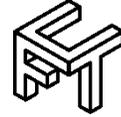




Universidad de Matanzas  
Facultad de Ciencias Técnicas



# SIMULACIÓN DEL PROCESO DE EMBUTIDO DEL CILINDRO DE GAS DE 10KG.

Tesis Presentada como Requisito Parcial  
para la Obtención del Título de  
Máster en Ingeniería Asistida por Computadora.

Autor: Ing. Reynier Febles García  
Tutor: Dr. C Marcelino Rivas Santana

Matanzas, 2017

## **DECLARACIÓN DE AUTORIDAD Y NOTA LEGAL**

Yo, Reynier Febles García, declaro que soy el único autor de la siguiente tesis, titulada Simulación del proceso de embutido del cilindro de gas de 10kg y, en virtud de tal, cedo el derecho de copia de la misma a la Universidad de Matanzas, bajo la licencia *Creative Commons* de tipo *Reconocimiento No Comercial Sin Obra Derivada*, con lo cual se permite su copia y distribución por cualquier medio siempre que mantenga el reconocimiento de sus autores, no haga uso comercial de la obra y no realice ninguna modificación de ella.

Matanzas, 24 de octubre de 2016.

Reynier Febles García

## RESUMEN

La simulación de procesos constituye una de las premisas fundamentales para la obtención de los parámetros adecuados del mismo, ayudando a una mejor comprensión y proporcionando un ahorro en las pruebas que se realizan para ajustar los regímenes de trabajo. En el presente estudio se desarrolla la simulación del proceso de embutido del cilindro de gas de 10kg. Con este propósito, se simuló el proceso a través del método de elementos finitos, teniendo en cuenta, entre otros, el comportamiento del material determinado a partir de sus propiedades químicas. Se tuvo en cuenta un modelo matemático para el material y la variabilidad de sus coeficientes en los resultados simulados. Como resultado se obtuvo la caracterización del proceso de fabricación del cilindro y los parámetros adecuados para su fabricación. También se construyó una curva de comportamiento de la fuerza de embutido, a lo largo del proceso, con sus respectivos límites de confiabilidad. Luego se validan los resultados simulados comprobando la correspondencia de adelgazamiento de las paredes del cilindro de las muestras realizadas en la fábrica y las simuladas.

**Palabras claves:** simulación, modelo constitutivo, procesos de conformado de chapas, método de elementos finitos.

## **ABSTRACT**

The simulation of processes is one of the fundamental premises for obtaining the adequate parameters of the same, helping a better understanding and provided a saving in the tests that are made to adjust the work regimes. In the present study is developed the simulation of sheet metal forming process of the gas cylinder of 10kg. For this purpose, the process was simulated through the finite element method, taking into account, among others, the behavior of the material, which was determined from its chemical properties. A mathematical model for the material and the variability of its coefficients in the simulated results was considered. The main result obtained is the characterization of the cylinder manufacturing process and the parameters suitable for its manufacture. A performance curve of the sausage force was also constructed, along the process, with its respective limits of reliability. Then the simulated results are validated by checking the thinning correspondence of the cylinder walls of the factory and simulated samples.

**Keywords:** simulation, constitutive model, sheet metal forming process, fine element method.

## TABLA DE CONTENIDO

Introducción .....	1
Capítulo 1. Estado del Arte.....	6
1.1    Proceso de conformación.....	6
1.1.1 Conformado de chapas metálicas.....	6
1.1.2 Embutido de chapas metálicas .....	7
1.2 Influencia de los materiales de embutir sobre el resultado de la operación.....	12
1.3 Modelos constitutivos del material. ....	13
1.3.1 Ensayos mecánicos .....	13
1.3.1.1 Ensayo de tracción uniaxial ( <i>Uniaxial Tensile Test</i> ). ....	13
1.3.1.2 Ensayo de embutición ( <i>Cupping tests</i> ). ....	15
1.3.1.3 Prueba de bombeo ( <i>Bulge test</i> ). ....	17
1.3.1.4 Ensayo de la altura límite de la copa ( <i>Limiting Dome Height (LDH)</i> ). ....	20
1.3.2 Modelos Ludwik y Hollomon.....	23
1.3.3 Modelo de Swift.....	26
1.3.4 Modelo de Voce.....	26
1.3.5 Ventajas y desventajas de los ensayos de tracción. ....	28
1.4 Simulación por elementos finitos del proceso de embutido. ....	28
1.5 Conclusiones parciales del capítulo. ....	36
Capítulo 2 Materiales y Métodos.....	37
2.1 Propiedades y composición química del material.....	37
2.2 Modelo constitutivo del acero JIS 3116.....	39

2.3 Características del proceso de embutido.....	40
2.3.1 Modelo CAD.....	41
2.3.2 Características de la prensa.....	41
2.3.3 Selección de los regímenes de embutido y parámetros para la simulación. 42	
2.3.3.1 Simulación del proceso de embutido. ....	42
2.4 Instrumento empleado en la medición de los espesores. ....	44
2.5 Conclusiones parciales del capítulo.....	44
Capítulo 3 Análisis de los Resultados.....	46
3.1 Modelo constitutivo del acero JIS 3116.....	46
3.2 Caracterización del proceso de embutido de los cilindros de gas de 10 kg.....	47
3.3 Selección del régimen de embutido. ....	49
3.4 Análisis del comportamiento de la fuerza de embutido máxima para diferentes valores de los coeficientes y exponentes del modelo constitutivo del material.....	53
3.4 Validación de los resultados .....	57
3.5 Conclusiones parciales del capítulo.....	59
Conclusiones .....	60
Recomendaciones .....	61
Referencias Bibliográficas .....	62
Anexos .....	67
Anexo 1. Especificaciones Técnicas de la Prensa Hidráulica YC 28-200/300.....	67

## INTRODUCCIÓN

En la actualidad se emplea para la fabricación de piezas para diversas aplicaciones industriales y de los servicios, tanto a nivel nacional como internacional, la chapa metálica laminada. Según datos consultados en los últimos años el 70 % de las piezas fabricadas en las grandes industrias son obtenidas mediante la conformación debido a la diversa cantidad de piezas que pueden obtenerse, la productividad del proceso y las propiedades que se obtienen, entre otras

Existen diferentes enfoques para el estudio y clasificación de los procesos de manufactura de chapas metálicas; entre ellos, se destacan las propuestas metodológicas que hacen (Gallardo, 1983; Kalpakjian y Schmid, 2010; Schaeffer, 2004) referidas a los procesos de corte (cizallado), doblado y embutición, en sus diversas variantes tecnológicas.

Entre los procesos de conformado de chapas, la embutición es el procedimiento más complejo desde el punto de vista físico mecánico que permite obtener una pieza en forma del recipiente a partir de chapas planas. La deformación por embutición es una tecnología de conformado de chapa metálica que proporciona la fabricación de grandes series de piezas de geometrías simples y complejas a partir de herramientas denominadas troqueles. Sus aplicaciones incluyen la industria automovilística, aeroespacial, la producción de equipos electrodomésticos y piezas para el complejo militar-industrial (Bernal, 2013).

En la tesis se hace referencia a los procesos de embutición de piezas cilíndricas, obtenidas a partir de chapas en los que, aprovechando las capacidades de plasticidad del material inicial, se generan estados tensionales complejos en la pieza para obtener un cuerpo en forma de dedal; estos procesos son conocidos también como procesos de estirado de chapas

o estampación, los cuales se emplean en nuestro país en diferentes empresas a lo largo del territorio nacional. Su auge comienza a partir de la década de los años 60, con la creación de empresas en La Habana, Matanzas, Santa Clara y Santiago de Cuba.

En empresas como CONFORMAT en Matanzas desde entonces hasta el presente, han prevalecido en los talleres los métodos empíricos basados en la experiencia de los diseñadores, independientemente de algunos manuales y recomendaciones. En ningún caso, estos manuales hacen referencia al comportamiento del material en los procesos, la influencia de las variables del proceso en los resultados de la simulación y tampoco los procesos son tratados como un sistema interactivo.

En la Facultad de Ciencias Técnicas de la Universidad de Matanzas se desarrollan investigaciones vinculadas al comportamiento de los materiales en los procesos de conformación, y más recientemente, dentro de la línea de investigación del departamento de Ingeniería Mecánica se viene trabajando en la modelación, simulación y optimización de los procesos de manufactura.

Existe una amplia gama de materiales que se pueden embutir, entre estos sobresalen el grupo de los aceros al carbono y aleados, aluminio y sus aleaciones, magnesio y aleaciones de cobre entre los que se encuentran (AP 04, JIS 3116, DP-780, DOT 4BA).

El trabajo de investigación titulado: Simulación del proceso de embutido del cilindro de gas de 10kg está enmarcado en el **campo de investigación** de la deformación plástica de la chapa. El **objeto de estudio** lo constituye el proceso de embutición de chapas y el **campo de acción** abarca el estudio del proceso de embutición de chapas para obtener formas cilíndricas.

Entender los procesos de embutición de chapas supone la unión de un grupo de conocimientos acerca de ciencia de materiales, procesos de manufactura y el diseño de herramientas. El rápido desarrollo de estos procesos en los últimos años, las demandas de alta precisión dimensional, miniaturización y la disminución de los ciclos de vida de los productos, son la base para que investigadores de diferentes partes del mundo hayan presentado sus resultados en la simulación de piezas cilíndricas (Lajarin y Magalhães, 2011; Ranganath y Hosalli, 2012) en la creación de sistemas de ayuda al diseño (Birajdar y Nagose, 2012; Narayanan, 2010) y en el uso de las herramientas de inteligencia artificial (Kakandikar y Nandedkar, 2012; Tsai y You, 2010). Estos estudios sufren de no tener un carácter integrador al tratar de manera individual cada uno de los tópicos señalados. Surge así la necesidad de desarrollar estudios sistémicos sobre las operaciones de embutición de chapas basados en la simulación, que integren conceptualmente la influencia de las variables tecnológicas del proceso de embutición, la calidad de la pieza, las fuerzas que se ejercen en el proceso y el comportamiento del material, con el objetivo de optimizar estos procesos, lo que permite un mejor aprovechamiento de los recursos y capacidades instalados en los talleres metalmecánicos con el fin de utilizar racionalmente los materiales y la disminución del número de piezas defectuosas.

Por otro lado, en las condiciones actuales de la producción de artículos conformados en el país, no es común la idea de caracterizar el comportamiento de la pieza conformada antes de su fabricación. Las experiencias del autor y las consultas efectuadas a los especialistas, confirman la necesidad de buscar nuevas aproximaciones más realistas de interés teórico y posibilidades de aplicación práctica según las operaciones de conformado a desarrollar, los defectos que se producen en las piezas y el desarrollo científico internacional en este

campo.

**Situación problémica:** La empresa no consta con un procedimiento para analizar a priori el proceso de embutido, lo que ha provocado en ocasiones una selección no adecuada de las dimensiones de la chapa a emplear para la fabricación de los cilindros de 10 kg. Situación esta ocasionada por el cambio de proveedor, de material y de su propiedades mecánicas, principalmente el coeficiente de endurecimiento.

Teniendo en cuenta la situación existente en la empresa nos surge el siguiente **problema:** ¿Cómo caracterizar a priori el proceso de embutido de los cilindros de gas licuado de 10 kg para poder determinar las dimensiones del material a elaborar y sus regímenes de trabajo? Después de lo antes expuesto podemos plantear como **Hipótesis:** Si se utiliza un software de simulación por Elementos Finitos se podrán realizar análisis a priori sobre la correcta selección de la chapa y parámetros del proceso con una consecuente disminución de los costos.

Para ello nos planteamos como **objetivo general:** Caracterizar el proceso de embutido del cilindro de gas de 10 kg mediante el empleo de las simulaciones determinando los mejores parámetros para su desarrollo como alternativa económica y flexible en la producción de piezas conformadas.

Para dar respuesta al enfoque propuesto se establecieron como **objetivos específicos:**

1. Estudiar, mediante las técnicas de investigación documental, las características de los procesos de embutición para fortalecer el conocimiento acumulado sobre estos procesos y desarrollar los procedimientos matemáticos asociados que garanticen la

interrelación entre los parámetros geométricos de las piezas embutidas, la geometría de la herramienta y el comportamiento del material en el proceso.

2. Integrar, en un modelo matemático (modelo constitutivo) las propiedades del material para su introducción en la base de datos de materiales del software DEFORM.
3. Simular y caracterizar el proceso de embutido del cilindro de gas de 10kg siguiendo la metodología propuesta.
4. Validar los resultados obtenidos de la simulación mediante la experimentación real.

## **CAPÍTULO 1. ESTADO DEL ARTE**

En este capítulo se expone una breve reseña de la búsqueda bibliográfica realizada a cerca de la temática tratada en la investigación, definiendo algunos conceptos importantes y mostrando algunos resultados obtenidos por otros autores.

### **1.1 Proceso de conformación.**

#### **1.1.1 Conformado de chapas metálicas.**

Industrias como las automovilísticas, la aeronáutica y las que se dedican a la fabricación de recipientes a presión, se enfrenta desde hace años a la necesidad de desarrollar artículos cada vez más ligeros y resistentes. Para así disminuir el consumo de material y también las emisiones contaminantes, pero además se deben cumplir normativas muy exigentes en materia de seguridad. Estimulados por estas necesidades del sector del transporte y los servicios entre otros, los fabricantes de acero han desarrollado nuevas aleaciones de alta resistencia mecánica que permiten reducir los espesores en piezas de la carrocería y tanques a presión. En los últimos años, esta reducción de peso de los vehículos ha experimentado un avance muy importante gracias al desarrollo de los aceros avanzados de alta resistencia. Actualmente, estos aceros se usan ampliamente en componentes estructurales de chasis y carrocería, y se caracterizan por combinar elevados valores de resistencia mecánica con aceptables niveles de ductilidad.

Así como con los vehículos sucede con los recipientes a presión los cuales necesitan de menor cantidad de material, Pero mantener la resistencia necesaria para cumplir su designación. Con el pasar del tiempo se han desarrollado materiales específicos para ser

conformados y cumplir este tipo de funciones, los cuales poseen excelentes propiedades mecánicas como alta resistencia, elevado % de elongación y dóciles de conformar.

Es de las propiedades del material, la que determina su maleabilidad. Esta propiedad en estado sólido del material se relaciona con procesos de deformación plástica. En estado líquido es atribuida al tipo de fundición que se emplee y en estado granular está sujeta a la presión y a la temperatura que se aplique a los granos o polvo del material.

El conformado de metales engloba procesos de manufactura en los cuales se usa la deformación plástica para cambiar la forma de las piezas. La deformación resulta del uso de un dado para formar metales, el cual aplica esfuerzos que exceden la resistencia a la fluencia del metal. Así, una forma simple es transformada en una compleja, mientras las herramientas “almacenan” la geometría deseada a través de la interface herramientas-material (Altan, 1983).

### **1.1.2 Embutido de chapas metálicas**

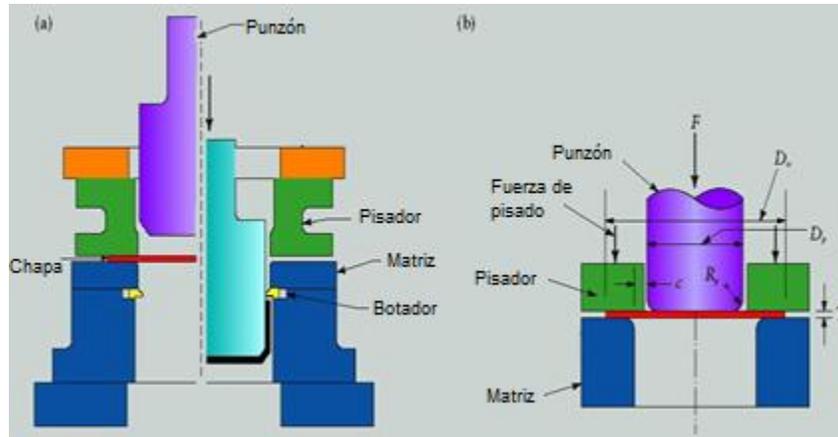
Un proceso de manufactura comienza con la obtención de un material de forma o geometría sencilla ejemplo de esto (lámina de acero), en dicho proceso esta pieza bruta es transformada en un elemento útil o sea con una forma bien definida o una geometría compleja para desempeñar una función específica. La misma ya posee tamaño, apariencia, propiedades, precisión y tolerancia (Altan, 1983). Existen dos vías para llegar a la transformación o formación del metal, por medio de procesos de conformación volumétrica como: forja, extrusión, laminación y la otra por medio de procesos de conformación de la chapa, por ejemplo: embutición, estirado, etc. (Altan, 2012).

El término embutición no es perfectamente explícito; deriva del verbo embutir que significa rellenar de una cierta sustancia un recipiente cerrado, delimitado por paredes flojas, para hincharlo y modificar su configuración. En el caso de las chapas plana, solamente se estiran con el fin de obtener un objeto de forma hueca, como, por ejemplo; una vasija, una copa, etc. La operación de embutir consiste por lo tanto en transformar una chapa plana de metal laminado en un cuerpo hueco, procediendo gradualmente con una o más pasadas. En la simple operación de embutir no se debe modificar el espesor de la chapa; se deduce que la superficie de la pieza producida ha de ser teóricamente equivalente a la de la chapa plana empleada; aunque en la práctica no ocurre exactamente así. El procedimiento base que proporciona el concepto del embutido es el de obligar a un disco metálico a pasar mediante la presión ejercida por un punzón, a través de un agujero cilíndrico de diámetro superior a dos veces el espesor del disco (Rossi, 1979).

Se denomina embutición al proceso de conformado en frío de los metales, por el cual se transforma un disco o una pieza recortada de metal, en una pieza hueca, de acuerdo con la forma definida por la matriz de embutición que se utiliza, mediante la presión ejercida por una prensa. La matriz de embutición se le conoce como molde (Hernández y Vásquez, 2010).

La tecnología de embutición de chapa metálica es uno de los procesos más difíciles en la fabricación. La operación de embutir es el proceso de conformado de una pieza plana de material en una forma hueca por medio de un punzón que hace fluir el material por el espacio existente entre el mismo y la matriz (fig. 1.1). La profundidad de la matriz puede ser superficial, moderada o profunda, esto dependerá de las variadas geometrías y tamaños de las piezas a fabricar, dos ejemplos extremos son las tapas de botellas y paneles de

automóviles. Debido al flujo incorrecto del material durante el proceso de embutido se ocasionan defectos como arrugas causadas por una excesiva compresión, desgarro o separación causada por una elevada tensión excesiva, y la recuperación causada por la recuperación elástica del material (Patel, 2008).



*Figura 1.1 (a) Ilustración esquemática del proceso de embutición profunda en una pieza en bruto de chapa metálica circular. (b) Las variables de embutición profunda de una taza cilíndrica (Kalpakjian, 2008).*

En los trabajos realizados por (Wu, *et al.*, 2005; Xie, *et al.*, 2006) después de un análisis del comportamiento del material sometido a deformaciones. Concluyeron que durante el proceso ocurren defectos, tales como fractura y arrugas provocadas por la geometría del herramental, la fuerza del pisador y la fuerza de embutido.

### **1.1.3.1 Tipos de embutido**

Existen varios tipos de embutido de chapa, estos se diferencian por el herramental empleado y las diversas formas que se obtienen. Entre los cuales se encuentra el embutido profundo que es la forma de conformado más convencional, en ella el espesor de la chapa es aproximadamente igual antes y después del proceso. Aunque se añada el adjetivo

profundo, designa a procesos con poca profundidad de embutición. En este método se utiliza sujeta chapas (pisador) y útiles mecanizados, normalmente de acero, para dar forma a la chapa. No siendo así en la embutición sin sujeta chapas que es un método de embutido más costoso y sencillo que el anterior, pero presenta limitaciones por el riesgo que implica la no utilización de un sujeta chapa que impida la formación de arrugas (Colorado, 2008).

Otra forma de embutir es el estirado de paredes o planchado, en este caso no se cumple la hipótesis de espesor de chapa constante durante el proceso. Este proceso interesa cuando se crean piezas que necesiten un espesor mayor en el fondo que en los laterales. Se suele realizar haciendo pasar las paredes por un intersticio menor que su espesor. Implica fuerzas mayores que el embutido profundo, ya que la deformación creada es mayor. También existe el formado con hule, el cual consiste en sustituir la matriz rígida con la forma de la pieza por una pieza con gran flexibilidad y con forma plana, denominada hule, y construida normalmente de poliuretano. El hule presenta debajo una cavidad para permitir su descenso cuando baja el punzón, que contiene la forma de la pieza. Una variedad de esta forma de conformado es el hidroformado, en el que el hule se sustituye por una cavidad cubierta con una lámina de poliuretano llena de fluido a una determinada presión (Colorado, 2008).

### ***1.1.3.2 Defectos en el embutido.***

Según (Colorado, 2008) durante el proceso de embutido pueden aparecer numerosos defectos que deben ser corregidos:

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

- Espesor irregular de chapa: Este defecto indica un desgaste en el utillaje de embutición, luego la solución está en su sustitución.
- Desgarre del fondo de la pieza: La solución está en aumentar el radio de redondeo en las aristas de punzón y matriz, pues éste es el origen del problema.
- Rotura del fondo: Originado por una relación de embutición muy grande que se soluciona reduciendo la relación de embutición y realizando otra posterior embutición. Otra forma de corregir el problema sería cambiar la chapa utilizada, bien en el material o en el espesor.
- Bordos ondulados: En algunas ocasiones al embutir la pieza (fig. 1.2) se obtienen unos bordes ondulados, llamados orejas. Esta ondulación esta ocasionada por la anisotropía plana de la chapa originada por su proceso de fabricación típico, el laminado, que hace que las características de la chapa no sean iguales en todas las direcciones, por tanto, depende del valor  $\Delta r$  de la chapa, si éste es cero no aparecerá este defecto.



*Figura 1.2. Ondulado tras la embutición.*

- Forma abombada: Si se pretende que la pieza tenga paredes rectas y resultan abombadas, significa que el intersticio es demasiado ancho y se debe cambiar la matriz o el punzón para reducir este intersticio.
- Formación de pliegues y arrugas: Se pueden producir en el ala o en las paredes. En ambos casos puede producirse por una fuerza insuficiente del sujeta -chapas, en cuyo caso se debe aumentar la fuerza del éste, teniendo en cuenta que aumentará la fricción. Si se produce en las paredes, el origen puede ser una anchura de intersticio demasiado grande y habrá que reducirla sustituyendo alguno de los elementos del utillaje.

## **1.2 Influencia de los materiales de embutir sobre el resultado de la operación.**

En el proceso de embutido, en gran medida, el buen resultado depende de la calidad del material y de sus propiedades. La chapa de cualquier metal para responder a las características del proceso, debe ser dúctil y recocida. Un material poco dúctil no se presta para embutir; si el mismo se empleara, daría pésimos resultados en el proceso, en el mejor de los casos, obtendríamos piezas agrietadas y sin resistencia. Todo cuanto sucede lo ocasiona o lo origina la deformación de las fibras del material de la chapa.

Con el empleo del material de chapa adecuado se pudiera realizar un determinado ciclo operativo, sería imposible si en lugar de ese material se colocará uno inferior o menos dúctil, aun haciendo uso de la misma estampa. Es evidente que la calidad y el tipo de material tienen una gran influencia sobre el número de transformaciones que es necesario establecer para obtener, de una pieza plana de chapa, un objeto hueco (Rossi, 1979).

Por lo expuesto anteriormente es necesario y de vital importancia realizar oportunas pruebas a las muestras de chapas del material, con el que se pretende realizar dicha operación de embutido, con el objetivo de tener una caracterización de las propiedades mecánicas, químicas y metalográficas del material, para la obtención de un resultado satisfactorio o esperado del proceso.

### **1.3 Modelos constitutivos del material.**

Cuando un material se deforma, se produce la deformación elástica y la deformación plástica. Durante la deformación elástica, cuando se retira la carga, el material recupera la forma y vuelve su punto original, sin embargo, cuando se aplica una carga superior al límite elástico, el material alcanza la fase de deformación plástica. En esta fase la deformación es permanente. Factores como el endurecimiento por deformación, reducción de la superficie, la relación entre la carga y la deformación se convierte en no lineal (Altan, 2012).

#### **1.3.1 Ensayos mecánicos**

##### ***1.3.1.1 Ensayo de tracción uniaxial (Uniaxial Tensile Test).***

Según (Altan, 2012) para determinar las propiedades mecánicas de los metales es necesario la ejecución de pruebas donde, dentro de las mismas el ensayo de tracción uniaxial es la más utilizada.

Después de haber observado las dimensiones de la probeta, el montaje en la máquina y el desarrollo del ensayo o prueba, se obtiene la curva de carga contra alargamiento (fig. 1.3), donde  $l_U$  es la elongación uniforme y  $l_F$  es el alargamiento total de la muestra.

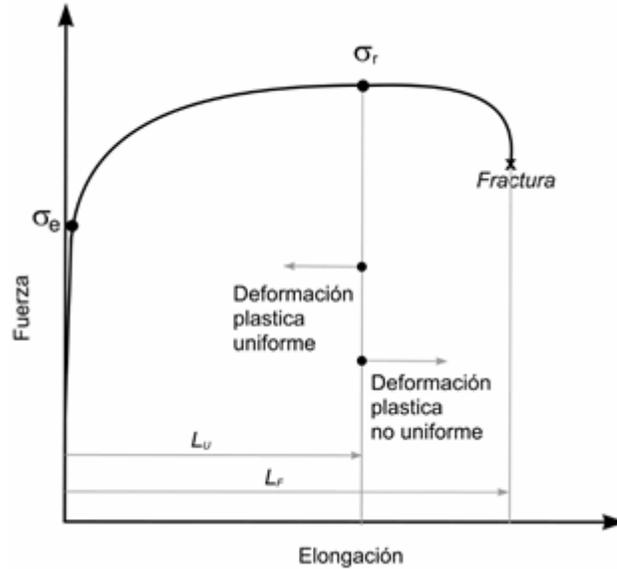


Figura 1.3. Esquema de la curva fuerza vs elongación obtenida del ensayo de tracción.

En la curva tensión de ingeniería vs deformación de ingeniería (fig. 1.4) se brinda una útil información. El Límite elástico ( $\sigma_e$ ) es el valor de la tensión en los acabados de la fase elástica. Después del límite elástico comienza la fase plástica. La resistencia a la fluencia se puede determinar por cualquiera de estas tres técnicas: (a) método de compensación, (b) extensión bajo método de carga, (c) método de diagrama autográfico (ASTM, 2011). Para la fase elástica, la pendiente de la línea indica el módulo de Young ( $E$ ). Cuando la tensión de ingeniería alcanza el máximo esfuerzo de ingeniería, da inicio a las muestras de estrangulamiento localizadas finalizando el alargamiento o elongación uniforme ( $\epsilon_u$ ), el valor de la tensión en este punto se denomina resistencia a la tracción final ( $\sigma_{m\acute{a}x}$ ). El alargamiento uniforme ( $\epsilon$ ) se considera que es un indicador de la ductilidad o conformabilidad del material porque después del estrangulamiento, el material comienza a fallar (Altan, 2012).

La tensión de ingeniería y la deformación de ingeniería se basan en el área de la sección transversal inicial, sin embargo, la tensión verdadera o (esfuerzo de flujo), es la relación

de la carga aplicada ( $F$ ) y el área de la sección transversal instantánea ( $A$ ) como se define en la ecuación 1.1 (Altan, 2012):

$$\sigma_f = \frac{F}{A} \quad (1.1)$$

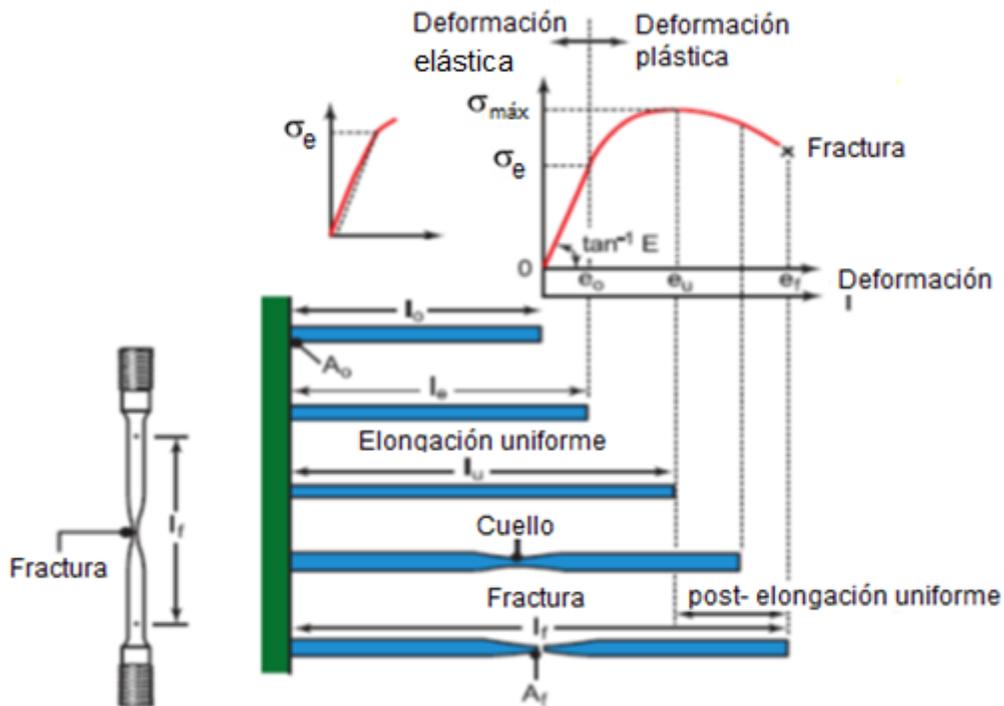
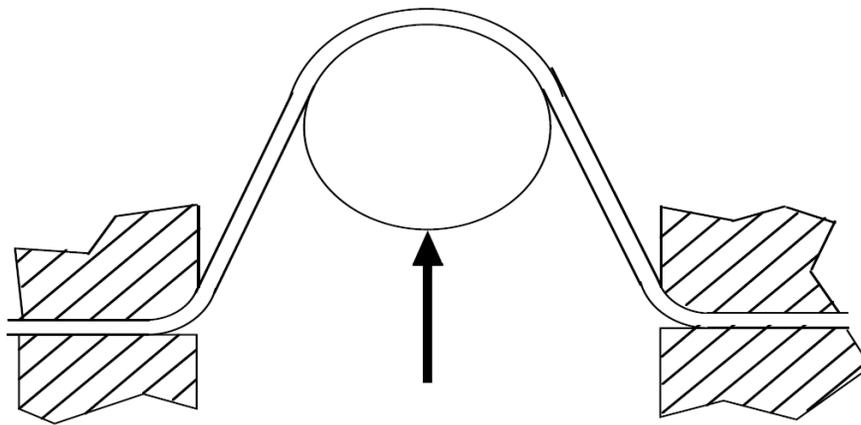


Figura 1.4. Curva de tensión de ingeniería vs deformación de ingeniería.

### 1.3.1.2 Ensayo de embutición (Cupping tests).

Existen varios ensayos de embutición para determinar la capacidad de conformado, entre ellas, prueba en copa Swift, prueba de Fukui y prueba Erichsen. A partir de la prueba en copa de Swift, se determina lo que limita o restringe la relación de diseño para las copas de fondo plano. La prueba Fukui de copa cónica (fig. 1.5) determina el estiramiento, atrayendo a más de un penetrador esférico (Hosford y Caddell, 2007).



*Figura 1.5.* Esquema de la prueba de copa de Fukui.

En el ensayo Erichsen (fig. 1.6), el punzón circular con un diámetro de 20 mm, va extendiendo o estirando la lámina de material bajo una condición biaxial, la hoja se deforma tomando una forma semiesférica y finalmente concluye en la fractura. La profundidad de la pelota se refiere como Índice Erichsen (IE) y el mayor índice de Erichsen significa mejor conformabilidad. Los ensayos de embutición tienen limitaciones y están perdiendo puntos a favor debido a la irreproducibilidad. Hecker describe la limitación de los ensayos de embutición como “insuficiente tamaño del penetrador”, la incapacidad para prevenir la extracción involuntaria en la pestaña o reborde y lubricación inconsistente (Hecker, 1974). Es decir, las pruebas de copa se limitan a ser utilizadas en la práctica, porque el área de la lámina del material se somete a una deformación que es relativamente pequeña. El espesor de la hoja de material influye significativamente en la conformabilidad, además, la fricción entre la lámina del material y el utillaje afecta la prueba o análisis de resultados (Altan, 2012; Hosford y Caddell, 2007).

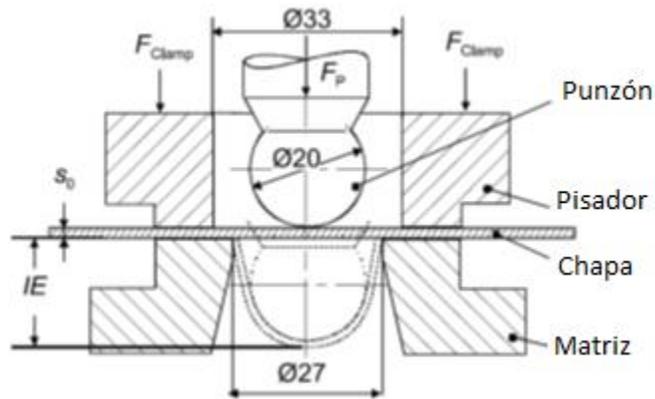


Figura 1.6. Esquema de prueba en copa Erichsen.

### 1.3.1.3 Prueba de bombeo (Bulge test).

En las prueba de bombeo, la lámina de material se deforma bajo una equilibrada deformación biaxial, mientras se sujeta alrededor de su periferia (fig. 1.7). Existen dos tipos de pruebas de bombeo: (1) prueba de bombeo hidráulico utilizando fluido a presión (tales como aceite) y (2) prueba de bombeo viscoso a presión (fig. 1.8), utilizando un medio viscoso (Gutscher, *et al.*, 2004).

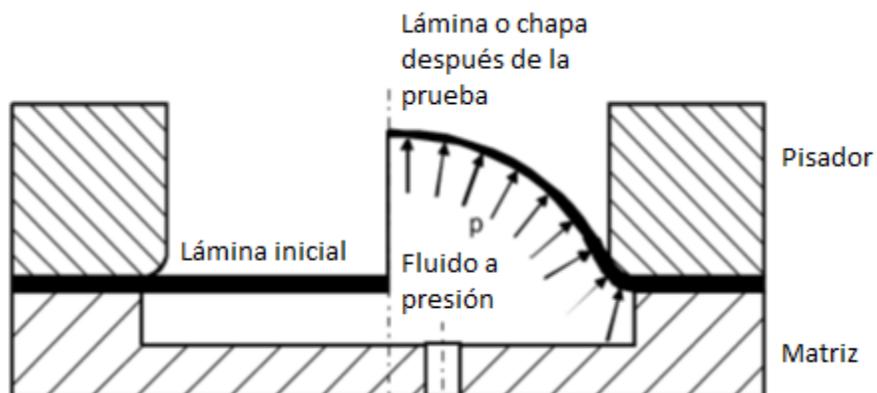
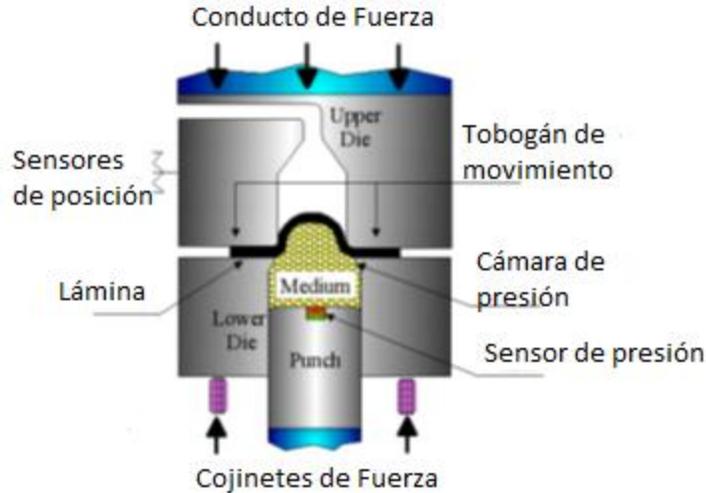


Figura 1.7. Esquema de prueba de bombeo hidráulico.



*Figura 1.8.* Sistema de Prueba de Bombeo viscoso a presión (VPB).

La prueba de bombeo viscoso a presión (VPB), se instala en una prensa hidráulica con un amortiguador en el troquel o con el empleo de cilindros de nitrógeno. Cuando el ariete se mueve hacia abajo, empuja el punzón hacia el medio viscoso de manera tal, que se genera presión dentro del medio el cual actúa sobre la hoja o lámina del material. Las variables instantáneas durante el abultamiento para determinar la fluidez de la curva de tensión son: altura de la cúpula ( $h_d$ ), la presión ( $P$ ), espesor en el ápice de la cúpula ( $t$ ) y radio de bulto o protuberancia ( $\rho$ ). En la geometría de la prueba de bombeo (fig. 1.9) se muestra que son constante los parámetros para los juegos de troqueles: espesor inicial de la hoja de material ( $s$ ), fuerza de sujeción ( $F_c$ ), radio de empalme de la matriz superior ( $r_f$ ), radio cavidad final ( $r_c$ ).

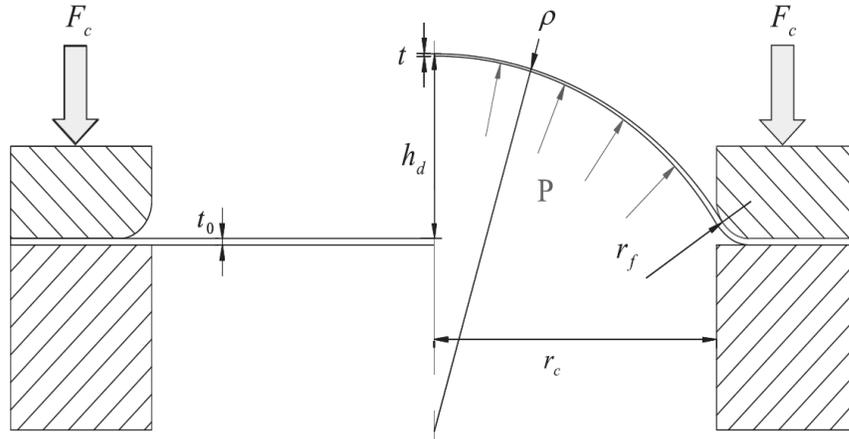


Figura 1.9. Geometría de la Prueba de Bombeo.

La tensión biaxial se puede calcular por la ecuación 1.2 a través de la reducción del espesor de la lámina.

$$\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = 0 \quad (1.2)$$

$$\varepsilon_x + \varepsilon_y = -\varepsilon_z \quad (1.3)$$

$$\bar{\varepsilon} = -\varepsilon_z = \ln\left(\frac{s_0}{s}\right) \quad (1.4)$$

Para calcular la tensión eficaz, es necesario los parámetros medidos, necesitan ser medidos la presión ( $P$ ) y altura de la cúpula ( $h_d$ ) y hay varios métodos tales como: Hill (Hill, 1950), Enikeev-Kruglov (Kruglov, *et al.*, 2002; Slota y Spišák, 2008) y Chakrabarty Alexander. En un estudio reciente, (Slota y Spišák, 2008) muestran que el resultado del enfoque de Enikeev-Kruglov es más preciso que el enfoque de Hill.

La prueba de bombeo se aplica a una lámina de material delgada (es decir,  $d_c/s_0$ , donde  $d_c$  es el diámetro de cavidad final), la teoría de la membrana puede ser asumido en que los efectos de flexión son insignificantes (Billur y Koç, 2008; Gutscher, *et al.*, 2004; Hill,

1950; Ranta, 1979). Sobre la base del criterio de fluencia Von Mises, la tensión efectiva se puede calcular por la ecuación 1.5. (Gutscher, *et al.*, 2004).

$$\bar{\sigma} = \frac{P}{2} \left( \frac{\rho}{t} + 1 \right) \quad (1.5)$$

El método de Hill (Hill 1950) y el método de Panknin son los enfoques de determinación del radio de bulto o protuberancia según (Gutscher, *et al.*, 2004; Kaya, *et al.*, 2008).

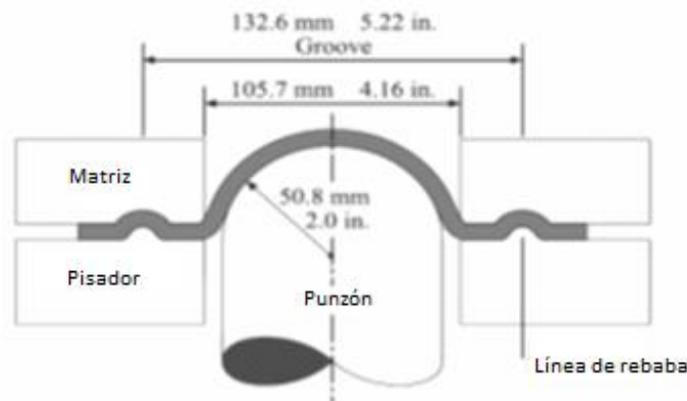
En (Altan, 2012) se plantea que existen algunas restricciones con el uso de la prueba hidráulica de bombeo como son:

- Que la prueba no se ha normalizado de manera que es difícil comparar los resultados de diferentes herramientas y laboratorios.
- El sistema de medición óptica 3D (Aramis) es altamente confiable en condición de temperatura ambiente. Sin embargo, cuando se producen aumentos de temperatura, el humo / vapor bloquea la visión y ocurren grandes deflexiones en la predicción del radio de protuberancia y desviaciones en los resultados (Billur y Koç, 2008).
- El tiempo y el trabajo son muy exigentes para analizar los resultados de las pruebas.
- En el sistema de medición existen cuestiones conexas como la pulverización o roseado (Altan, 2012).
- El utensilio se ensucia después de las explosiones o fracturas de las hojas o láminas debido al uso de aceite o medios viscosos.

#### ***1.3.1.4 Ensayo de la altura límite de la copa (Limiting Dome Height (LDH)).***

Hecker propuso el ensayo (LDH) para evitar el área pequeña de deformación que fue una de las limitaciones de la prueba en vaso Erichsen y Ghosh. La prueba Hecker fue

modificada para simular condiciones plano-deformación donde en el 80% de la conformación de metales ocurre la falla (Ayers, *et al.*, 1979). El ensayo LDH (fig. 1.10) utiliza 101,6 mm de diámetro del punzón y la lámina de material o chapa se estira en direcciones biaxiales mientras es detenida en los bordes por los lockbead (tope), además de estar sujeta entre pisador (Die) y matriz (Blankholder) para evitar la extracción brusca de la misma. Simulaciones por el método de elementos finitos (MEF) para el análisis LDH arrojaron que la prueba es muy sensible a la fricción y que afecta las mediciones (Ngaile y Altan, 1999). Las simulaciones (fig. 1.11) se llevaron a cabo para estudiar las relaciones de interfaz de fricción, obteniéndose como era de esperar el máximo adelgazamiento cuando la fricción se produjo cero en el ápice o extremo superior de la cúpula. Para la fricción de 0,075, la ubicación de máximo adelgazamiento se encuentra a los 20 mm (Altan, 2012; Hosford y Caddell, 2007; Ngaile, *et al.*, 2000).



*Figura 1.10.* Esquema del utensilio para la realización del ensayo LDH.

En general, la ubicación de máximo adelgazamiento (fig. 1.11) se aleja desde el vértice de la cúpula a medida que aumenta la fricción de la interfaz o coeficiente de fricción, y la fuerza de perforación también aumentará a medida que el coeficiente de fricción aumenta.

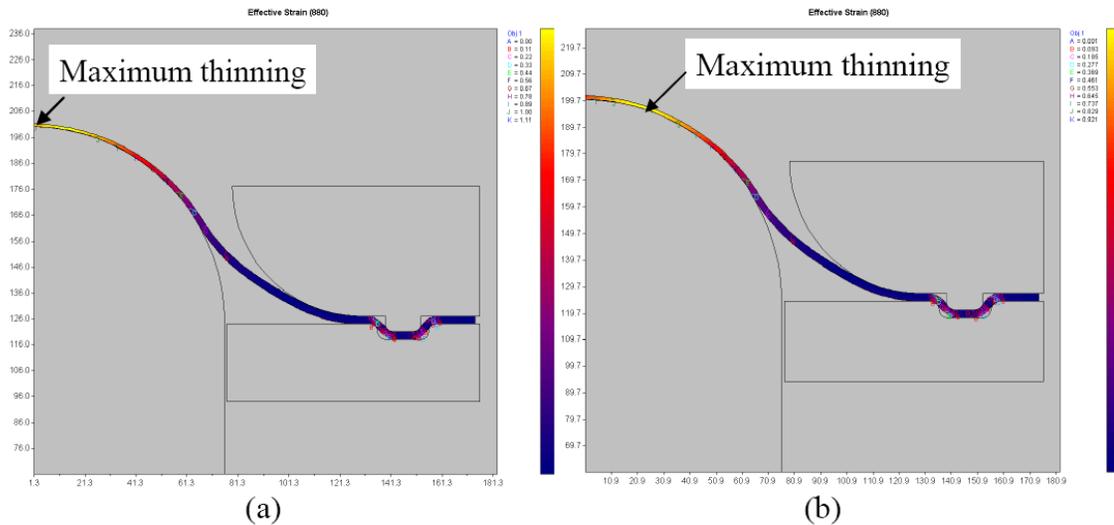


Figura 1.11. Localización de adelgazamiento máximo (Maximum thinning) cuando la fricción es (a) 0 y (b) 0,075.

La prueba LDH puede simular el estado de deformación más crítico en condiciones de deformación plana, por lo que se utiliza con gran frecuencia en la industria. Sin embargo, hay varias limitaciones para el uso del ensayo tales como:

- Es difícil obtener una estable reproducción de la condición plano-deformación en gran región de la lámina de material.
- A pesar del procedimiento especial, es casi imposible de reproducir los resultados dentro de un laboratorio y entre diferentes laboratorios.
- El resultado es críticamente dependiente de pequeñas variaciones en la anisotropía plástica, la fricción, etc.
- No existe una definición imprecisa de fracaso debido a la naturaleza de la grieta.
- La realización de este tipo de ensayo consume mucho tiempo.

A partir de la obtención de las propiedades mecánicas de los materiales por medio de algunos de estos ensayos, se construyen los modelos de materiales. Diversos autores han

estudiado los modelos matemáticos para describir la zona plástica de la curva tensión-deformación. A continuación se exponen algunos de ellos.

### 1.3.2 Modelos Ludwik y Hollomon.

Un primer modelo matemático para describir la zona plástica de la curva tensión-deformación es el propuesto por Ludwik y simplificado posteriormente por Hollomon. El modelo matemático de Ludwik se define de la siguiente forma (Gutiérrez, 2012).

$$\sigma = \sigma_0 + K\varepsilon^n \quad (1.6)$$

Mientras que el modelo simplificado propuesto por Hollomon se describe como:

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (1.7)$$

Propone que el esfuerzo,  $\sigma$ , aumenta potencialmente con la deformación,  $\varepsilon$ , de tal manera que  $K$  coeficiente de resistencia o módulo plástico (constante de Hollomon) y el exponente  $n$  coeficiente de endurecimiento, definen la curva. Este modelo es ampliamente utilizado para estudiar la tracción en los aceros, sin embargo es criticado en ocasiones por ser empírico porque la tensión o esfuerzo  $\sigma$ , crece infinitamente con el aumento de la deformación  $\varepsilon$  y porque  $n$  no es constante. Según (Sala, 2008) a pesar de estos reproches se ajusta con excelentes resultados a cortas deformaciones obtenidas en tracción.

Para determinar los coeficientes del modelo de Hollomon se representa los valores de tensión y deformación en escala logarítmica, donde la pendiente de la recta proporciona el coeficiente de endurecimiento  $n$  (Gutiérrez, 2012).

$$\log \sigma = \log K + n \log \varepsilon \quad (1.8)$$

Las tres zonas (fig. 1.12) de la curva muestran el comportamiento del material al aplicársele una carga, donde: la zona I es la región elástica, la zona II es la región de transición entre el comportamiento elástico y plástico y la zona III el material se comporta de forma totalmente plástico. La relación entre la tensión y la deformación se puede expresar con la Ley de Hooke ( $\sigma_e = E\epsilon$ ) en la región elástica y la ley de Hollomon en región plástica ( $\sigma = K\epsilon^n$ ). En región elástica, la tensión y la deformación tienen relación lineal. El módulo de Young ( $E$ ) puede ser determinada por la pendiente de la curva de tensión de ingeniería ( $\sigma_e$ ) vs la deformación de ingeniería ( $\epsilon$ ). En la región plástica, la Ley de Hollomon es normalmente la más utilizada en la relación no lineal entre la verdadera tensión y la deformación real,  $K$  indica el coeficiente de fuerza y  $n$  es el exponente o coeficiente de endurecimiento por deformación. En la curva (fig. 1.13) se muestra la tensión verdadera y la verdadera deformación de Al 1100-O (Altan, 2012; Hosford y Caddell, 2007).

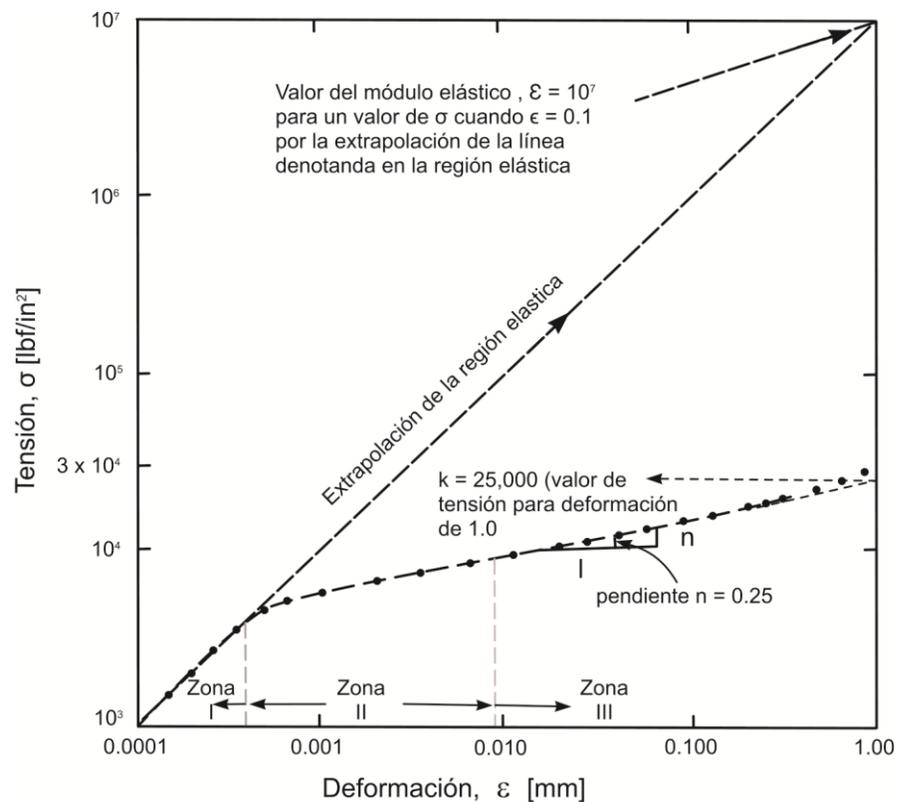


Figura 1.12. Curva de tensión verdadera  $\sigma$  vs deformación verdadera a escala, ploteada por puntos para la determinación de los coeficientes  $n$  y  $K$  del modelo de Hollomon.

Estrictamente la ecuación 1.6, debería aplicarse solo en la zona plástica de la deformación pero, en ciertos casos, si la deformación elástica es muy pequeña respecto a la plástica esta puede ignorarse (Hosford y Caddell, 2007).

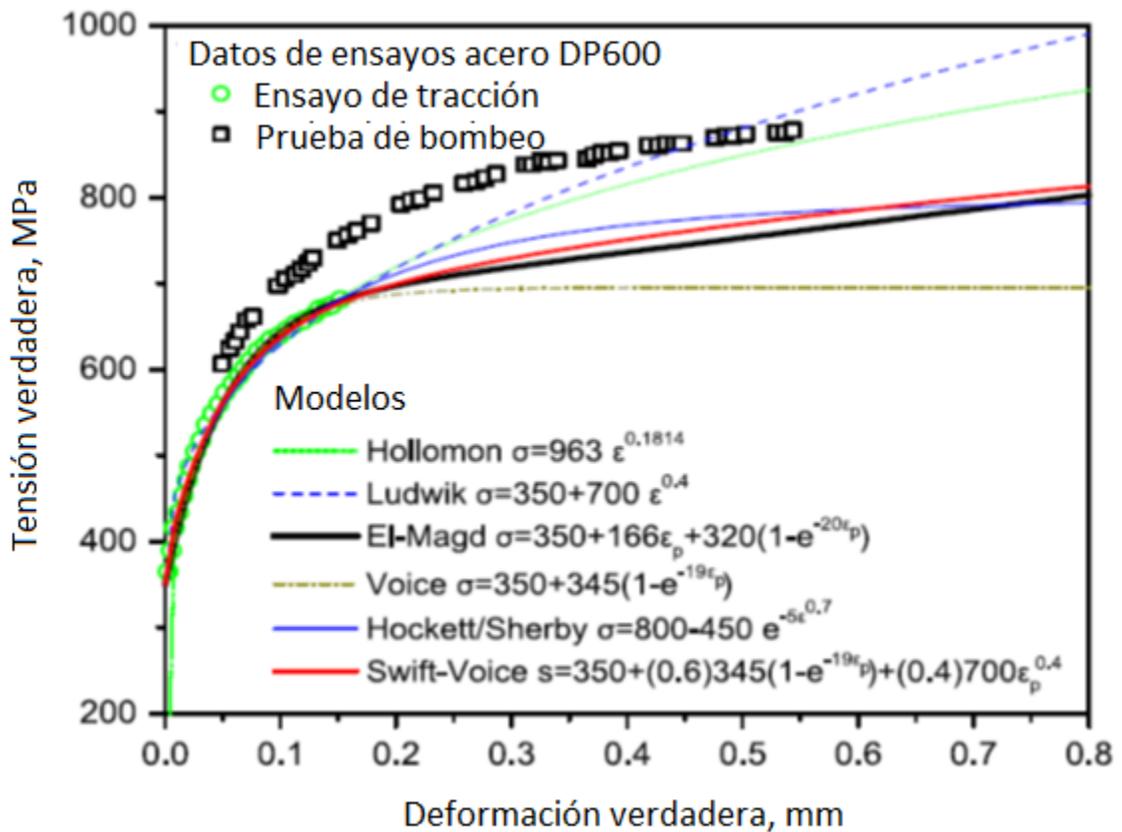


Figura 1.13 Predicción de curvas de tensión de flujo de diferentes ecuaciones, con valores verdaderos (True) de tensión y deformación (stress, strain).

### 1.3.3 Modelo de Swift.

El modelo de Swift tiene en cuenta la predeformación para describir la ley de endurecimiento del material:

$$\sigma = K(\varepsilon_0 + \varepsilon_p)^n \quad (1.9)$$

Donde  $K$  y  $n$  son constantes del material, conocidos como parámetros de endurecimiento, mientras que  $\varepsilon_0$  es la predeformación. Esta expresión proporciona un mejor resultado en valores de tensión-deformación a mayores elongaciones que el modelo de Ludwik (Gutiérrez, 2012).

### 1.3.4 Modelo de Voce

En su investigación (Dixit, *et al.*, 2011) expresa que Voce propuso otro modelo matemático basado en el aumento de la tensión hasta un valor denominado de saturación,  $\sigma_{sat}$ . La ecuación de Voce se puede describir de la siguiente manera.

$$\sigma = A - B \exp(-C\varepsilon) \quad (1.10)$$

Donde  $A$ ,  $B$  y  $C$  constantes del material. Posteriormente Kocks realizó una demostración física para justificar la ecuación del modelo Voce-Kocks, el cual se puede escribir de la siguiente forma:

$$\sigma = \sigma_{sat} + (\sigma_0 - \sigma_{sat}) \exp\left(-\frac{\varepsilon - \varepsilon_0}{\varepsilon_c}\right) \quad (1.11)$$

Siendo  $\sigma_0$  el límite elástico,  $\varepsilon_c$  es un valor de deformación,  $\varepsilon_0$  es valor de deformación en el límite elástico. Aunque algunos autores dan un valor nulo a  $\sigma_0$  como  $\varepsilon_0$  y la ecuación se simplifica de la siguiente forma.

$$\sigma = \sigma_{sat}[1 - \exp(-W\varepsilon)] \quad (1.12)$$

Donde por simplicidad  $W=l/\varepsilon_c$  que representa una medida de la longitud de dislocaciones restauradas.

En su artículo (Dixit, *et al.*, 2011) realiza una revisión bibliográfica acerca de la modelación de los procesos de maquinado y conformación de chapas metálicas. Donde hace referencias a modelos empíricos típicos que muestran la dependencia de la tensión de flujo (Tabla 1.1).

*Tabla 1.1 Modelos empíricos típicos que muestran la dependencia de la tensión de flujo.*

No.	Modelos empíricos	Comentario
1	$\sigma = k\varepsilon^n$	Ley de Hollomon
2	$\sigma = \sigma_y + k\varepsilon^n$	Ley de Ludwik
3	$\sigma = \sigma_y(1 + \varepsilon/b)^n$	Ley de potencia generalizada de Swift, adecuada para un amplio rango.
4	$\sigma = C(m + \varepsilon)^n$	
5	$\sigma = \sigma_y + K[1 - me^{-n\varepsilon}]$	Ley de potencia generalizada de Swift
6	$\varepsilon = \frac{\sigma}{\bar{E}} \left\{ 1 + \alpha \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^{m-1} \right\}$	Ecuación de Ramberg-Osgood, considera la elasticidad
7	$\sigma = \sigma_y \tanh\left(\frac{\dot{E}\varepsilon}{\sigma_y}\right)$	Ley de Pragar para el material plástico ideal
8	$Z = \dot{E} \exp\left(\frac{Q}{RT}\right) = A\{\sinh(\alpha\sigma)\}^n$	Relación considerando velocidad de desplazamiento y temperatura, donde Z es el parámetro de Hollomon o la temperatura corregida por la velocidad de deformación
9	$\sigma = k\varepsilon^n \dot{E}^m \exp\left(\frac{\beta}{T}\right)$	Relación considerando velocidad de desplazamiento.
10	$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left( 1 + C \ln \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} \right) \left\{ 1 - \left( \frac{T - T_0}{T_{melt} - T_0} \right)^m \right\}$	Modelo de Johnson-Cook, ampliamente utilizado en el maquinado
11	$\sigma = \sigma_0 \varepsilon^n \left( \frac{\dot{E}}{\dot{E}_0} \right)^m \left( \frac{T}{T_0} \right)^{-r}$	Ley de potencia

### **1.3.5 Ventajas y desventajas de los ensayos de tracción.**

#### **Ventajas:**

1. Reproducir condiciones de uso de productos con el objeto de la resolver de problemas de funcionamiento de los que se desconoce su origen.
2. Calibración de los modelos de comportamiento utilizados para simulación de componentes y desarrollo de producto.
3. Obtención de información detallada acerca del comportamiento estructural de un elemento o producto y extracción de conclusiones de sus factores críticos.

#### **Desventajas:**

1. Los ensayos de embutición tienen limitaciones como “insuficiente tamaño del penetrador”, la incapacidad para prevenir la extracción involuntaria en la pestaña o reborde y lubricación inconsistente. Es decir, las pruebas de copa se limitan a ser utilizadas en la práctica, porque el área de la lámina del material se somete a una deformación que es relativamente pequeña.
2. Simulaciones por el método de elementos finitos (MEF) para el análisis LDH arrojaron que la prueba es muy sensible a la fricción y que afecta las mediciones.
3. Es difícil obtener una estable reproducción de la condición plano-deformación en gran región de la lámina de material.

### **1.4 Simulación por elementos finitos del proceso de embutido.**

El estudio analítico de los procesos de conformado de metales se inició a mediados del siglo XX por (Hill, 1950; Swift, 1948). Más tarde, un número de métodos de análisis se

han desarrollado y aplicado a diversos procesos de conformado. Algunos de estos métodos son el de campo de línea de deslizamiento, el método de viscoplasticidad superior e inferior unidos al método general Hill "s.

Procedimientos numéricos (método de diferencias finitas) se aplicaron para analizar el proceso de embutición profunda axisimétrica en 1960 (Woo, 1964), el trabajo contribuyó en gran medida al desarrollo de la teoría del análisis de la formación de láminas de metal, que podría no ser aplicable a los componentes industriales.

Según lo expuesto por (Tang, 1980; Wang y Budiansky, 1978) en su trabajo la determinación más precisa de los efectos de diversos parámetros del proceso de embutición profunda ha sido posible sólo, cuando el método de elemento finito no lineal fue desarrollado para estos análisis.

Los primeros intentos de soluciones numéricas del conformado de la chapa metálica tienen lugar sobre la década de los años 60. En este sentido un gran avance en la solución de problemas en el proceso de conformado de la chapa utilizando soluciones numéricas fue método de elementos finitos (FEM) (Govik, *et al.*, 2012; Nasser, *et al.*, 2010).

Los primeros trabajos fueron realizados por (Gotoh y Ishise, 1978), donde utilizaron un comportamiento del material elastoplástico; por otra parte (Wang y Budiansky, 1978; Wifi, 1976) utilizan una ley plástico-rígido. Las primeras aplicaciones en 3D son conocidos por (Tang, *et al.*, 1982; Toh y Kobayashi, 1983). Todos los estudios mencionados son de tipo estático implícito y explícito. Los métodos explícitos dinámicos tienen sus raíces en el estudio de (Belytschko y Mullen, 1977).

Más tarde, el proceso de deformación de tres paneles de carrocería de un auto fue simulada utilizando el método de elementos finitos elasto-plástico por (Alinghaus, *et al.*, 1985; Tang, 1985). Ellos simularon el proceso de deformación profunda de la ventana izquierda exterior y el proceso de envoltura de tapa del maletero. Pero estaban en el estado de prueba y

evaluación. Debido a que el análisis de elementos finitos para entonces todavía era una herramienta extremadamente lenta y poco fiable para los ingenieros en el taller de prensas. El método de elementos finitos permite obtener información sobre las fuerzas, esfuerzos, deformaciones y otros parámetros de importancia en el proceso, por lo que ha sido investigado por diferentes autores (Wang y Budiansky, 1978). El método se fundamenta en dos formulaciones: la Eulerian y la Lagrangian. En la primera se analiza el control del volumen del material y en la segunda el análisis se realiza a partir de las características del material sin tener en cuenta el control del volumen.

El modelo del material, así como los valores de las constantes y exponentes son aspectos muy importantes para obtener resultados robustos y confiables. Basado en lo anterior (Chung, *et al.*, 2014), proponen un modelo visco plástico para el material usando elementos tetraédricos MINI-lineales, con particular atención a su efecto sobre la deformación de la pieza. En el trabajo realizado por (Arfa, *et al.*, 2013), consideraron un modelo elastoplástico para aleaciones de aluminio y realizaron el análisis por FEM de un proceso de conformado incremental (SPIF) utilizando el software ABAQUS.

También (Gantar y Kuzman, 2002) demostraron que en el caso de la simulación por elementos finitos del proceso de embutido, los parámetros del proceso más importantes son: las propiedades del material (coeficiente de endurecimiento, límite de fluencia, constante del flujo de esfuerzos, coeficiente de anisotropía y coeficiente de fricción. Por otra parte (Ledoux, *et al.*, 2010) llegaron a la conclusión de que el coeficiente de fricción es el parámetro que más influye en los resultados de la simulación, con más del 60%,

mientras que la variabilidad del material presenta una influencia de más del 30 %, según sus investigaciones, el límite de fluencia casi no muestra influencia.

Más adelante la combinación de un sistema neuro borroso (ANFIS) y el método de elementos finitos para realizar estudios sobre el diseño óptimo de la matriz utilizada en el proceso de conformación de la chapa fue usada por (Fung, *et al.*, 2012).

Con los avances de la tecnología diversos productos de software han sido utilizados para simular el proceso de embutición a través del método de elementos finitos. Dentro de ellos cabe destacar el DYNAFORM (Jie, *et al.*, 2015; Lindeberg, 2012), el ANSYS LS-DYNA (Ankenas y Barauskas, 2006; Lora, *et al.*, 2013), el ABAQUS (Ayed, *et al.*, 2014; Hagenah, *et al.*, 2013) el STAMPACK (Bernal, 2013) y DEFORM-3D y 2D (Poláková y Zemko, 2012).

El término simulación se deriva de la palabra latina "simulare" lo que significa "fingir". Sin embargo, el significado técnico de la simulación es la descripción y la reproducción de los procesos físicos y técnicos mediante el uso de modelos matemáticos y físicos. En comparación con las pruebas prácticas, la simulación a menudo es más barata y no tan peligrosa. En combinación con los métodos modernos de computación, la simulación es una poderosa herramienta que gana cada vez más importancia para la descripción y el desarrollo de nuevos métodos de procesamiento. Debido a los requisitos más altos en la calidad de los productos y tolerancias estrechas de medidas, la optimización, planificación y simulación de procesos de conformado se vuelve más importante. A medida que la potencia de cálculo se ha incrementado durante los últimos años, los métodos numéricos juegan un rol destacado. Donde el método numérico más importante es el método de elementos finitos (FEM). Por ello han sido desarrollados numerosos programas de

elementos finitos que son capaces de resolver problemas lineal, no lineal, estático, dinámico, elástico, plástico, elástico - plástico, en estado estacionario, transitoria, isotérmico, así como problemas no isotérmicas (Harrer, 2003).

La simulación no es más que el diseño de un modelo matemático de un sistema, y la posterior ejecución de una serie de experimentos con la intención de entender su comportamiento bajo ciertas condiciones. El modelo debe ser capaz de reproducir el comportamiento del proceso real con la mayor exactitud posible (Mamani, 2011).

En la actualidad la simulación de procesos o fenómenos, es un recurso que se emplea en gran medida con el objetivo de disminuir costos y optimizar la producción. Mediante la reproducción de un modelo lo más real posible se pueden obtener resultados con gran exactitud y así evitar gastos innecesarios, roturas de equipos y en casos hasta pérdidas de vidas humanas.

La simulación de procesos resume toda la teoría relacionada con un proceso en el cual se sustituyen las situaciones reales por otras creadas artificialmente, de las cuales se deben aprender ciertas acciones, habilidades y hábitos. En los últimos años, la simulación de procesos ha llegado a ser una herramienta adecuada y oportuna de apoyo para el diseño, caracterización, optimización y monitoreo del funcionamiento de procesos industriales. Según (Martinez, 2000) para aplicar estas simulaciones existen en la actualidad una gran variedad de software de simulación de procesos.

La simulación es conveniente cuando no existe una formulación matemática analíticamente resoluble. Muchos sistemas reales no pueden ser modelados matemáticamente con las herramientas actualmente disponibles, como pudiera ser, el comportamiento de un cliente de un barco. Otro de los momentos en los que se hace necesaria la simulación, es cuando

hay un formulario matemático, pero se hace difícil obtener una solución analítica, por ejemplo: sin simplificar seriamente los modelos matemáticos para modelar una planta química o un reactor nuclear serían imposibles de resolver.

Cuando no existe el sistema real, el ingeniero tiene que diseñar un sistema nuevo, este diseño mejorara notablemente si se puede contar con un modelo adecuado para realizar experimentos. En innumerables casos la realización de experimento resulta imposible debido a razones económicas, de seguridad o ética, en este caso el sistema real está disponible para realizar experimentos, pero la dificultad del mismo lleva a descartar esta opción, se imaginan provocar fallas en un avión real para evaluar la conducta del piloto. Otra de las aplicaciones de la simulación se ve representada en los sistemas de evolución lenta o muy rápida, ejemplo de esto es el de los científicos que estudian la evolución del clima; ellos no pueden esperar a que un tornado arrase una ciudad para después dar el mensaje de alerta (Tarifa, 1998).

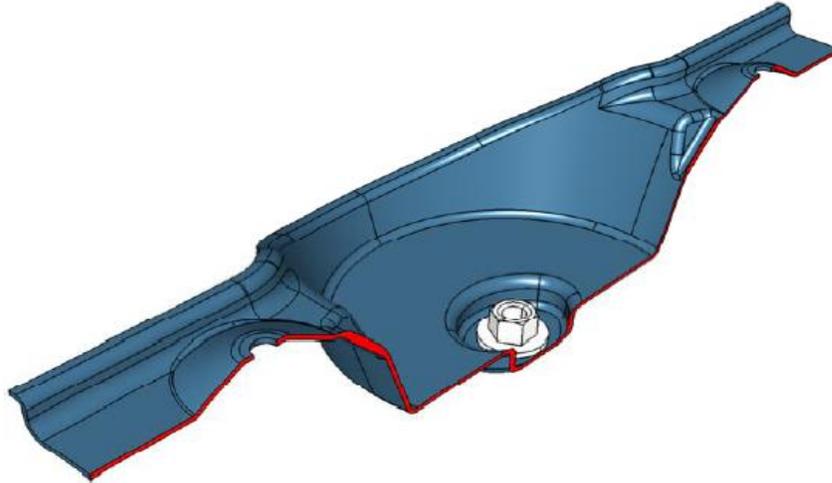
A partir de esto (Garrido, *et al.*, 2004) desarrollaron el análisis del proceso de embutición profunda de un componente de una lavadora semiautomática de uso doméstico (fig. 1.14), específicamente la tapa embrague del sistema de transmisión. En el mismo se utilizó la simulación numérica basada en el método de elementos finitos y los resultados se compararon con valores obtenidos experimentalmente. Emplearon un código capaz de realizar la integración explícita de las ecuaciones de movimiento a través de un modelo dinámico. Fue considerado además el problema de contacto friccional entre las herramientas y el punzón. Los resultados que se obtuvieron con este modelo numérico corresponden a desplazamientos, esfuerzos, deformaciones y a partir de estos, se realizaron comparaciones con valores experimentales. Los autores concluyeron en que los resultados

de dicha simulación tuvieron buenas aproximaciones a los valores reales y a la luz de los mismo que el modelo empleado permite predecir el comportamiento de procesos de conformado de metales con las condiciones establecidas en este trabajo.



*Figura 1.14 Forma final del cuerpo de la tapa de embrague.*

Del mismo modo (García, 2009) realizó el análisis del comportamiento del proceso de embutido de una pieza de soporte de la rueda de repuesto de un automóvil (fig. 1.15) en sus distintas etapas, con el fin de obtener desviaciones límites aceptables con respecto a las reales obtenidas del proceso. A pesar de no haber cumplido con su objetivo, concluyo en que, la forma de la placa simulada es muy parecida a la real, por lo que la metodología empleada es capaz de simular correctamente la secuencia de movimientos de todos los elementos. A demás expone que es imprescindible conocer más en profundidad tanto el proceso que se quiere simular como la herramienta empleada, para definir el modelo con el que se va a trabajar de forma más fiel al proceso real.



*Figura 1.15 Soporte de la rueda de repuesto de un automóvil.*

Posteriormente (Hernández y Vásquez, 2010) realizaron un estudio del proceso de fabricación de extintores, con vista analizar el proceso de embutición mediante el método de elementos finitos (MEF), usando el software STAMPACK para la simulaciones, con la finalidad de obtener soluciones exactas o al menos lo más semejantes a las que se obtienen en la práctica. Los autores llegaron a la conclusión de que, como es lógico, es necesario disponer de los parámetros reales del proceso, que aunque son difíciles de obtener, resultan imprescindibles para lograr un resultado de la simulación lo más aproximado a los reales del proceso. También resaltan que, para la implementación del software STAMPACK no es necesario tener conocimientos profundos del método numérico.

Más reciente ha sido la simulación de un procesos de embutición profunda con el empleo de DYNAFORM desarrollada por (Jie, *et al.*, 2015) donde se establece una modelación por elementos finitos basada en la estructura real del herramental y para ello se tomaron como parámetros numéricos de simulación: el material de la chapa BTC 330R, el módulo elástico es 289 GPa, el coeficiente de Poisson es 0,28, el valor del coeficiente de endurecimiento ( $n$ ) es 0,34, el parámetro anisótropo es 1.488, el diámetro de punzón ( $D_p$ ) es 343,6 mm y

el diámetro de dado ( $Dd$ ) es 350 mm. Entretanto, el punzón, el dado y el pisador permanecen por defecto como rígidos. El coeficiente de fricción de la chapa metálica en contacto con el dado rígido es 0,12.

### **1.5 Conclusiones parciales del capítulo.**

Después de realizar la revisión del estado de la temática podemos concluir planteando que:

1. El estudio de los procesos de embutido es complejo y difícil debido a la existencia de una serie de variables, las cuales hay que tener presente para su comprensión.
2. La confiabilidad de los modelos constitutivos del material, está dada principalmente por una buena obtención de sus propiedades; es decir realización de los ensayos.
3. Así como los modelos dependen de los ensayos, la simulación depende principalmente del modelo del material y de una buena reproducción del fenómeno real.

## CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS

En este capítulo se conocerá que material se utiliza para la elaboración de los cilindros de gas, así como las propiedades físicas, químicas y mecánicas del mismo. La metodología para realizar la simulación será planteada.

### 2.1 Propiedades y composición química del material.

Para el análisis del proceso de embutido fue utilizado el material JIS 3116-255, el mismo es muy utilizado en la industria para la fabricación de cilindros de gas licuado de 10 Kg. En el análisis de la composición química fueron utilizados los métodos de fluorescencia de rayos X con el equipo Olympus modelo Innov Delta 500, cuyo resultado mostro un 99,41% de hierro, 0,32 % de silicio y 0,27 % de manganeso. Para el análisis de otros elementos se utilizó la técnica de microanálisis por dispersión de energía (EDS), utilizando el microscopio de barrido JEOL modelo JSM-6510LV con una unidad de detección EDAX, la cual tiene la capacidad de identificar energías y obtener los elementos presentes en la muestra (fig. 2.1).

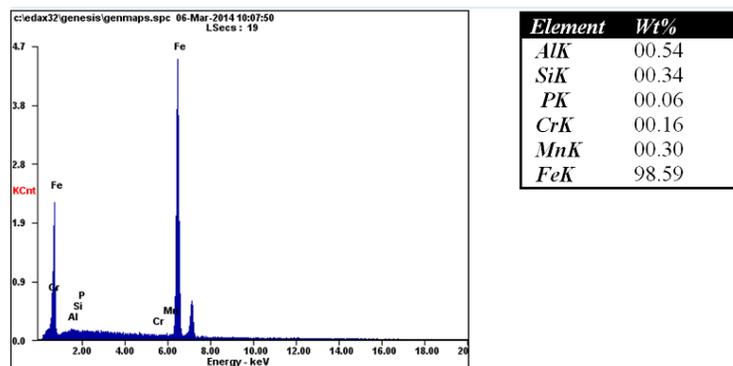
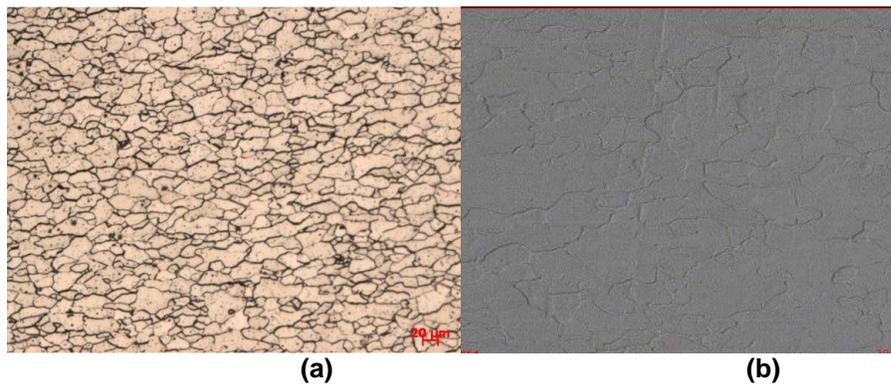


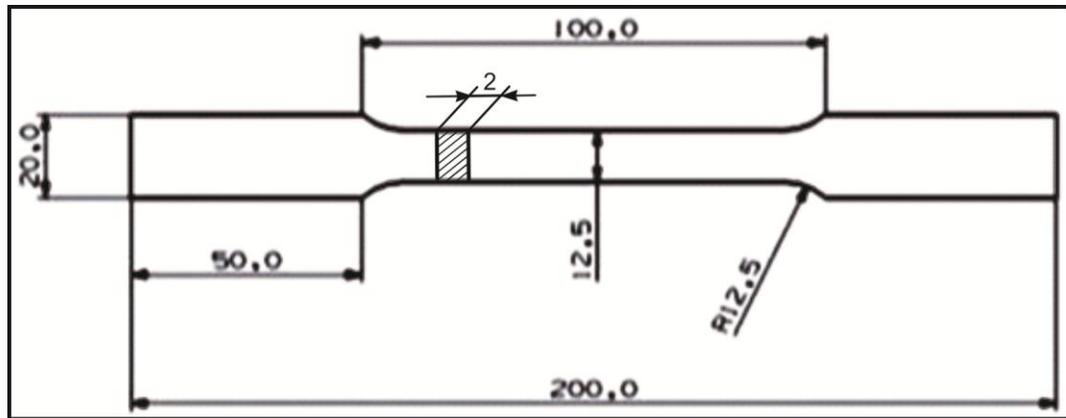
Figura 2.1. Resultado del microanálisis por dispersión de energía.

Para la obtención de las micrográficas se utilizó un microscopio óptico de platina invertida modelo Axio Observer.Z1m de la compañía Carls Zeiss, capaz de analizar las imágenes con fases metalográficas reveladas químicamente. Posteriormente se utilizó el Microscopio Electrónico Barrido (SEM) para obtener mejor resolución. La muestra fue atacada con una solución de Nital al 2% (2gr de ácido nítrico, 98 ml etanol).La microestructura observada en el análisis (fig. 2.2) coincide con un acero ferrítico.



*Figura 2.2. Microestructura del acero JIS 3116-255. (a) Microscopio óptico, (b) SEM.*

Para obtener las propiedades mecánicas del material, así como los datos necesarios para los modelos de tensión verdadera y deformación verdadera se realizaron ensayos de tracción acorde con (ASTM, 2013). El equipo utilizado (fig. 2.4) fue la prensa de ensayo de tracción y las probetas con sus dimensiones se presentan en la (fig. 2.3). Los ensayos fueron realizado a diferentes velocidades de deformación e introducidos en forma de tabla en el software DEFORM-3D. El espesor de la chapa fue de 2,2 mm. El límite elástico obtenido fue de 242 MPa, módulo de Young de 210 GPa y el coeficiente de Poisson de 0,3



*Figura 2.3. Probetas utilizadas en los ensayos de tracción.*



*Figura 2.4. Equipo y probetas utilizadas en los ensayos de tracción.*

## **2.2 Modelo constitutivo del acero JIS 3116.**

El modelo del material fue obtenido a través de ensayos de tracción, los cuales se desarrollan para varias probetas y a distintas velocidades de deformación, a partir de estos se logra obtener las propiedades mecánicas del material. Las cuales se emplean para la obtención del modelo constitutivo del material.

Según lo expuesto en el capítulo anterior varios autores han propuesto diversos modelos para la representación de las propiedades de los aceros en distintos procesos. En nuestro caso el acero JIS 3116 se ajusta mejor al modelo propuesto por Ludwik (ecuación 1.6) que tiene en cuenta el límite de fluencia del material ( $\sigma_0$ ), la deformación ( $\epsilon$ ), el coeficiente de endurecimiento ( $n$ ) y el coeficiente de resistencia ( $K$ ).

### 2.3 Características del proceso de embutido.

El proceso que analizaremos es el embutido de los cilindros de gas de 10 kg que se desarrolla para una producción en serie de dichos artículos. Es un proceso de conformado en frío de chapas metálicas que se desarrolla con el empleo de un troquel montado en una prensa hidráulica, que consta de matriz, punzón y pisador (fig. 2.5). Luego de elaboradas las dos mitades del cilindro estas deben poseer como espesor mínimo de 1.98 mm según los estándares de calidad estimados para su comercialización (NC-1442:2012).

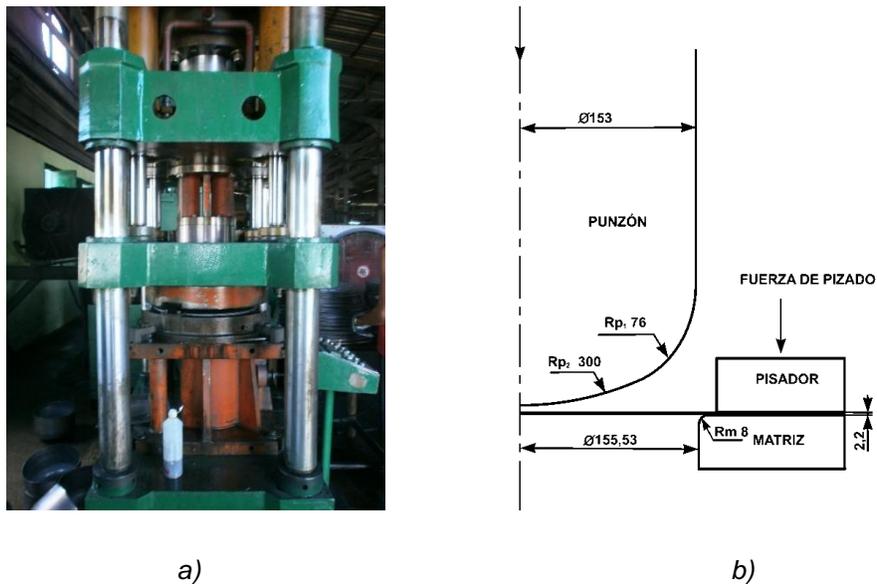
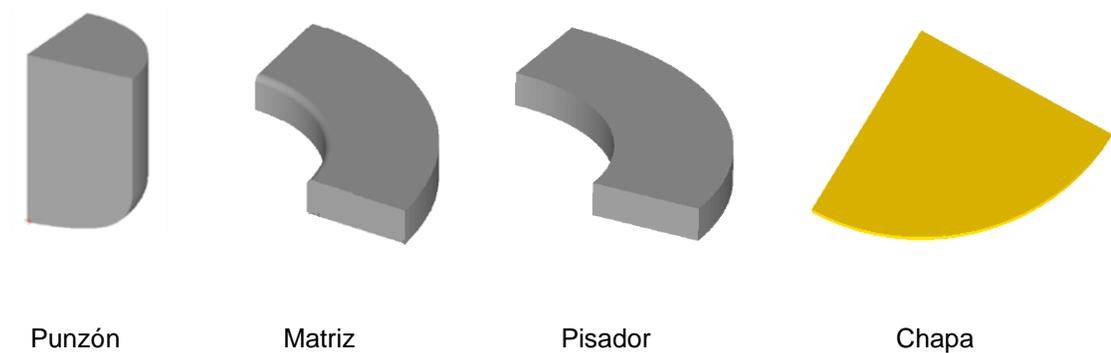


Figura 2.5. Prensa, Herramental y Chapa empleado en el embutido de los cilindros de 10kg.

### 2.3.1 Modelo CAD.

Para llevar a cabo las simulaciones se realizó el modelo bidimensional del herramental y la chapa (fig. 2.6) disminuyendo de esta forma considerablemente los cálculos a realizar, lo cual es factible debido a la forma simétrica de las partes, para ello se empleó el software AutoCAD (2013). Luego se exportaron dichos modelos en una extensión compatible con el software de simulación DEFORM. El cual los transforma a su entorno de trabajo (fig. 2.7).



*Figura 2.6. Geometrías del herramental y la chapa en entorno de DEFORM v 10.2.*

### 2.3.2 Características de la prensa.

Los experimentos fueron realizados en una prensa modelo YC 28-200/300 de fabricación China (fig. 2.5a), con las especificaciones técnicas expuesta en el anexo 1. El lubricante utilizado fue la grasa ETIRELF T 474-FE/B.

### **2.3.3 Selección de los regímenes de embutido y parámetros para la simulación.**

El software DEFORM 3D v10.2, fue diseñado con el fin de analizar los flujos tridimensionales que ocurren en los procesos de conformado de metales, brindando informaciones vitales sobre el material, dependiendo del proceso que se simule. El algoritmo de simulación es capaz de predecir simultáneamente grandes deformaciones y el comportamiento térmico de piezas y herramientas. Brindando un ambiente virtual de pruebas que permite evaluar la producción en la computadora en lugar de la prensa, ayudando a la predicción de defectos, mejorando tanto el flujo de material como la vida útil del herramental, ayuda además a presagiar propiedades y microestructuras, minimizando los procedimientos de prueba y error.

Los regímenes de trabajo de las máquinas son los parámetros que determinan la posibilidad de obtención de piezas con adecuada calidad. En el caso de estudio estos parámetros se seleccionaron de acuerdo al intervalo en el cual la pieza fabricada no posee defectos del proceso de embutido. Determinando como límite superior de fuerza de pisado de 68 kN y límite inferior de 20 kN. Determinándose posteriormente dentro de dicho rango el valor de fuerza con el cual se obtiene una pieza de mejor calidad.

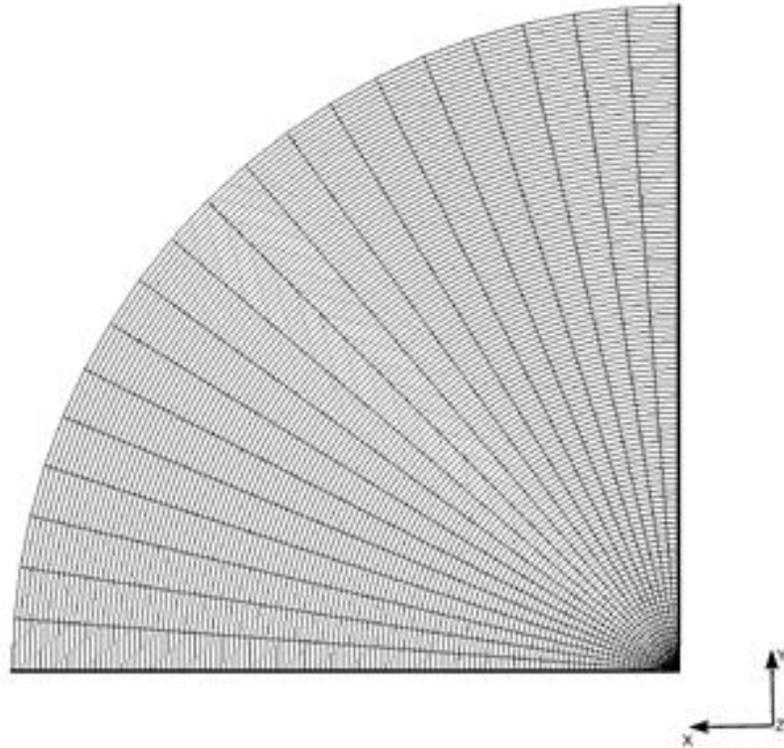
#### ***2.3.3.1 Simulación del proceso de embutido.***

Con el fin de desarrollar la simulación del proceso embutido, se crearon las geometrías de trabajo. En el mallado de la chapa se tecleó el valor de 115 en la sección *Number of Elements*, el tipo de malla escogida para realizar la convección de la misma a 3D, en la sección *Mesh Type* de la ventana *2D3D Converter* fue la *Hexahedron*. Luego de generar la malla (fig. 2.7) se obtuvo como valores del mallado 2410 elementos con 5084 nodos. Vale

destacar que solo se empleó un cuarto de las geometrías de trabajos debido a que simular solo esta sección ahorra considerablemente el empleo de recursos informáticos.

Permitiendo solo el desplazamiento del punzón en el eje Z con una velocidad de desplazamiento de 30 mm/s. El valor de fricción de contacto que se declaró en la ventana *Inter Object* y fue el de 0,15 según la ley de *Coulomb*. Empleando como fuerza de pisado 5000 N para la cuarta parte de la geometría de trabajo.

Dentro de la ventana *Simulation Control* solo se cambiaron parámetros como los de *Simulation Steps*, en el cual se le asignaron al Punzón, 1000 pasos de simulación con un incremento de pasos de 10. En la pestaña *Step increment* se modificó dentro de *step increment control* seleccionando *constant* y dándole un valor de 0,25 mm/step. Otro de los parámetros que se cambió fue, en la pestaña *Remesh criteria*, el de *Interference depth* asignándole a la condición *absolute* un valor de 0,7 mm y en la pestaña *Iteration* se marcó *Sparse* en la sección *solver*, en *iteration method* se tomó la condición *direct iteration*, en la sección *Maximum iteration* se definió un valor de 350, los valores de *Velocity error* y *Force error* son 0,005 y 0,05 respectivamente. Con todos estos valores se generó la base de datos y se procedió a correr la simulación.



*Figura. 2.7. Mayado hexaédrico.*

#### **2.4 Instrumento empleado en la medición de los espesores.**

Para realizar las mediciones de espesor se fijaron varios puntos sobre la superficie del cilindro en los lugares donde estos deben ser mínimos. Dichas mediciones se realizaron con un medidor de espesor ultrasónico marca Dakota Ultrasonics con cabezal de doble cristal con una frecuencia de 5 MHz.

#### **2.5 Conclusiones parciales del capítulo.**

Después de haber especificado las propiedades del material y la metodología a seguir para la simulación podemos concluir que:

1. Las pruebas realizadas brindaron los datos necesarios para caracterizar el acero JIS 3116 y nos permitieron obtener datos importantes para la simulación con los que no se contaban.
2. A partir de las geometrías generadas en AutoCad, y el empleo de la metodología para la simulación con DEFORM se puede simular el proceso de embutido de los cilindros de gas de 10 kg.

## CAPÍTULO 3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se darán a conocer los resultados obtenidos de la simulación y los análisis realizados de los mismos. Así como la caracterización del comportamiento de la fuerza durante el desarrollo del proceso y el intervalo de su mayor valor.

### 3.1 Modelo constitutivo del acero JIS 3116.

A partir de los ensayos de tracción realizado a tres probetas a distintas velocidades de deformación (50, 100 y 150 mm/min), se logró obtener las propiedades mecánicas del material. Las cuales se emplearan para la obtención del modelo constitutivo. Según lo expuesto en el capítulo anterior en nuestro caso el acero JIS 3116 se ajusta mejor al modelo propuesto por Ludwik. En la ecuación 3.1 podemos observar dichos valores para este acero.

$$\sigma = 286,7 + (439,8 * \epsilon^{0,239}) \quad 3.1$$

El modelo (fig. 3.1) obtenido presenta un buen ajuste para un coeficiente de correlación de 97,2%, con un error medio absoluto de 19,38; siendo significativas todas las variables analizadas, demostrándose la influencia de la de la deformación y el límite de fluencia en la tensión del material.

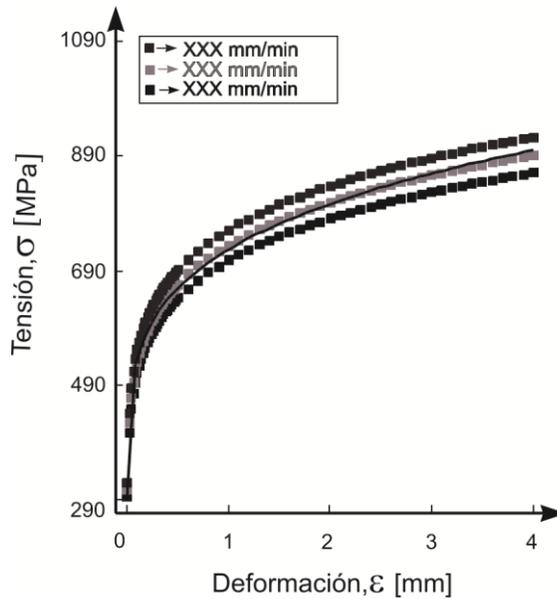


Figura 3.1. Gráfico tensión vs deformación del modelo ajustado.

Obteniéndose con una confiabilidad de un 95% los intervalos de confianza para el coeficiente de resistencia o módulo plástico ( $k$ ), para coeficiente de endurecimiento ( $n$ ) y para límite de fluencia ( $\sigma_0$ ) los presentados en la (Tabla 3.1).

Tabla 3.1 Resultados de la regresión.

Parámetros	Estimado	Error estándar	Intervalo de confianza	
			Inferior	Superior
$\sigma_0$	286,689	12,504	262,015	311,363
$K$	439,785	13,175	413,788	465,782
$n$	0,2396	0,008	0,223	0,256

### 3.2 Caracterización del proceso de embutido de los cilindros de gas de 10 kg.

Según la (fig. 3.2) dicho proceso de embutido se desarrolla en tres zonas fundamentales, la primera cuando el punzón y el pisador hacen contacto con el material a embutir, comienzo del proceso. Desde este instante la fuerza de embutido ( $Fe$ ) comienza su ascenso hasta llegar

a su mayor valor cercano a los 3,7 segundos y una profundidad de embutido de 110 mm. Luego en la Zona II comienza a descender moderadamente  $F_e$  hasta los 5,58 segundos donde comienza a elevarse nuevamente. Ya en este instante comienza su transcurso por la tercera zona que es la etapa final del proceso, donde se encuentra acumulado todo el material desplazado durante el proceso, alcanzando valores de espesores (2,92) en el borde superior, mucho mayor que el juego de embutido (2,53), lo que provoca el aumento de la fuerza que necesita realizar el punzón para poder deslizar ese volumen de material entre él y la matriz. Después de fluir el material por dicha cavidad la fuerza desciende nuevamente hasta la culminación del proceso.

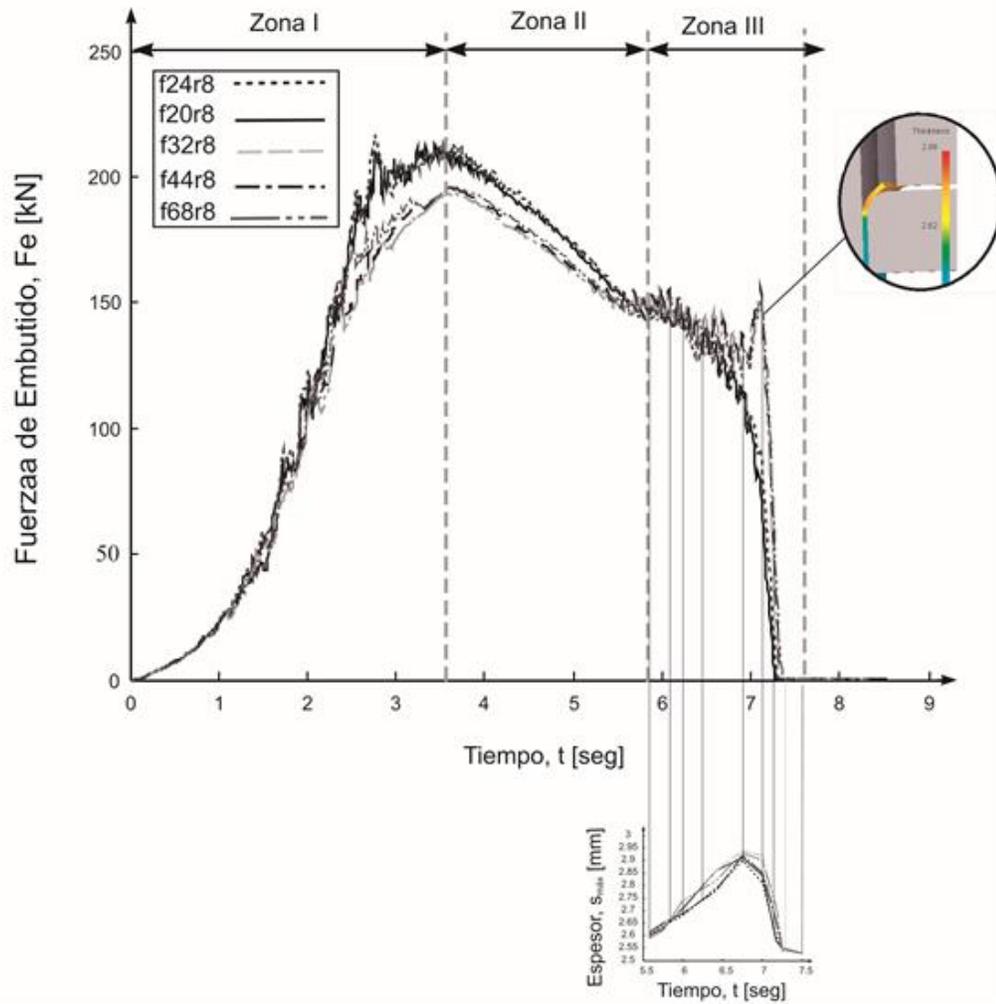


Figura 3.2. Comportamiento de la fuerza de embutido durante el proceso.

### 3.3 Selección del régimen de embutido.

Se realizaron 7 simulaciones para distintas fuerzas de pisados (16 – 70 kN), con el fin de determinar el valor de fuerzas donde se obtuviera un menor adelgazamiento de las paredes del recipiente. En la (Tabla 3.2) podemos observar los resultados de las simulaciones, apreciándose que para una fuerza de 16 y 70 kN respectivamente ocurren defectos en el embutido, por lo cual estos valores no son recomendables emplear en la fabricación de los recipientes. Por otra parte para un valor 20 kN se obtienen los mayores espesores.

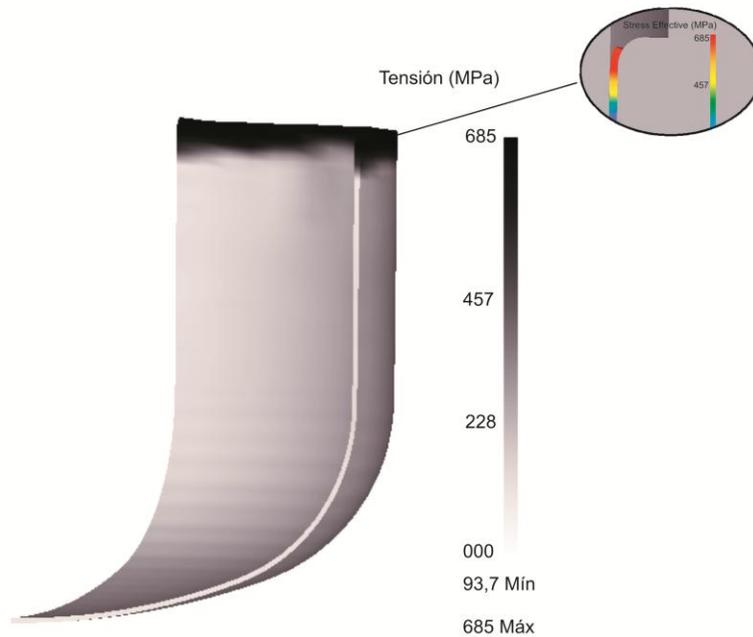
Tabla 3.2 Resultados de las simulaciones para distintas fuerzas de pisado.

<b>Exp</b>	<b>F pisado (kN)</b>	<b>S<sub>mín</sub> (mm)</b>	<b>Fe máx (N)</b>	<b>T (seg)</b>	<b>Gráfico espesores</b>	<b>Defecto</b>
<b>1</b>	16	-	-	-		<b>Pliegues o arrugas</b>
<b>2</b>	20	2,09	212678,6	3,67		-
<b>3</b>	24	1,91	217796,23	3,83		-
<b>4</b>	32	2,03	195573,87	3,75		-
<b>5</b>	44	2,02	196747,03	3,58		-
<b>6</b>	68	1,04	194827,70	3,76		-

						
7	70	-	-	-		<b>Rotura</b>

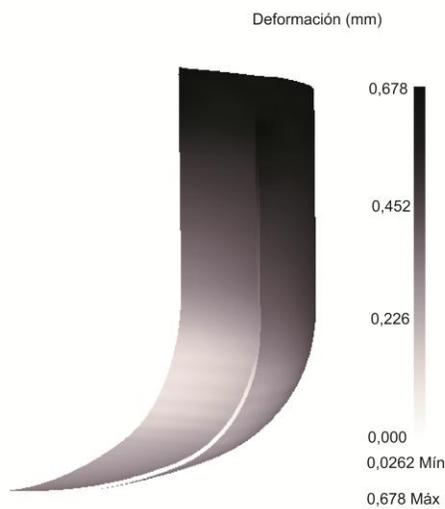
A continuación se realiza un análisis del comportamiento de las tensiones, deformaciones y adelgazamiento para la fuerza de 20 kN que sería el valor más adecuado para la fabricación de los cilindros según los resultados de las simulaciones.

Como se puede apreciar en la (fig. 3.3) los mayor valor de tensión bajo los cuales estará sometido el material se alcanzan en el instante en el que el pisador suelta la chapa y comienza a desplazarse entre el punzón y la matriz con un espesor mayor que el juego entre el herramental.



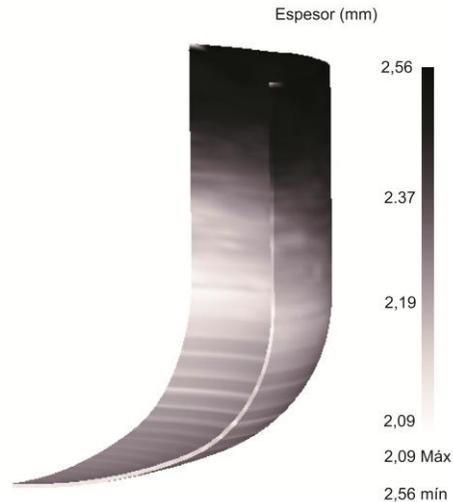
*Figura 3.3. Distribución de tensiones para 20 kN de fuerza.*

En el proceso de embutido las deformaciones que ocurren para lograr obtener las piezas son generalmente grande. En la (fig. 3.4) se puede observar que para la fabricación de los cilindros de gas de 10 kg empleando el acero JIS 3116 los valores de deformación oscilan entre 0,0262 mm y 0,678 mm.



*Figura 3.4. Deformaciones presentes en el material para 20 kN de fuerza.*

Durante la elaboración de recipientes a presión uno de los parámetros más importantes que se debe tener en cuenta es el espesor de la pared o adelgazamiento. Aspecto este que está estrechamente relacionado con las normas de seguridad. En el caso de estudio, esta normado como mínimo valor de espesor de pared 1,98 mm. En la (fig. 3.5) podemos apreciar que según las simulaciones el mínimo valor de espesor que se debe obtener para los parámetros especificados del proceso es 2,09 mm, cumpliendo con lo mormado para su comercialización.



*Figura 3.5. Relación de espesores para 20kN de fuerza.*

### **3.4 Análisis del comportamiento de la fuerza de embutido máxima para diferentes valores de los coeficientes y exponentes del modelo constitutivo del material.**

Ya que se ha determinado 20 kN como el mejor régimen de fuerza para la obtención de un mayor espesor, se generan aleatoriamente 30 valores para determinar la influencia de los coeficientes y exponentes del modelo constitutivo del material en la variación de la  $F_e$ .

Dando como resultado que el experimento 9 de la (Tabla 3.3) es el que mayor  $Fe$  presenta con 220,5 kN.

Si se hace un análisis de los experimentos que tienen mayores  $Fe$  se puede observar que con el aumento de  $\sigma_0$  o  $n$  aumenta la fuerza y en algunos casos con la combinación de ambos. Lo cual puede estudiarse con mayor profundidad en otros trabajos.

*Tabla 3.3 Resultados del análisis del comportamiento de  $Fe$ .*

Exp	$\sigma_0$	K	n	$Fe$ (máx) (kN)	Tiempo (seg)
1	293,5	451,5	0,2305	207,3	3.675
2	266,9	443,5	0,2284	196,1	3.758
3	258,3	425,6	0,2443	186,2	3.575
4	297,6	429	0,2489	199,8	3.658
5	290,7	400,7	0,2527	192,5	3.658
6	270,3	458,8	0,2404	199,5	3.650
7	281,3	444,1	0,2271	202,4	3.716
8	291	429,7	0,2334	199,9	3.658
9	331,8	457,9	0,2307	220,5	3.666
10	321,6	417,1	0,2595	202,6	3.675
11	269,7	438,4	0,2345	196,3	3.575
12	324,9	436,6	0,246	209,2	3.575
13	295,9	444	0,238	204,2	3.750
14	285,9	443,9	0,2472	204,2	3.683
15	295,7	428,3	0,2332	200,4	3.758
16	284,1	439,4	0,2278	199,8	3.675
17	276,3	437,6	0,2276	199,9	3.766
18	305,5	448,1	0,2438	207,0	3.578
19	304,5	454,3	0,2382	209,6	3.566

20	304,6	454,5	0,238	199,8	3.675
21	295,2	428,3	0,2516	199,4	3.758
22	271,5	440,8	0,2421	194,5	3.708
23	295,7	423,6	0,2413	199,1	3.583
24	307,2	425	0,2531	203,7	3.658
25	292,9	439,7	0,2329	204,6	3.675
26	299,7	460,1	0,2455	208,2	3.658
27	295,9	429,5	0,2467	191,9	3.583
28	282,9	444,7	0,2376	200,7	3.700
29	290,4	436,8	0,2415	200,9	3.650
30	276,8	454,6	0,2298	202,5	3.650

Para la obtención del rango de valores de fuerza de embutido para los 30 experimentos se empleó un filtrado de medias móviles (fig. 3.6) para eliminar los valores extraños en las mediciones (ruido). En el cual se filtran las señales (aplicando una media móvil), cortándose la curva  $F_e$  vs  $T$  para analizar solo la zona donde se encuentran las mayores  $F_e$  y luego se determina la media, la desviación y el intervalo de confianza, todo esto con el empleo del software MATLAB R2013a.

```

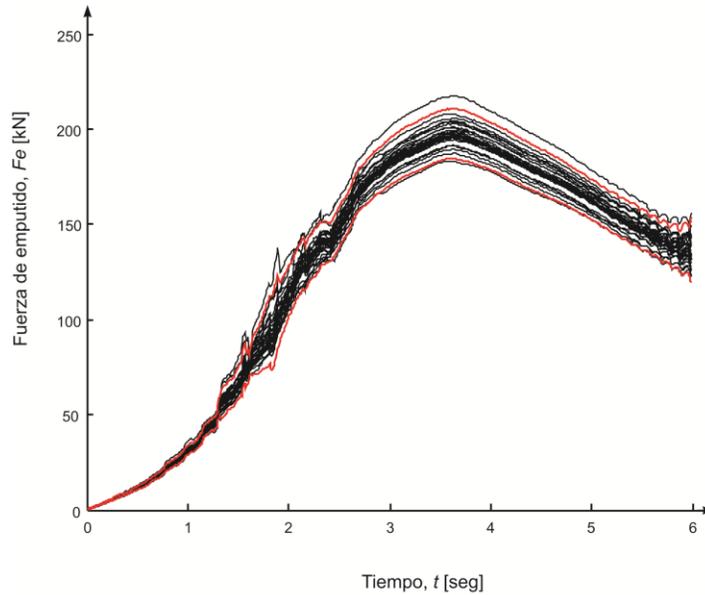
clear all; clc;
figure;
hold on;
for i = 1 : 30
    data = importdata(['Exp\Exp', int2str(i), '.txt']);
    x = data.data(:, 1);
    y = data.data(:, 2);

    n = 32; %Filtrado
    y1 = zeros(length(y) - n + 1, 1);
    for j = 1 : n
        y1 = y1 + y(j : length(y) - n + j);
    end
    y1 = y1./n;
    x1 = 0 : max(x)./(length(y1)-1) : 8.34;
    k=1;
    while (x1(k)<6) %Corte de las gráficas
        a(i,k)=x(k);
        a1(i,k)=x1(k);
        b(i,k)=y(k);
        b1(i,k)=y1(k);
        k=k+1;
    end
    s1=a1(i,:);
    s2=b1(i,:);
    plot(a1(i,:), b1(i,:), 'k-');
    save(['Exp\F_Exp', int2str(i), '.mat'], 'x', 'y', 'x1', 'y1');
    save(['Exp\F_Exp_Filt', int2str(i), '.mat'], 's1', 's2');
end
for i=1:698
    md(i)=mean(b1(:,i)); %Media
    st(i)=std(b1(:,i)); %Desviacion
    mi(i)=md(i)-(tinv(0.975,29)*st(i)); %Mínimo intervalo de confianza
end
plot(a1(1, :), mi, '-r', a1(1, :), ma, '-r');

```

Figura 3.6. Script del filtro empleado para la eliminación del ruido en los experimentos.

En la (fig. 3.7) podemos observar que el 93,3 % de los valores de fuerza se encuentran dentro del intervalo de confianza, marcado con la línea roja variando entre (190-210 kN). Encontrándose por debajo del valor mínimo del intervalo el experimento 3 con un valor de fuerza de 186,2 kN y por encima del valor máximo del intervalo el experimentos 9 con 220,5 kN.



*Figura 3.7. Intervalo de confianza de la Fe para la variación de las propiedades del material.*

### **3.4 Validación de los resultados**

Luego de haber realizado todos los análisis antes mencionado y de ejecutar una serie de simulaciones para determinar los parámetros adecuados para fabricar el cilindro de gas. Se procede a validar los resultados de la simulación mediante experimentos reales. Donde se elaboraron varios cilindros con los parámetros empleados en la simulación. A los cuales se les realizaron varias mediciones como se presenta en la (fig. 3.8). Verificando en los resultados de la (Tabla 3.3) se aprecia que el error relativo máximo obtenido fue de 8.88% para un valor de H de 60 mm. Por otra parte, durante la simulación, se muestra que los valores máximos se obtienen en la parte superior, mientras que los espesores mínimos fueron obtenidos en la zona donde comienza el radio del recipiente. Fenómeno este que se manifiesta también en el resultado del proceso real de embutido.

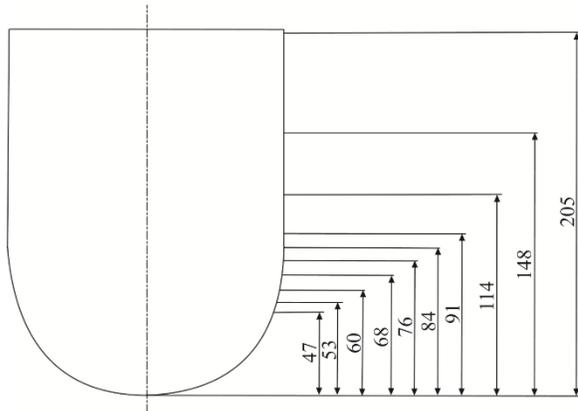
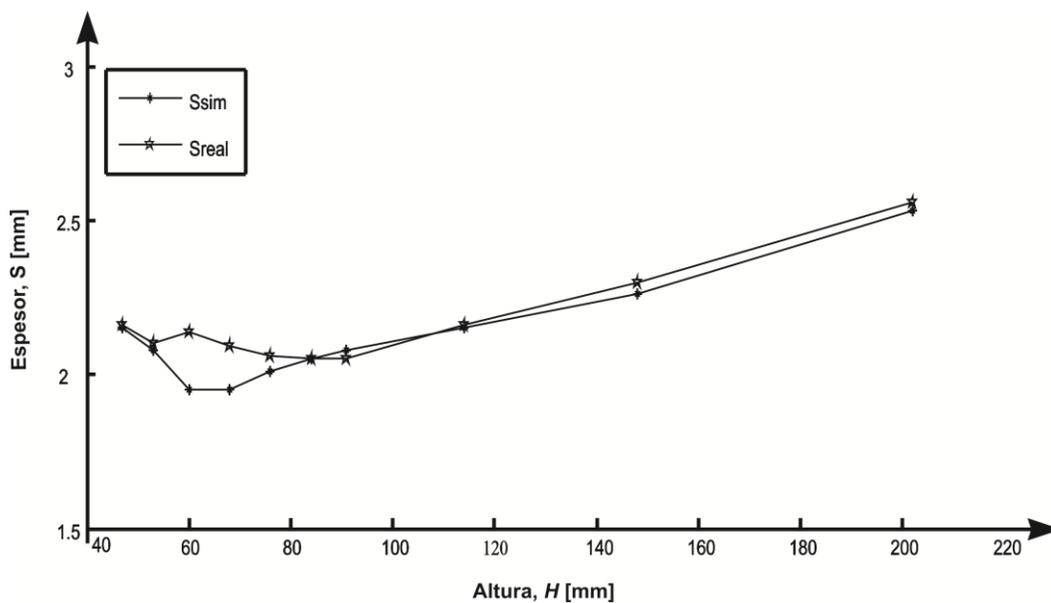


Figura 3.8. Mediciones experimentales de espesores.

Tabla 3.3 Validación de los experimentos.

No. mediciones	Altura (mm)	Espesor real (mm)	Espesor sim. (mm)
1	202	2,53	2,53
2	148	2,26	2,30
3	114	2,15	2,16
4	91	2,08	2,05
5	84	2,05	2,05
6	76	2,01	2,06
7	68	1,98	2,09
8	60	1,99	2,14
9	53	2,08	2,10
10	47	2,15	2,16

En la (fig. 3.9) podemos apreciar el comportamiento del espesor a distintas alturas del recipiente. Observándose las mayores diferencias de espesores entre el real y simulado cercanas a los 60 mm de altura que coincide con la zona de curvatura del cilindro, lugar donde ocurren los mayores adelgazamientos de las paredes.



*Figura 3.9. Curvas de espesor vs altura.*

### **3.5 Conclusiones parciales del capítulo.**

Luego de haber desarrollado una serie de simulaciones y analizar los resultados, se ha podido arribar a las siguientes conclusiones:

1. Se logra obtener un modelo constitutivo para el material JIS 3116 utilizado en la fábrica.
2. El proceso de embutido de los cilindros de 10kg se desarrolla en tres etapas principales, donde la fuerza de embutido sufre fluctuaciones, siendo su valor máximo aproximado de 200 kN para una fuerza de pisado de 20 kN.
3. Para valores 16 kN y 70 kN de fuerzas del pisador ocurren defectos en los cilindros, tales como arrugas y rotura de la chapa.

## CONCLUSIONES

Como resultado final del trabajo desarrollado, se ha podido arribar a las siguientes conclusiones:

1. Los resultados de la simulación en gran medida dependen del modelo constitutivo y de la variación de sus coeficientes parámetros estos que, entre otros, alteran la fiabilidad de los resultados.
2. El proceso de embutido del cilindros de gas de 10kg se desarrolla en tres zonas principales de acuerdo al comportamiento de la fuerza de embutido, la cual aumenta hasta su punto máximo (200 kN), luego disminuye gradualmente (140 kN) hasta que comienza a fluir la última parte del material, que posee espesores mayores que el juego de embutido lo cual provoca un nuevo aumento de la fuerza (160 kN), la cual finalmente disminuye hasta 0 kN.
3. La simulación indica que el valor de la fuerza del pisador con el cual se obtendrá un cilindro con menor adelgazamiento en sus paredes es de 20kN siendo.
4. Al realizar la validación del proceso para 20kN de fuerza del pisador, se observa que los resultados de la simulación (espesores) son cercanos a los experimentales para un error medio del 5%.

## RECOMENDACIONES

Basadas en las conclusiones obtenidas y para la extensión futura del presente trabajo, se realizan las siguientes recomendaciones:

1. Ampliar el estudio a otros parámetros del proceso, para una posterior optimización.
2. Emplear en la empresa el valor de fuerza del pisado propuesto, ya que los cilindros fabricados bajo estas condiciones cumplen con todas las especificaciones técnicas para su comercialización.
3. Utilizar la simulación del proceso de embutido antes de hacer pruebas de puesta a punto en caso de cambiar el material. Esto permite una disminución de los costos.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alinghaus, F.; Frey, W.; Stoughton, T.; Murthy, B., 1985. "Finite Element Modelling of a stretch formed part symposium on computer modeling of sheet metal forming". *The Metallurgical Society Inc. Ann Arbor. Michigan*.

Altan, T., 1983. "Metal Forming: Fundamentals and Applications". *American Society for Metals*.

Altan, T., 2012. *Metal Forming Processes in Manufacturing*. Handbook of Sheet Metal Forming.

Ankenas, R.; Barauskas, R., 2006. "Finite element investigation on parameters influencing the springback during sheet metal forming". *Mechanika*, 5, pp. 57-61.

Arfa, H.; Bahloul, R.; BelHadjSalah, H., 2013. "Finite element modelling and experimental investigation of single point incremental forming process of aluminum sheets: influence of process parameters on punch force monitoring and on mechanical and geometrical quality of parts". *International Journal of Material Forming*, 6, pp. 483-510, DOI: doi: 10.1007/s12289-012-1101-z.

ASTM, 2011. *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*.

ASTM, 2013. *Standard test methods for tension testing of metallic materials*. USA: West Conshohocken.

Ayed, L.; Robert, C.; Delamézière, A.; Nouari, M.; Batoz, J., 2014. "Simplified numerical approach for incremental sheet metal forming process". *Engineering Structures*, 62-63, pp. 75-86, DOI: doi: 10.1016/j.engstruct.2014.01.033. .

Ayers, R.; Brazier, W.; Sajewski, V., 1979. *Journal of Applied Metalworking*, 1 (1), pp. 41-49.

Belytschko, T.; Mullen, R., 1977. "Explicit integration of structural problems". *Finite Elements in Nonlinear Mechanics*. Tapir, Trondheim, Norway, pp. 672-720.

Bernal, Y., 2013. *Planeación asistida y simulación numérica de los procesos de embutición cilíndrica sin reborde y rectangular con pestaña* Tesis de doctorado. Las Villas Universidad central "marta abreu" de las villas

Billur, E.; Koç, M., 2008. "A Comparative Study on Hydraulic Bulge Testing and Analysis Methods". *Proceedings of the 2008 International Manufacturing Science and Engineering Conference*. Evanston, Illinois, USA, vol. 1.

Birajdar, N. ; Nagose, R., 2012. “CAE-based Optimization Methodology for Stamping Process of Deep Drawn Automotive Component”. In *SIMULIA Community Conference*. pp. 1-10.

Colorado, J., 2008. *Análisis de las Características de los Modelos de Material Para la Simulación de los Procesos de Embutido de Chapas de Acero*. Proyecto de fin de carrera. Madrid: Universidad Carlos III.

Chung, W.; Kim, B.; Lee, S.; R., H. ; Mansoo, J., 2014. “Finite element simulation of plate or sheet metal forming processes using tetrahedral MINI-elements”. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 28 (1), pp. 237-243, DOI: doi: 10.1007/s12206-013-0959-0.

Dixit, U.S.; Joshi, S.N. ; Davim, J.P., 2011. “Incorporation of material behavior in modeling of metal forming and machining processes: A review”. *Materials and Design*, 32 pp. 3655–3670, DOI: 10.1016/j.matdes.2011.03.049.

Fung, Y.; Ching, L. ; Kun, T., 2012. “Application of Adaptive Network Fuzzy Inference System to Die Shape Optimal Design in Sheet Metal Bending Process”. *Journal of Applied Science and Engineering*, 15 (1), pp. 31-40.

Gallardo, M., 1983. *Conformación de Materiales*. 1987 ed Ed. Ciudad de la Habana: Pueblo y Educación.

Gantar, G. ; Kuzman, K., 2002. “Sensitivity and stability evaluation of the deep drawing process”. *Journal of Materials Processing Technology*, 125–126, pp. 302–308, DOI: doi: 10.1016/s0924-0136(02)00334-5.

García, N., 2009. *Simulación de un proceso de embutición mediante ANSYS LS-DYNA*. Universidad Carlos III de Madrid.

Garrido, C.; Celentano, D.; Castillo, J. ; Guerra, J., 2004. *Simulación del proceso de embutición de una tapa de embregue de una lavadora semiautomática*.

Gotoh, M. ; Ishise, F., 1978. “A Finite element analysis of rigid-plastic deformation of the flange in a deep-drawing process based on a fourth-degree yield function”. *International Journal of Mechanical Sciences*, 20, pp. 423-435, DOI: doi: 10.1016/0020-7403(78)90032-2.

Govik, A.; Nilsson, L. ; Moshfegh, R., 2012. “Finite element simulation of the manufacturing process chain of a sheet metal assembly”. *Journal of Materials Processing Technology*, 212 (7), pp. 1453-1462, DOI: doi: 10.1016/j.jmatprotec.2012.02.012.

Gutiérrez, D., 2012. *Aplicación de criterios de conformabilidad en productos planos de aceros de alta resistencia*. Barcelona: Universidad Politécnica de Catalunya.

Gutscher, G.; Wu, H.; Ngaile, G. ; Altan, T., 2004. “Determination of flow stress for sheet metal forming using the viscous pressure bulge (VPB) test”. *Journal of Materials Processing Technology*, 146, pp. 1-7.

Hagenah, H.; Geiger, M. ; Merklein, M., 2013. "Numerical Simulation to Improve Robustness in Sheet Metal Forming Process Chains". *The 11th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes*. vol. 1532, pp. 683-688.

Harrer, O., 2003. "Finite element simulation in metal forming" *Acta Montanistica Slovaca Ročník* ". (8), pp. 176.

Hecker, S., 1974. "A Cup Test for Assessing Stretchability ". *Metals Engineering Quarterly*, 14, pp. 30-36.

Hernández, C. ; Vásquez, W., 2010. *Diseño y simulación del proceso de embutición de chapa metálica para la construcción de extintores utilizando el método de elementos finitos*. Quito: Escuela Politécnica Nacional.

Hill, R., 1950. "A theory of plastic bulging of metal diaphragm by lateral pressure". *Philosophical Magazine*, 41, pp. 1133.

Hosford, W. ; Caddell, R., 2007. *Metal Forming*. 3rd Edition Ed. Cambridge University Press.

Jie, Z.; Fang, Z.; Lei, H. ; Yan, L., 2015. "Multi-objective optimization of stamping forming process of head using Pareto-based genetic algorithm". *Journal of Central South University*, 22, pp. 3287–3295, DOI: 10.1007/s11771-015-2868-0.

Kakandikar, G. ; Nandedkar, V., 2012. "Some Studies on Forming Optimization with Genetic Algorithm". *International Journal of Optimization and Control: Theories & Applications*, 2 (2), pp. 105-112.

Kalpakjian, S., 2008. *Manufacturing Processes for Engineering Materials*. 5th ed. • Schmid© Ed., ISBN 0-13-227271-7.

Kalpakjian, S. ; Schmid, S., 2010. *Manufactura, Ingeniería y tecnología*. La Habana: Felix-Varela.

Kaya, S.; Altan, T.; Groche, P. ; Klöpsch, C., 2008. "Determination of the flow stress of magnesium AZ31-O sheet at elevated temperatures using the hydraulic bulge test ". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 48, pp. 550-557.

Kruglov, A.; Enikeev, F. ; Lutfullin, R., 2002. "Superplastic forming of a spherical shell out a welded envelope". *Materials Science and Engineering*, 323, pp. 416-426.

Lajarin, S. ; Magalhães, J., 2011. "Numerical and experimental true strain assessment on sheet forming using mapped versus free meshing". *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 49 (2), pp. 323-330.

Ledoux, Y.; Sébastien, P. ; Samper, S., 2010. "Optimization method for stamping tools under reliability constraints using genetic algorithms and finite element simulations".

*Journal of Materials Processing Technology* 210, pp. 474–486, DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2009.10.010.

Lindeberg, F., 2012. *Sheet metal forming simulations with FEM*. Master thesis. Umeå: Umeå University.

Lora, F.; Boff, U.; Yurgel, C.; Folle, L. ; Schaeffer, L., 2013. “Validation of the computer simulation process applied to the incremental forming process for the evaluation of strain paths”. *Key Engineering Materials*, 554-557 (2453-2461), DOI: doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.554-557.2453.

Mamani, J., 2011. *Introducción a la simulación de procesos*. primera ed. Ed.

Martinez, V., 2000. *Simulación de proceso en Ingeniería Química*. primera ed Ed. México.

Narayanan, R., 2010. “Expert System Applications in Sheet Metal Forming”. En: Vizureanu, P. (ed.), *en Expert Systems*. pp. 238.

Nasser, A.; Yadav, A.; Pathak, P. ; Altan, T., 2010. “Determination of the flow stress of five AHSS sheet materials (DP 600, DP 780, DP 780-CR, DP 780-HY and TRIP 780) using the uniaxial tensile and the biaxial Viscous Pressure Bulge (VPB) tests”. *Journal of Materials Processing Technology*, pp. 429–436, DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2009.10.003.

NC-1442:2012, *Instrucciones técnicas de embutido de la tapa y el fondo del cilindro de gas de 10 kg*. Norma cubana NC EN 1442:2012, COVENIN 649:1997.

Ngaile, G. ; Altan, T., 1999. *Model Test to Evaluate Lubricants and Die coatings in Tube Hydroforming*.

Ngaile, G.; Gutscher, G. ; Altan, T., 2000. “Evaluation of Friction and Formability in Stamping: Practical Methods for Production”. *Presented at the Sheet Forming Conference*. Detroit, pp. 26.

Patel, H., 2008. “Optimization of an aerospace component die design using metal forming simulation capability of hyper-form”. *Hyper-works Technology conference(HTC)*. pp. 1-8.

Poláková, I. ; Zemko, M., 2012. “FEM simulation of strips cold rolling in DEFORM 3D”. *Recent trends in structural materials*. Plzen, Czech Republic, EU, vol. 11, pp. 21-22.

Ranganath, J. ; Hosalli, R., 2012. “Finite Element Modeling For Simulation of a Rectangular Tank with an Integral Flange for Automotive Application”. *International Journal of Engineering Research & Technology*, 1 (5).

Ranta, A., 1979. “Use of the Hydraulic Bulge Test in Biaxial Tensile Testing”. *International Journal of Mechanical Sciences*, 21 (8), pp. 457-465, DOI: 10.1016/0020-7403(79)90008-0.

- Rossi, M., 1979. *Estampado en frio de chapas*. novena ed Ed. Dossat s.a.
- Sala, J., 2008. *Caracterización y comparación de las propiedades mecánicas de dos chapas de acero avanzado de alta resistencia (AHSS): TRIP800 Y DP800*. Proyecto final de carrera. Barcelona.
- Schaeffer, L., 2004. *Conformação de Chapas Metálicas*. Porto Alegre. Rio Grande do Sul. Brazil: Imprensa Livre Editora Ltda.
- Slota, J. ; Spišák, E., 2008. “Determination of Flow Stress by the Hydraulic Bulge Test”. *Metallurgical*, 47.
- Swift, H., 1948. “Plastic bending under tension”. *Engineering*, 166, pp. 333-357.
- Tang, S., 1980. “Computer prediction of deformed shape of draw blank during the binder-wrap stage”. *Jornal of Applied Metal Working*, 1, pp. 22.
- Tang, S., 1985. “Verificaiton and Application of Binder-wrap Analysis”. *Symposium on computer modeling of sheet metal forming*. Michigan, pp. 193.
- Tang, S.; Chu, E. ; Samanta, S., 1982. “Finite element prediction of the deformed shape of an automotive body panel during preformed stage”. *En NUMIFORM'82*. Pineridge Press, Swansea, pp. 629-640.
- Tarifa, E.E., 1998. “Teoría de Modelos y Simulación ”.
- Toh, C.H. ; Kobayashi, S., 1983. “Finite Element Process Modeling of Sheet Metal Forming of General Shapes”. *En Grundlagen der Umformtechnik I*. Berlin, Heidelberg, vol. 74, pp. 39-56.
- Tsai, Y. ; You, C., 2010. “Knowledge-based Engineering for Process Planning and Die Design for Automotive Panels”. *Computer-Aided Design & Applications*, 7 (1), pp. 75-87.
- Wang, N. ; Budiansky, B., 1978. “Analysis of sheet metal forming by finite element method”. *Jornal of Applied Mechanics*, 45, pp. 73.
- Wifi, A., 1976. “ An incremental complete solution of the stretch-forming and deep-drawing of a circular blank using a hemispherical punch”. *International Journal of Mechanical Sciences.*, 18, pp. 23-31, DOI: doi: 10.1016/0020-7403(76)90071-0.
- Woo, D., 1964. “Analysis of cup drawing process”. *Journal of Mechanical Engineering Science*, 6, pp. 116.
- Wu, B.; Huang, X. ; Gu, Z., 2005. “The research on drawing process of heater head”. *Journal of Plasticity Engineering*, 2, pp. 26-29.

Xie, Y.; Yu, H. ; CHEN Jun, Y.X.-g., 2006. "Recent advances of sheet metal forming optimization based on meta modeling." *Journal of Plasticity Engineering*, 13 (2), pp. 20-24.

## **ANEXOS**

### **Anexo 1. Especificaciones Técnicas de la Prensa Hidráulica YC 28-200/300.**

NO	PARAMETROS	UNIDAD	ESPECIFICACIONES
1	Fuerza	KN	3000

2	Fuerza del punzón		KN	2000
3	Fuerza de pisado		KN	250x4
4	Máxima presión del fluido de trabajo		MPa	25
5	Máximo recorrido del punzón		mm	700
6	Máximo recorrido del pisador		mm	400
7	Luz		mm	1400
8	Distancia entre la mesa de trabajo y el pisador.		mm	900
9	Velocidad de deslizami	Velocidad de bajada	mm/s	150
		Velocidad de pisado	mm/s	12^28
		Velocidad de retroceso	mm/s	150
10	Dimensiones de la mesa de trabajo	De izquierda a derecha	mm	1000
		De adelante hacia atrás	mm	900
11	Columna central	De izquierda a derecha	mm	1120
		De adelante hacia atrás	mm	720
12	Potencia del motor	K		2x22
13	Peso del cuerpo	K		12000
14	Peso total	K		13500