapa metálica se debe aplicar un tratamiento térmico de recocido de alivio de esfuerzos cada dos operaciones. [6]

### **1.3. Análisis numérico mediante el método de elementos finitos.**

El método de elementos finitos (MEF) es una herramienta para la solución de sistemas de ecuaciones diferenciales. Estas ecuaciones describen esfuerzos, desplazamientos y deformaciones de un elemento que está sometido a cargas externas. [8]

#### **1.3.1. Tipos de sistemas**

A cualquier proceso que realice una transformación de señales se lo conoce como sistema. Parámetros como el dominio, condiciones de contorno y las incógnitas, son considerados para definir los sistemas, y se pueden clasificar como: continuos y discretos.



**Figura 3.** Ejemplo de un sistema  
**Fuente:** (Salazar & Villacrés, 2017)

### 1.3.1.1. Sistemas continuos

Se puede tratar de sistema geométrico continuo, cuando este se divide en un número infinito de elementos. Todos los elementos mecánicos son sistemas continuos, los cuales requieren para su solución la utilización de modelos matemáticos. [9]

### 1.3.1.2. Sistemas discretos

Al contrario de los sistemas continuos, cuando un modelo geométrico se divide en un número finito de elementos, entonces se denomina sistema discreto. Los sistemas continuos y discretos guardan cierta relación entre sí, que se puede utilizar para facilitar la resolución, a esta herramienta se le llama discretizar un sistema, que es un proceso matemático para obtener soluciones aproximadas de la ecuación diferencial planteada. La figura 4 muestra a un elemento que se encuentra dividido en secciones que se pueden analizar individualmente. [8] [9]



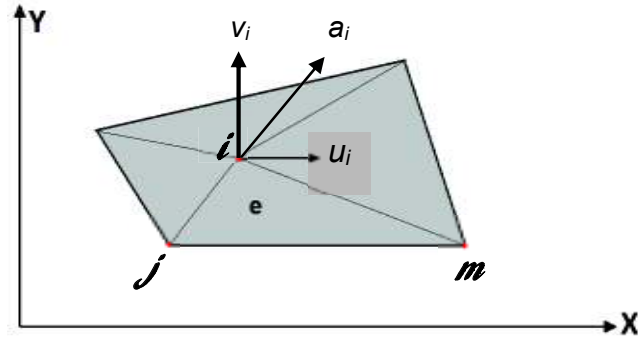
**Figura 4.** Discretización de un sistema continuo a un sistema discreto.  
Fuente: (Zienkiewicz & Taylor, 1994)

### 1.3.2. Parámetros para la formulación del MEF en procesos de embutición.

Para estudiar el proceso de embutición por el método de elementos finitos se debe establecer las propiedades mecánicas del material, y también plantear ecuaciones que describen los principales parámetros que influyen en el proceso, estas ecuaciones se combinan entre sí para formar sistemas que gobiernan el modelo en su totalidad. Estos parámetros son función del desplazamiento, deformaciones unitarias, estado de tensiones, equilibrio del elemento, entre otras y se describen a continuación. [10]

#### 1.3.2.1. Función desplazamiento

La figura 5 muestra un elemento (e) contenido en un plano, el cual se ha discretizado y definido por los nodos i, j, m. Los desplazamientos de cada nodo pueden ser representados por componentes rectangulares (u; v).



**Figura 5.** Coordenadas nodales (i, j, m) del elemento e.  
**Fuente:** (Zienkiewico & Taylor, 1994)

La ecuación (4) muestra la representación matricial del desplazamiento del nodo i. [9]

$$a_i = \begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \end{Bmatrix} \quad (4)$$

La ecuación (5) define a la matriz  $a^e$  en función de los desplazamientos nodales. [9]

$$a^e = \begin{Bmatrix} a_i \\ a_j \\ a_m \end{Bmatrix} \quad (5)$$

Las funciones de posición dadas forman las componentes de la matriz fila N. y la función de desplazamiento  $\hat{u}$  es el producto matricial de N por  $a^e$  expresada en la ecuación (6).

$$\hat{u} = \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \Sigma N_i a_i^e = (N_i, N_j, N_m) \begin{Bmatrix} a_i \\ a_j \\ a_m \end{Bmatrix}^e = N a^e \quad (6)$$

### 1.3.2.2. Deformaciones unitarias

La ecuación (7) define a la deformación unitaria ( $\epsilon$ ), como el producto de un operador lineal L, compuesto por las derivadas parciales en el plano, y el vector de desplazamiento  $\hat{u}$ . [9]

$$\epsilon = \begin{Bmatrix} \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial}{\partial y} \\ \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = L \hat{u} \quad (7)$$

La ecuación (8) se define al reemplazar la deformación  $\hat{u}$ , por su equivalente N  $a^e$  mostrado en la ecuación (6). El operador matricial  $\partial$  representa las derivadas parciales que permite convertir las deformaciones (u, v) a las deformaciones unitarias  $\epsilon$ . [9]

$$\varepsilon = \partial u = \partial N \delta^e \quad (8)$$

La ecuación (9) define la matriz B como el campo de deformaciones unitarias. [9]

$$B = \partial N \quad (9)$$

Al reemplazar la ecuación (9) en la ecuación (8) resulta

$$\varepsilon = B \delta^e \quad (10)$$

### 1.3.2.3. Estado de tensiones

Los elementos en general pueden sufrir deformaciones debido a tensiones externas que actúan sobre ellos. Para un elemento con esfuerzo inicial  $\sigma_o$  y deformación inicial  $\varepsilon_o$ , el esfuerzo total se puede calcular con la ecuación (11): [8] [9]

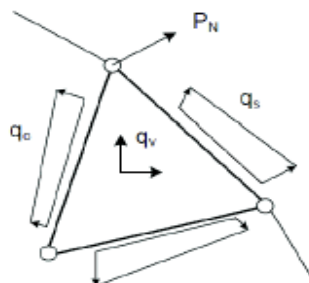
$$\sigma = D (\varepsilon - \varepsilon_o) + \sigma_o \quad (11)$$

Donde, D es la matriz de rigidez del material que es función del módulo de elasticidad E, y del módulo de Poisson  $\nu$ . Las relaciones isotrópicas usualmente utilizadas para esfuerzo-deformación, son la herramienta más útil para obtener la matriz D, ver ecuación (12). [8] [9]

$$\sigma = \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} (\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \gamma_{xy}) = D (\varepsilon_x \ \varepsilon_y \ \gamma_{xy}) \quad (12)$$

### 1.3.2.4. Equilibrio del elemento

El equilibrio del elemento está directamente relacionado con una adecuada distribución de fuerzas volumétricas por unidad de volumen ( $q_v$ ), las fuerzas de superficiales por unidad de superficie ( $q_s$ ), las fuerzas de contacto mecánico ( $q_c$ ), y cargas externas, a esto se denomina principio de trabajos virtuales, y determina el conjunto de fuerzas nodales  $\{PN^e\}$ . En la figura 6 se puede distinguir como actúan las diferentes fuerzas. [11]



**Figura 6.** Fuerzas que intervienen en el equilibrio de un elemento.  
Fuente: (Celigueta, 2008)



La formulación de los trabajos virtuales se puede expresar como sigue: [9] [11]

$$\int_v B^T \sigma dv = \int_v N^T q_v dv + \int_s N^T q_s ds + \int_c N^T q_c ds + P_N^e \quad (13)$$

De la ecuación 13 se puede señalar los siguientes términos:

**Vector de fuerzas nodales equivalentes:** Es el producto de las fuerzas por unidad de volumen. [9] [11]

$$P_v^e = \int_v N^T q_v dv \quad (14)$$

**Vector de fuerzas nodales equivalentes:** Relaciona las fuerzas exteriores aplicadas en la superficie: [9] [11]

$$P_s^e = \int_s N^T q_s ds \quad (15)$$

La variación de las deformaciones unitarias está directamente involucrada con la variación de las deformaciones nodales a través de la matriz B. La integral debida a las fuerzas producidas por cargas de contacto mecánico  $q_c$ , (ver ecuación (13), la 3era integral desde la izquierda), que actúan sobre el contorno de unión se sustituye por: [9] [11]

$$P_c^e = \int_c N^T q_c ds \quad (16)$$

**Vector de fuerzas externas:** Son producto de las tensiones iniciales que existen en el material: [9] [11]

$$P_b^e = \int_v B^T \sigma_o dv \quad (17)$$

Al sustituir entonces la ecuación (16) y (17) en la ecuación (13) se obtiene:

$$\int_v B^T \sigma dv = \int_v N^T q_v dv + \int_s N^T q_s ds + P_c^e + P_N^e \quad (18)$$

Reemplazando a ecuación (12) en la ecuación (18) resulta:

$$\int_v B^T (D(\varepsilon - \varepsilon_0) + \sigma_0) dv = \int_v N^T q_v dv + \int_s N^T q_s ds + P_C^e + P_N^e \quad (19)$$

Resolviendo y reordenando todos los términos se obtiene:

$$\int_v B^T DB dv \delta^e = \int_v N^T q_v dv + \int_s N^T q_s ds + \int_v B^T D\varepsilon_0 - \int_s B^T \sigma_0 dv + P_C^e + P_N^e \quad (20)$$

La ecuación (20) es la resultante y final del elemento finito considerado cuando está en equilibrio. En ella se puede distinguir los siguientes términos:

**Matriz de rigidez:** Relaciona los desplazamientos de los nodos con los esfuerzos puntuales efectivos en dichos nodos. Es una matriz simétrica y cuadrada de igual tamaño al número de grados de libertad del elemento. [9] [11]

$$K^e = \int_v B^T DB dv \quad (21)$$

**Vector de fuerzas externas:** Presentes debido a las deformaciones iniciales en el material de trabajo: [11]

$$P_T^e = \int_v B^T D\varepsilon_0 dv \quad (22)$$

Una vez analizada la ecuación de equilibrio del elemento, la ecuación (20) se puede expresar como: [9] [11]

$$K^e \delta^e = P_v^e + P_S^e + P_T^e + P_b^e + P_C^e + P_N^e \quad (23)$$

Donde K es la matriz de rigidez: [9] [11]

$$K = \int_v B^T D B dv = \int_v B^T Q^T D' q b dv \quad (24)$$

### 1.3.3. Condiciones de contorno

Las condiciones de contorno se utilizan principalmente para reducir el número de ecuaciones de equilibrio, y sus respectivas incógnitas, por lo que las condiciones de contorno se pueden decir que permiten la resolución de sistemas de ecuaciones diferenciales. [9]

#### 1.3.3.1. Restricciones de desplazamiento.

Para obtener las ecuaciones de equilibrio y las condiciones de contorno asociadas al proceso de embutición, se debe aplicar el principio del trabajo virtual. Para ello las condiciones de contorno deben sustituir la ecuación de equilibrio asociada al desplazamiento prescrito. En caso de soportes fijos, el desplazamiento para Y es  $v_i = 0$  y para X es  $u_i = 0$ , se elimina filas y columnas del sistema de ecuaciones que se relacionaron con el desplazamiento. En la figura 7 se reduce la dimensión del sistema que se busca resolver y entonces solo se calcularán las incógnitas actuales del problema. [10]

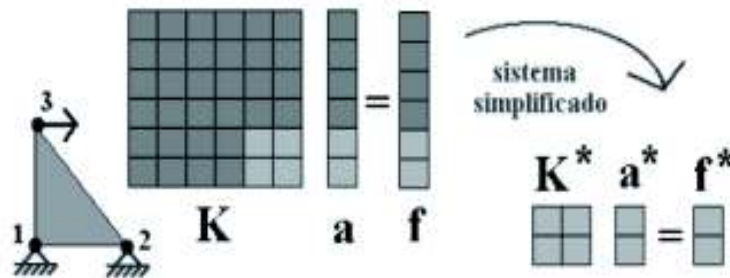
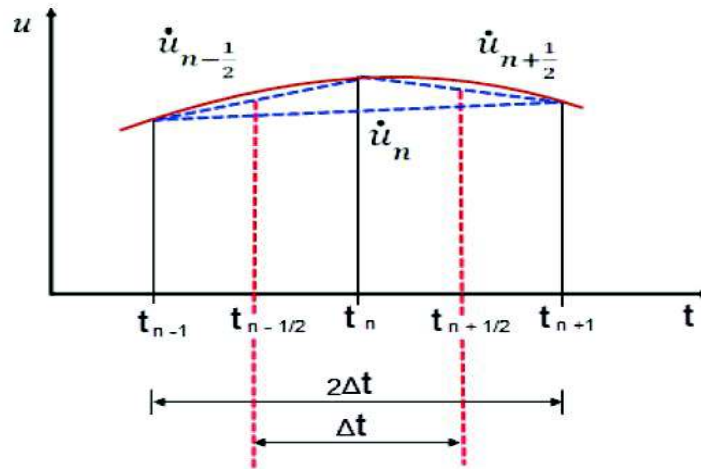


Figura 7. Reducción de la matriz de rigidez  
Fuente: (Salazar & Villacrés, 2017)

#### 1.3.4. Métodos numéricos usados para el proceso de embutición.

En los elementos finitos se requiere resolver ecuaciones diferenciales usando métodos numéricos. Uno de estos métodos se muestra en la figura 8, llamado método de diferencia central. Este método permite convertir una ecuación diferencial en una ecuación algebraica, como se muestra en la ecuación (25), donde se discretiza en intervalos finitos del elemento en espacio y el tiempo.

Además, las condiciones iniciales sirven para resolver constantes de integración y para iniciar el proceso iterativo. También, el intervalo de discretización resulta ser de vital importancia para reducir errores de truncado y evitar divergencias.



**Figura 8.** Diferenciación central para determinar la ecuación general de movimiento.  
**Fuente:** (Salazar & Villacrés, 2017)

$$\left( [M] \frac{1}{\Delta t^2} + [C] \frac{1}{2\Delta t} \right) u_{n+1} + \left( [K] - [M] \frac{2}{\Delta t^2} \right) u_n + \left( [M] \frac{1}{\Delta t^2} - [C] \frac{1}{2\Delta t} \right) u_{n-1} = [F_n^{\text{externa}}] \quad (25)$$

#### 1.4. Software para simulación de procesos de embutición

Para la simulación del proceso de embutición de la chapa metálica que se utiliza el software ANSYS, con su módulo LS-DYNA, que se describen a continuación:

ANSYS es un software usado en ingeniería e investigación que brinda soluciones a problemas usando métodos implícitos y explícitos, resuelve sistemas dinámicos y estáticos, en los cuales, los problemas pueden ser lineales o no lineales. Una limitación es que sus módulos no son adecuados para resolver problemas de contacto e impacto mecánico con deformaciones grandes. [12]

LS-DYNA es un software que resuelve procesos explícitos y dinámicos, en los que se producen problemas de impactos, de contactos entre superficies, grandes deformaciones y problemas no lineales. Como la solución explícita depende del tiempo, el sistema debe resolverse completamente para cada intervalo de tiempo hasta llegar a completar el tiempo total de la simulación. [12]

Existen módulos de ANSYS que realizan los mismos análisis que LS-DYNA pero con menos precisión en sus resultados.

## **2. METODOLOGÍA**

Es esta sección se detalla el procedimiento del proceso de embutición, y el desarrollo del método numérico realizado.

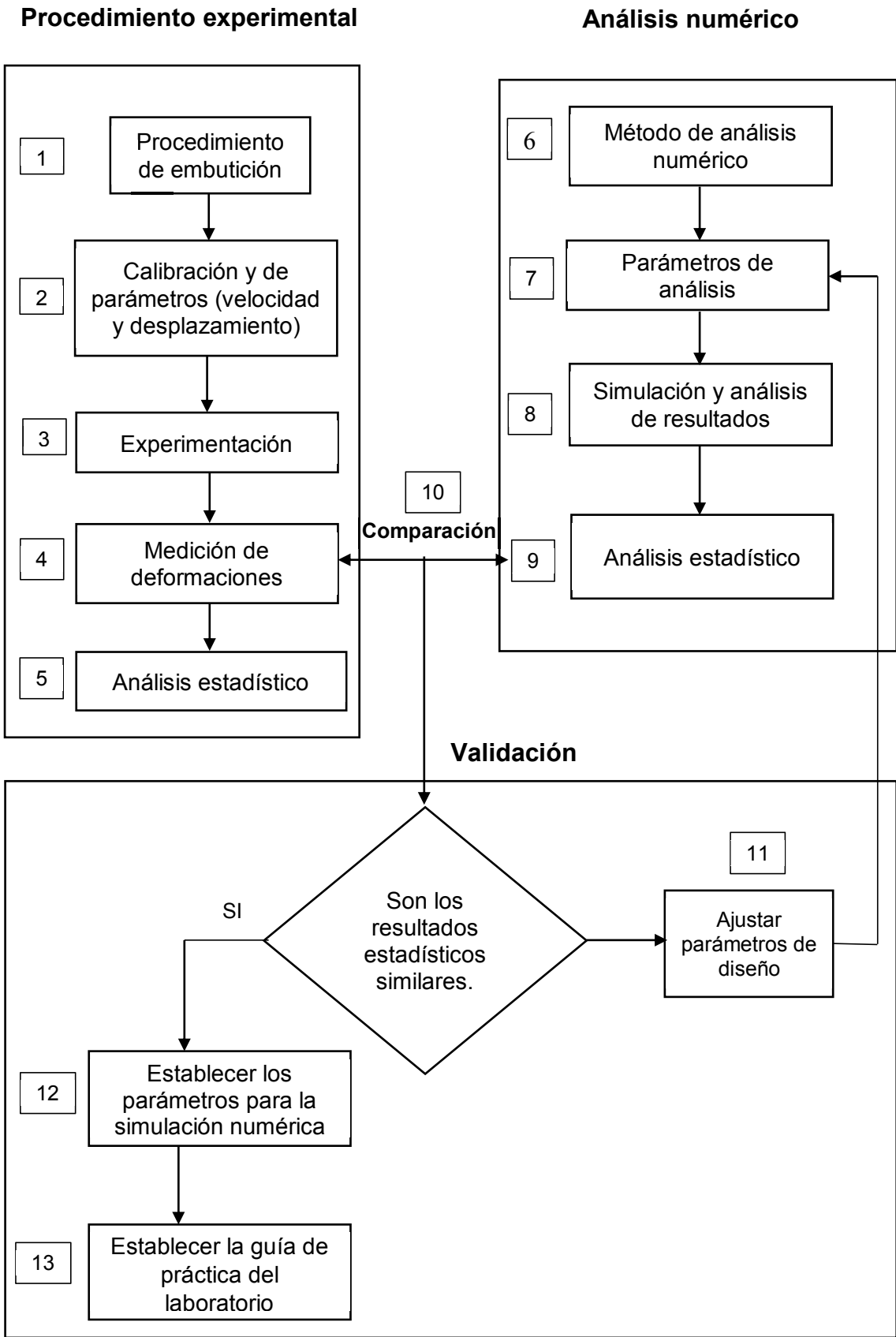
### **2.1. General**

El presente proyecto tiene un diseño experimental, de campo y descriptivo. Es experimental porque se realizó el proceso de embutición en chapas metálicas de acero de bajo carbono, de campo porque se realizó en el laboratorio de conformado mecánico de la Escuela Politécnica Nacional y descriptivo por que se caracteriza las variables involucradas en la experimentación para desarrollar y validar el método numérico. El diagrama de flujo mostrado en la figura 9 describe la metodología empleada en este proyecto. Se trabajó en tres procesos a nivel macro: La experimentación, el análisis numérico y la validación.

El primer proceso macro es el procedimiento experimental que se detalla globalmente por los 5 primeros pasos. La figura 9 muestra en el paso 1 la necesidad de establecer el proceso de embutición, ver subcapítulo 2.2. Una vez establecido el procedimiento, los parámetros de velocidad y desplazamiento del émbolo deben ser determinados, esto se lo realiza en el paso 2. En el paso 3 se llevó a cabo el ensayo de las probetas (ver apartado 2.2.1). El paso 4 consistió en medir las deformaciones, ver subcapítulo 2.3, donde se menciona los parámetros empleados en cada placa embutida. El análisis estadístico de las deformaciones se presenta en el paso 5, donde se utilizó los datos medidos en las 43 probetas, ver subcapítulo 3.1.

El segundo proceso macro es la etapa del análisis numérico que se describe desde el paso 6 hasta el 10, En el paso 6 se establece un método ordenado del análisis numérico, ver subtítulo 2.4. y figura 21. El paso 7 detalla los parámetros de análisis cuantitativo y cualitativamente ver apartados 2.4.1, 2.4.2 y 2.4.3. El paso 8 muestra la simulación del proceso de embutición en el software ANSYS – LSDYNA, ver apartado 2.4.4. El paso 9 consistió en evaluar estadísticamente los datos entregados por la simulación.

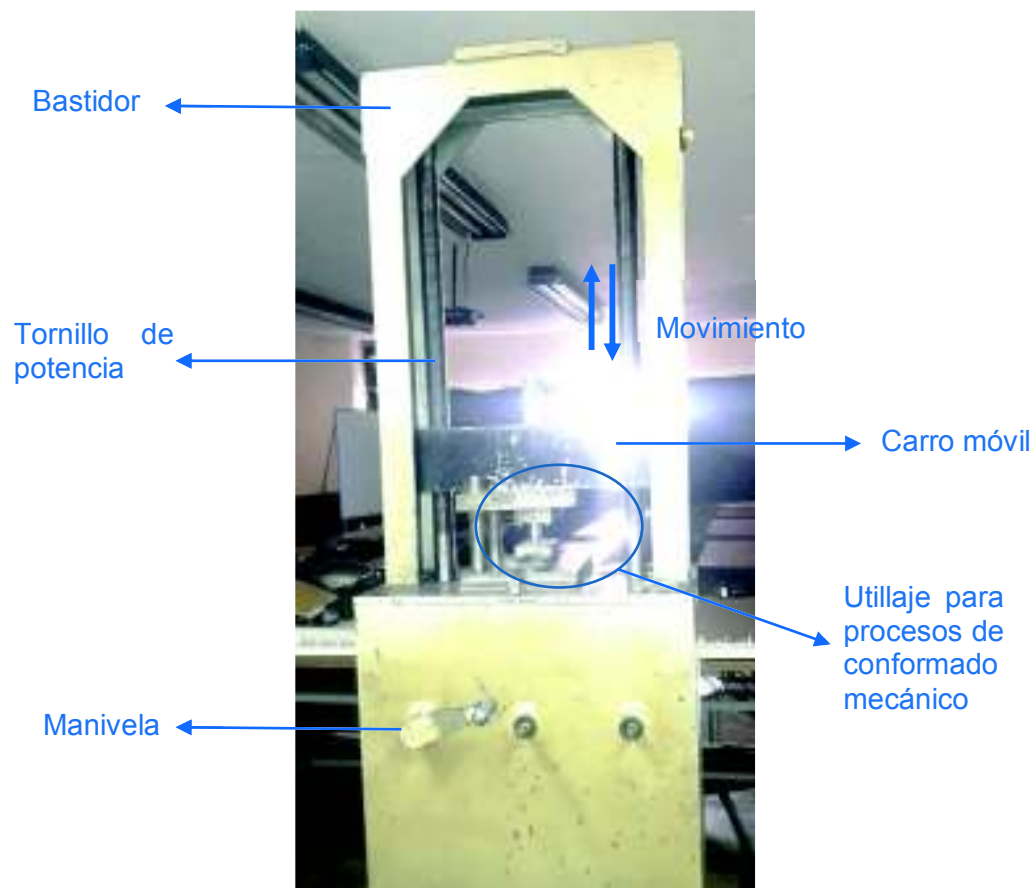
El tercer proceso macro es la etapa de la validación del análisis numérico. Los resultados de los pasos 5 y 9 son comparados mediante una decisión como se muestra en el paso 10, ver apartado 3.3. Si los resultados no son estadísticamente similares se ajustan los parámetros de diseño como se observa en el paso 11. El paso 12 consiste en establecer los parámetros para la simulación numérica y finalmente el paso 13 consiste en establecer la guía de práctica del laboratorio de conformado mecánico, ver anexo 7.



**Figura 9.** Metodología para estudio experimental y numérico de piezas embutidas  
**Fuente:** Propia

## 2.2. Proceso de embutición

La figura 10 muestra la prensa de tornillos que fue usada en el proceso de embutición. La prensa posee una manivela con tres velocidades que permite desplazar el émbolo de acuerdo a las necesidades requeridas. Consta de una mesa en donde se coloca los diferentes utillajes para las prácticas de embutición, corte, dureza, entre otras.



**Figura 10.** Prensa de engranajes del Laboratorio de conformado mecánico EPN.  
**Fuente:** Propia

El cálculo de tamaño muestral necesario para realizar el proceso de embutición se basó en la ecuación (26) que describe el tamaño estadístico de muestra en base a proporción. [13]

$$n = \frac{Z^2 PQ}{e^2} \quad (26)$$

Donde,  $n$  es el tamaño muestral,  $Z$  es el nivel de confianza,  $P$  es la proporción de éxito,  $Q$  es la proporción de fracaso y  $e$  es el error, que este caso tiene un valor de 0.15. El nivel de confianza usado para este cálculo es de 95 % ( $z=1.96$ ), el nivel de éxito y fracaso es igual a 50 % (0.5), y el error usado fue del 15 % (0.15).

Utilizando la ecuación 26, con los datos señalados, se obtiene el valor de n.

$$n = 42.68$$

$$n \approx 43$$

En base a este resultado, se realizaron 43 procedimientos de embutición en las placas de acero ASTM A-36.

El material de las placas metálicas es acero de bajo carbono ASTM A-36 de 1.1 mm de espesor, debido a que la matriz, el émbolo y demás utillajes fueron diseñados para trabajar sin problema con materiales dúctiles de baja resistencia mecánica de acuerdo a Merchan (1986). [14]

Las propiedades mecánicas y químicas del material de la probeta se encuentran detallados en la norma ASTM A 36/A 36M "Specification for Steel Sheet, Carbon, Drawing Quality, Special Killed, Cold Rolled" [15]. La tabla 2 muestra las propiedades mecánicas requeridas para el desarrollo de la práctica de embutición.

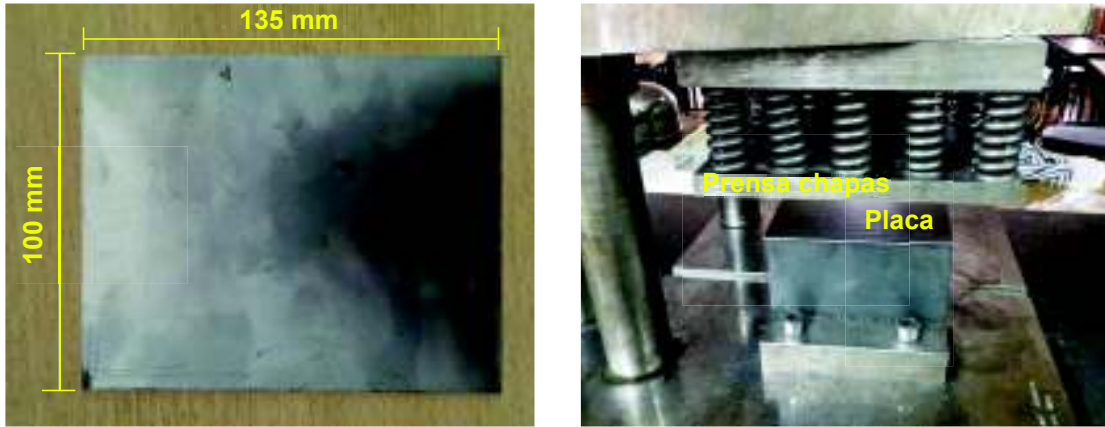
**Tabla 2.** Propiedades del material ASTM A-36

<b>Propiedades mecánicas</b>	
Módulo de Young (E)	2900 Ksi (200 GPa)
Relación de Poisson ( $\nu$ )	0,26
Límite de fluencia ( $S_y$ )	36 Ksi (250 MPa)
Densidad ( $\rho$ )	7850 (Kg / m <sup>3</sup> )
Módulo de corte	145 MPa
<b>Composición química (% en peso)</b>	
C	0,26
Mn	0,0
P	0,04
S	0,05
Cu	0,2 (min)

**Fuente:** (ASTM A 36 / A 36M)

La chapa metálica fue cortada en rectángulos de 100 x 135 mm con una cizalla de banco, en la figura 11 (a) se puede apreciar el material cortado según las dimensiones requeridas por el equipo de embutición. En la figura 11 (b) se muestra la placa colocada sobre la matriz en la prensa de tornillos de diez toneladas de capacidad del laboratorio de Conformado Mecánico de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional.



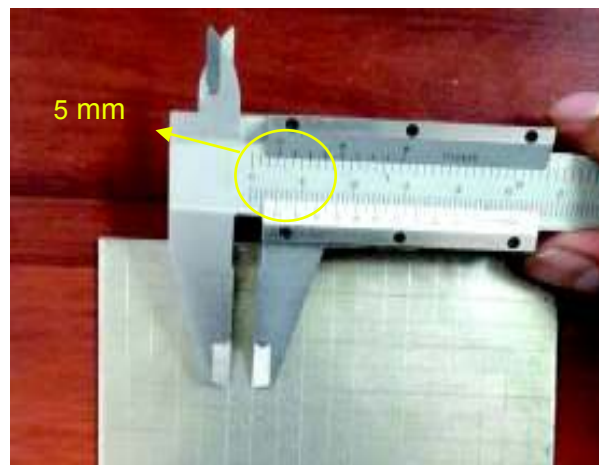


(a) Dimensiones requeridas de la placa (b) Placa colocada sobre la matriz de embutición

**Figura 11.** Chapa metálica cortada en dimensión requerida

**Fuente:** Propia

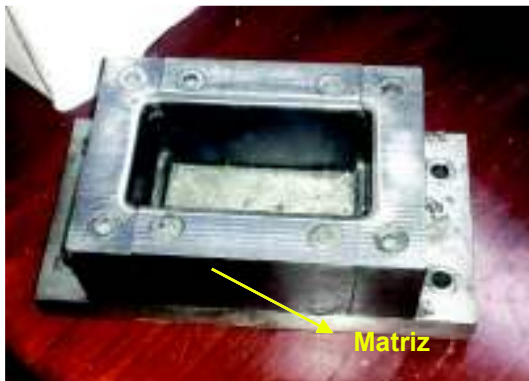
Después de cortar el material en rectángulos se realizó un mallado en una cara de la chapa metálica con ayuda de un buril para rayado de punta de acero. La finalidad del mallado es subdividir la placa en pequeñas cuadrículas para facilitar el análisis de cada área de interés. Para elegir el mallado adecuado se realizó 2 mallados preliminares, de 5 mm y 10 mm de lado cada una (la chapa metálica con el mallado de 10 mm fue descartada después de haber sido embutida porque las líneas de flujo no eran las suficientes como para poder medir las deformaciones en área de mayor deformación plástica necesarias para la validación del método numérico). Con la malla de 5 mm en la chapa metálica embutida se pudo evidenciar más líneas de flujo. Una mayor cantidad de líneas de flujo permite un análisis más exacto en zonas específicas que experimentan mayor deformación plástica, por ello se utilizó esta distancia de malla. La figura 12 muestra la malla de 5 mm dibujada en la chapa metálica.



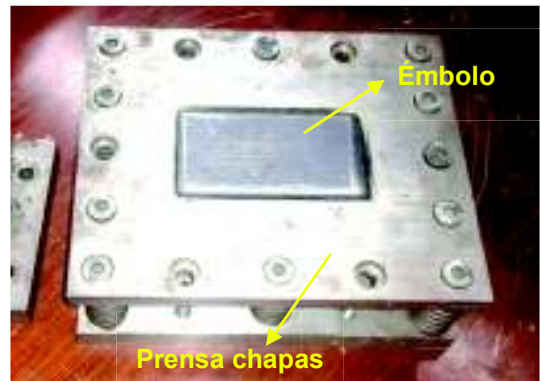
**Figura 12.** Mallado de 5mm en la placa metálica

**Fuente:** Propia

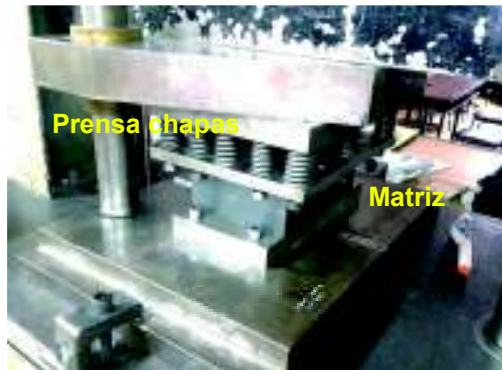
Debido a que la prensa del laboratorio de conformado mecánico sirve para realizar varios procesos de conformado mecánico, se armó el conjunto necesario durante los días que duraron los ensayos. La figura 13(a) muestra la cavidad de prisma rectangular de la matriz, en la figura 13 (b) se muestra la prensa chapa y el émbolo que complementan el utillaje para el proceso de embutición. En esta parte por facilidad, se midió las dimensiones de la matriz, émbolo y prensa chapa para dibujar la geometría del conjunto en software CAD. La matriz de embutición debe ensamblarse adecuadamente, porque el conjunto émbolo-matriz encaja perfectamente en la mesa de la prensa, esto garantiza una adecuada embutición de las chapas metálicas. En la figura 13 (c) se muestra el ensamble del utillaje de embutición en la mesa de la prensa.



(a) Matriz de embutición



(b) Utillaje de embutición



(c) Ensamble del utillaje de embutición

**Figura 13.** Utillaje para embutición  
**Fuente:** Propia

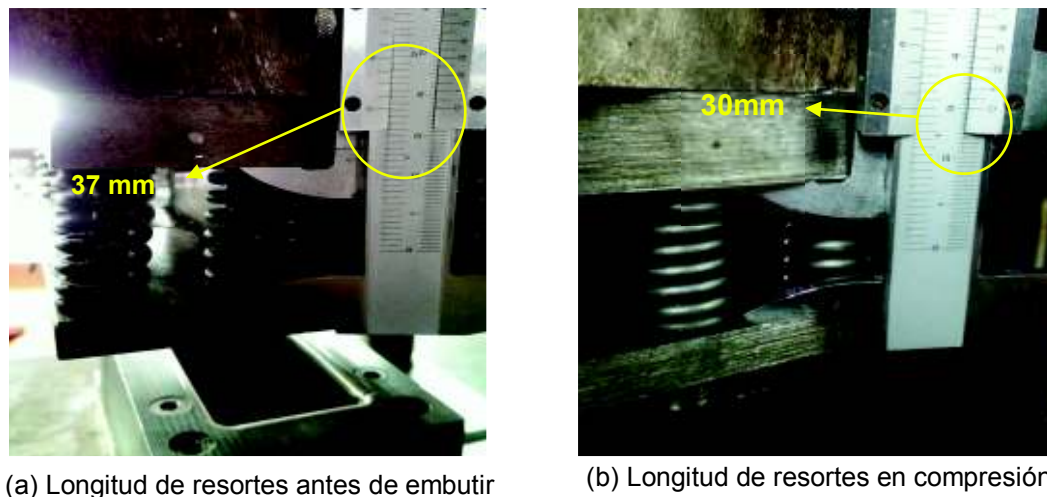
Después de haber colocado el utillaje de embutir en la prensa se procedió a probar el funcionamiento del conjunto, para ello se ensayó 3 probetas, de allí se pudo concluir que el utillaje colocado se encontraba en la posición adecuada. La figura 14 (a) muestra la posición inicial de todos los elementos. La figura 14 (b) muestra la posición final de los elementos después de la compresión máxima.



**Figura 14.** Posición inicial y final de elementos del utillaje de embutición  
**Fuente:** Propia

Una vez realizado el montaje, puesto a punto del utillaje de embutición, el corte y mallado de la chapa metálica, se realizó el proceso de embutición, como se explicó en el apartado 1.2.1. A continuación, se describe los parámetros que se midieron durante la experimentación:

**Desplazamiento del émbolo:** Se tomó como referencia la longitud inicial de los resortes antes de ser comprimidos como se muestra en la figura 15 (a), la posición final del desplazamiento del émbolo se midió cuando los resortes estaban comprimidos cierta distancia como se muestra en la figura 15 (b), las medidas fueron tomadas con un calibrador pie de rey con tolerancia de 0.05 mm, la diferencia de la medida dio como resultado el desplazamiento del émbolo.



**Figura 15.** Medición del desplazamiento mediante la longitud de los resortes  
**Fuente:** Propia

Para el cálculo del desplazamiento del émbolo se realizó el siguiente cálculo:

$$\text{Desplazamiento del émbolo} = \text{Medida de resorte sin comprimir} - \text{resorte comprimido}$$

$$\text{Desplazamiento del punzón} = 7 \text{ mm}$$

En base al resultado anterior, el émbolo se desplazó 7 mm en el proceso de embutición de las chapas metálicas analizadas.

**Tiempo de embutición:** Para realizar esta medición se tomó como punto inicial cuando el émbolo entra en contacto con la placa, pero aún sin deformarla, y como punto final, cuando los resortes se han comprimido los 7 mm. Para esta medida se utilizó un cronometro convencional, considerando constante la velocidad angular de la manivela. Se cubrió los puntos de referencia en aproximadamente 13 segundos.

### **2.2.1. Procedimiento real de embutición**

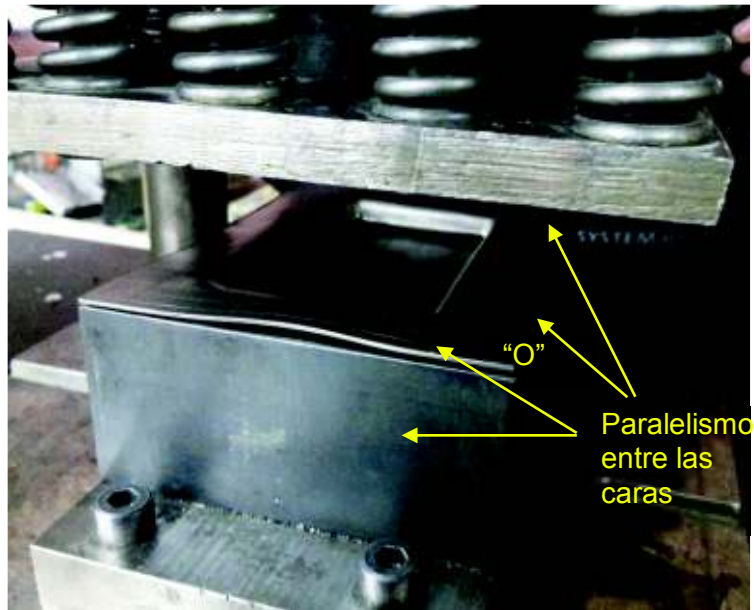
Se embutió a los 43 elementos, en cada chapa metálica se aplicó el procedimiento que se detalla a continuación:

La chapa metálica de acero de bajo carbono se coloca sobre la abertura de la matriz, no se lubricó el material ni la matriz. Se verificó el paralelismo de las caras laterales como se muestra en la figura 16 en el punto O. Se procede a bajar lentamente el émbolo hasta que presiona levemente al material sin deformarlo (ver figura 14 a) se aplica presión a toda la superficie de la chapa metálica excepto el área debajo del émbolo.

En este momento se comienza a contar 13 vueltas de manivela en un tiempo de aproximadamente 13 segundos que produce un desplazamiento lineal del émbolo de aproximadamente 7 mm. El émbolo presiona la pieza de metal dentro de la cavidad del molde, formando una pieza hueca cóncava rectangular.

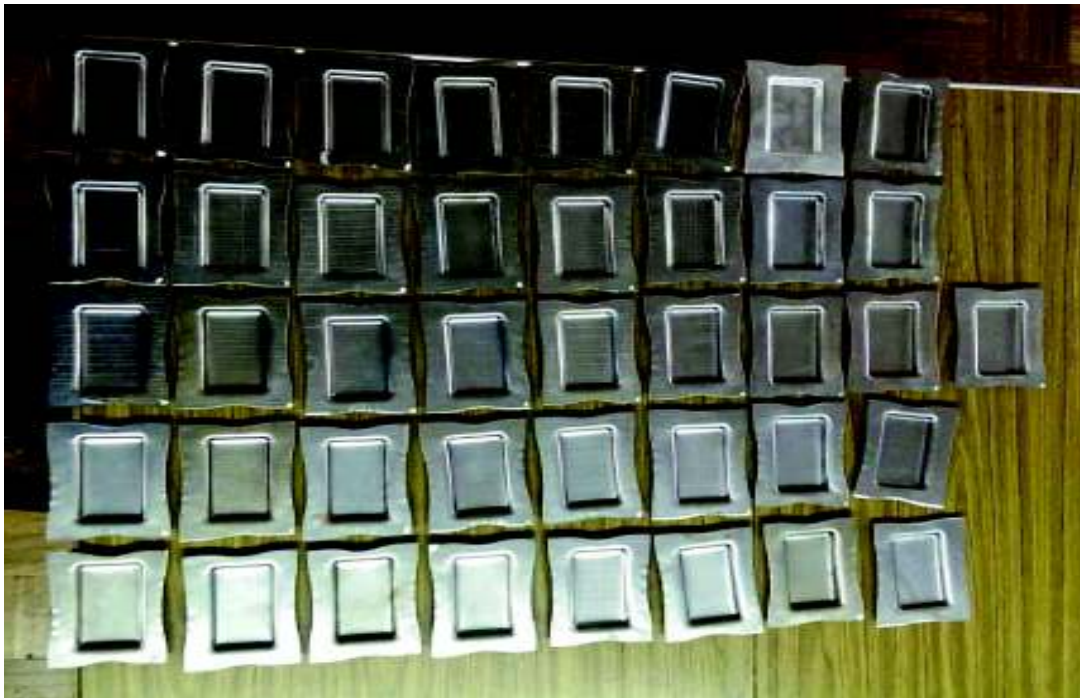
A continuación, se procede a regresar al émbolo una distancia a 25 mm para poder retirar la chapa metálica de la matriz con la ayuda de una punta metálica, debido a que la placa se encuentra ligeramente adherida a la matriz (gripado). Después se procedió a marcar con un corrector la esquina O correspondiente al origen de coordenadas que se consideró para los análisis posteriores con ANSYS.





**Figura 16.** Paralelismo entre caras de la chapa y la matriz  
**Fuente:** Propia

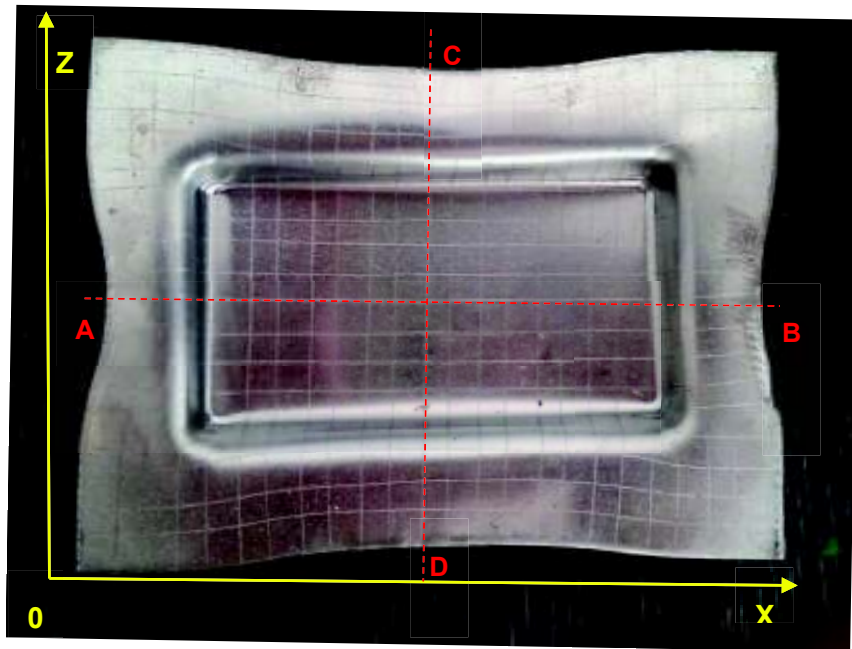
Después de realizar el proceso de embutición se enumeró a las placas conforme la secuencia en la que se trabajó. La figura 17 muestra las placas conformadas.



**Figura 17.** Probetas conformadas  
**Fuente:** Propia

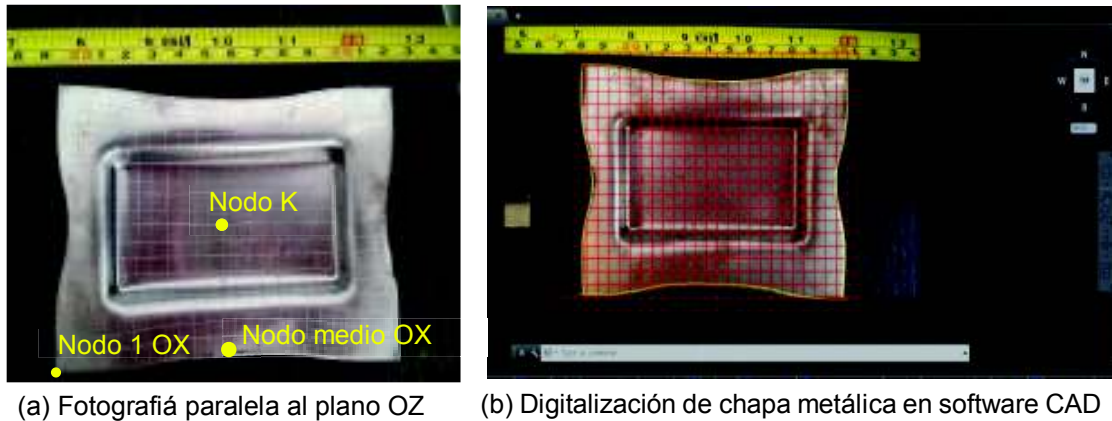
### 2.3. Método para la obtención de resultados

Una vez realizado el proceso de embutición en las placas metálicas se procedió a medir las deformaciones en diversas partes de la chapa. Se midió las deformaciones en los bordes a nivel longitudinal y transversal y también en las líneas medias en donde se muestra las deformaciones geométricas más grandes de acuerdo a la metodología usada en los trabajos realizados por Salazar & Villacrés (2017) y Garrido & Celentano (2004). En la figura 18 se muestra las líneas AB y CD (líneas medias) y OX (eje exterior) que se consideró para medir las deformaciones, también muestra el eje de referencia usado en todas las placas.



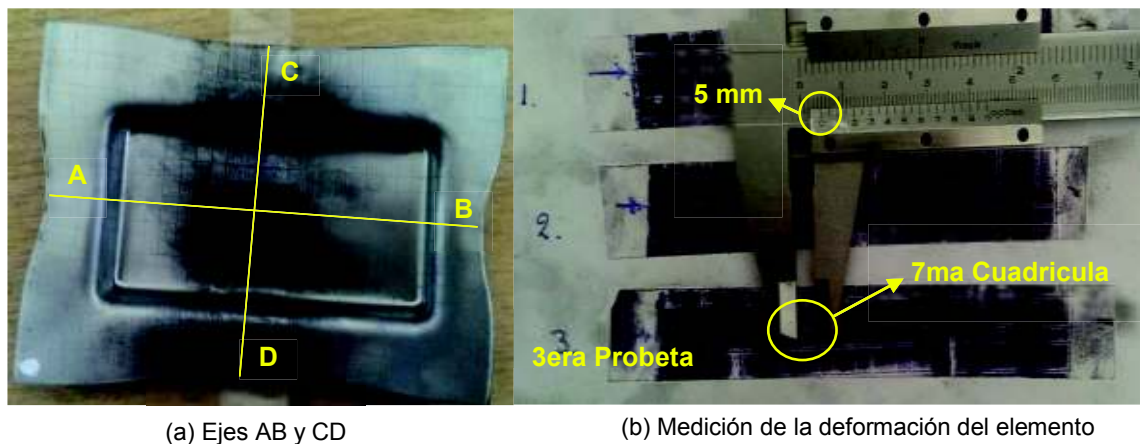
**Figura 18.** Eje de referencia en la probeta conformada  
**Fuente:** Propia

Para medir las deformaciones lineales se utilizó dos métodos diferentes, evaluando el más adecuado para cada geometría específica de las probetas. En la figura 19 se muestra una parte del primero método, el cual se usó para medir la geometría del eje exterior OX de las probetas, con la ayuda de una cinta graduada como referencia, se tomó una fotografía paralela a la cara de referencia como se muestra en la figura 19 (a), y se la introdujo a un software CAD en donde se escaló la imagen de acuerdo a la medida real, después se utilizó las herramientas adecuadas para medir las deformaciones lineales, con respecto a un sistema de referencia cartesiano y se documentó las medidas en una hoja electrónica de cálculo. La figura 19(b) muestra el eje de referencia usado con un mallado de color rojo y las deformaciones lineales con una línea de color amarillo.



**Figura 19.** Primer método para medir deformaciones  
**Fuente:** Propia

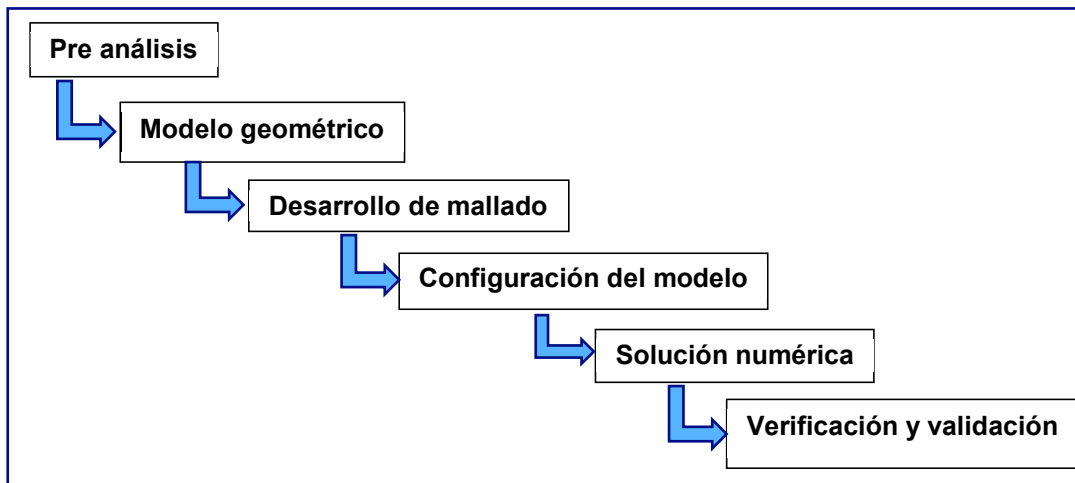
Una parte del segundo método para medir las deformaciones, se muestra en figura 20, Donde se midió las líneas medias AB y CD, se utilizó cinta adhesiva, la cual sirvió para tomar la medida de la impronta dejada en la placa una vez que esta ha sido embutida como se muestra en la figura 20 (a). Esta técnica se utilizó debido a la dificultad de medida que presenta la placa en los ejes centrales, ya que en ellos se halla la mayor deformación de la geometría a tracción y compresión en diferentes cuadrículas. Una vez impresa la impronta en la cinta adhesiva, se la adhirió a una hoja en blanco y con un calibrador pie de rey de tolerancia 0,05 mm se midió las deformaciones como se muestra en la figura 20 (b), donde la impronta pertenece al eje CD, cuadrícula 7 de probeta N° 3 y se documentó las medidas en una hoja de cálculo electrónica. En el anexo 1 se muestra las improntas de las probetas ensayadas.



**Figura 20.** Segundo método para medir deformaciones  
**Fuente:** Propia

## 2.4. Método para el análisis numérico

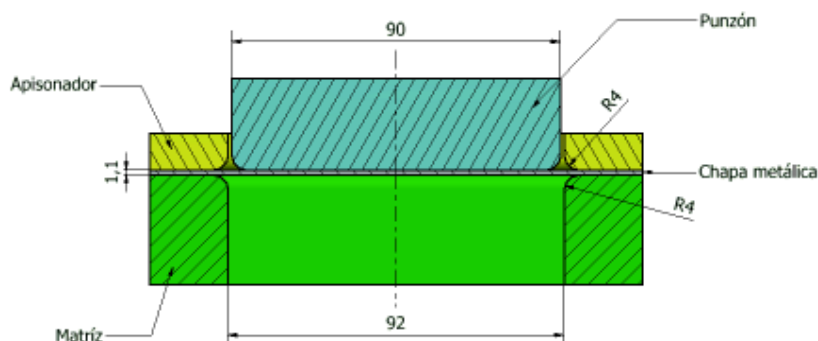
La figura 21 muestra un método sugerida por Rajesh (2016) para el desarrollo del análisis numérico en el software ANSYS LS – DYNA que permitió seguir una secuencia lógica para la obtención de resultados que posteriormente serán validados mediante los resultados experimentales.



**Figura 21.** Método para el análisis numérico  
Fuente: (Rajesh, 2016)

### 2.4.1. Modelo geométrico

Para la elaboración del modelo geométrico se utilizó un software CAD (Autodesk Inventor profesional 2016), en donde, el émbolo de embutición, la matriz, el prensa chapas y la chapa metálica se modelaron en 3D. La figura 22 muestra el ensamble correspondiente al conjunto. Se despreció las alturas reales del émbolo y de la matriz debido a que la deformación máxima de profundidad se estimó de 11 mm según la experimentación. Se consideró importante utilizar los radios de acuerdo y diámetros en todos los elementos de acuerdo a los trabajos de Dwivedi & Agnihotri (2016) y Castro, Lajarin & Marcondes (2010).



**Figura 22.** Geometría dibujada en software CAD  
Fuente: Propia



La tabla 3 muestra los parámetros geométricos del émbolo de embutición, matriz y chapa metálica usadas durante la experimentación, también se muestra los radios de acuerdo de los diferentes elementos.

**Tabla 3.** Parámetros geométricos del utillaje de embutición

Elemento	Dimensiones exteriores	Dimensiones interiores
Chapa metálica	$L_{ec} = 135 = D_b$ $A_{ec} = 100$ $e_{ec} = 1,1$	
Émbolo	$L_{ep} = 90 = D_p$ $A_{ep} = 48$ $H_{ep} = 25$	
Prensa chapas	$L_{ea} = 135$ $A_{ea} = 100$ $H_{ea} = 10$	$L_{ia} = 92$ $A_{ia} = 50$ $H_{ia} = 10$
Matriz	$L_{em} = 135$ $A_{em} = 100$ $H_{em} = 10$	$L_{im} = 92$ $A_{im} = 50$ $H_{im} = 10$

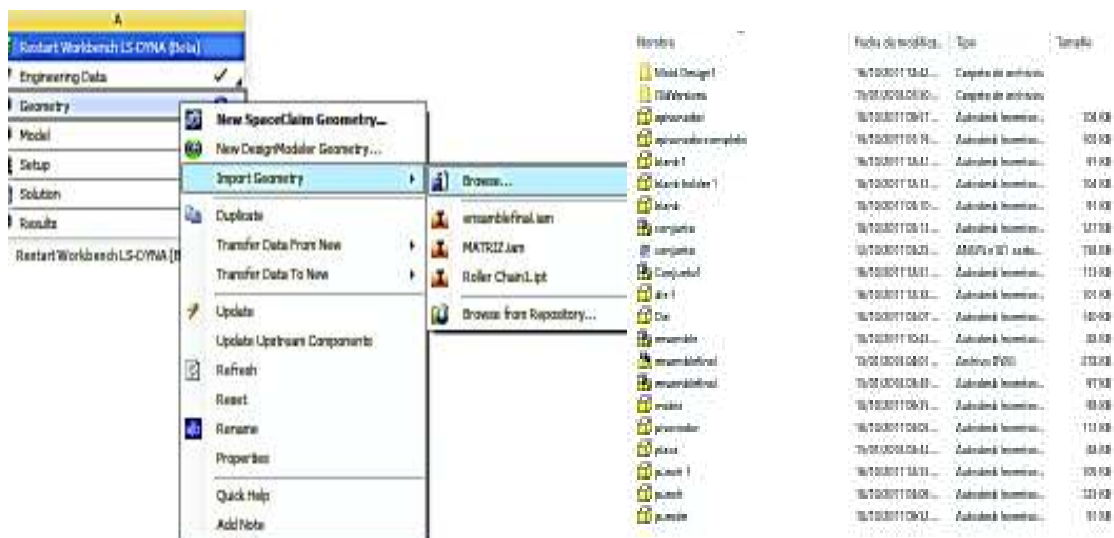
Nota: Todos los radios de acuerdo son iguales ( $R = 4 \text{ mm}$ )

Todas las medidas están en mm

**Fuente:** Propia

Donde L, A y H son las dimensiones de longitud, ancho y altura; los subíndices “e” e “i” representan la dimensión exterior e interior y los subíndices “c”, “p”, “a” y “m” representan la chapa metálica, émbolo, prensa chapa y matriz respectivamente.

El archivo del ensamblaje CAD se importó al software ANSYS LS – DYNA para su posterior análisis numérico como se muestra en la figura 22.



**Figura 23.** Importación del archivo CAD al software ANSYS LS - DYNA

**Fuente:** Propia

## 2.4.2. Condiciones de contorno

Una vez importada la geometría en 3D se procede a asignar el material a cada utillaje de embutición y también a la chapa metálica. Para la chapa metálica se asignó el material Structural Steel NL (ASTM A -36), acero de bajo carbono conforme a los valores de la tabla 2. Para el utillaje de embutición se asignó el material Stainless Steel y se conservó las propiedades asignadas por defecto en el software ANSYS LS – DYNA, como se muestra en las figuras 24 y 25. A los utillajes de embutición y a la chapa metálica se asignó el tipo de cuerpo flexible, es decir que se puede deformar elástica y plásticamente.

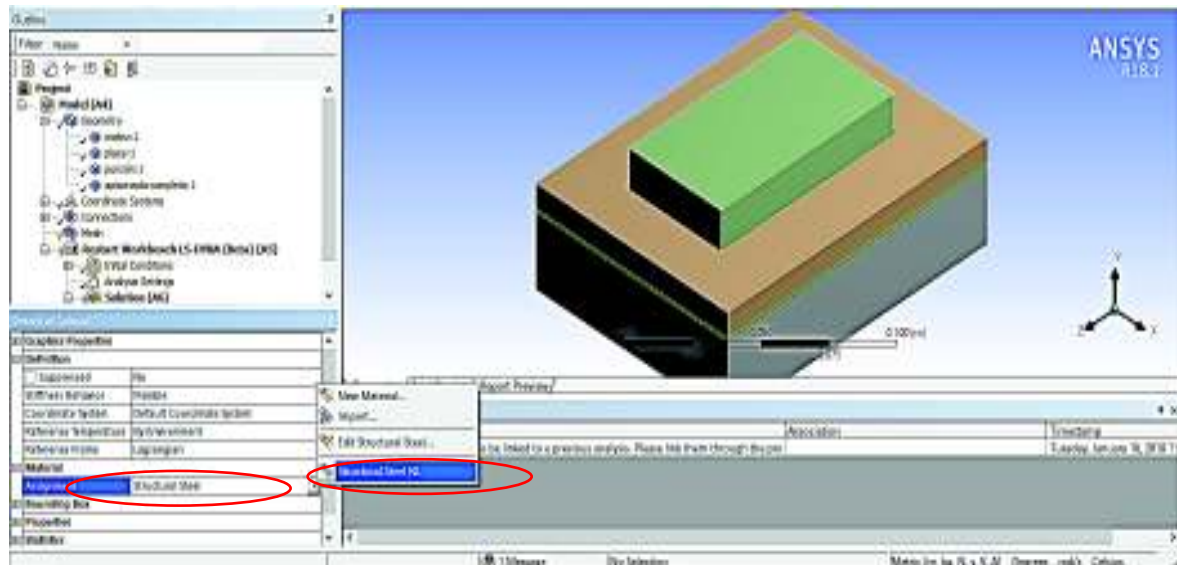


Figura 24. Asignación de material y tipo de cuerpo

Fuente: Propia

Property	Value	Unit
Material Field Variables	Table	
Density	7780	kg m <sup>-3</sup>
Isotropic Elasticity		
Derive from	Young's Modulus...	
Young's Modulus	1.93E+11	Pa
Poisson's Ratio	0.33	
Bulk Modulus	1.69E+11	Pa
Shear Modulus	7.36E+10	Pa
Isotropic Thermal Conductivity	15.1	W m <sup>-2</sup> C <sup>-1</sup>
Specific Heat	480	J kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>

Figura 25. Propiedades mecánicas del material Structural Steel NL

Fuente: Propia

### 2.4.2.1. Condiciones de contacto

El tipo de cuerpo flexible que se seleccionó anteriormente para todos los elementos permitió seleccionar las condiciones de contacto entre los diferentes cuerpos que se muestra en la tabla 4. Los tipos de contactos utilizados en el análisis numérico se consideraron en base a los trabajos realizados por Srijan Pragya (2015). Los valores utilizados para los coeficientes de rozamiento estático y dinámico entre los diferentes cuerpos fueron extraídos de la literatura científica Beer & Jhonson (2010).

Tabla 4. Parámetros geométricos del utillaje de embutición

Elementos	Tipo de contacto	Coefficiente
Émbolo – Chapa metálica	Con rozamiento estático	$\mu_e = 0,15$
Chapa metálica - Matriz	Con rozamiento dinámico	$\mu_d = 0,09$
Chapa metálica - Prensa chapas	Con rozamiento dinámico	$\mu_d = 0,09$

Donde  $\mu_e$  = coeficiente de rozamiento estático,  $\mu_d$  = coeficiente de rozamiento dinámico  
Fuente: (Beer, 2010)

### 2.4.2.2. Cálculo de la fuerza de embutición

Debido a que la prensa de tornillos utilizada para el proceso de embutición no cuenta con un instrumento que permita medir la fuerza o presión de embutición real, se estimó la fuerza de embutición promedio que se usó en el análisis numérico conforme a la ecuación (2). Los valores de las variables reales se encuentran especificados en las tablas 2 y 3 respectivamente. Entonces, la fuerza promedio de embutición estimada para simular el proceso de embutición fue de 19 806 N (2 109 Kgf).

### 2.4.2.3. Cálculo de la fuerza aplicada por la prensa chapa

La fuerza promedio de la prensa chapa que se aplica, se puede calcular teóricamente con la ecuación (3). Entonces la fuerza de la prensa chapa que se utilizó para simular el proceso de embutición fue el un tercio de la fuerza de embutición calculada anteriormente es decir, de 6602 N.

En el trabajo realizado por Merchan (1986) en donde se midió experimentalmente la fuerza de la prensa chapa con respecto al desplazamiento del émbolo señala que la fuerza de embutición correspondiente a 7mm de embutido es 5880 N. En el anexo 2 se muestra la gráfica de la fuerza de la prensa chapa vs la carrera del émbolo experimental para la matriz de embutición utilizada.

#### 2.4.2.4. Velocidad de desplazamiento del émbolo

En base a la experimentación se midió el desplazamiento lineal del émbolo que fue de 7 mm en 13 segundos, es decir que la velocidad de desplazamiento fue de 0.5385 mm / s ( $5.38 \times 10^{-4}$  m/s). Para el análisis numérico realizado se consideró una velocidad de 500 mm / s (0.5 m / s) de acuerdo a la metodología que describe Castro, Lajarin & Marcondes (2010) en donde concluye que: “La velocidad usada para el émbolo fue aproximadamente 400 veces más grande que la velocidad experimental (1.33 mm / s)...” [16]. Se utiliza altas velocidades de desplazamiento del émbolo en los análisis numéricos de embutición porque los resultados son precisos y no demandan de una cantidad excesiva de recurso de procesamiento

#### 2.4.2.5. Condiciones de borde

Anteriormente, los valores de la fuerza de embutición y de la fuerza de la prensa chapa fueron calculados analíticamente. Las condiciones de contorno utilizadas se muestran en la figura 26. Para la matriz se utilizó un soporte fijo (fixed support A) en todo el cuerpo. El desplazamiento (displacement B) en la prensa chapa se encuentra restringido a lo largo de los ejes X y Z, mientras que en el eje -Y se desplaza 0.01 mm. El desplazamiento C (displacement C) del émbolo se encuentra restringido a lo largo del eje X y Z, mientras que para eje -Y, éste se desplaza 7mm. La fuerza de embutición (force D) de 19 806 N se encuentra aplicada sobre el émbolo en la dirección -Y. La fuerza de la prensa chapa (force E) de 6 602 N se encuentra aplicada sobre la prensa chapa a lo largo del eje -Y. Se aplica una velocidad en la dirección -Y de 500 mm / s al émbolo.

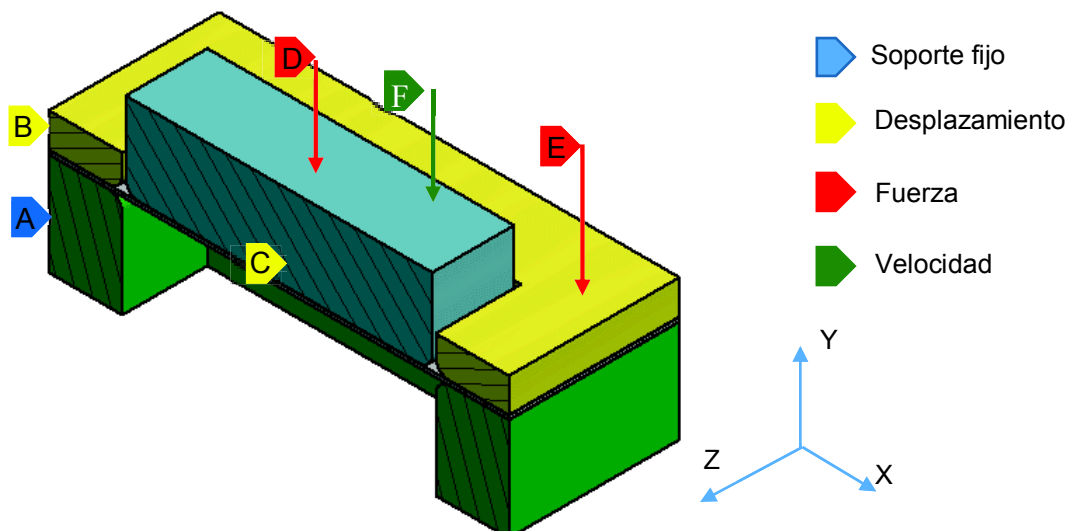


Figura 26. Condiciones de contorno  
Fuente: Propia

### 2.4.3. Criterios para el refinamiento y convergencia de la malla

Para realizar el refinamiento de la malla y su convergencia se consideró los aspectos señalados por Fuenmayor & Parayes (2002). Se creó una malla en la chapa metálica con el menor número razonable de elementos, tamaño del elemento por defecto y se analizó el modelo. Se volvió a generar un mallado con un tamaño de elemento más pequeño, es decir la densidad de los elementos aumentó, se volvió a analizar el modelo y se comparó los resultados con el modelo anterior. El proceso continuó con un tamaño de elemento de mallado más pequeño y se volvió a comparar los resultados hasta obtener convergencia. [17]

De acuerdo a Autodesk Support se manifiesta que: “Este tipo de estudios de convergencia de malla permite obtener una solución precisa con una malla que sea lo suficientemente densa, pero que no demande una cantidad excesiva de recursos de procesamiento.” [18]

Se realizó el refinamiento de la malla con 6 tamaños diferentes de los elementos, empezando por el tamaño por defecto de 10mm, luego 5 mm; 3mm; 2mm; 1mm; 0,6mm. Con cada tamaño de la malla se consideró los valores de los números de nodos y elementos. En el nodo K, ver figura 19 (a) se determinó el esfuerzo equivalente de Von Mises y deformación direccional en el eje Y por ser la dirección en donde la deformación es mayor y por la facilidad para obtener los resultados. La tabla 5 muestra los valores considerados para el refinamiento y convergencia del mallado.

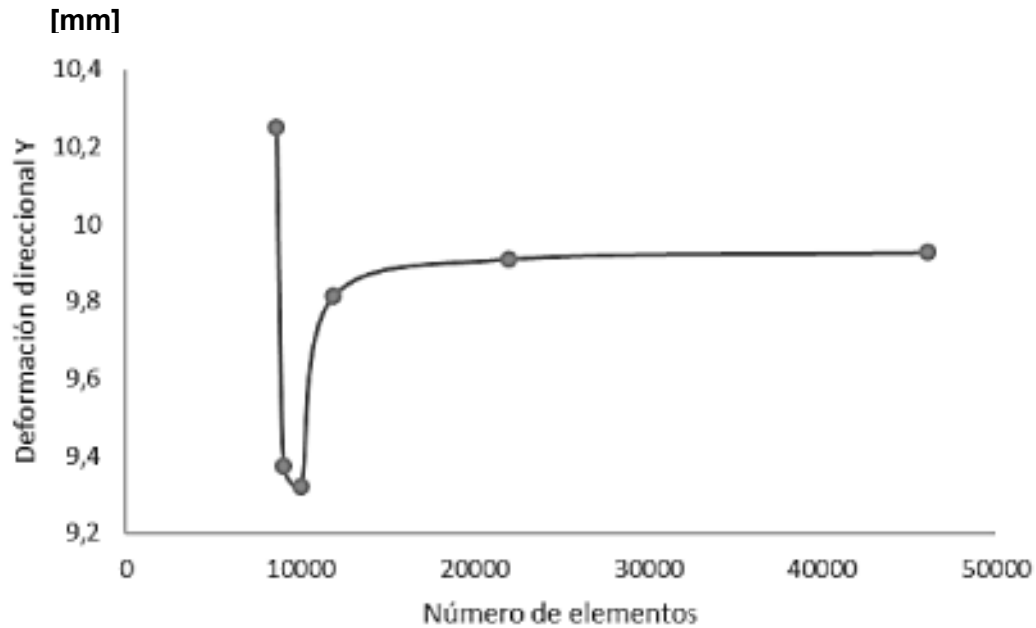
**Tabla 5.** Valores de refinamiento del mallado

Tamaño del mallado (mm)	N° de elementos	N° de nodos	Nodo K	
			Esfuerzo Equivalente (Von Mises) (Pa)	Deformación direccional Y (mm)
10	8655	11745	$4,1986 \times 10^{11}$	10,251
5	9055	12591	$4,1987 \times 10^{11}$	9,3725
3	10045	14635	$4,1987 \times 10^{11}$	9,3197
2	11915	18453	$4,1987 \times 10^{11}$	9,8145
1	22015	38887	$4,1987 \times 10^{11}$	9,9103
0,6	46090	87351	$4,1987 \times 10^{11}$	9,9272

**Fuente:** Propia

En la figura 27 se muestra la gráfica de número de elementos vs deformación direccional en Y. Se puede observar que los resultados comienzan a converger cuando el tamaño del elemento es 1 mm. En base al procedimiento realizado para el refinamiento y convergencia

de la malla se utilizó un tamaño de elemento en la chapa metálica de 1 mm para la validación del análisis numérico mediante los resultados de la experimentación.



**Figura 27.** Elementos vs deformación direccional Y  
Fuente: Propia

### 2.4.3.1. Desarrollo de la malla

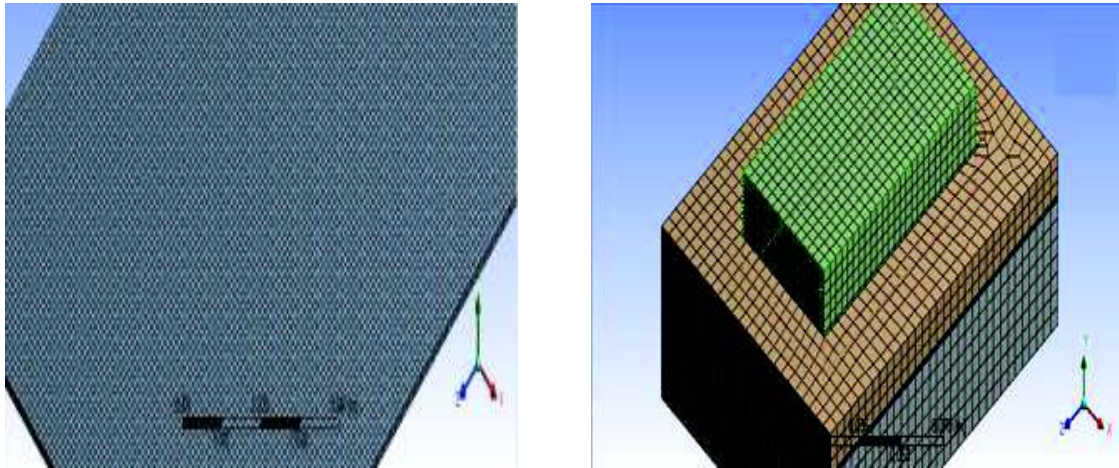
El mallado fue generado en base a los criterios usados por Dwivedi & Agnihotri (2016) y Castro, Lajarin & Marcondes (2010). Los parámetros de mallado usados para el análisis numérico son: Tamaño de elemento de la chapa metálica de 1 mm (element size: 1 mm), para el émbolo, prensa chapa y matriz se utilizó la función del tamaño avanzado apagado (advanced size function: off), centro de relevancia grueso (relevance center: coarse), tamaño del elemento por defecto (element size: default), suavizado bajo (smoothing: low), transición suave (transition: slow). La tabla 6 muestra los criterios usados para el mallado de los elementos.

**Tabla 6.** Parámetros geométricos del utillaje de embutición

Elemento	Criterios
Chapa metálica	Tamaño de elemento = 1mm
Émbolo , prensa chapas y matriz	Tamaño de elemento = por defecto
	Suavizado = bajo
	Transición = suave

Fuente: Propia

En la figura 28 se muestra el mallado que se realizó en el software ANSYS LS – DYNA en los utillajes de embutición y en la chapa metálica.



**Figura 28.** Mallado de la chapa metálica y utillajes de embutición  
**Fuente:** Propia

#### **2.4.4. Simulación numérica**

Con los valores mencionados anteriormente se procedió a realizar la simulación numérica en la ventana del Workbench ANSYS 18.1. Una vez generado los resultados, el programa los almacena en un archivo \*.K en la carpeta MECH generada en el almacenamiento del proyecto. El archivo digital de extensión \*.K se carga en el módulo Mechanical ANSYS Product Launcher (APDL) el cual permite analizar mediante la licencia ANSYS MECHANICAL / LS DYNA (Ver figura 29 a), después se envía a ejecutar para que se genera un archivo digital de extensión \*.b (Ver figura 29 b). Este archivo se carga en el LS Pre Procesador donde se muestra los resultados del análisis a nivel nodal y de elementos. El anexo 5 ilustra el resultado del análisis numérico ANSYS MECHANICAL LS/DYNA.

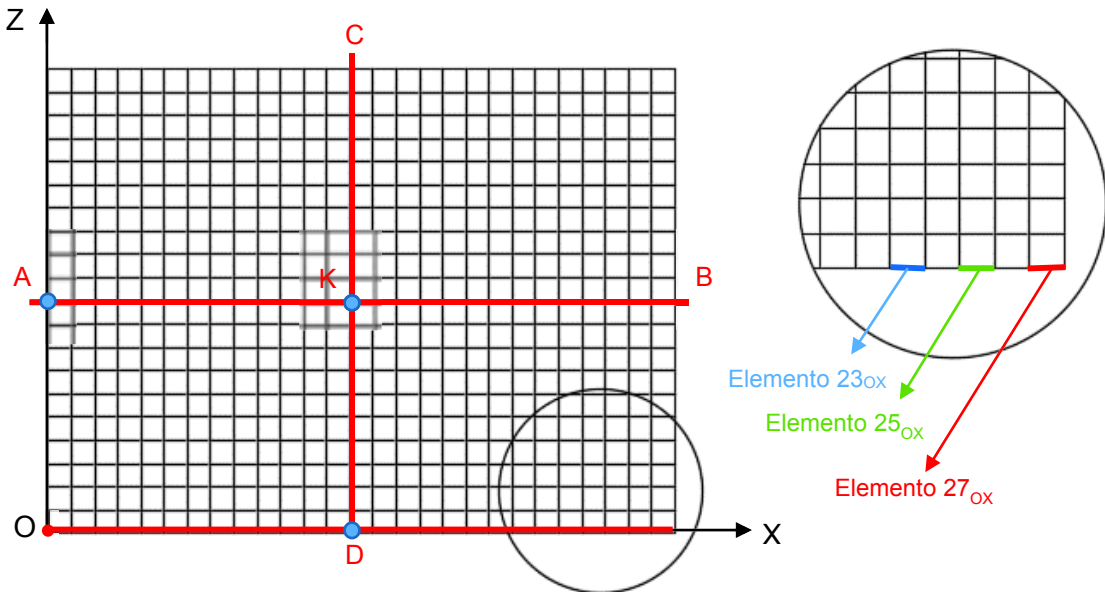




### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1. Resultados de la experimentación

En el capítulo anterior se describió los métodos utilizados para la medición de las deformaciones de las chapas embutidas en el laboratorio de conformado mecánico de la EPN. En la figura 30 se muestra las líneas OX, AB y CD, y los nodos medios A, K y D. En las líneas de referencia para medir los desplazamientos se dividieron en un número finito de elementos. Los 27 elementos en las líneas AB y OX fueron enumerados ascendentemente de izquierda a derecha, mientras que para la línea CD los 20 elementos se enumeraron ascendentemente de abajo hacia arriba.



Nota: Los subíndices  $OX$ ,  $AB$  y  $CD$  corresponden a la línea en la cual se encuentra el elemento

**Figura 30.** Ubicación de ejes y líneas de referencia para la medición de deformaciones  
Fuente: Propia

##### 3.1.1. Resultados en las líneas de referencia

La tabla 7 muestra la media aritmética de las longitudes de las líneas OX, AB y CD. Las deformaciones promedio se calcularon con la ecuación (1).

**Tabla 7.** Deformaciones lineales experimentales en las líneas de referencia

Líneas de referencia	$L_i$	$L_f$	$\epsilon$	$\% \epsilon$
OX	135	133.9	-0.008	0.8
AB	135	135.2	0.001	0.1
CD	100	100.45	0.004	0.45

Nota:  $L_i$  = Longitud inicial;  $L_f$  = Longitud final;  $\epsilon$  = deformación unitaria  $(L_f - L_i) / L_i$ ;  $\% \epsilon$  = Porcentaje de deformación  $\epsilon \times 100 \%$ . Todos los valores son medias aritméticas de las 43 placas embutidas

Fuente: Propia

Se observa que las deformaciones unitarias en cada línea de referencia son cercanas a cero, es decir la longitud inicial no cambia en ninguna de las líneas de referencia.

La tabla 8 muestra los valores promedio de la longitud final de cada elemento correspondiente a las líneas de referencia de las 43 placas embutidas. Se considera que el valor promedio de la longitud inicial es de 5 mm en todos los elementos. Las deformaciones promedio de los elementos se calcularon con la ecuación (1).

**Tabla 8.** Deformaciones lineales experimentales en los elementos de las líneas de referencia

Elem	L <sub>i</sub>	Línea OX			Línea AB			Línea CD		
		L <sub>f</sub>	$\epsilon$	% $\epsilon$	L <sub>f</sub>	$\epsilon$	% $\epsilon$	L <sub>f</sub>	$\epsilon$	% $\epsilon$
1	5	4.84	-0.03	-3%	5.10	0.02	2%	5.3	0.06	6%
2	5	4.67	-0.07	-7%	5.50	0.09	9%	4.55	-0.1	-10%
3	5	4.06	-0.19	-19%	5.55	0.10	10%	4.45	-0.11	-11%
4	5	4.62	-0.08	-8%	5.55	0.11	11%	4.55	-0.1	-10%
5	5	4.58	-0.08	-8%	4.55	-0.09	-9%	5.60	0.12	12%
6	5	4.65	-0.07	-7%	4.50	-0.10	-10%	5.10	0.02	2%
7	5	5.01	0.00	0%	5.00	0.00	0%	5.00	0.00	0%
8	5	6.12	0.22	22%	5.00	0.00	0%	5.00	0.00	0%
9	5	6.36	0.27	27%	5.00	0.00	0%	5.00	0.00	0%
10	5	4.27	-0.15	-15%	5.00	0.00	0%	5.00	0.00	0%
11	5	3.59	-0.28	-28%	5.00	0.00	0%	5.00	0.00	0%
12	5	3.39	-0.32	-32%	5.00	0.00	0%	5.00	0.00	0%
13	5	5.67	0.13	13%	5.00	0.00	0%	5.00	0.00	0%
14	5	5.29	0.06	6%	5.00	0.00	0%	5.00	0.00	0%
15	5	5.93	0.19	19%	5.00	0.00	0%	4.60	-0.09	-9%
16	5	4.08	-0.18	-18%	5.00	0.00	0%	5.20	0.04	4%
17	5	3.38	-0.32	-32%	5.00	0.00	0%	4.60	-0.08	-8%
18	5	4.70	-0.06	-6%	5.00	0.00	0%	4.70	-0.06	-6%
19	5	4.88	-0.02	-2%	5.00	0.00	0%	5.10	0.02	2%
20	5	3.94	-0.21	-21%	5.00	0.00	0%	5.25	0.05	5%
21	5	4.29	-0.14	-14%	5.00	0.00	0%			
22	5	5.15	0.03	3%	5.00	0.00	0%			
23	5	4.71	-0.06	-6%	4.80	-0.04	-4%			
24	5	3.52	-0.30	-30%	4.85	-0.03	-3%			
25	5	4.83	-0.03	-3%	5.50	0.10	10%			
26	5	4.56	-0.09	-9%	5.55	0.11	11%			
27	5	3.87	-0.23	-23%	5.15	0.03	3%			
			$\bar{X}_{\epsilon OX}$	-0.07		$\bar{X}_{\epsilon AB}$	0		$\bar{X}_{\epsilon CD}$	0
			$S_{\epsilon OX}$	0.16		$S_{\epsilon AB}$	0.05		$S_{\epsilon CD}$	0.06
			$\epsilon_{m\acute{a}x OX}$	0.27		$\epsilon_{m\acute{a}x AB}$	0.11		$\epsilon_{m\acute{a}x CD}$	0.12
			$\epsilon_{m\acute{i}n OX}$	-0.32		$\epsilon_{m\acute{i}n AB}$	-0.10		$\epsilon_{m\acute{i}n CD}$	-0.11

Nota: Elem = Elemento; L<sub>i</sub> = Longitud inicial cuadrícula del mallado (5mm); L<sub>f</sub> = Longitud final, medida de la deformada de cada cuadrícula;  $\epsilon$  = deformación unitaria; % $\epsilon$  = Porcentaje de deformación  $\epsilon \times 100$  %. Todos los valores son medias aritméticas de las 43 placas embutidas

Fuente: Propia

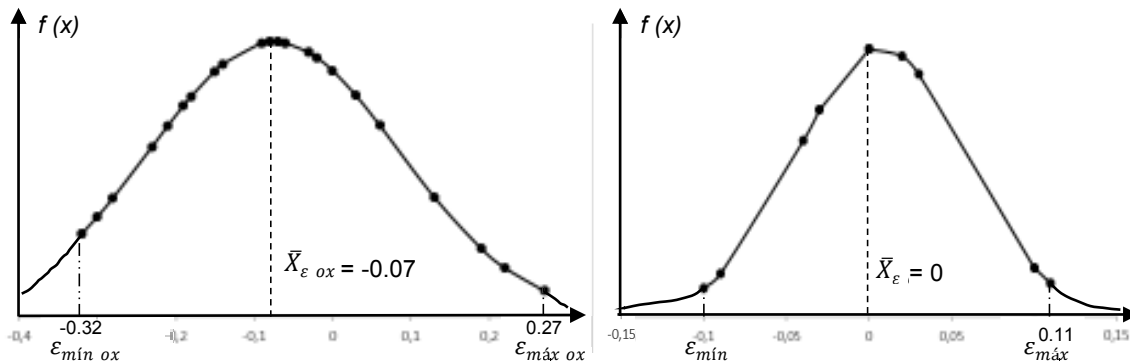
Las deformaciones de los elementos de las líneas de referencia fueron medidas considerando alargamientos o contracciones lineales, en la realidad eran curvas, sin embargo, al medirse cuadrícula por cuadrícula la diferencia entre la línea curva y la recta puede ser considerada como despreciable debido a la tolerancia del instrumento de medida utilizado en el proceso (tolerancia = 0,05 mm).

La ecuación (27) muestra la función de distribución normal teórica para un conjunto de muestra. [13]

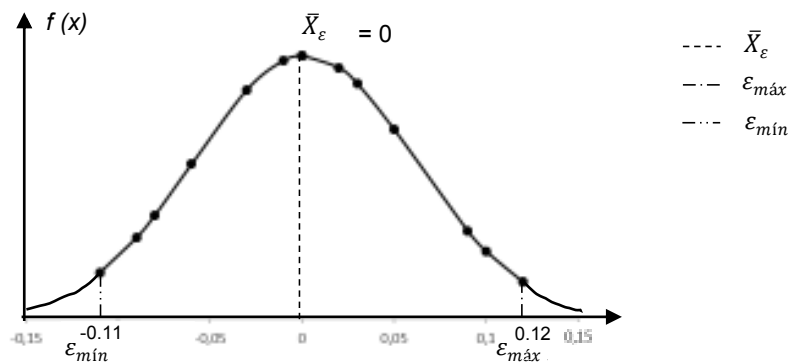
$$f(x) = \frac{1}{S\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\bar{X}}{S}\right)^2} \quad (27)$$

Donde, S es la desviación estándar;  $\bar{X}$  es la media aritmética y X es el valor de la variable. El anexo 3 muestra los valores usados de x y  $f(x)$  para graficar las funciones de distribución normal.

La figura 31 (a), (b) y (c) muestra la función de distribución normal de la deformación unitaria en los elementos correspondientes a las líneas de referencia OX, AB y CD respectivamente.



(a) Función de distribución normal en línea OX      (b) Función de distribución normal en línea AB

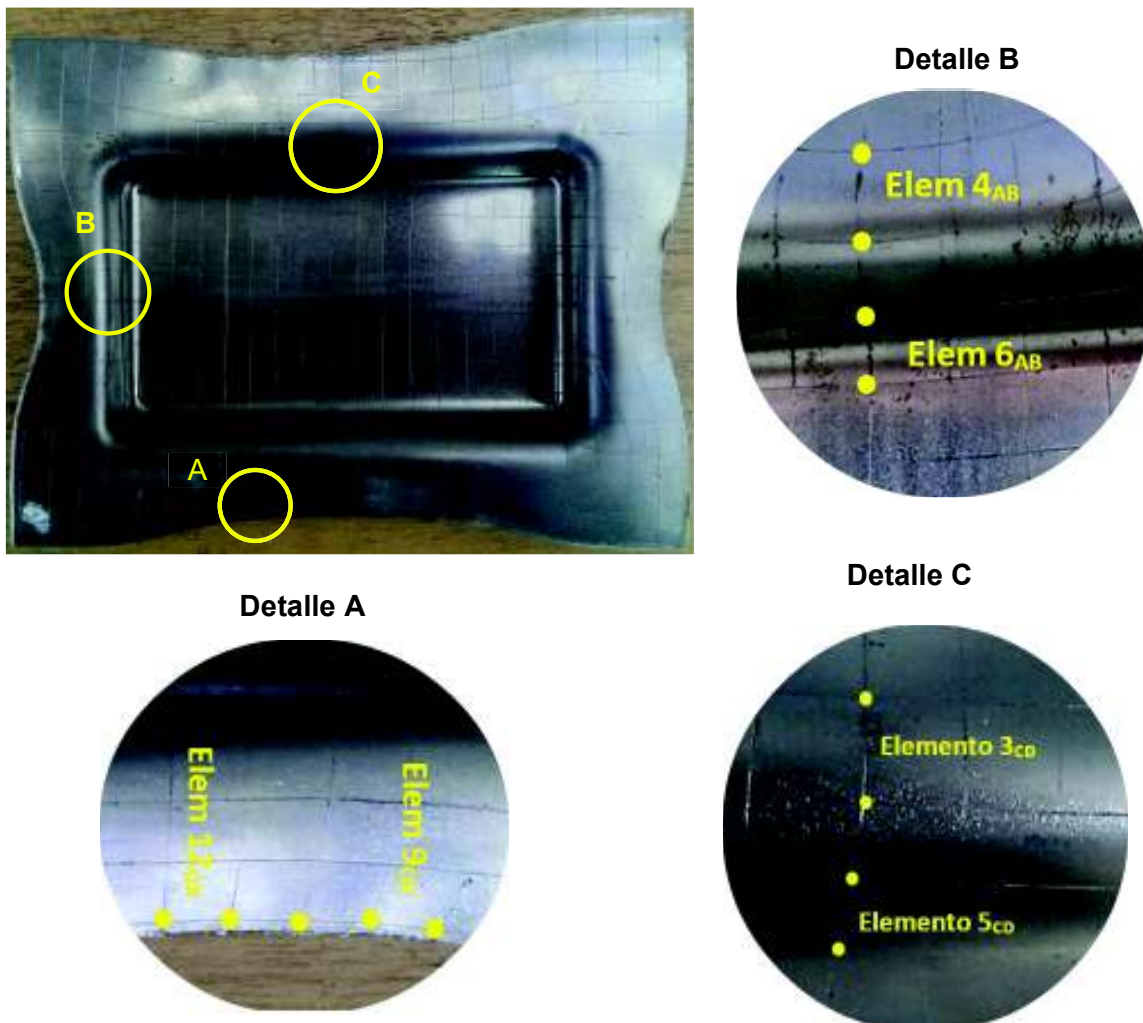


(c) Función de distribución normal en línea CD

**Figura 31.** Función de distribución normal para las líneas de referencia  
Fuente: Propia

Los valores de la desviación estándar y de las deformaciones máximas y mínimas para las líneas AB y CD son similares (ver figura 30). Se puede observar que la distribución de datos es aproximadamente simétrica y los valores máximos y mínimos en el eje x son similares en la línea AB y CD, es importante mencionar que las medias de las deformaciones unitarias se aproximan a cero en los tres casos porque la placa embutida tiene una geometría simétrica y la sumatoria de la deformación por compresión ( $\epsilon < 0$ ) es similar a la sumatoria de la deformación por extensión ( $\epsilon > 0$ ).

En la figura 32 se muestra las áreas en donde se presentaron las deformaciones máximas y mínimas en las líneas de referencia conforme a los resultados de la tabla 8. En el detalle A, se observa al elemento 12<sub>OX</sub> que muestra la deformación mínima y al elemento 9<sub>OX</sub> muestra la deformación máxima. El detalla B muestra al elemento 4<sub>AB</sub> de deformación máxima y al elemento 6<sub>AB</sub> de deformación mínima. El detalle C muestra al elemento 3<sub>CD</sub> de deformación máxima y al elemento 5<sub>CD</sub> de deformación mínima.



**Figura 32.** Áreas de deformaciones máximas y mínimas  
Fuente: Propia

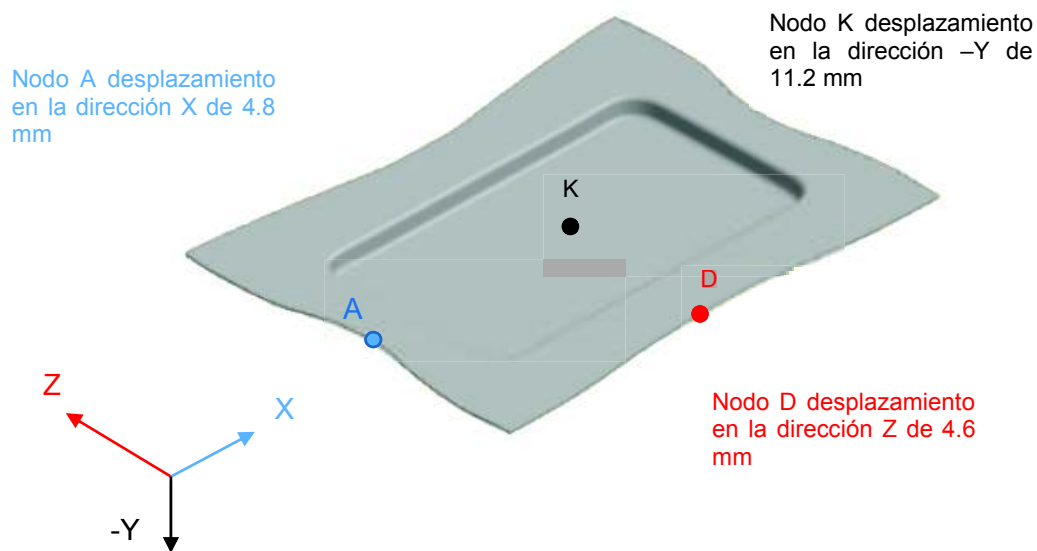
Un patrón que se evidenció en las deformaciones de los elementos de las líneas de referencia es que la deformación máxima y mínima se encuentra separadas por un solo elemento y se encuentran ubicadas en los dobleces (cambio abrupto de geometría). En la mitad de las tres líneas donde no existen cambios de geometría, las deformaciones fueron muy cercanas a cero.

### 3.1.2. Resultados en nodos medíos

En la figura 30 y 33 se muestra la ubicación de los nodos medios A, K y D. En el nodo A se midió el desplazamiento en la dirección X. En el nodo K se midió el desplazamiento en la dirección  $-Y$ , en donde se desplaza el émbolo. Y para el nodo D se midió el desplazamiento en la dirección Z en donde fluye el material.

En el nodo A se obtuvo la desviación estándar de:  $S_A = 0,195$ , mientras que la media aritmética del desplazamiento en la dirección X es:  $\bar{X}_A = 4.8 \text{ mm}$ . En el nodo K se obtuvo la desviación estándar de:  $S_K = 0,265$ , mientras que la media aritmética del desplazamiento en la dirección  $-Y$  es:  $\bar{X}_K = 11.2 \text{ mm}$ . Para el nodo D, se obtuvo una  $S_D = 0,165$  y la media aritmética del desplazamiento en la dirección Z es:  $\bar{X}_D = 4.6 \text{ mm}$ .

La figura 33 se muestra el desplazamiento de los nodos A y D en las direcciones X y Z respectivamente y el desplazamiento del nodo K en la dirección  $-Y$  de la placa embutida.

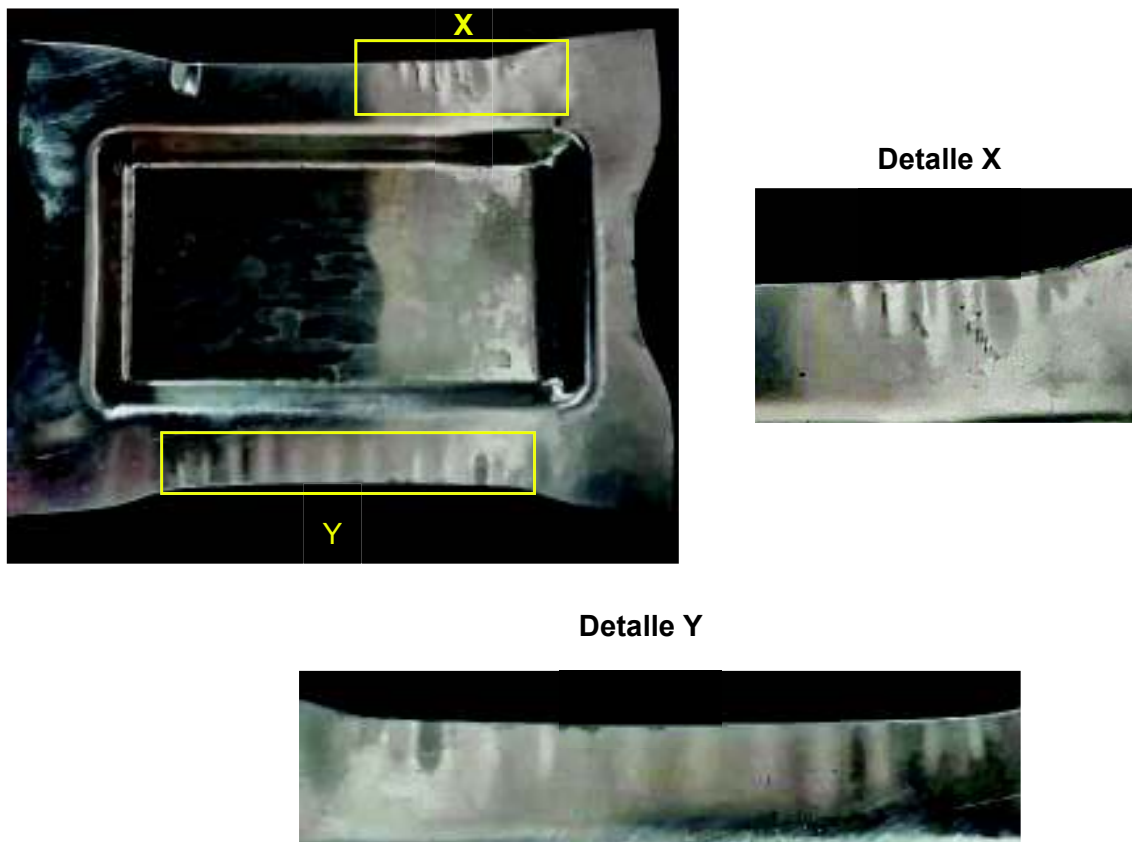


**Figura 33.** Desplazamientos de los nodos medios  
**Fuente:** Propia

### 3.1.3. Arrugas en la placa embutida

En el proceso de embutición, a las arrugas se las denomina comúnmente como líneas de fluencia, se forman en las zonas límite de alargamiento, y dependen de las propiedades del material y la geometría de la pieza [2]. En las placas que sirvieron para la calibración de los parámetros experimentalmente se observaron arrugas, mientras que en las 43 probetas ensayadas las arrugas son imperceptibles debido a un menor desplazamiento del émbolo.

En la figura 34 se observa las dos áreas donde se generaron arrugas en las placas que sirvieron para calibrar los parámetros para el proceso de embutición. Se evidencia que las regiones que están fuera del área de deformación producida por el desplazamiento del émbolo muestran arrugas. Uno de los mecanismos que ayuda a disminuir la formación de arrugas en el proceso de embutición es la prensa chapa, el cual debe ejercer una distribución uniforme de fuerza sobre las áreas que no tienen contacto con el émbolo. En el ensayo realizado se produjeron arrugas porque la prensa chapa no ejerció una fuerza uniforme sobre la placa metálica.



**Figura 34.** Arrugas generadas en la placa embutida  
**Fuente:** Propia

## 3.2. Resultados del análisis numérico

El programa usado para realizar el análisis numérico es ANSYS / LS DYNA que proporcionó los resultados que se muestran a continuación.

### 3.2.1. Calibración del modelo numérico

La calibración del modelo numérico consistió en un proceso iterativo de mejoramiento de parámetros. En el primer modelo se replicó las condiciones de contorno señaladas por CPDLR (2015) y se comparó la deformación direccional  $-Y$  del nodo K con una placa que se tenía de referencia. Se observó que en el modelo existían varias arrugas y se descartó los resultados. Es importante señalar que en este modelo los valores de velocidad y tiempo de simulación usados fueron considerados de literaturas de referencia.

Para el segundo modelo usado se cambió parámetros como condiciones de contacto y coeficientes de rozamiento y se eliminó ciertas restricciones de desplazamiento consideradas en el primer modelo. Los resultados obtenidos numéricamente se analizaron con las medias aritméticas de los nodos A, K y D de las probetas que sirvieron para calibrar los parámetros experimentales. Los resultados fueron descartados.

En el tercer modelo utilizado se modificó la velocidad del émbolo y el tiempo de simulación. Se colocó las fuerzas de embutición en todo el cuerpo del émbolo y de manera similar en el prensa chapas y también se añadió un desplazamiento ( $-Y$ ) que no se había considerado antes. Los valores de los coeficientes de rozamiento se cambiaron para la parte estática y dinámica del análisis (anteriormente se consideró un solo valor) los resultados obtenidos se compararon con las medias aritméticas de los nodos A, K y D de las 43 probetas. Los resultados eran cercanos al comparar los desplazamientos direccionales. Finalmente, al tercer modelo se aplicaron criterios de refinamiento y de convergencia de la malla para reducir errores de redondeo y de truncado.

### 3.2.2. Resultados de las líneas de referencia del modelo numérico

La tabla 9 muestra las longitudes de las líneas OX, AB y CD del análisis numérico. Las deformaciones promedio se calcularon con la ecuación (1).

**Tabla 9.** Deformaciones lineales numérico en las líneas de referencia

Líneas de referencia	$L_i$	$L_f$	$\epsilon$	$\% \epsilon$
OX	135	133.7	-0.009	0.9
AB	135	135.5	0.0011	0.11
CD	100	100.5	0.005	0.5

Nota:  $L_i$  = Longitud inicial;  $L_f$  = Longitud final;  $\epsilon$  = deformación unitaria  $(L_f - L_i) / L_i$ ;  $\% \epsilon$  = Porcentaje de deformación  $\epsilon \times 100 \%$ .

Fuente: Propia

Al observar las longitudes finales de las líneas de referencia se concluye que la deformación unitaria es despreciable.

La tabla 10 muestra los valores de la longitud final de cada elemento correspondiente a las líneas de referencia del análisis numérico. Las deformaciones promedio de los elementos se calcularon con la ecuación (1).

**Tabla 10.** Deformaciones lineales numéricas en los elementos de las líneas OX, AB y CD

Elem	L <sub>i</sub>	Línea OX			Línea AB			Línea CD		
		L <sub>f</sub>	ε	% ε	L <sub>f</sub>	ε	% ε	L <sub>f</sub>	ε	% ε
1	5	5.000	0.000	-0.006%	5.158	0.032	3.152%	5.056	0.011	1.112%
2	5	5.001	0.000	0.027%	5.054	0.011	1.090%	5.031	0.006	0.623%
3	5	5.003	0.001	0.057%	5.197	0.039	3.945%	5.014	0.003	0.272%
4	5	4.995	-0.001	-0.107%	5.351	0.070	7.016%	5.311	0.062	6.222%
5	5	4.977	-0.005	-0.470%	5.066	0.013	1.323%	5.255	0.051	5.100%
6	5	4.957	-0.009	-0.854%	4.881	-0.024	-2.376%	4.788	-0.042	-4.231%
7	5	4.947	-0.011	-1.064%	4.959	-0.008	-0.816%	4.881	-0.024	-2.383%
8	5	4.941	-0.012	-1.178%	5.001	0.000	0.015%	4.938	-0.012	-1.241%
9	5	4.913	-0.017	-1.730%	5.004	0.001	0.072%	4.974	-0.005	-0.524%
10	5	4.912	-0.018	-1.762%	5.012	0.002	0.242%	4.987	-0.003	-0.270%
11	5	4.910	-0.018	-1.797%	5.014	0.003	0.279%	4.987	-0.003	-0.266%
12	5	4.909	-0.018	-1.825%	5.018	0.004	0.366%	4.974	-0.005	-0.525%
13	5	4.917	-0.017	-1.653%	5.032	0.006	0.634%	4.938	-0.012	-1.237%
14	5	4.921	-0.016	-1.573%	5.033	0.007	0.662%	4.881	-0.024	-2.386%
15	5	4.917	-0.017	-1.657%	5.032	0.006	0.642%	4.788	-0.042	-4.230%
16	5	4.909	-0.018	-1.812%	5.018	0.004	0.367%	5.256	0.051	5.119%
17	5	4.909	-0.018	-1.818%	5.013	0.003	0.269%	5.310	0.062	6.204%
18	5	4.912	-0.018	-1.766%	5.012	0.002	0.240%	5.013	0.003	0.266%
19	5	4.913	-0.017	-1.746%	5.003	0.001	0.068%	5.031	0.006	0.625%
20	5	4.941	-0.012	-1.181%	5.001	0.000	0.023%	5.056	0.011	1.123%
21	5	4.947	-0.011	-1.057%	4.959	-0.008	-0.825%			
22	5	4.957	-0.009	-0.864%	4.881	-0.024	-2.373%			
23	5	4.976	-0.005	-0.475%	5.066	0.013	1.310%			
24	5	4.994	-0.001	-0.112%	5.351	0.070	7.014%			
25	5	5.003	0.001	0.055%	5.196	0.039	3.929%			
26	5	5.002	0.000	0.032%	5.055	0.011	1.097%			
27	5	5.000	0.000	-0.005%	5.157	0.031	3.138%			
			$\bar{X}_{\epsilon ox}$	-0.009		$\bar{X}_{\epsilon AB}$	0.01		$\bar{X}_{\epsilon CD}$	0,005
			$S_{\epsilon ox}$	0.007		$S_{\epsilon AB}$	0.02		$S_{\epsilon CD}$	0.03
			$\epsilon_{m\acute{a}x ox}$	0.0005		$\epsilon_{m\acute{a}x AB}$	0.07		$\epsilon_{m\acute{a}x CD}$	0.06
			$\epsilon_{m\acute{i}n ox}$	-0.02		$\epsilon_{m\acute{i}n AB}$	-0.02		$\epsilon_{m\acute{i}n CD}$	-0.04

Nota: Elem = Elemento; L<sub>i</sub> = Longitud inicial; L<sub>f</sub> = Longitud final; ε = deformación unitaria (L<sub>f</sub> – L<sub>i</sub>) / L<sub>i</sub>; %ε = Porcentaje de deformación ε x 100 %

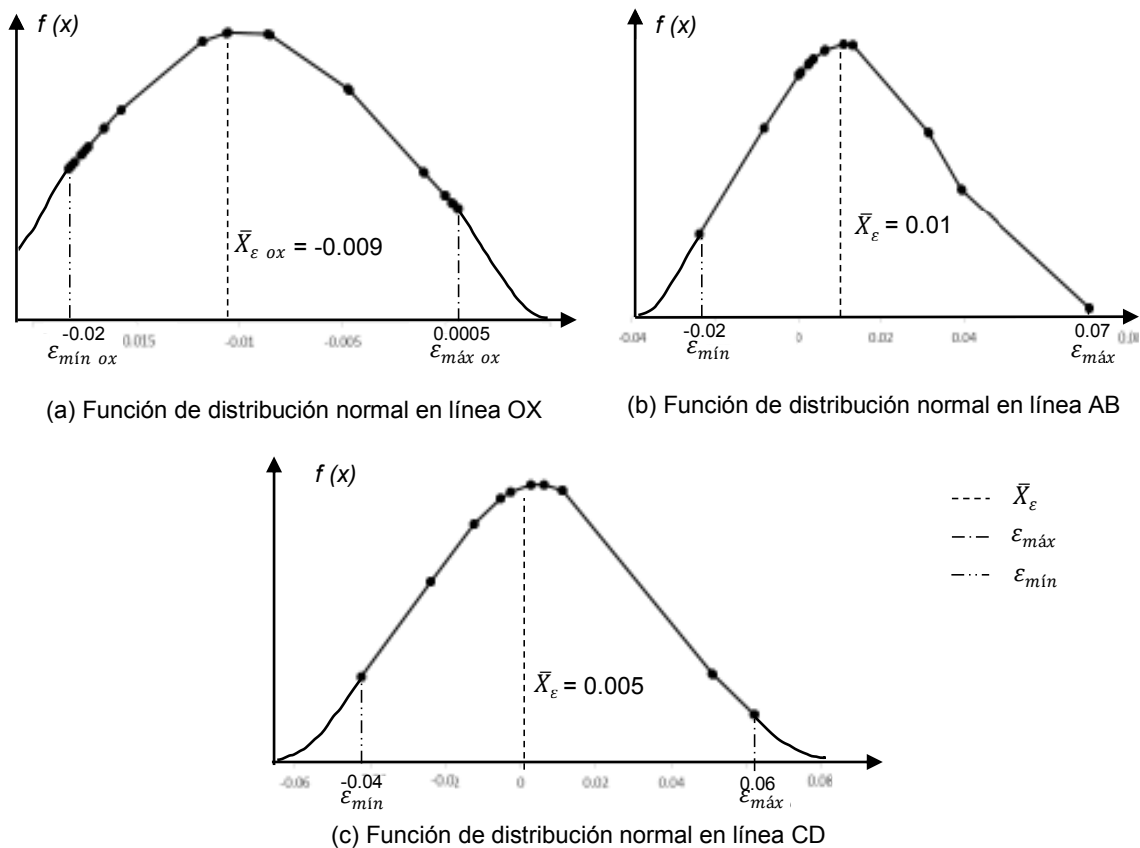
Fuente: Resultados del análisis numérico



En la línea OX la deformación unitaria máxima es 0.0005 (extensión) y la deformación mínima de -0.02 (compresión). En la línea AB la deformación unitaria máxima es 0.07 (extensión) y la deformación mínima de -0.02 (compresión). En la línea CD la deformación unitaria máxima es 0.06 (extensión) y la deformación mínima de -0.04 (compresión). El promedio de la deformación en las tres líneas es muy cercano a cero.

El anexo 4 muestra los valores usados de  $x$  y  $f(x)$  para graficar las funciones de distribución normal de los resultados numéricos.

La figura 35 (a), (b) y (c) muestra la función de distribución normal de la deformación unitaria en los elementos correspondientes a las líneas de referencia OX, AB y CD de los resultados numéricos.

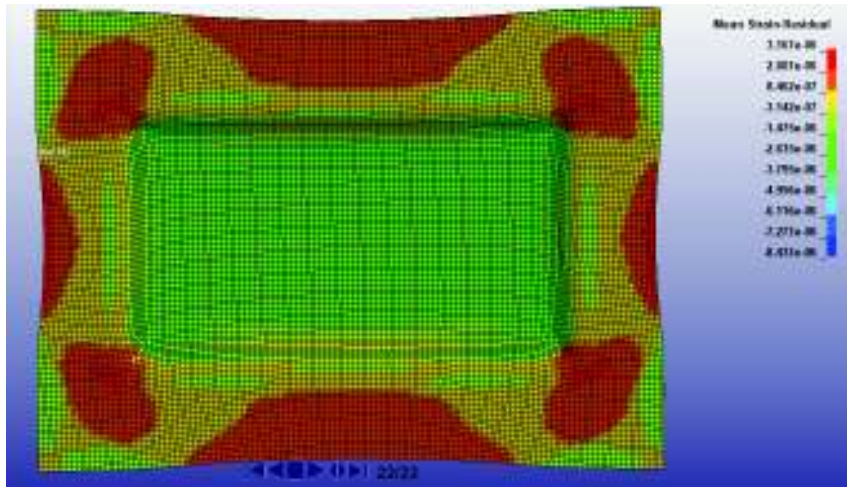


**Figura 35.** Distribución normal de las deformaciones unitarias del análisis numérico  
**Fuente:** Propia

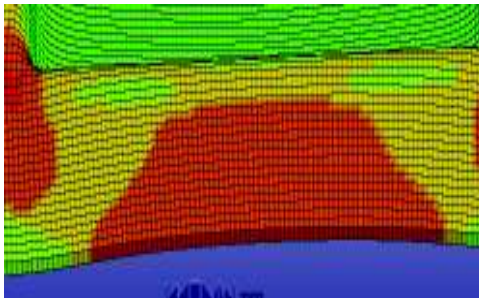
La distribución normal para las tres líneas es aproximadamente simétrica, las medias aritméticas son cercanas a cero. Para la línea OX se muestra que la media aritmética se inclina ligeramente a deformaciones negativas de compresión. En las líneas AB y CD los datos se agrupan hacia las deformaciones positivas (extensión).

### 3.2.3. Deformación media residual

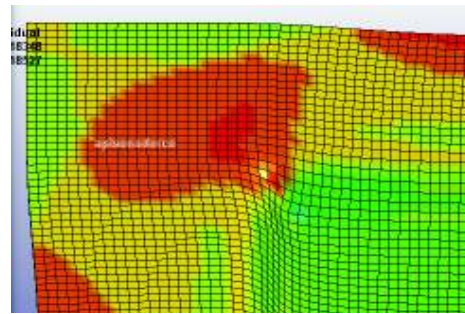
Después de haber calibrado en lo posible el modelo numérico en base a los parámetros medidos en la experimentación, se procede a estudiar los fenómenos que no se pueden evidenciar a simple vista. La figura 36 (a) muestra las áreas de deformación media residual en la placa del modelo numérico. Las menores deformaciones se muestran en la parte media de la placa (zona en donde presiona el émbolo) porque el cambio de la geometría es despreciable.



(a) deformación media residual de la placa



(b) deformación media en la línea OX



(c) deformación media en el doblez

**Figura 36.** Áreas de mayor deformación media residual en el modelo numérico

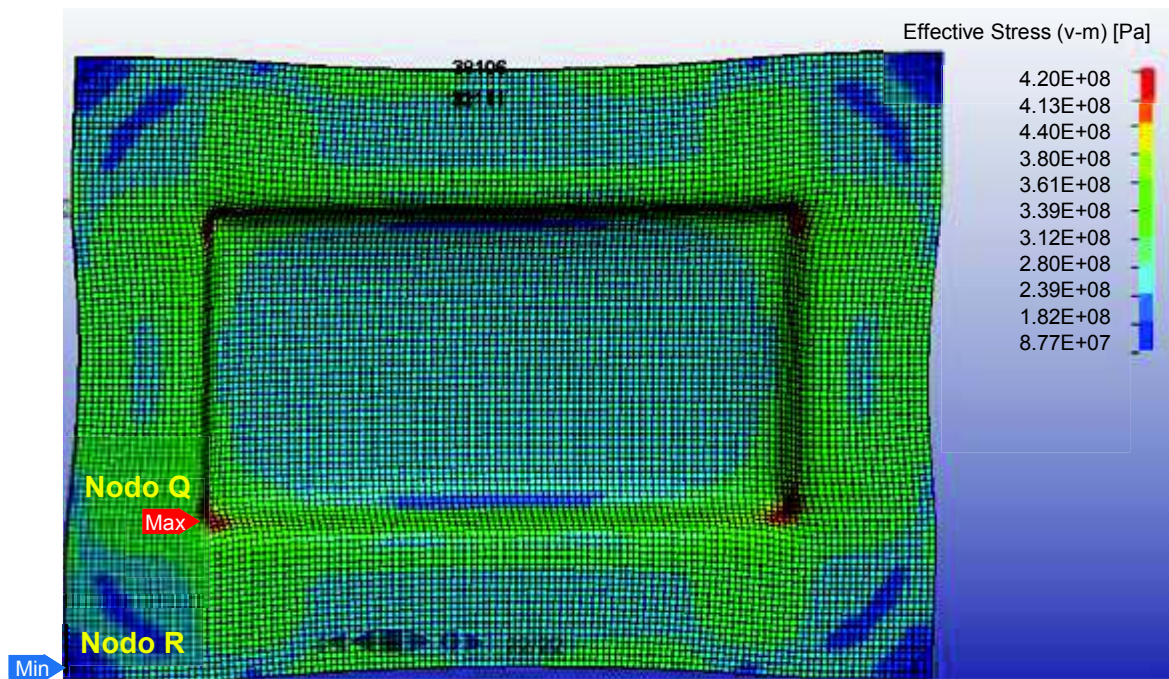
**Fuente:** Propia

La figura 36 (b) muestra la deformación media residual sobre la línea OX, siendo el elemento 12<sub>OX</sub> el que presenta la mayor deformación por compresión (ver tabla 10). En la zona media de la línea OX el material fluye en la dirección Z, y presenta un cambio abrupto en la geometría, por ende, las deformaciones medias residuales son mayores. Los resultados mostrados en la línea OX son similares a la línea OZ (ver figura 30) debido a que los fenómenos se reproducen de la misma manera, pero en la dirección X.

La figura 36 (c) muestra el área en donde las deformaciones medias residuales son las más altas. Esta zona es la esquina en donde se produce el doblez debido a la embutición, ya que en ella se combinan los flujos del material en las direcciones Z, X y -Y. Las deformaciones producidas en esta región dependen de los parámetros de geometría y de proceso de embutición (ver tabla 1).

### 3.2.4. Esfuerzos generados en la embutición

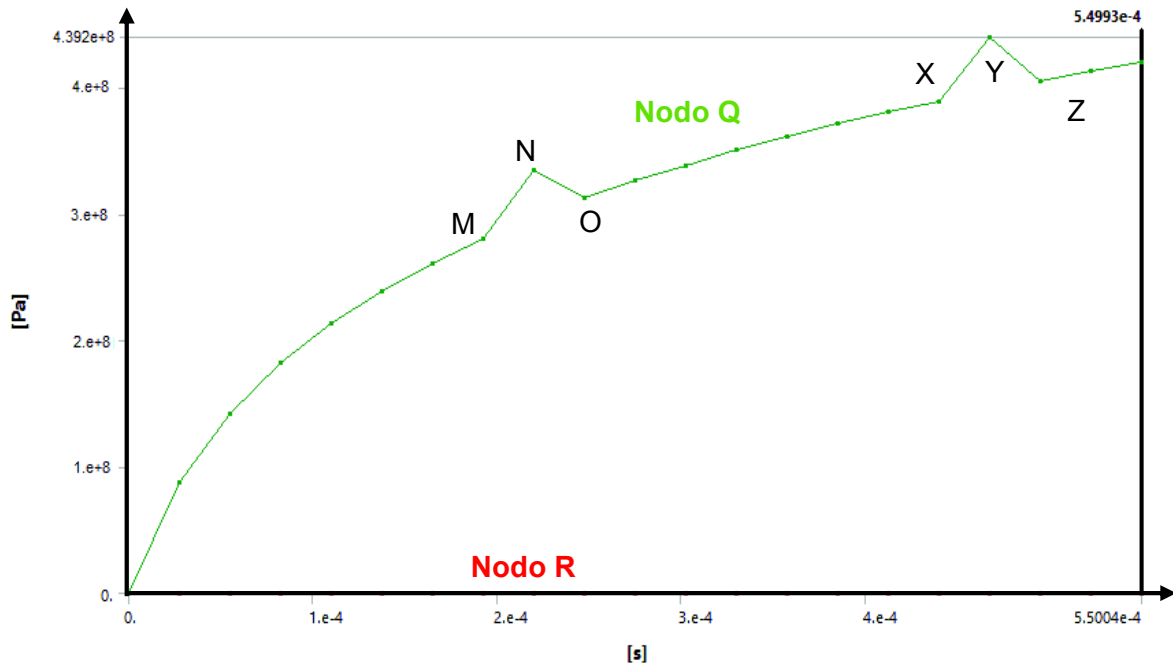
La figura 37 muestra los esfuerzos generados sobre la placa según el criterio de Von Mises. La esquina en donde se produce el doblez debido a la embutición presenta el esfuerzo máximo correspondiente a 420 MPa (área de color rojo, nodo Q). El menor esfuerzo se presenta en la esquina de la placa metálica con un valor de 0,9 MPa (área de color azul, nodo R).



**Figura 37.** Áreas de mayor deformación media residual en el modelo numérico  
**Fuente:** Propia

Al comparar las áreas de las deformaciones medias residuales con el esfuerzo equivalente de Von Mises se puede evidenciar que en las esquinas de los dobleces debido a la embutición se presentan los mayores valores, es decir que los mayores esfuerzos se relacionan directamente con mayores deformaciones. Al contrario, en la zona de la esquina de la placa metálica se presentaron las menores deformaciones y menores esfuerzos equivalentes.

En el anexo 6 se muestra la curva esfuerzo deformación para un acero ASTM A 36. En la figura 38 se muestra la variación del esfuerzo equivalente de Von Mises máximos (línea verde) y mínimos (línea roja) en función del tiempo, correspondientes a los nodos Q y R.



**Figura 38.** Esfuerzo equivalente de los nodos Q y R vs tiempo.  
Fuente: Propia

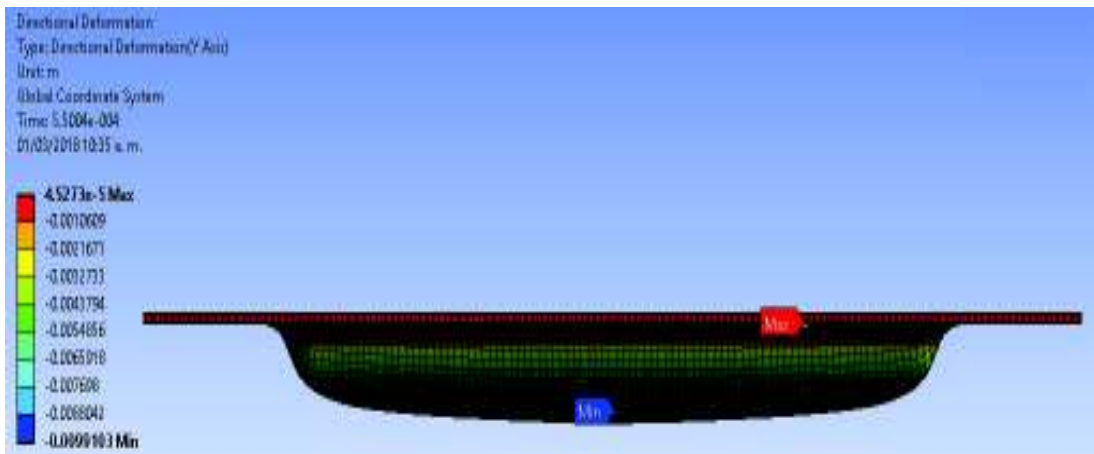
Según Ciligueta (2008) “Las tensiones y deformaciones tridimensionales se desarrollan en varias direcciones. Una forma habitual de expresar estas tensiones multidireccionales consiste en resumirlas en una tensión equivalente, también denominada tensión de von-Mises. El criterio de máxima tensión de von Mises se basa en la teoría de von Mises-Hencky. La teoría expone que un material dúctil comienza a ceder en una ubicación cuando la tensión de von Mises es igual o superior al límite de tensión ( $S_y$ ).” [8]

Los puntos M, N y O son puntos de inflexión en la curva. Los valores correspondientes al esfuerzo equivalente de Von Mises son 280, 334 y 312 MPa respectivamente. Al comparar estos resultados con los valores de la curva esfuerzo deformación unitaria para el acero ASTM A 36 (ver anexo 6), se evidencia que corresponden a la zona de plasticidad y endurecimiento por deformación. De la misma forma, los puntos X, Y y Z son otros puntos de inflexión. Los valores correspondientes al esfuerzo equivalente de Von Mises son 389, 440, 405 MPa respectivamente, y estos esfuerzos corresponden al inicio de la zona de estricción. Esta es la razón por la cual se produce puntos de inflexión en la figura 38.

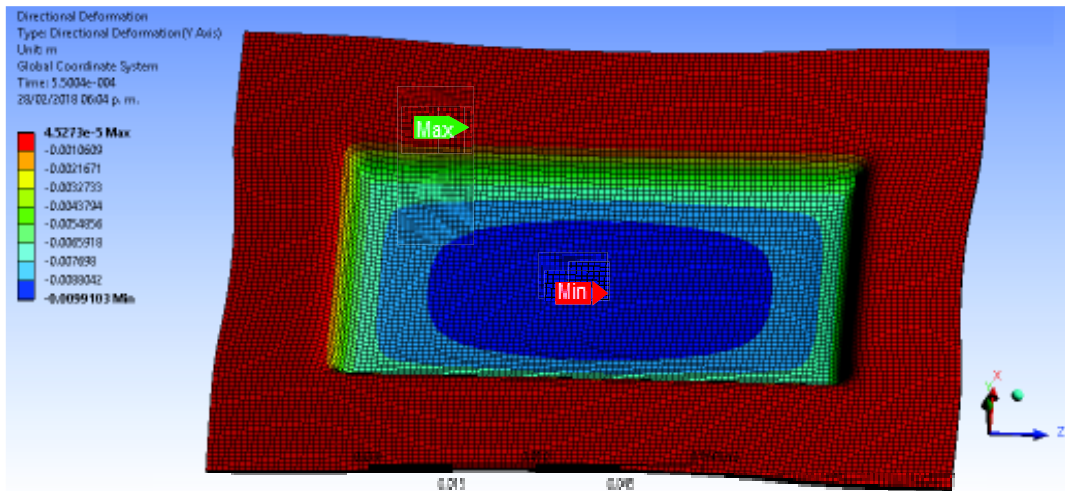


### 3.2.5. Desplazamiento direccional en el eje Y

En la figura 39 (a) se muestra la geometría de la placa después de la embutición en la dirección Y. El desplazamiento máximo corresponde a la cara de la placa que se encuentra en contacto con el prensa chapas que sube 0.045 mm, mientras que el área de la placa que está en contacto con el émbolo se desplaza 9.91 mm en la dirección  $-Y$ . El desplazamiento total en esta dirección es aproximadamente 10 mm. La figura 39 (b) muestra la ubicación del nodo que presenta la deformación mayor en la dirección  $-Y$ , que coincide con el nodo K que se estudió experimentalmente (ver apartado 3.1.2.).



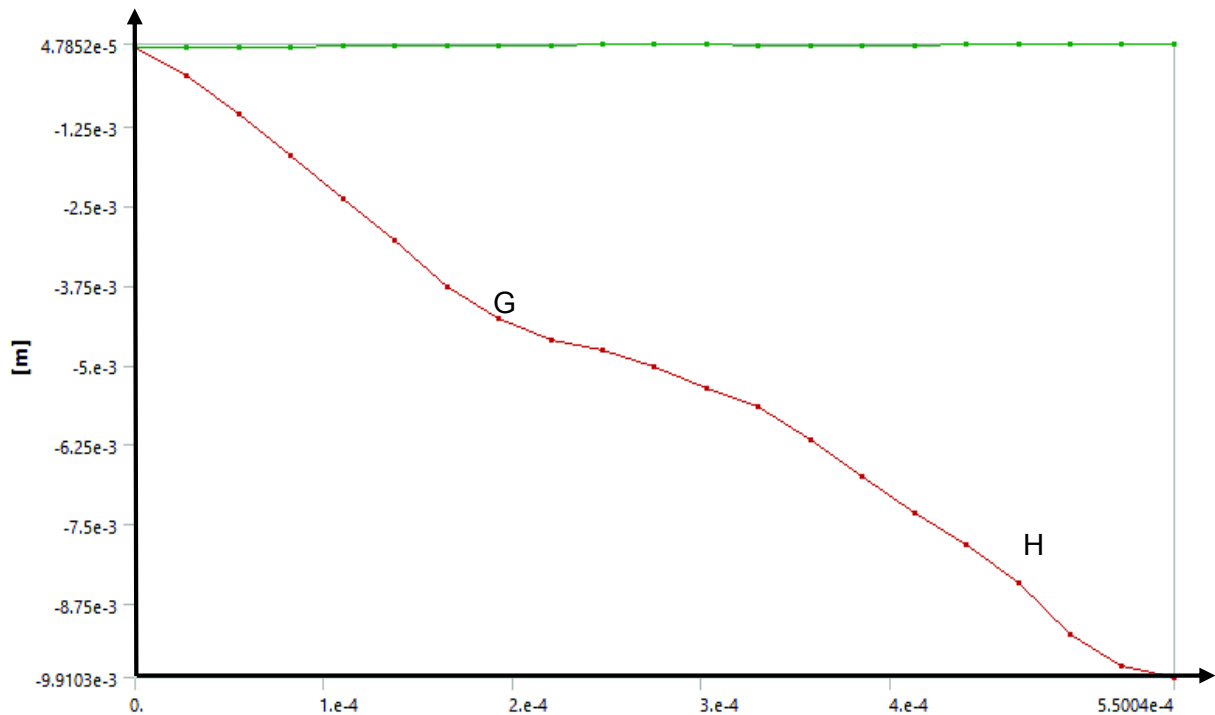
(a) Geometría de la placa en la direccional Y



(b) Nodos máximos y mínimos de desplazamiento direccional Y

**Figura 39.** Desplazamiento direccional en el eje Y  
**Fuente:** Propia

La figura 40 muestra la variación del desplazamiento direccional en el eje Y para el valor máximo (línea verde) y mínimo (línea roja) en función del tiempo.

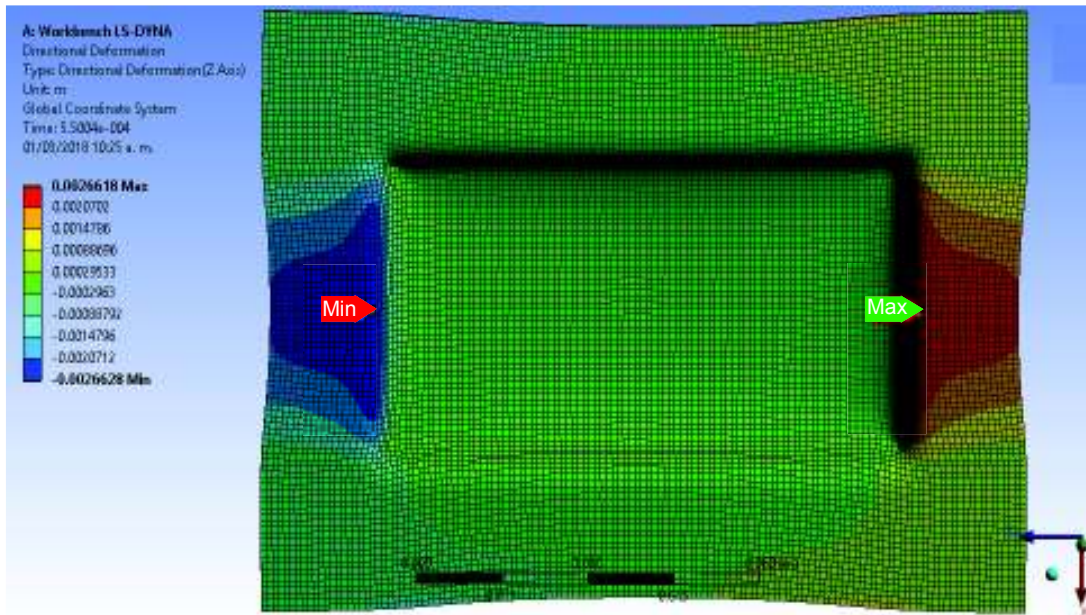


**Figura 40:** Desplazamiento direccional en el eje Y vs tiempo  
**Fuente:** Propia

Los puntos G y H son puntos de inflexión en la curva. Los valores correspondientes al esfuerzo equivalente de Von Mises son 228 y 258 MPa respectivamente. Al comparar estos resultados con los valores de la curva esfuerzo deformación unitaria para el acero ASTM A 36 (ver anexo 6), se evidencia que el punto G se encuentra al inicio de la zona plástica y el punto H se encuentra al inicio de la zona de endurecimiento por deformación.

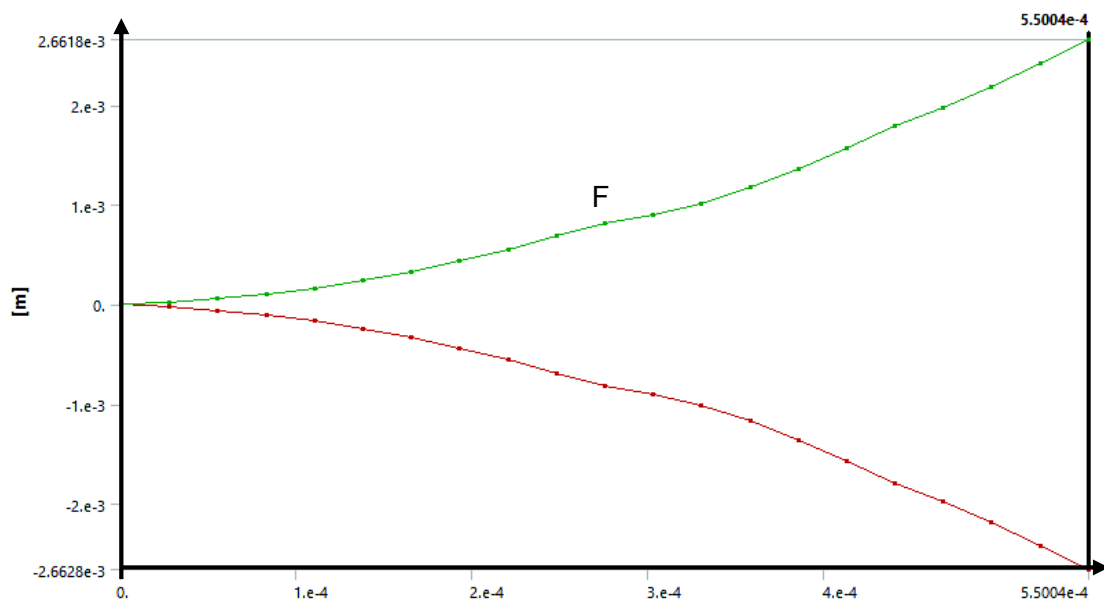
### 3.2.6. Desplazamiento direccional en el eje X

La figura 41 muestra los desplazamientos direccionales sobre la placa en el eje X. Las áreas que se encuentran ubicadas cerca de la línea AB son las que presentan los desplazamientos máximos. Debido a la simetría de la placa se puede apreciar que los valores máximos y mínimos se ubican simétricamente. El valor máximo es de 2.66 mm y el mínimo de -2.66 mm.



**Figura 41.** Desplazamiento direccional en el eje X  
**Fuente:** Propia

La figura 42 muestra la variación del desplazamiento direccional en el eje X para el valor máximo (línea verde) y mínimo (línea roja) en función del tiempo.

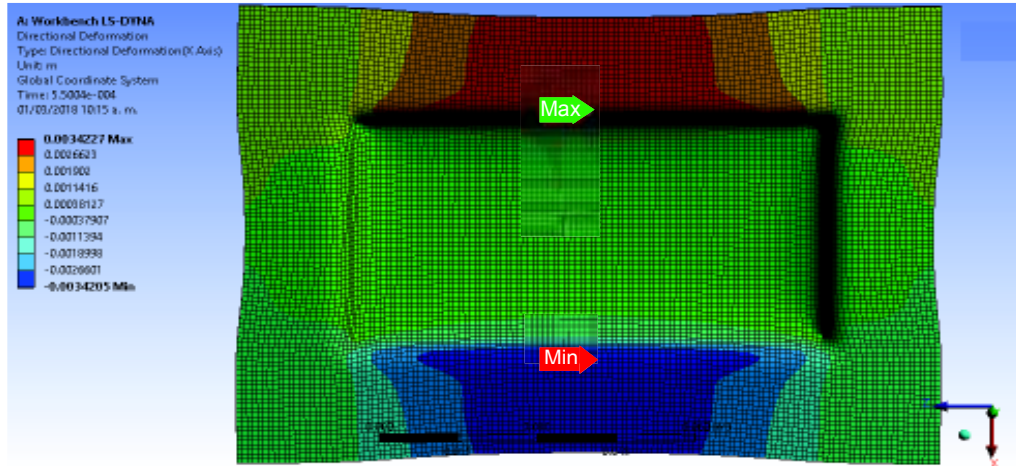


**Figura 42.** Desplazamiento direccional en el eje X vs tiempo  
**Fuente:** Propia

El punto F muestra la unión de dos curvas. El valor correspondiente al esfuerzo equivalente de Von Mises es 290 MPa. Al comparar este resultado con los valores de la curva esfuerzo deformación unitaria para el acero ASTM A 36 (ver anexo 6), se evidencia que el punto F se encuentra en la zona de endurecimiento por deformación.

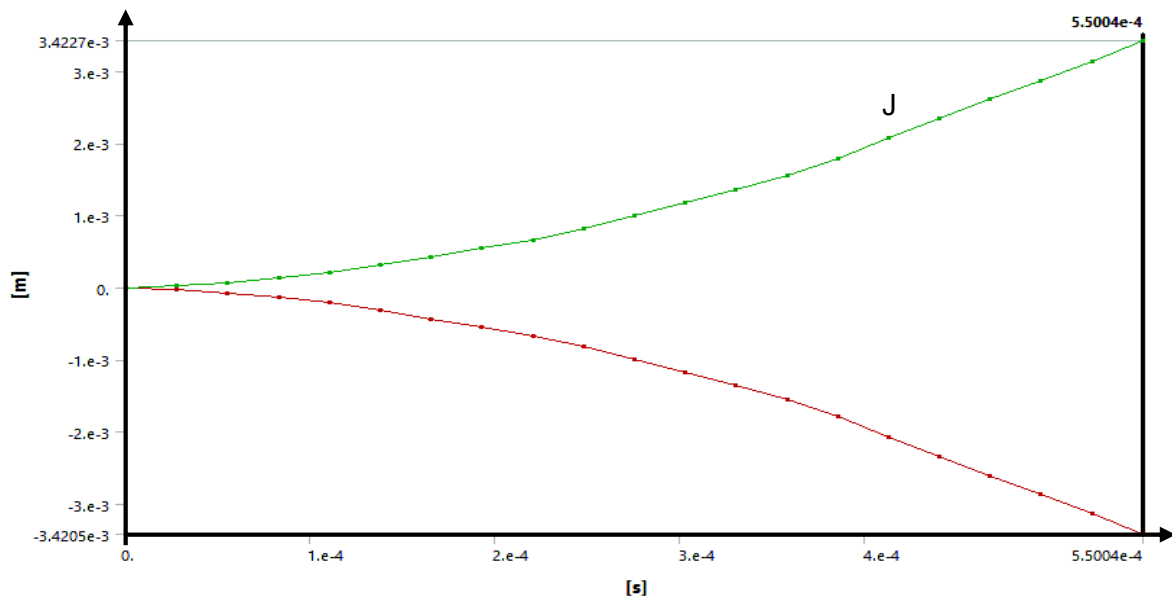
### 3.2.7. Desplazamiento direccional en el eje Z

La figura 43 muestra los desplazamientos direccionales sobre la placa en el eje Z. Las áreas que se encuentran ubicadas cerca de la línea CD son las que presentan los desplazamientos máximos. El valor máximo es de 3.44 mm y el mínimo de -3.44 mm.



**Figura 43.** Desplazamiento direccional en el eje Z  
**Fuente:** Propia

La figura 44 muestra la variación del desplazamiento direccional en el eje Z para el valor máximo (línea verde) y mínimo (línea roja) en función del tiempo.



**Figura 44.** Desplazamiento direccional en el eje Z vs tiempo  
**Fuente:** Propia

El valor correspondiente en el punto J del esfuerzo equivalente de Von Mises es 271 MPa. Al comparar este resultado con los valores de la curva esfuerzo deformación unitaria para



el acero ASTM A 36 (ver anexo 6) se evidencia el punto J se encuentra en la zona de endurecimiento por deformación.

### 3.2.8. Desplazamiento direccional de los nodos medios

En la tabla 11 se muestra los valores de los desplazamientos direccionales de los nodos medios en las direcciones X, -Y y Z, respectivamente.

**Tabla 11.** Desplazamientos direccionales numéricos de los nodos medios.

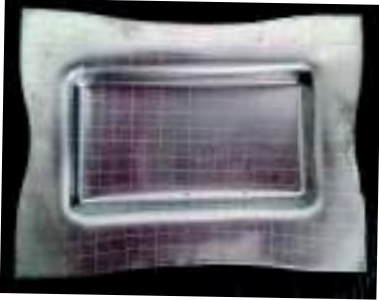
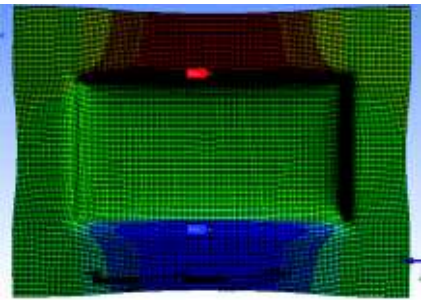

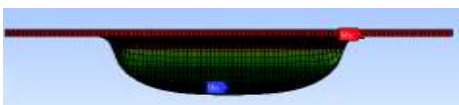
Nodo	Desplazamiento
A	3.42 mm
K	10 mm
D	2.66 mm

Fuente: Propia

### 3.3. Validación del análisis numérico

La tabla 12 muestra una comparación cualitativa y la tabla 13 muestra una comparación cuantitativa entre los resultados experimentales y numéricos, se calculó el porcentaje de error entre ambos resultados para la posterior validación.

**Tabla 12.** Comparación cualitativa entre resultados experimentales y numéricos

Parámetro	Experimental	Numérico
Geometría		
	Plano XZ	
		
	Plano YX	

Fuente: Propia

El modelo experimental y numérico presentan una geometría similar. Se puede evidenciar que los desplazamientos de los nodos A, K y D son similares, otro aspecto a considerar es la simetría que se presenta con respecto a los ejes AB y CD. Finalmente se puede apreciar

que en ningún modelo se presentan arrugas visibles, debido a que los parámetros usados no permitieron que se forme arrugas en el modelo numérico.

**Tabla 13.** Comparación cuantitativa entre resultados experimentales y numéricos

	Parámetro	Resultados		Error	
		Experimental	Numérico		
Deformaciones totales (tabla 7 y 9)	OX	-0.008	-0.009	13%	
	AB	0.001	0.0011	10%	
	CD	0.004	0.005	25%	
Deformaciones de los elementos (tabla 8 y 10)	OX	$\bar{X}_{\varepsilon ox}$	-0.07	-0.009	87%
		$S_{\varepsilon ox}$	0.16	0.007	96%
		$\varepsilon_{máx ox}$	0.27	0.0005	100%
	AB	$\varepsilon_{mín ox}$	-0.32	-0.02	94%
		$\bar{X}_{\varepsilon AB}$	0.015	0.01	33%
		$S_{\varepsilon AB}$	0.05	0.02	60%
	CD	$\varepsilon_{máx AB}$	0.11	0.07	36%
		$\varepsilon_{mín AB}$	-0.1	-0.02	80%
		$\bar{X}_{\varepsilon CD}$	0.004	0.005	25%
	D	$S_{\varepsilon CD}$	0.06	0.03	50%
		$\varepsilon_{máx CD}$	0.12	0.06	50%
		$\varepsilon_{mín CD}$	-0.11	-0.04	64%
Desplazamiento direccional [mm]	A	$\bar{X}_A$	4.8	3.42	29%
	K	$\bar{X}_B$	11.2	10	11%
	D	$\bar{X}_D$	4.6	2.66	42%

**Fuente:** Propia

Los resultados mostrados en la tabla 13 señalan tres parámetros. El primero consiste en la comparación de las deformaciones de las longitudes totales en donde los errores entre el modelo experimental y numérico no son mayores al 25 %, esto se debe principalmente a que las medidas tomadas en las placas embutidas experimentalmente presentan un error de medición bajo.

El segundo parámetro consiste en comparar las deformaciones promedio de los elementos. Debido a la simetría de la placa embutida la cantidad de deformaciones positivas (extensión) es similar a las deformaciones negativas (compresión) y, por ende, el promedio se aproxima a cero. Los errores que se producen al comparar los resultados experimentales y numéricos según este parámetro son altos, se debe principalmente

porque los promedios experimentales de deformación se obtienen de la medición de cada elemento que implica a su vez errores de medición debido a la tolerancia del instrumento usado, errores de apreciación y principalmente al error truncado que se produce.

Al comparar las curvas de distribución normal presentes en el modelo experimental y numérico se puede apreciar que son similares. La curva de la línea OX presenta una pequeña inclinación de sus medias hacia la izquierda (deformaciones negativas), mientras que para AB y CD se muestran unos promedios positivos (deformaciones positivas) y son más simétricas con respecto a la línea OX.

El tercer parámetro de comparación consiste en los desplazamientos que se producen en los nodos medio A, K y D ya que se desplazan en una sola dirección. De la misma manera que en el primer parámetro estos errores son bajos debido a la facilidad de medición y la disminución de los errores de apreciación y humanos.

El modelo numérico se valida para las longitudes en las líneas OX, AB y CD, porque los errores entre los resultados experimentales y numéricos son aceptables ( $> 25\%$ ). No se valida al analizar la sumatoria de las deformaciones de los elementos lineales porque el comportamiento no es el mismo en toda la placa y también se debe a errores de truncado en la tolerancia y apreciación de las medidas experimentales.

### **3.4. Discusión de resultados**

En este proyecto se revisó parámetros del proceso, como la fuerza de la prensa chapa, la fuerza de embutición. La fricción es un parámetro muy importante debido a que la distribución del espesor y la calidad de la superficie del producto dependen del coeficiente de fricción. El coeficiente de fricción se ve afectado por algunos parámetros como la temperatura, la presión en la embutición, la composición química de la capa superficial y la dureza. [7]

Para las velocidades experimentales, autores como Koninck & Gutter señalan que la velocidad de embutición para materiales de acero de bajo carbono es un parámetro importante en el proceso y se encuentra definida en un rango amplio que varía entre los 20 mm / s hasta 500 mm / s, siendo función principalmente de la prensa que se utiliza para el proceso de conformado. Al contrario, la ASM International the Materials Information Society refiere que para aceros de bajo carbono la velocidad de embutición no es un parámetro importante, criterio compartido por Dwivedi & Agnihotri. En la experimentación se usó una velocidad constante de 0.54 mm / s.

En varias investigaciones científicas relacionadas a procesos de embutición las velocidades son bajas y oscilan entre valores de 10 mm / s hasta 30 mm / s, sin embargo, la velocidad usada para los análisis numéricos explícitos es de 400 a 450 veces más alta para reducir considerablemente el tiempo de simulación y que no demande una cantidad excesiva de recursos de procesamiento. Esta metodología ha permitido encontrar valores numéricos cercanos a los experimentales. En el presente estudio se utilizó una velocidad experimental de embutición de 0, 54 mm / s y en la simulación de 500 mm / s. [4] [6] [7] [16]

El análisis numérico realizado por elementos finitos determina una solución aproximada del problema real. La diferencia de los resultados numéricos se debe a las simplificaciones de geometría, condiciones de contorno, propiedades mecánicas del material, carga y fricción. [20] En este trabajo se utilizó condiciones de contorno aproximadas mediante cálculos analíticos en la fuerza de embutición y de la prensa chapa, también se consideró valores referentes en la norma ASME A36 / A36M, para definir las propiedades mecánicas del material y los coeficientes de rozamiento. Se omitió parámetros como temperatura y se simplificó el modelo geométrico, adicionalmente la velocidad de embutición se aumentó y el tiempo del proceso se redujo a  $5,5 \times 10^{-4}$  s.

En ningún artículo consultado se menciona sobre errores admisibles en la validación de resultados numéricos, ni sobre la metodología para la medición de los valores experimentales. En este trabajo se señala que se realizó un mallado de 5 mm experimentalmente y es importante aclarar que existe un error de medición debido a que el instrumento usado tiene una precisión de 1mm. De la misma manera el instrumento utilizado para medir las deformaciones experimentales tiene una precisión de 0,05 mm. Estos errores se trataron de reducir al aplicar el procedimiento descrito en el capítulo anterior mediante el ensayo a 43 placas metálicas y al trabajar con promedios, con respecto a otros trabajos similares como Salazar & Villacrés, se indica que se realizó este procedimiento con 10 muestras.

De acuerdo a Hidalgo (2017) un análisis numérico es validado cuando la discrepancia entre los resultados numéricos y experimentales es hasta de un 20%. En el trabajo realizado por Salazar & Villacrés la validación se realiza mediante una comparación de las deformaciones porcentuales. En el presente proyecto la discrepancia de resultados varía dependiendo del parámetro analizado.

En el primer parámetro, el error máximo se presenta en la línea CD con un 25 %. El error máximo del segundo parámetro es de 87 % en la línea OX. En el tercer parámetro el error máximo se presenta en el nodo D (sobre la línea OX) con un 42 %.

El modelo numérico actual caracteriza la realidad adecuadamente en las longitudes totales. Varios parámetros como temperatura, lubricación, coeficientes de rozamiento, fuerzas de embutición y del prensa chapas fueron idealizadas, se descarta la validación del modelo numérico en las deformaciones de los elementos porque los errores en las mediciones de las deformaciones de los elementos experimentales influyen.

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1. Conclusiones

- Se realizó un estudio experimental a 43 probetas sobre el proceso de embutición para la obtención de una pieza cóncava hueca rectangular de acero de bajo carbono (ASTM A 36), la velocidad de embutición fue de 0,5385 mm / s, la deformación máxima de 11,2 mm se produce en la dirección del desplazamiento del émbolo. Valores como las fuerzas de embutición, de la prensa chapa y coeficientes de rozamiento no se pudieron medir experimentalmente, por lo cual dichos parámetros fueron estimados a partir de ecuaciones empíricas e información disponible en literatura.
- Todas las variables que influyen en el proceso de embutición para aceros de bajo carbono se agrupan en tres parámetros principales que son: Propiedades mecánicas del material, proceso y geometría (ver tabla 1). Se concluye que la velocidad no es una variable de importancia en embutición de aceros de bajo carbono porque no afecta los esfuerzos y deformaciones residuales.
- En este trabajo se estimó para el análisis numérico condiciones de contorno aproximadas mediante cálculos analíticos para la fuerza de embutición de 19 806 N, la fuerza de la prensa chapa de 6 602 N, coeficientes de rozamiento estático y dinámico de 0.15 y 0.09, material de la chapa metálica ASTM A 36. Se omitió parámetros como temperatura y se simplificó el modelo geométrico, la velocidad de embutición fue de 500 mm / s y el tiempo de simulación de  $5.5 \times 10^{-4}$  s. El mallado utilizado fue refinado y mediante criterios de convergencia se usó un tamaño de elemento de 1 mm.
- La validación del análisis numérico se realizó con 3 parámetros: Deformación total, deformación de los elementos y desplazamientos direccionales. A partir de la comparación entre los resultados experimentales y numéricos, se puede concluir que el análisis realizado mediante el método de elementos finitos utilizando el software ANSYS 18.1 / LS\_Dyna caracterizar la realidad solamente en deformaciones totales. A pesar de que la forma de las curvas de distribución normal numéricas y experimentales son bastante similares entre sí, las diferencias son altas.

- El modelo numérico permite estudiar parámetros importantes en la embutición. Parámetros como los esfuerzos y deformaciones son muy importantes para entender el proceso de embutición. La guía de práctica resultante de este proyecto sirve como complemento para las prácticas actuales de embutición realizadas en el Laboratorio de Conformado Mecánico de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la Escuela Politécnica Nacional.

## **4.2. Recomendaciones**

- Evaluar parámetros que puedan introducir incertidumbre, por ejemplo, lubricación, presión en el émbolo, errores de medición, con los métodos estadísticos, entre otros. Este estudio puede dar luz a la magnitud de los errores y deformaciones entre valores experimentales y numéricos, porque se pueden encontrar los factores de influencia de cada parámetro.
- En el estudio presentado, los experimentos se realizaron solo para una forma cóncava hueca rectangular. Pero se puede analizar el comportamiento de otras geometrías de acuerdo a ensayos de embutición normalizados.
- En el estudio actual, el material se considera isotrópico. De forma similar, se puede desarrollar un estudio al considerar la anisotropía del material, por ejemplo, considerando que el material sea diferente al acero ASTM A-36.
- La mayoría de los productos de la industria automovilística y aeronáutica se fabrican mediante un proceso de embutición. Los productos de estas industrias se pueden analizar experimental y numéricamente.
- Se pueden llevar a cabo investigaciones sobre piezas de trabajo no simétricas. Se pueden desarrollar diferentes modelos de elementos, especialmente de aquellos que resultan de difícil construcción con el fin de optimizar y controlar de mejor manera los parámetros usado en la operación del equipo.

## Bibliografía

- [1] J. Gere, Mecánica de materiales, Séptima ed., México D.F.: Cengage Learning, 2009.
- [2] H. Appold y F. Kurt, Tecnología de los metales, Barcelona: Reverté, 1982.
- [3] J. Beer y E. Mazurek, Mecánica vectorial para ingenieros "Estática", México: McGraw Hill, 2010.
- [4] J. Koninck y D. Gutter, Manual del técnico matricero, Montesó, 2000.
- [5] M. Rosii, Estampado en frio de la chapa, Dossat, 2000.
- [6] A. International, Forming and forging, Novena ed., vol. XIV, A. Handbook, Ed., 1993.
- [7] R. Dwivedi y G. Agnihotri, «Study of deep drawing process parameters,» *ELSEVIER*, pp. 820 - 826, 2016.
- [8] J. Celigueta Lizarza, Método De Los Elementos Finitos Para Análisis Estructural, 3era ed., Navarra: U. C.B., 2008.
- [9] C. Zienkiewico y R. Taylor, El Método de los Elementos Finitos Formulacion Básica y Problemas Lineales, 4ta ed., Barcelona: McGraw-Hill, 1994, p. 24.
- [10] J. Salazar y I. Villacrés, Diseño Y Modelización Del Proceso De Embutición Del "Protector Metálico Para El Tanque De Combustible Del Chevrolet SZ" Mediante El Método De Elementos Finitos (Tesis)., Quito, 2017.
- [11] L. Segerlind, Applied Finite Element Analysis, 2da ed., MICHIGAN: Jhon Wiley and Sons, 1984.
- [12] N. García , Simulación de un Proceso de Embutición Mediante ANSYS LS-DYNA (Tesis), Madrid, 2009.
- [13] L. Camarero, A. Llmazán y J. Arribas, Estadística para la investigación social, Madrid: UNED, 2010.



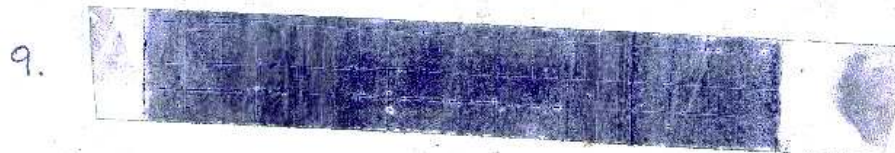
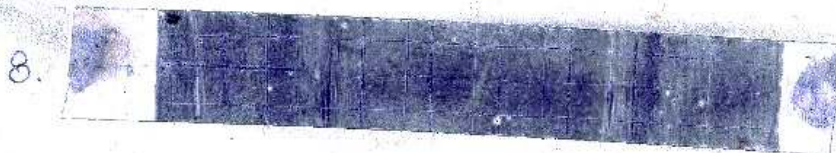
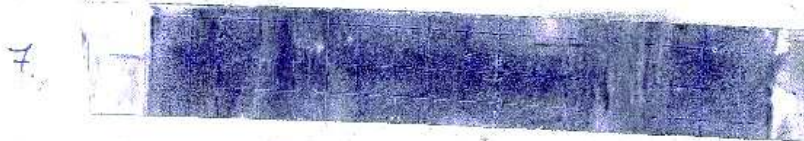
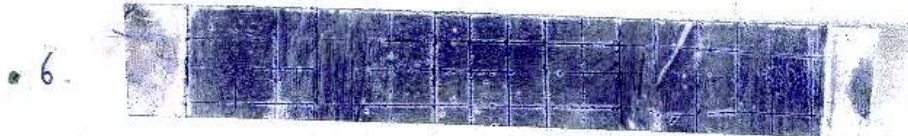
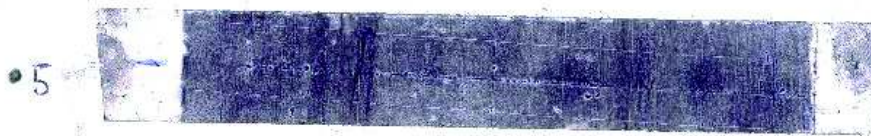
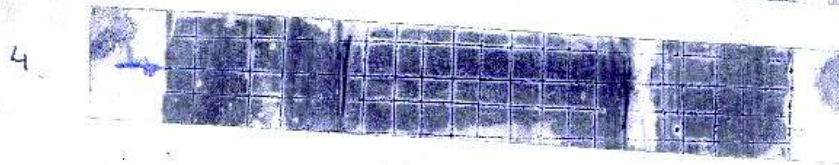
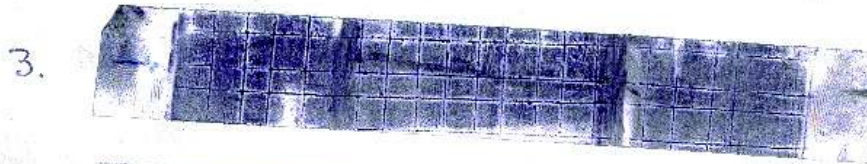
- [14] C. Merchan, Diseño y construcción de tres matrices de corte, doblado, embutido y porta troquel, Quito: E.P.N., 1986.
- [15] ASME, A 36 / A 36 M "Specification for steel sheet, carbon, drawing quality, special killed, cold rolled", ASME International, 2017.
- [16] H. Castro, S. Lajarin y P. Marcondes, «Analysis of numerically simulated true strain on high stampability sheets,» *ABCM*, vol. XXXII, nº 1, pp. 21 - 27, 2010.
- [17] F. Fuenmayor y F. Payares, «Definición de malla óptima en refinamiento H-Adaptativo para múltiples casos de carga,» *Mecánica computacional* , vol. XXI, pp. 3060 - 3075, 2002.
- [18] Autodesk, «Cómo realizar un estudio de convergencia de malla,» Autodesk, 25 Mayo 2015. [En línea]. Available: <https://knowledge.autodesk.com/es/support/simulation-mechanical/learn-explore/caas/sfdcarticles/sfdcarticles/ESP/How-to-Perform-a-Mesh-Convergence-Study.html>. [Último acceso: 23 Enero 2018].
- [19] S. Anwekar y A. Jain, «Finite Element Simulation of Single Stage Deep Drawing Process for Determining Stress Distribution in Drawn Conical Component,» *International Journal of Computational Engineering Research*, vol. II, nº 8, pp. 229 - 236, 2012.
- [20] C. Hernández, Diseño Y Simulación Del Proceso De Embutición De Chapa Metálica Para La Construcción De Extintores Utilizando El Método De Elementos Finitos (Tesis)., Quito, 2010.
- [21] M. Sandoval, Análisis De Esfuerzos En Un Diente De Engrane Recto Para Bomba Hidráulica Aplicando El Método Foto Elástico Y El Método De Elementos Finitos (Tesis)., Mexico DF., 2009.
- [22] E. Oñate, Cálculo De Estructuras Por El Método De Elementos Finitos., Barcelona: McGraw-Hill, 1995.

- [23] M. Portabella, Un Procedimiento Para Cálculo De Estructuras Por El Método De Elementos Finitos Con Error Prefijado Utilizando Refinamiento De Malla Adaptativo (Tesis)., Barcelona: Ibañez & Zárata, 2014.
- [24] ANSYS, Ansys LS-DYNA User's Guide., Canonsburg, 2013.
- [25] C. Garrido, D. Celentano y J. Castillo, Simulación del proceso de embutición de una tapa de embrague de una lavadora semiautomática, La Serena: Chile, 2004.
- [26] B. Rajesh, A hands on introduction to engineering simulations, Cornell University, 2016.
- [27] CPDLR, «Deep Drawing Analysis by Using Explicit Dynamics in Ansys Workbench,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.cpdlr.com/notes-articles-engineering/259-deep-drawing-analysis-by-using-explicit-dynamics-in-ansys-workbench.html>. [Último acceso: 2 Noviembre 2017].
- [28] R. Kanttikar, B. Kodli y R. Chikmeti, «Analysis on Deformation Process in Deep Drawing of Sheet Metal Part by FEM,» *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, vol. II, nº 4, pp. 6 - 16, 2015.
- [29] A. Choubey, G. Agnihotri y C. Sasikumar, «Experimental and mathematical analysis of simulation results for sheet metal parts in deep drawing,» *Journal of Mechanical Science and Technology* , vol. 31, nº 9, pp. 4215 - 4220, 2017.
- [30] C. Arwidson, Numerical Simulation of sheet metal forming for high strengt steels, Lulea: Lulea University of technology, 2005.
- [31] M. Wallmeier, E. Linvill y M. Hauptmann, «Explicit FEM analysis of the deep drawing of paperboard,» *Mechanis of materials*, pp. 1 - 15, 2015.
- [32] V. Hidalgo, Compositor, *Taller de redacción científica*. [Grabación de sonido]. Facultad de Ingeniería mecánica. 2017.

## Anexos

### Anexo 1. Impronta de las líneas medias de las placas embutidas

EJE C-D



**Anexo 2.** Diagrama fuerza de la prensa chapa vs carrera del émbolo de embutido



**Anexo 3.** Valores de  $x$  y  $f(x)$  para la función de distribución normal de las deformaciones unitarias correspondientes a la experimentación

OX		AB		CD	
$x$	$f(x)$	$x$	$f(x)$	$x$	$f(x)$
-0,32	1,34	-0,1	1,485	-0,11	2,06
-0,32	1,34	-0,09	2,219	-0,09	3,65
-0,3	1,62	-0,04	9,141	-0,08	4,657
-0,28	1,92	-0,03	10,777	-0,06	6,967
-0,23	2,76	-0,03	10,777	-0,03	10,32
-0,21	3,10	0	13,933	-0,01	11,65
-0,19	3,42	0	13,933	0	11,86
-0,18	3,58	0	13,933	0	11,86
-0,15	3,99	0	13,933	0	11,86
-0,14	4,10	0	13,933	0	11,86
-0,09	4,45	0	13,933	0	11,86
-0,08	4,47	0	13,933	0	11,86
-0,08	4,47	0	13,933	0	11,86
-0,07	4,47	0	13,933	0	11,86
-0,07	4,47	0	13,933	0,02	11,31
-0,06	4,45	0	13,933	0,03	10,58
-0,06	4,45	0	13,933	0,05	8,521
-0,03	4,30	0	13,933	0,09	3,938
-0,03	4,30	0	13,933	0,1	3,026
-0,02	4,21	0	13,933	0,12	1,642
0	4,00	0	13,933		
0,03	3,60	0,02	13,571		
0,06	3,12	0,03	12,622		
0,13	1,94	0,1	2,514		
0,19	1,10	0,1	2,514		
0,22	0,79	0,11	1,705		
0,27	0,42	0,11	1,705		

**Anexo 4.** Valores de  $x$  y  $f(x)$  para la función de distribución normal de las deformaciones unitarias correspondientes al análisis numérico

OX		AB		CD	
x	f(x)	x	f(x)	x	f(x)
-0.02	49.67	-0.02	9.51	-0.04	7.13
-0.02	50.18	-0.02	9.52	-0.04	7.15
-0.02	50.66	-0.01	21.48	-0.02	14.95
-0.02	51.76	-0.01	21.55	-0.02	14.96
-0.02	54.09	0.00	27.53	-0.01	19.71
-0.02	54.44	0.00	27.58	-0.01	19.73
-0.02	55.61	0.00	27.84	-0.01	21.84
-0.02	56.84	0.00	27.86	-0.01	21.84
-0.02	62.41	0.00	28.75	0.00	22.35
-0.02	62.67	0.00	28.76	0.00	22.36
-0.02	68.62	0.00	28.89	0.00	22.96
-0.01	90.74	0.00	28.94	0.00	22.96
-0.01	90.82	0.00	29.34	0.01	22.98
-0.01	93.54	0.00	29.34	0.01	22.98
-0.01	93.64	0.01	30.30	0.01	22.51
-0.01	93.15	0.01	30.33	0.01	22.49
-0.01	92.96	0.01	30.38	0.05	7.39
0.00	75.39	0.01	31.02	0.05	7.32
0.00	75.06	0.01	31.03	0.06	4.03
0.00	48.63	0.01	30.93	0.06	3.99
0.00	48.23	0.01	30.92		
0.00	40.92	0.03	21.04		
0.00	40.86	0.03	20.93		
0.00	38.61	0.04	14.59		
0.00	38.25	0.04	14.47		
0.00	36.72	0.07	1.11		
0.00	36.56	0.07	1.10		

Anexo 5. Resultado del análisis numérico ANSYS MECHANICAL LS/DYNA

```

C:\Program Files\ANSYS Inc\v181\CommonFiles\TCL\bin\winx64\wish.exe
23455 t 5.5004E-04 dt 1.11E-07 write d3plot file 01/29/18 15:34:09

Normal termination 01/29/18 15:34:09

Memory required to complete solution : 6969573
Additional dynamically allocated memory: 5928222
Total: 12897795

Timing information
-----
CPU(seconds) %CPU Clock(seconds) %Clock
-----
Keyword Processing ... 2.0000E+00 0.10 2.1220E+00 0.10
  KW Reading ..... 1.0000E+00 0.05 8.5800E-01 0.04
  KW Writing ..... 1.0000E+00 0.05 7.0200E-01 0.03
Initialization ..... 1.8000E+01 0.87 1.8345E+01 0.89
  Init Proc Phase 1 .. 5.0000E+00 0.24 5.2890E+00 0.26
  Init Proc Phase 2 .. 0.0000E+00 0.00 6.2000E-02 0.00
Element processing ... 6.4000E+02 31.02 6.4612E+02 31.32
  Solids ..... 5.7800E+02 28.02 5.9225E+02 28.71
Binary databases ..... 3.0000E+00 0.15 2.7280E+00 0.13
ASCII database ..... 1.3000E+01 0.63 1.4741E+01 0.71
Contact algorithm ... 1.2380E+03 60.01 1.2339E+03 59.81
  Interf. ID 33 2.1500E+02 10.42 2.0382E+02 9.88
  Interf. ID 36 1.1200E+02 5.43 1.2039E+02 5.84
  Interf. ID 39 2.5100E+02 12.17 2.5051E+02 12.14
  Interf. ID 46 6.6000E+02 31.99 6.5865E+02 31.93
Rigid Bodies ..... 0.0000E+00 0.00 2.8200E-01 0.01
Time step size ..... 0.0000E+00 0.00 5.6400E-01 0.03
Bnd prescribed opt ... 1.2000E+01 0.58 1.3922E+01 0.67
Group force file .... 6.9000E+01 3.34 7.1267E+01 3.45
Others ..... 2.0000E+00 0.10 2.2450E+00 0.11
Misc. 1 ..... 1.9000E+01 0.92 1.6660E+01 0.81
Misc. 2 ..... 2.8000E+01 1.36 2.0735E+01 1.01
Misc. 3 ..... 1.0000E+00 0.05 4.8200E-01 0.02
Misc. 4 ..... 1.8000E+01 0.87 1.9027E+01 0.92
-----
T o t a l s 2.0630E+03 100.00 2.0631E+03 100.00

Problem time = 5.5004E-04
Problem cycle = 23455
Total CPU time = 2063 seconds ( 0 hours 34 minutes 23 seconds)
CPU time per zone cycle = 3956 nanoseconds
Clock time per zone cycle = 3955 nanoseconds

Number of CPU's 1
NLQ used/max 136/ 136
Start time 01/29/2018 14:59:59
End time 01/29/2018 15:34:09
Elapsed time 2050 seconds for 23455 cycles using 1 SMP thread
( 0 hour 34 minutes 10 seconds)

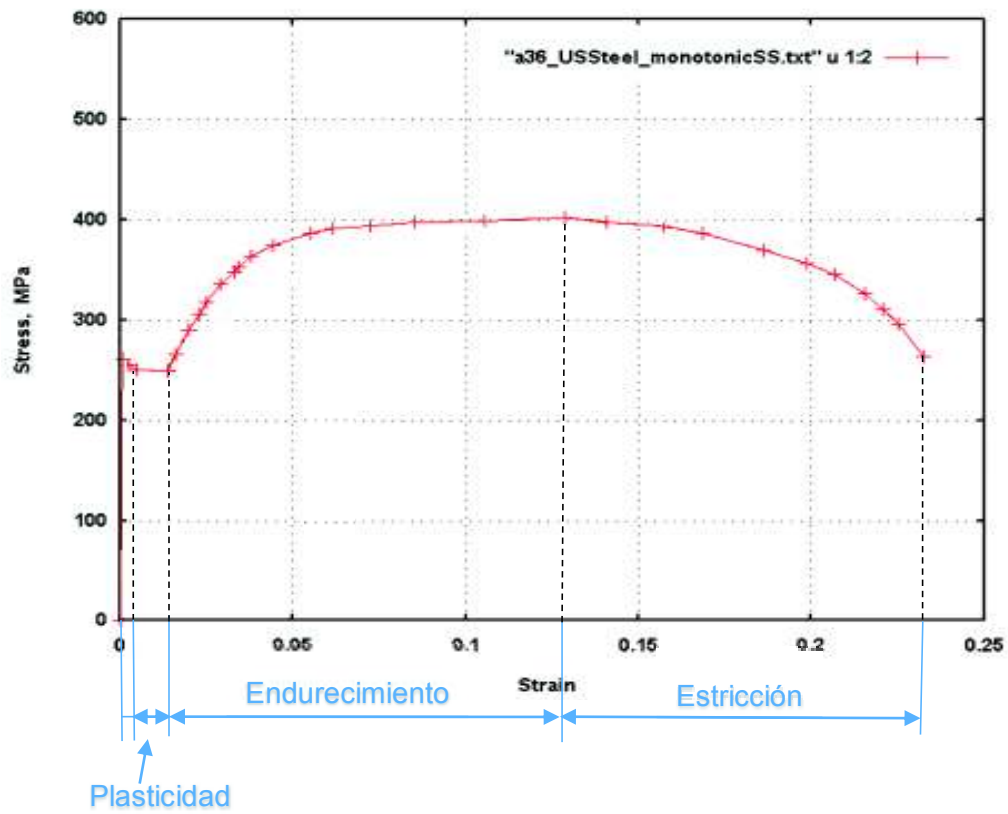
Normal termination 01/29/18 15:34:09

Presione una tecla para continuar . . .

```



**Anexo 6.** Diagrama esfuerzo deformación para un acero ASTM A 36





**Anexo 7.** Guía de prácticas del proceso de embutición para la obtención de una pieza cóncava hueca rectangular de acero de bajo carbono.

**ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**  
**LABORATORIO DE CONFORMADO MECÁNICO**

**Tema:** Ensayo de embutición.

**Objetivos:**

- Investigar el proceso de embutición y los fundamentos teóricos relacionados a deformación plástica para la obtención de piezas mecánicas.
- Analizar el proceso de embutición para la obtención de una pieza cóncava hueca rectangular de acero de bajo carbono de 1 [mm] de espesor.
- Obtener mediante el proceso de embutición una pieza cóncava hueca rectangular de acero de bajo carbono (ASTM A-36).
- Comparar los resultados obtenidos (cualitativa y cuantitativamente) con los resultados que se muestran en la tabla 2 (Deformaciones lineales numéricas en los ejes AB y CD).

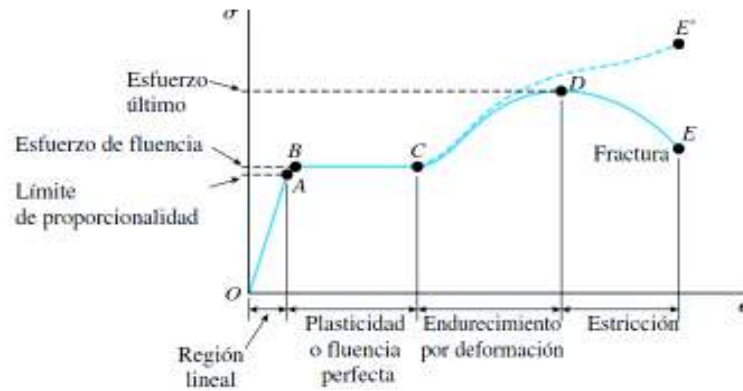
**Revisión teórica:**

**Procesos de conformado mecánico**

La figura 1 muestra el diagrama esfuerzo deformación unitaria para un material metálico dúctil sometido a cargas de tensión. Cuando se aplica una fuerza que no supera el límite de proporcionalidad (región lineal), la longitud cambia ligeramente una distancia que se puede expresar como deformación ( $\epsilon$ ), que es la relación que existe entre la deformación total y la longitud inicial del elemento, ( $\epsilon = \frac{l_f - l_i}{l_i}$ ), pero el material vuelve a su estado original una vez que se libera de la carga aplicada, a este tramo **OA** se llama deformación elástica.

Una vez que la fuerza aplicada supera el límite elástico **A**, comienza a sufrir deformación plástica **BC**. En la deformación plástica, el cambio geométrico no es directamente

proporcional a la fuerza y el material no recupera su forma original. El metal se endurece si se deforma plásticamente; esto se observa en el tramo **CD** a esto se denomina endurecimiento por deformación o trabajo. Para deformar plásticamente un metal, debe aplicarse una fuerza que exceda el límite fluencia **B** ( $S_y$ ) del material.



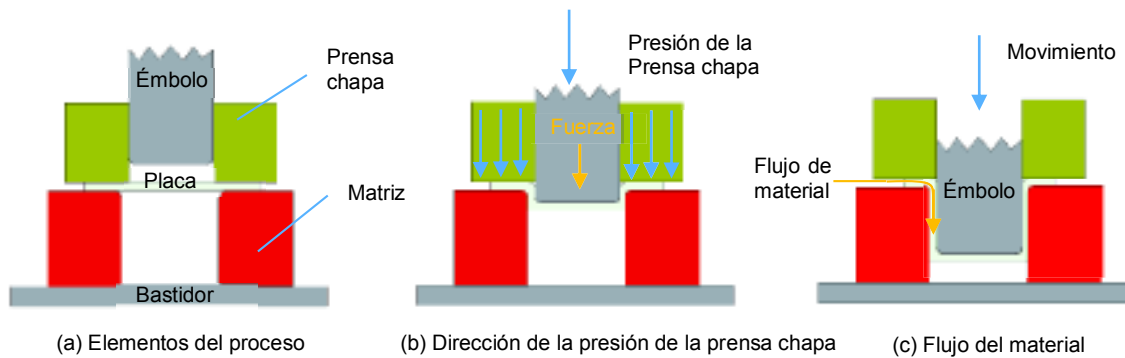
**Figura 1.** Diagrama esfuerzo deformación unitaria  
**Fuente:** (Gere, 2009, p.19)

### Embutición

Un proceso de conformado mecánico es la embutición que se utiliza ampliamente para la fabricación de objetos huecos como ollas, recipientes, piezas del automóvil, paneles, tanques de gas, entre otros. A medida que aumenta la complejidad geométrica de la pieza hueca, las dificultades de fabricación aumentan.

### Procedimiento de embutición

En la figura 2 se muestra el proceso de embutición de una chapa metálica que se realiza con un émbolo y una matriz. El émbolo tiene forma deseada de la base de la pieza, una vez estirada (ver figura 2 (a)). La cavidad de la matriz coincide con el émbolo y es un poco más ancha para permitir su paso, así como la separación. La chapa metálica a ser conformada se denomina pieza en bruto, se coloca sobre la abertura de la matriz. En la figura 2(b) la prensa chapa aplica presión a toda la superficie de la pieza en bruto, manteniendo la chapa plana contra la matriz, y luego el émbolo se desplaza hacia el espacio en blanco. Después de poner en contacto los elementos, el émbolo presiona a la chapa metálica y la deforma plásticamente como se muestra en la figura 2(c).



**Figura 2.** Proceso de embutición profunda.  
**Fuente:** (Koninck & Gutter, 1982)

### Parámetros principales en el proceso de embutición

La embutición es un proceso de conformado de chapa metálica que involucra distribuciones complejas de flujo y fuerza en el material [5]. Las condiciones ideales para la embutición incluyen: Uso de un metal de trabajo con calidad para la embutición, piezas simétricas de gravedad relativamente leve, lubricación adecuada, herramientas de carburo de precisión, presión controlada y prensas que mantienen un alto nivel de precisión. Los principales parámetros que se consideran para el proceso de embutición se clasifican en tres grupos como se muestra en la tabla 1.

**Tabla 141.** Parámetros principales que intervienen en el proceso de embutición

Propiedades del material	Proceso	Geometría
Densidad de la chapa	Temperatura	Radios de acuerdo
Límite de fluencia	Fuerza de embutición	Forma de la matriz
Límite último a la tracción	Presión en el prensa chapas	Tipo de embutición
Coefficiente de fricción	Lubricación	

**Fuente:** (Dwivedi & Agnihotri, 2016)

#### Propiedades del material

La placa comienza a ocupar la cavidad del molde cuando se supera el límite de fluencia del material, esto se conoce como tensión de flujo. Los aceros laminados de bajo contenido de carbono son los materiales que más comúnmente se usan en embutición, por ejemplo, en la industria automotriz. Los materiales como el acero 1006 y 1008 tienen un límite elástico típico en el rango de 172 a 241 MPa y alargamientos de 35 a 45% en 50 mm. Estos materiales tienen una excelente conformabilidad y están disponibles en laminación en frío y caliente con diversos niveles de calidad y una amplia gama de espesores. Además de ello, se sabe que el tamaño del grano afecta la capacidad de estiramiento de los materiales y puede afectar la selección de un grado más grueso que puede dar como resultado una

rugosidad superficial excesiva, así como una capacidad de embutición reducida. El acabado superficial también influye en la capacidad de estiramiento. El acabado opaco normalmente suministrado en aceros para embutición está diseñado para contener lubricantes y para mejorar la capacidad de embutición. Se pueden requerir acabados más brillantes si, por ejemplo, las piezas deben ser galvanizadas.

## Proceso

**Temperatura:** Un parámetro a considerar dentro del proceso de embutición es la temperatura. Las propiedades mecánicas del material cambian con el aumento de temperatura, lo cual, afecta el proceso de embutición, a pesar de que el rango de temperatura de trabajo es considerado como trabajo en frío.

**Fuerza de embutición:** La fuerza usada para realizar la embutición de chapa metálica debe ser la adecuada para proporcionar la deformación, producir un flujo de metal adecuado y superar la fricción durante el proceso. La magnitud de la fuerza no debe ser demasiado alta o aplicada incorrectamente porque puede producirse fisuras en la chapa metálica. El émbolo y la prensa chapa ejercerán diferentes fuerzas y el análisis de la fuerza se debe hacer para ambos. La fuerza de embutición se puede calcular como sigue:

$$F_e = S_y e D_p \left( \frac{D_b}{D_p} - 0,7 \right)$$

Donde,  $S_y$  es el límite de fluencia,  $e$  es el espesor,  $D_b$  es el diámetro de la chapa metálica y  $D_p$  es el diámetro del émbolo. El factor 0,7 es una constante de corrección de la fricción del material en función del espesor.

**Presión en la prensa chapa:** El objetivo de una prensa chapa es evitar que se formen arrugas en la chapa metálica durante la embutición. La formación de arrugas impide la acción de compresión. Se pueden lograr estiramientos más grandes cuando se utiliza una prensa chapa, sin embargo, cuando la presión aplicada es alta se producen fracturas en el material. Existen varias maneras de calcular la presión que se debe ejercer en la prensa chapa, la más simple es la que se muestra a continuación, para chapas metálicas de 1mm de espesor

$$F_a = \frac{1}{3} F_e$$

Donde,  $F_e$  y  $F_a$  son las fuerzas en la prensa chapa y de embutición respectivamente.

**Lubricación:** Cuando dos metales están en contacto deslizante bajo presión, como ocurre en el proceso de embutición, es probable que se produzcan gripado (soldadura a presión), que depende de la fuerza y la composición entre las herramientas y la chapa metálica. Los lubricantes que se utilizan en la mayoría de las operaciones de embutición, varían desde aceite hasta compuestos pigmentados.

### **Geometría**

La geometría de la matriz tiene dos factores principales que permiten al émbolo en embutición formar el metal en la cavidad de la matriz: El primer factor corresponde a los radios de la esquina de la matriz y el émbolo. Un radio en los bordes cambiará la distribución de la fuerza y hará que el metal fluya sobre el radio y dentro de la cavidad de la matriz. El segundo factor es la separación entre la matriz y el émbolo en donde el material debe fluir. La separación en las operaciones de corte es relativamente pequeña, usualmente del 3 % al 8 % del grosor de la chapa. En embutición, si el espacio libre es demasiado pequeño, la chapa puede cortarse o perforarse, a pesar de tener radio de borde. La separación en el proceso de embutición es mayor que el grosor de la chapa, normalmente los valores de separación son del 107 % al 115 % del grosor.

Para cálculos empíricos se considera que el grosor de la chapa permanece constante. Sin embargo, hay cambios de espesor en ciertas áreas debido a las fuerzas involucradas. Para formar las paredes laterales de la pieza, el material debe fluir desde el periférico de la pieza en bruto sobre el radio de la esquina de la matriz, luego en línea recta en la dirección del émbolo. El adelgazamiento máximo ocurrirá muy probablemente en la pared lateral, cerca de la base de la pieza.

Otro parámetro a considerar es el material de la matriz, debido a que debe facilitar la fabricación en la forma de la cavidad. También se debe considerar el desgaste debido al uso, por ser un proceso industrial de fabricación en serie de millones de piezas. El aspecto más importante relacionado con el material de la matriz se relaciona a la fuerza de rozamiento que existe con la placa metálica porque este factor influye en el porcentaje de deformación por embutición.

El aspecto final a considerar es el tipo de embutición que se va a realizar en la chapa metálica. Cuando el porcentaje de deformación por embutición es superior al 50 %, la pieza debe conformarse en operaciones múltiples. Cada operación afectará a la siguiente y se debe realizar un análisis para cada paso. Si se realizar una embutición múltiple o profunda en donde es necesario varias operaciones de embutido, entonces la chapa metálica se

debe aplicar un tratamiento térmico de recocido de alivio de esfuerzos cada dos operaciones.

### Mallado

Consiste en realizar un número finito de divisiones a un elemento en particular. Se puede decir que es el grado de aproximación que tiene un modelo con la realidad, y su diseño y dimensionamiento geométrico depende de los parámetros propios del elemento que se requiere estudiar. Según convenga, una malla puede ser de varias formas, las más usadas son rómbica y rectangular. Para que una malla sea de calidad, esta debe tener el menor tamaño posible, o a su vez, el suficiente para obtener los parámetros de aproximación de resultados requeridos.

Una malla está compuesta básicamente por nodos y elementos. En los nodos es donde se aplican las cargas, en ellos se determinan los efectos producidos, que por lo general son deformaciones. Por otro lado, los elementos son los conductores de los efectos entre los nodos.

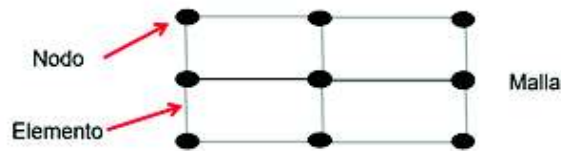


Figura 3. Malla y sus componentes.

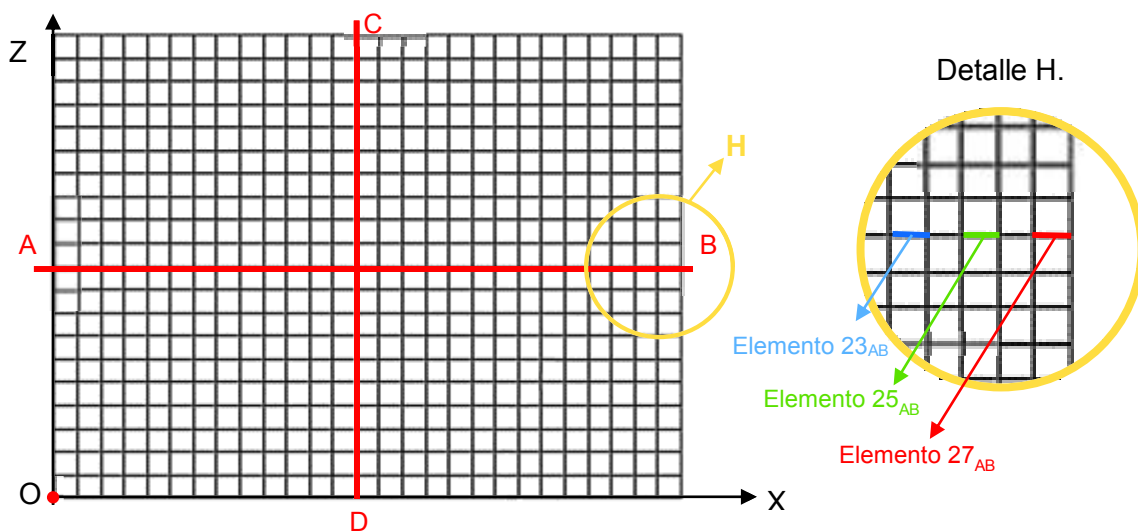


Figura 4. Mallado realizado en la placa y ubicación de sus ejes y líneas de referencia.

## Resultados obtenidos mediante el método de análisis numérico:

**Tabla 2.** Deformaciones lineales numéricas en los ejes AB y CD.

Elem	L <sub>i</sub>	Eje AB			Eje CD		
		L <sub>f</sub>	$\epsilon$	% $\epsilon$	L <sub>f</sub>	$\epsilon$	% $\epsilon$
1	5	5.158	0.032	3.152	5.056	0.011	1.112
2	5	5.054	0.011	1.090	5.031	0.006	0.623
3	5	5.197	0.039	3.945	5.014	0.003	0.272
4	5	5.351	0.070	7.016	5.311	0.062	6.222
5	5	5.066	0.013	1.323	5.255	0.051	5.100
6	5	4.881	-0.024	-2.376	4.788	-0.042	-4.231
7	5	4.959	-0.008	-0.816	4.881	-0.024	-2.383
8	5	5.001	0.000	0.015	4.938	-0.012	-1.241
9	5	5.004	0.001	0.072	4.974	-0.005	-0.524
10	5	5.012	0.002	0.242	4.987	-0.003	-0.270
11	5	5.014	0.003	0.279	4.987	-0.003	-0.266
12	5	5.018	0.004	0.366	4.974	-0.005	-0.525
13	5	5.032	0.006	0.634	4.938	-0.012	-1.237
14	5	5.033	0.007	0.662	4.881	-0.024	-2.386
15	5	5.032	0.006	0.642	4.788	-0.042	-4.236
16	5	5.018	0.004	0.367	5.256	0.051	5.119
17	5	5.013	0.003	0.269	5.310	0.062	6.204
18	5	5.012	0.002	0.240	5.013	0.003	0.266
19	5	5.003	0.001	0.068	5.031	0.006	0.625
20	5	5.001	0.000	0.023	5.056	0.011	1.123
21	5	4.959	-0.008	-0.825			
22	5	4.881	-0.024	-2.373			
23	5	5.066	0.013	1.310			
24	5	5.351	0.070	7.014			
25	5	5.196	0.039	3.929			
26	5	5.055	0.011	1.097			
27	5	5.157	0.031	3.138			

Nota: Elem = Elemento, es la longitud existente entre nodos; L<sub>i</sub> = Longitud inicial, es la medida de longitud de cada cuadrícula del mallado (5mm); L<sub>f</sub> = Longitud final, es la medida de la longitud deformada de cada cuadrícula;  $\epsilon$  = deformación unitaria (L<sub>f</sub> – L<sub>i</sub>) / L<sub>i</sub>; % $\epsilon$  = Porcentaje de deformación  $\epsilon$  x 100 %. Ver figura 4.

### Materiales y equipos:

#### Material:

- Placa de acero de bajo carbono (ASTM A-36), 100 x 135 mm, y 1 mm de espesor.

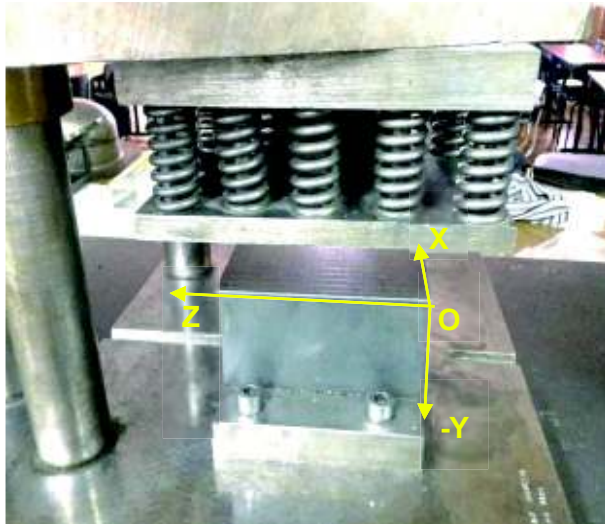
#### Equipos e instrumentos:

- Prensa de tornillo.

- Utillaje para embutición.
- Calibrador pie de rey (tolerancia: 0.01 mm).
- Buril para rayado punta de acero.
- Regleta de acero.
- Papel calca negro.
- Cinta mágica.
- Marcador para metal.

**Procedimiento:**

1. Preparación de la probeta para el ensayo de embutición.
2. Mallado de 5mm en forma de cuadrícula con el buril en la placa.
3. Revisar, y en caso de ser necesario armar, el utillaje para embutición.
4. Colocar la placa sobre la matriz con la orientación mostrada en la figura 5, y con el marcador, señalar un punto de referencia en "O" para la toma de medidas.



**Figura 5.** Ubicación de la placa en el utillaje de embutición.

5. Bajar el émbolo hasta que entre en contacto con la placa.
6. Con el engranaje central de la prensa, realizar 13 vueltas a una velocidad de giro constante. Y para extraer la placa de la matriz, girar el engranaje en sentido opuesto.
7. Realizar una impronta de los ejes AB y CD (ver figura 4) con la ayuda del papel calco.
8. Tomar las medidas de las deformaciones unitarias de todos los elementos existentes en los ejes mencionados.
9. Llenar la hoja de datos.



**Hoja de datos:**

**Tabla 3.** Deformaciones lineales experimentales en los ejes AB y CD.

Elem	Eje AB				Eje CD		
	$L_i$	$L_f$	$\epsilon$	$\% \epsilon$	$L_f$	$\epsilon$	$\% \epsilon$
1	5						
2	5						
3	5						
4	5						
5	5						
6	5						
7	5						
8	5						
9	5						
10	5						
11	5						
12	5						
13	5						
14	5						
15	5						
16	5						
17	5						
18	5						
19	5						
20	5						
21	5						
22	5						
23	5						
24	5						
25	5						
26	5						
27	5						

**Tabla 4.** Comparación cuantitativa entre resultados experimentales y numéricos

		PARÁMETRO	Resultados		ERROR	
			Experimental	Numérico		
DEFORMACIONES TOTALES (Tabla 7 y 9)		OX		-0.009		
		AB		0.0011		
		CD		0.005		
Deformaciones de los elementos (tabla 8 y 10)		OX	$\bar{X}_\varepsilon$		-0.009	
			$S_\varepsilon$		0.007	
			$\varepsilon_{m\acute{a}x}$		0.0005	
			$\varepsilon_{m\acute{i}n}$		-0.02	
		AB	$\bar{X}_\varepsilon$		0.01	
			$S_\varepsilon$		0.02	
			$\varepsilon_{m\acute{a}x}$		0.07	
			$\varepsilon_{m\acute{i}n}$		-0.02	
		CD	$\bar{X}_\varepsilon$		0.005	
			$S_\varepsilon$		0.03	
			$\varepsilon_{m\acute{a}x}$		0.06	
			$\varepsilon_{m\acute{i}n}$		-0.04	
Desplazamientos direccionales [mm]		A	$\bar{X}_A$		3.42	
		K	$\bar{X}_K$		10	
		D	$\bar{X}_D$		2.66	

**Informe:**

1. Tema.
2. Objetivos.
3. Revisión teórica.
4. Datos obtenidos.
5. Datos calculados.
6. Análisis de resultados.
7. Conclusiones y recomendaciones.
8. Bibliografía consultada.