



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA**

**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

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

**TEMA: CONFORMADO INCREMENTAL APLICADO AL DISEÑO Y  
DESARROLLO DE PROTOTIPOS**

**AUTOR:**

**PÉREZ AGUILAR, MICHELLE ESTEFANÍA**

**DIRECTOR:**

**ING. SEGURA SANGUCHO, LUIS JAVIER**

**SANGOLQUÍ – ECUADOR**

**2018**



**ESPE**  
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS  
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**CERTIFICACIÓN**

Certifico que el trabajo de titulación, “**CONFORMADO INCREMENTAL APLICADO AL DISEÑO Y DESARROLLO DE PROTOTIPOS**” fue realizado por la señorita **PÉREZ AGUILAR, MICHELLE ESTEFANÍA**, el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Sangolquí, 02 de marzo de 2018

-----  
Ing. Luis Segura

DIRECTOR



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y  
MECÁNICA  
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**AUTORIA DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **PÉREZ AGUILAR, MICHELLE ESTEFANÍA**, declaro que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“CONFORMADO INCREMENTAL APLICADO AL DISEÑO Y DESARROLLO DE PROTOTIPOS”**, es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Consecuentemente el contenido de la investigación mencionada es veraz.

Sangolquí, 02 de marzo de 2018

Una firma manuscrita en tinta azul que parece decir 'Michelle Pérez'.

-----  
Michelle Pérez

CC: 172446229-4



## DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA

### CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

#### AUTORIZACIÓN

Yo, **PÉREZ AGUILAR, MICHELLE ESTEFANÍA**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: “**CONFORMADO INCREMENTAL APLICADO AL DISEÑO Y DESARROLLO DE PROTOTIPOS**” en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de mi responsabilidad.

Sangolquí, 02 de marzo de 2018

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Michelle Pérez', written over a horizontal line.

-----  
Michelle Pérez

CC: 172446229-4

## **DEDICATORIA**

El presente proyecto de titulación está dedicado a mi familia por el amor y apoyo incondicional que me han brindado durante todo este tiempo, por impulsarme a seguir adelante y por darme ese ejemplo de perseverancia y constancia, a mis profesores y mentores que me han ayudado a crecer y culminar esta etapa de mi vida con éxito.

**Michelle Pérez**

## **AGRADECIMIENTO**

Finalmente no me queda nada más que agradecer con todo el corazón a las personas que han formado parte de esta gran etapa de mi vida y a aquellas personas que han contribuido a alcanzar un logro más en mi desarrollo personal. Agradezco infinitamente a mi familia, ya que ellos han sido el pilar fundamental para continuar y han estado pendientes de mí apoyándome siempre. Agradezco a mis amigos los cuales estuvieron conmigo en los malos y buenos momentos, y también me ayudaron cuando necesitaba una mano. A a mis profesores y a la universidad por formarme como profesional competente, en especial un agradecimiento al Ing. Luis Segura, director de este proyecto, por su paciencia y guía. Gracias a todos.

**Michelle Pérez**

## ÍNDICE DE CONTENIDO

1. Tabla de Contenido	
CERTIFICACIÓN.....	i
AUTORIA DE RESPONSABILIDAD .....	ii
AUTORIZACIÓN .....	iii
DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO .....	v
ÍNDICE DE CONTENIDO .....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS .....	ix
ÍNDICE DE TABLAS.....	xii
RESUMEN .....	xiii
ABSTRACT .....	xiv
CAPÍTULO I.....	1
1 INTRODUCCION .....	1
1.1. Introducción .....	1
1.2. Antecedentes .....	1
1.3. Definición del Proyecto .....	3
1.4. Objetivos.....	4
1.4.1. Objetivo general .....	4
1.4.2. Objetivos específicos.....	4
1.5. Justificación e Importancia .....	5
1.6. Alcance .....	6
CAPÍTULO II.....	7
2. MARCO TEÓRICO .....	7
2.1. Procesos de formación de chapa metálica .....	7
2.1.1. Plegado o doblado .....	7

2.1.2.	Estirado.....	8
2.1.3.	Embutición.....	9
2.1.4.	Estampado .....	9
2.2.	Conformado Incremental .....	10
2.2.1.	Proceso.....	10
2.2.2.	Características.....	12
2.2.3.	Ventajas y Desventajas .....	14
2.2.4.	Aplicaciones .....	15
2.3.	Conformado Incremental Monopunto.....	17
2.3.1.	Introducción general SPIF.....	18
2.3.2.	Parámetros importantes de formación .....	18
2.3.3.	Herramientas y Utillaje.....	21
2.3.4.	Equipo para conformado incremental.....	22
2.3.5.	Aplicaciones del proceso de conformado incremental .....	23
2.3.6.	Antecedentes teóricos .....	24
2.3.7.	Formación de curvas límite .....	25
2.3.8.	Límites de conformado .....	27
2.3.9.	Técnicas de corrección .....	30
CAPÍTULO III .....		32
3.	DISEÑO DE HERRAMIENTA DE CONFORMADO Y UTILLAJE RIGIDO .....	32
3.1.	Diseño de Herramienta de conformando .....	32
3.1.1.	Consideraciones generales.....	32
3.1.2.	Consideraciones geométricas .....	32
3.1.3.	Consideraciones dinámicas.....	35
3.1.4.	Material de fabricación de la herramienta .....	39
3.1.5.	Giro de la herramienta .....	40
3.1.6.	Dimensionamiento final de la herramienta.....	43



3.2 Diseño del soporte o utillaje rígido (BlankHolder) .....	44
3.2. Construcción .....	54
CAPÍTULO IV .....	58
4. DISEÑO Y DESARROLLO DE PROTOTIPOS .....	58
4.1. Plan de experimentos .....	58
4.2. Desarrollo del diseño CAD / CAM.....	60
4.2.1. Características de diseño del Prototipo 1.....	61
4.2.3. Características de diseño del Prototipo 2.....	63
4.3. Parámetros a evaluar .....	64
CAPÍTULO V .....	66
5. ENSAYOS EXPERIMENTALES .....	66
5.1. Construcción de los prototipos seleccionados .....	66
5.2. Costos asociados al desarrollo del proyecto .....	82
CAPITULO VI.....	84
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	84
6.1. Conclusiones .....	84
6.2. Recomendaciones .....	86
BIBLIOGRAFIA .....	88

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.</i> Esquema del SPIF .....	11
<i>Figura 2.</i> Utillaje de sujeción del IF.....	12
<i>Figura 3.</i> Tipos de conformado incremental .....	13
<i>Figura 4.</i> Principales configuraciones del conformado incremental.....	14
<i>Figura 5.</i> Proceso de Plegado.....	8
<i>Figura 6.</i> Proceso de estirado de barras, varillas o alambres .....	8
<i>Figura 7.</i> Proceso de embutición.....	9
<i>Figura 8.</i> Proceso de Estampado.....	10
<i>Figura 9.</i> Utillaje de sujeción del IF.....	22
<i>Figura 10.</i> Máquina especializada para SPIF.....	23
<i>Figura 11.</i> Diferentes estados de las deformaciones principales .....	28
<i>Figura 12.</i> Curva representativa de los diferentes mecanismos de fallo.....	29
<i>Figura 13.</i> Diagramas límite de conformado para materiales dúctiles y poco dúctiles .....	30
<i>Figura 14.</i> Relaciones utilizadas de topología de gráficos basada en características .....	31
<i>Figura 15.</i> Fuerza en ensayo con herramienta de 10 mm .....	37
<i>Figura 16.</i> Fuerzas medidas para SPIF de una chapa de Aluminio de 1,21 mm de espesor....	38
<i>Figura 17.</i> Contacto de la herramienta con la lamina .....	41
<i>Figura 18.</i> Dimensiones de Herramienta para SPIF .....	43
<i>Figura 19.</i> Embutido al aire. ....	45
<i>Figura 20.</i> Fuerzas que actúan sobre el embutido y consideraciones geométricas.....	45

<i>Figura 21.</i> Fuerzas que actúan en uniones apernadas. ....	49
<i>Figura 22.</i> Tensiones permitidas, en uniones roscadas. ....	51
<i>Figura 23.</i> Vista de los elementos del BlankHolder. ....	52
<i>Figura 24.</i> Vista del elemento Brida superior del BlankHolder. ....	53
<i>Figura 25.</i> Vista del elemento Base inferior del BlankHolder. ....	54
<i>Figura 26.</i> Fabricación del elemento Brida del BlankHolder. ....	55
<i>Figura 27.</i> Fabricación del elemento Base inferior del BlankHolder. ....	55
<i>Figura 28.</i> Fabricación del elemento Base pilar del BlankHolder. ....	56
<i>Figura 29.</i> Perforación del elemento Base pilar del BlankHolder. ....	56
<i>Figura 30.</i> Vista del Utillaje BlankHolder ya armado. ....	57
<i>Figura 31.</i> CNC Fresadora FADAL VCM 3016. ....	59
<i>Figura 32.</i> Configuración de herramienta de deformación en el Software CAD/CAM .....	61
<i>Figura 33.</i> Prototipo 1 de 65° .....	62
<i>Figura 34.</i> Modelado y simulación en programa CAD/CAM del prototipo 1 .....	63
<i>Figura 35.</i> Prototipo 2 a) ángulo de 70°, b) ángulo de 50° .....	64
<i>Figura 36.</i> Modelado y simulación en programa CAD/CAM del prototipo 2 .....	64
<i>Figura 37.</i> Diagrama del proceso de conformado .....	68
<i>Figura 38.</i> Preparación del equipo CNC para a conformación de la placa .....	70
<i>Figura 39.</i> Automatización del equipo CNC fresadora FADAL VMC 3016 .....	70
<i>Figura 40.</i> Ensayo 1 vista superior de la lámina conformada .....	71
<i>Figura 41.</i> Ensayo 1 vista isométrica de la lámina conformada .....	72
<i>Figura 42.</i> Ensayo 1 vista lateral de la lámina conformada .....	72

<i>Figura 43.</i> Ensayo 2 vista superior de la lámina conformada .....	73
<i>Figura 44.</i> Ensayo 2 vista isométrica de la lámina conformada .....	73
<i>Figura 45.</i> Ensayo 2 vista lateral de la lámina conformada .....	74
<i>Figura 46.</i> Ensayo 3 vista superior de la lámina conformada .....	75
<i>Figura 47.</i> Ensayo 3 vista isométrica de la lámina conformada .....	75
<i>Figura 48.</i> Ensayo 3 vista lateral de la lámina conformada .....	76
<i>Figura 49.</i> Ensayo 4 vista superior de la lámina conformada .....	76
<i>Figura 50.</i> Ensayo 4 vista isométrica de la lámina conformada .....	77
<i>Figura 51.</i> Ensayo 4 vista lateral de la lámina conformada .....	77
<i>Figura 52.</i> Ensayo 5 vista superior de la lámina conformada .....	78
<i>Figura 53.</i> Ensayo 5 vista isométrica de la lámina conformada .....	78
<i>Figura 54.</i> Ensayo 5 vista lateral de la lámina conformada .....	79
<i>Figura 55.</i> Ensayo 6 vista superior de la lámina conformada .....	79
<i>Figura 56.</i> Ensayo 6 vista isométrica de la lámina conformada .....	80
<i>Figura 57.</i> Ensayo 6 vista lateral de la lámina conformada .....	80

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Relación entre rugosidad y grados según norma DIN4769.....	55
Tabla 2. Características de la Herramienta para SPIF.....	44
Tabla 3. Descripción de elementos del BlankHolder.....	52
Tabla 4. Características de la CNC Fresadora FADAL VCM 3016.....	59
Tabla 5. Variables presentes en el proceso de construcción.....	67
Tabla 6. Resultados.....	81
Tabla 7. Costos asociados al desarrollo de la investigación.....	83

## **RESUMEN**

Hoy en día se tienen varios sectores industriales que utilizan diferentes procesos de conformado para producir componentes de láminas o chapas metálicas, sean estos de geometrías simples o a su vez muy complejas. Muchos de los procesos tradicionales utilizan matrices y son apropiados para producción en alta escala, pero justamente, debido a la matricería, estos no son rentables en el caso de series cortas o prototipos. Este trabajo por lo tanto estudia el conformado incremental como técnica de prototipado rápido, mostrando de esta forma que este proceso inteligente y flexible, es una alternativa válida a los métodos de conformado que tradicionalmente se conocen. El trabajo, conformado incremental aplicado al diseño y desarrollo de prototipos, trata sobre la aplicación de un modelo numérico de proceso de conformado incremental en chapas de aluminio 7075-0 mediante el uso de un equipo CNC se aplicará la conformación con la ayuda de un software CAM de carácter robusto, de gran aplicación industrial, el cual nos ayudará a simular el proceso y obtener los códigos para usarlos en el equipo CNC. El proyecto está estructurado centrándose en la creación de prototipos con la técnica de conformado incremental, con la finalidad de dar a conocer este proceso como una alternativa a los otros procesos existentes. Ya que este es el primer trabajo realizado en nuestro entorno sobre el tema, lo que busca es ser una pauta para a futuro tener más trabajos e información sobre el tema.

### **PALABRAS CLAVES**

- **CONTROL NUMERICO COMPUTARIZADO CNC**
- **CONFORMACION INCREMENTAL MONO PUNTO SPIF**
- **PROTOTIPO**

## **ABSTRACT**

Today, there are several industrial sectors that use different forming processes to produce sheet metal components, whether they are simple geometries or very complex geometries. Many of the traditional processes use matrices and are suitable for high-scale production, but precisely, due to the die-cutting, they are not profitable in the case of short series or prototypes. This work therefore studies the incremental conformation as a rapid prototyping technique, showing in this way that this intelligent and flexible process is a valid alternative to the conforming methods that are traditionally known. The work, formed incremental applied to the design and development of prototypes, deals with the application of a numerical model of incremental forming process in aluminum sheets 7075-0 through the use of a CNC equipment, the conformation will be applied with the help of a software CAM of robust character, of great industrial application, which will help us to simulate the process and obtain the codes to use them in the CNC equipment. The project is structured focusing on the creation of prototypes with the incremental forming technique, in order to make this process known as an alternative to the other existing processes. Since this is the first work done in our environment on the subject, what you are looking for is to be the guideline in the future to have more work and information on the subject.

### **KEYWORDS**

- **COMPUTERIZED NUMERIC CONTROL CNC**
- **SINGLE POINT INCREMENTAL FORMING**
- **PROTOTYPE.**

# CAPÍTULO I

## 1 INTRODUCCION

### 1.1. Introducción

Tradicionalmente, los componentes que se obtienen a partir de chapa metálica se producían mediante técnicas de estampación o embutición, que utilizan prensas y matrices. Pero estas tecnologías sólo son rentables para la producción de grandes series de piezas y económicamente inviables para la fabricación de series cortas o medias. Gracias a la tecnología de conformado incremental, se podrá dar una solución a las empresas que producen series cortas y se ven obligadas en la actualidad a elaborar sus productos en otros materiales o con otros diseños para evitar los problemas asociados a las tecnologías tradicionales de estampado.

### 1.2. Antecedentes

Los procesos de conformado convencionales tales como el estampado son usados en la producción en serie, ya que requieren una alta inversión en equipos y herramientas, además de un alto coste energético, por ello se trata de una tecnología de fabricación caracterizada por su escasa flexibilidad. (Hariharan K, 2009).

El conformado incremental (Incremental Forming, IF), particularmente el conformado incremental mono punto (Single Point Incremental Forming, SPIF) es un proceso novedoso



caracterizado por un alto potencial en cuanto a rentabilidad económica en aplicaciones de prototipado rápido y en pequeña producción en serie, destinado para abarcar el espacio existente en la fabricación rápida. También, además del aspecto económico, dicho proceso mejora la conformabilidad del material debido a ciertas propiedades que lo caracterizan.

En los últimos años se han realizado estudios sobre esta nueva tecnología, como lo son: “Single point incremental forming: A study of Forming Parameters, Forming limits and Part accuracy of Aluminium 2024, 6061 and 7475 alloys” realizado por KTH Royal Institute of Technology, “Análisis experimental de deformaciones límites en chapas de acero AISI 304 en conformado incremental” realizado en la Universidad de Sevilla, “Análisis numérico de procesos de conformado incremental mono punto en chapas de aluminio” realizado también por la Universidad de Sevilla. Como se puede observar, estos y otros proyectos que se han realizado con respecto al conformado incremental, han sido realizados fuera del país. Es así que tanto en la universidad de las fuerzas armadas, como en el país en general no se han realizado investigaciones de este proceso, por lo cual se puede decir que es novedoso y de gran aporte este tema. En consecuencia a todas estas ventajas, se pretende estudiar en este proyecto al conformado incremental como técnica de prototipado rápido específicamente el conformado incremental mono punto (Single Point Incremental Forming, SPIF) sobre láminas de aluminio 70750, ya que este estudio puede ser un gran aporte para futuras investigaciones y métodos de manufactura a realizarse.

### **1.3. Definición del Proyecto**

El proyecto de grado busca analizar, y conocer al conformado incremental mono punto SPIF como una nueva técnica de prototipado rápido. Realizando para esto una investigación y análisis del proceso sobre chapas de aluminio 7075-0, además realizando pruebas y prototipos. Para lo cual se deberá diseñar y fabricar el utillaje pertinente junto con la herramienta necesaria en este proceso se contara con un equipo CNC maquina vertical FADAL VMC 3016 en el cual se realizarán los procesos de conformación de chapa, y del cual se tomaran viables fijas necesarias para el diseño de el utillaje.

El conformado incremental mono punto SPIF es una tecnología de transformación de chapa que ofrece una solución al problema de plazos y costos altos en aplicaciones de prototipado rápido y en pequeñas producciones en serie. Su capacidad para fabricar piezas de geometría compleja unida al bajo coste en equipamiento permitiría fabricar prototipos en chapa de forma rápida y económica agilizando así la etapa de diseño y garantizando la validación del diseño final. Incluso podría ser una solución para fabricar pieza final o simplificar los troqueles en los casos de las series de menor tirada.

Tradicionalmente, los componentes que se obtienen a partir de chapa metálica se producían mediante técnicas de estampado o embutición, que utilizan prensas y matrices. Así, se obtiene una gran productividad y un tiempo de producción corto. Pero estas tecnologías sólo son rentables para la producción de grandes series de piezas y económicamente inviábiles para la fabricación de series cortas o medias.

## **1.4. Objetivos**

### **1.4.1. Objetivo general**

Diseñar y Desarrollar dos prototipos usando el proceso de conformado incremental.

### **1.4.2. Objetivos específicos**

- Estudiar las principales características del proceso de conformado incremental mono punto SPIF, sus aplicaciones, ventajas y limitaciones.
- Diseñar y seleccionar las herramientas y utillajes necesarios para la aplicación del proceso de conformado incremental mono punto SPIF sobre la chapa para obtener los prototipos seleccionados.
- Seleccionar y construir dos prototipos aplicando la tecnología de conformado incremental mono punto (SPIF).
- Determinar los parámetros más influyentes y comunes dentro del proceso de conformado incremental mono punto que tienen repercusión en la geometría y dimensiones finales de los prototipos seleccionados, teniendo como premisa la utilización del equipo CNC FADAL VCM 3016 del laboratorio de conformado de la ESPE.
- Analizar experimental y visualmente la conformabilidad sobre chapas metálicas de aluminio 7075-0 en dos prototipos utilizando el proceso de conformado incremental mono punto.
- Emitir conclusiones sobre el estudio y análisis experimental realizado sobre el proceso de conformado incremental mono punto (SPIF).

### **1.5. Justificación e Importancia**

Gracias a la tecnología de conformado incremental, se puede dar una solución a las empresas que producen series cortas y se ven obligadas en la actualidad a elaborar sus productos en otros materiales o con otros diseños para evitar los problemas asociados a las tecnologías tradicionales de estampado.

Actualmente, diversos sectores industriales como el aeronáutico y automotriz, utilizan procesos de conformado para producir componentes de geometrías complejas a partir de chapas metálicas. Los procesos tradicionales que utilizan matrices son apropiados para la producción de grandes volúmenes de piezas, pero no son rentables en el caso de series reducidas como por ejemplo en prototipos. El conformado incremental es un proceso diferente, inteligente y flexible, que se presenta como una alternativa a los métodos de conformado tradicionales. Este proceso se basa en metodologías de Fabricación Rápida (Rapid Manufacturing) que es un conjunto de técnicas, tecnologías y métodos que permiten la fabricación rápida, flexible y competitiva de piezas, ya sean prototipos, moldes, matrices o productos finales, directamente a partir de información digital.

Por tanto esta técnica de conformado incremental permite reducir los costos de utillaje, ya que solo requiere de una herramienta simple de soporte. Se adecua perfectamente a la fabricación de prototipos y series cortas por los bajos costos de producción, pero el tiempo necesario para conformar una pieza, típicamente varias horas, lo hace inviable para series más largas.

## **1.6. Alcance**

Con la evaluación experimental de esta técnica de prototipado de conformado incremental mono punto, se pretende obtener piezas en aluminio y una vez evaluado su desempeño emitir recomendaciones con las lecciones aprendidas para así realizar las mejoras necesarias y continuas en este proceso y poder así introducir este tipo de tecnología en la industria en un futuro no muy lejano. Por lo tanto en este proyecto se evaluará experimentalmente el conformado incremental, centrándose específicamente en el conformado incremental mono punto. Se realizará primero el diseño y selección del herramental y utillaje necesarios para esta técnica. A continuación se realizará la selección y diseño de los prototipos mediante técnicas CAD/CAM. Siguiendo se procederá a la fabricación de los prototipos mediante conformado incremental mono punto, una vez realizados estos, se hará la verificación de parámetros fundamentales como son la geometría, trayectoria de la herramienta, acabado superficial y dimensiones finales, para finalizar dando las conclusiones y recomendaciones sobre el estudio.

## **CAPÍTULO II**

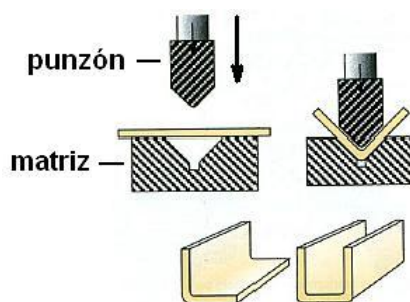
### **2. MARCO TEÓRICO**

#### **2.1. Procesos de formación de chapa metálica**

Según el libro Tecnología Mecánica: Metrología y procesos de conformado de metales sin arranque de viruta, existen varios tipos de conformado de chapa. A continuación se presentan algunos de los procesos de formación de chapa más comúnmente utilizados en la industria.

##### **2.1.1. Plegado o doblado**

El plegado o doblado de metales es un proceso de conformado en el que no existe separación de material realizando una deformación plástica para dar forma alrededor de un ángulo determinado a una chapa. Consiste en doblar una chapa, bien a lo largo de una línea recta o bien a lo largo de una directriz curva. En este proceso la deformación plástica se localiza en una zona pequeña (la región a flexión), permaneciendo el resto del material sin deformaciones. Hay que tener en cuenta en efecto de la recuperación elástica, que puede ser apreciable.

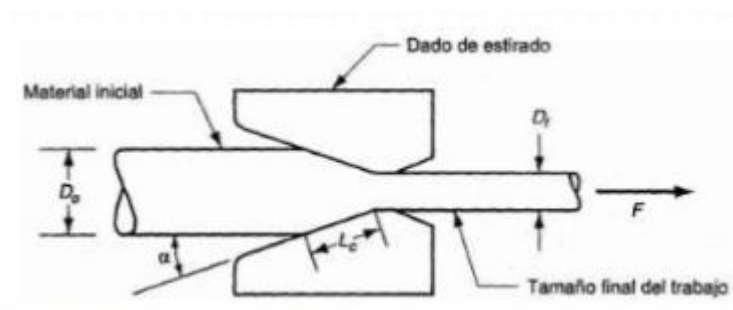


**Figura 1:** Proceso de Plegado

Fuente: Suntaxi C. (2013)

### 2.1.2. Estirado

Proceso de reducción de secciones, de un sólido, que se lleva a cabo a través de una sola operación. Es un proceso de conformado por deformación plástica en el que se estira una barra o varilla de metal con el objetivo de reducir su sección. Para reducir la sección de la pieza, se utiliza una matriz de un material metálico muy duro insertado en un bloque de acero. El proceso de estirado, como norma general, se realiza como una operación de deformación plástica en frío y para secciones redondas.

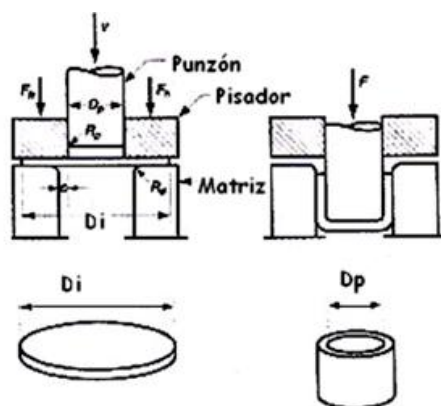


**Figura 2:** Proceso de estirado de barras, varillas o alambres

Fuente: Fuerzas del embutido. Ingeniería mecánica-tecnología mecánica II.

### 2.1.3. Embutición

La embutición es un procedimiento para el conformado de piezas no desarrollables, que requiere generalmente el empleo de máquinas (prensas) y de utillajes (matrices). Consiste en deformar la chapa de forma que la mayor deformación se produzca en las paredes de las piezas embutidas. El material debe fluir por el hueco de la matriz con facilidad. La embutición se usa para conseguir piezas más profundas



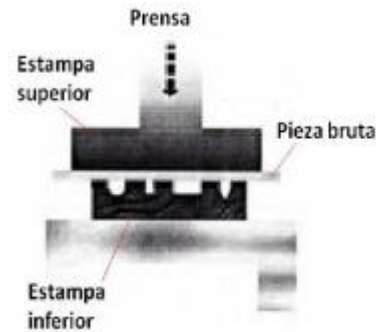
**Figura 3:** Proceso de embutición

Fuente: Fuerzas del embutido. Ingeniería mecánica-tecnología mecánica II.

### 2.1.4. Estampado

El estampado es un forjado mecánico en el que se emplea un molde o estampa para conformar la pieza. La estampa se compone de dos partes (estampa y contra estampa) que se acoplan entre sí. Al diseñar las estampas hay que aumentar sus dimensiones en previsión de la posterior contracción del material que se produce.





**Figura 4:** Proceso de Estampado

Fuente: Fuerzas del embutido. Ingeniería mecánica-tecnología mecánica II.

## 2.2. Conformado Incremental

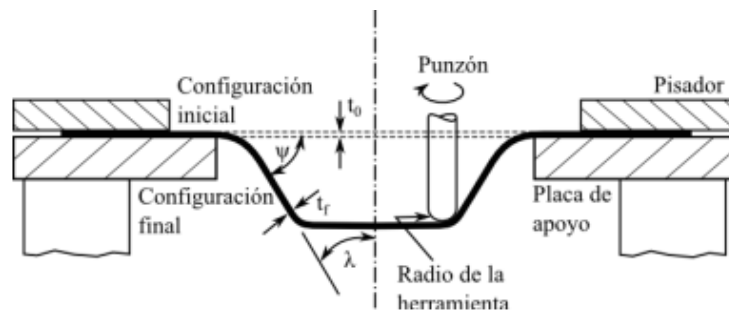
El conformado incremental se caracteriza dentro de los procesos de conformado como una tecnología capaz de elaborar piezas con geometría de elevada complejidad. Con su utilización se logra obtener todo tipo de geometrías típicas de embutición, aunque el proceso difiere de este. La fabricación de piezas de chapa se consigue a través de generar sucesivas y pequeñas deformaciones sobre la chapa con una herramienta o punzón semiesférico, hasta que la suma de estas pequeñas deformaciones configure la forma final deseada. Esto se consigue haciendo que la herramienta siga un recorrido programado mediante el uso de equipos y técnicas de control numérico.

### 2.2.1. Proceso

El proceso de deformación incremental mono punto SPIF consiste en deformar la chapa mediante una herramienta con forma esférica. Esta, sigue las trayectorias programadas

previamente por un sistema CAM. El conformado se realiza de manera local con una cabeza semiesférica que está en contacto con la chapa, con lo cual la chapa es deformada plásticamente solo alrededor del área de contacto. La geometría del producto se logra incrementalmente cuando la herramienta sigue una trayectoria sobre la chapa; por esta razón la trayectoria de la herramienta es una operación crítica en la exactitud de la pieza final.

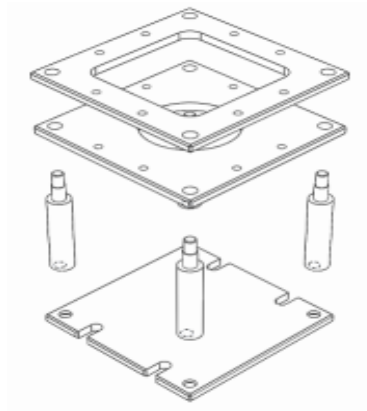
Dicho proceso se inicia a partir de un fichero CAD 3D con la geometría de la pieza. El proceso está basado en el principio de conformado por capas, donde el modelo está dividido en secciones horizontales. La trayectoria de la herramienta CNC se prepara utilizando los contornos de estas secciones. Estas trayectorias se repiten a diferentes profundidades, siendo la suma total de trayectorias la que permite obtener la geometría deseada.



**Figura 5:** Esquema del SPIF

Fuente: Suntaxi C. (2013)

Se necesita en este proceso un soporte o utillaje rígido (blankholder), como se muestra en la figura 6, que sirve para sujetar los extremos de la chapa o lámina firmemente y evitar los movimientos relativos de esta.



**Figura 6:** Utillaje de sujeción del IF

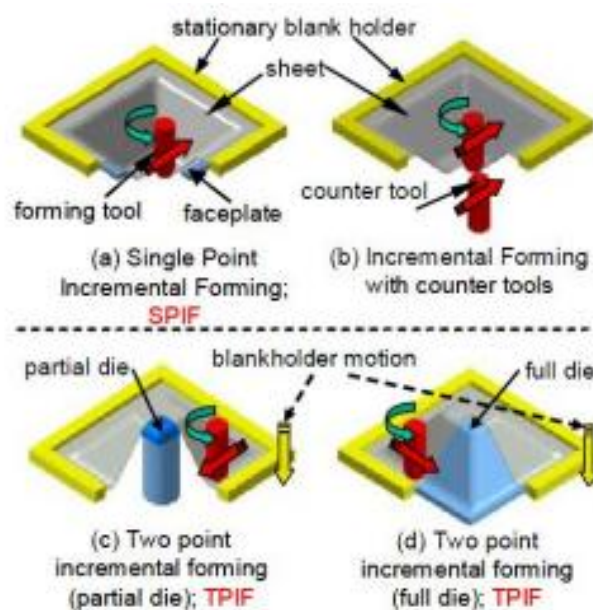
Fuente: Suntaxi C. (2013)

### 2.2.2. Características

El conformado incremental mono punto SPIF se caracteriza dentro de los procesos de conformado como una tecnología capaz de elaborar geometrías de piezas de elevada complejidad. Con su utilización se logra la obtención de todo tipo de geometrías típicas de embutición. La fabricación de piezas de chapa metálica se consigue a través de la generación de sucesivas y pequeñas deformaciones sobre la chapa, hasta que la suma de las pequeñas deformaciones configure la forma final deseada, de la pieza. El conformado incremental de láminas metálicas es un proceso derivado de las tecnologías existentes en el área de fabricación rápida y en comparación con procesos de conformado tradicionales, esta técnica permite reducir drásticamente el coste de herramientas específicas (matrices por ejemplo) así como costos asociados a la propia fabricación de las piezas metálicas.

Una característica del SPIF es que la herramienta se desplaza mientras que deforma la chapa. Existen dos casos: (1) el husillo que contiene la herramienta se va desplazando sin

rotación, (2) el husillo gira de modo que la herramienta de formación se desplaza sobre la superficie de la lámina, tal como se muestra en la figura 7. El control de estas variables velocidad de rotación y velocidad de desplazamiento controlan el calentamiento de la chapa durante la deformación. La herramienta de formación tiene una forma semiesférica, que es presionada contra el material a fin de causar la deformación.

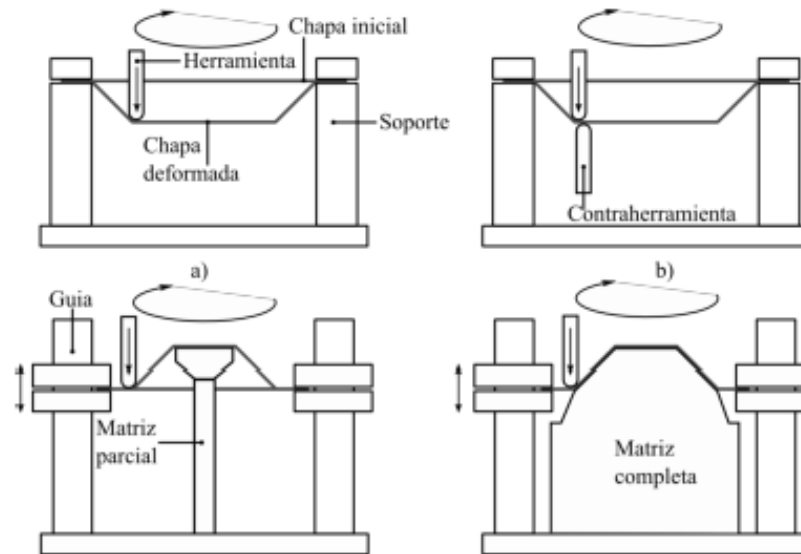


**Figura 7:** Tipos de conformado incremental

Fuente: Jeswiet et al. (2005)

Se han explorado muchas variaciones de conformado incremental, como se muestra en la figura 8, incluyendo el uso de un chorro de agua, rodillos o herramientas de martilleo con vibración, pero aun así la herramienta más ampliamente utilizada es un indentador sólido semiesférico. Las dos configuraciones más comunes son: Single-Point incremental Forming (SPIF) y Two-Point Incremental Forming (TPIF). En el SPIF una chapa sujeta alrededor de sus bordes es formada con una sola herramienta, mientras que en TPIF se requiere de una matriz

parcial o total o una segunda herramienta móvil que siga la trayectoria de la herramienta principal. En ambos casos las trayectorias de las herramientas más comunes son contornos o espirales de aumento de la profundidad, siguiendo el perfil del producto.



**Figura 8:** Principales configuraciones del conformado incremental

Fuente: Suntaxi C. (2013)

### 2.2.3. Ventajas y Desventajas

De acuerdo con Filice & Micari en el libro *Analysis of Material Formability in Incremental Forming*, se tienen en esta técnica como en todas las demás, ventajas y desventajas y a continuación son nombradas las más importantes.

Las ventajas de SPIF son las siguientes:

- Producción de piezas directamente desde un archivo CAD
- No hay necesidad de una matriz positiva o negativa

- Los cambios de diseño pueden ser fácil y rápidamente realizados
- Aumento de la capacidad de conformación material
- Se puede realizar en una máquina convencional de control numérico computarizado CNC
- Debido a la naturaleza incremental del proceso, las fuerzas son pequeñas.
- Las dimensiones de las partes sólo están limitadas por la máquina herramienta.
- Se puede lograr un buen acabado superficial.

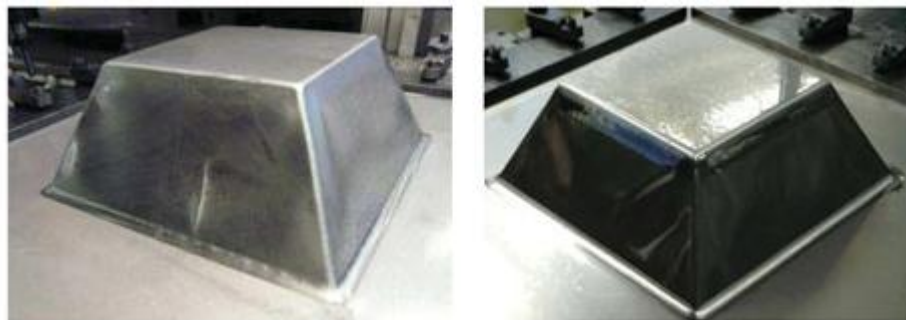
En cuanto a las desventajas se presentan las siguientes:

- Tiempo más largo de procesamiento en comparación con la embutición profunda convencional.
- Se limita a pequeños lotes de tamaño de producción.
- La formación de ángulos rectos debe ser alcanzada por estrategias de varias fases.
- Geometría menos precisión, en particular en los radios de flexión convexa y bordes  
Ocurre recuperación elástica, aunque se puede minimizar con el uso de algunos algoritmos de corrección.

#### **2.2.4. Aplicaciones**

Existen sectores industriales que actualmente serían los más aprovechados con esta técnica de prototipo rápido como son el sector aeronáutico y automotriz, sectores en los cuales al momento es el alcance propuesto para esta técnica. A pesar de ello existen también otros sectores industriales donde se utiliza mayormente procesos de conformado para producir componentes de geometrías complejas son: la industria médica y biomecánica, entre otros. Estos son otros de los

sectores que saldrían beneficiados con esta técnica nueva de conformado incremental. A continuación en la figura 9 y 10 se tiene unos ejemplos de algunos modelos hechos con esta técnica de conformado.



**Figura 9:** Piezas tipo tronco de pirámide con ángulo de pared de 65°

Fuente: Urrutia, B. & Aranzabal, N. (2013)



**Figura 10:** Obtención en AISI 304 de embuticiones con ángulo de inclinación máxima 65°

Fuente: Urrutia, B. & Aranzabal, N. (2013)

### 2.3. Conformado Incremental Monopunto

La idea de formar gradualmente una chapa con una sola herramienta de punto, fue patentada por Leszak (1967) aún antes que fuera técnicamente factible. El conformado incremental, se introdujo originariamente en Japón por Matsubara en 1993 como un método para la realización de prototipos y la fabricación de productos de chapa en pequeñas series.

El conformado incremental de láminas es un proceso derivado de las tecnologías existentes en el área de fabricación rápida, y, en comparación con procesos de conformado tradicionales, esta técnica permite reducir el coste de herramientas específicas como matrices para el caso de estampado, así como costes asociados a la propia fabricación de las piezas.

Las dos configuraciones más comunes son: Single-Point incremental Forming (SPIF) y Two Point Incremental Forming (TPIF). Ambas configuraciones tienen como elementos la herramienta, la chapa, el elemento de sujeción y la máquina de control numérico.

- El TPIF es un proceso en el que la placa es presionada simultáneamente por dos puntos. La herramienta presiona el metal, causando deformación plástica, y a la vez va recorriendo el trazado fijado para la forma que está siendo mecanizada. El otro punto es un elemento estático que es considerado un molde parcial, o completo que crea una fuerza contraria hacia arriba en la chapa.
- El SPIF presenta como principal diferencia al proceso anterior la ausencia de molde. En este proceso, la chapa es conformada con una sola herramienta.



### **2.3.1. Introducción general SPIF**

El surgimiento de este nuevo proceso de conformado de chapa conocido como Single Point Incremental Forming (SPIF) ha demostrado ser muy prometedor en su diversidad de uso relativo a otros procesos de conformación convencionales. El SPIF ofrece más flexibilidad y bajos costos de operación. No requiere ninguna matriz y es ideal para prototipos rápidos y operaciones de baja producción. La formación con este método implica el uso de una fresadora CNC con una herramienta de punta hemisférica. Varias ventajas se realizan fácilmente con este método. Este es un proceso muy versátil, pero, se trata de un método de producción de bajo volumen debido a que la productividad y el tiempo de ciclo se ven afectados por el tamaño tanto de la herramienta de formación como de la pieza que se forma, así como del tipo de acabado de superficie deseado.

### **2.3.2. Parámetros importantes de formación**

En SPIF hay algunos parámetros importantes del proceso, tales como son: Trayectoria de la herramienta, material de la hoja, ángulo de formación, tamaño de la herramienta, tamaño del paso, velocidades de conformación (rotación y velocidad de Peed), lubricación y forma.

#### **2.3.2.1. Trayectoria de la herramienta**

Con el fin de formar el prototipo con SPIF primero tenemos que generar un modelo CAD y para a continuación idear las trayectorias de la herramienta usando un software CAM comercial. El paquete CAD se utiliza para crear modelos sólidos de piezas que luego se impone en el CAM donde se genera la ruta de la herramienta según el perfil de los modelos CAD. Este paquete se utiliza generalmente para la remoción de material en la molienda y es perfecto para SPIF porque

su algoritmo de generación de trayectoria incorporado se puede utilizar para guiar la herramienta de conformación. Los contornos de la herramienta se crean y conectan usando un paso o un método de transición espiral.

### **2.3.2.2. Material**

La formabilidad es una característica muy importante en este proceso, y esta difiere entre los distintos tipos de materiales. Un estudio estadístico de Fratini et al., establece la influencia de las propiedades comunes en la formabilidad de los materiales, encontraron que el coeficiente de endurecimiento de la deformación ( $n$ ) así como la interacción entre los coeficientes de endurecimiento de fuerza y de deformación ( $K.n$ ), tenían la mayor influencia en la formabilidad. Este estudio mostró que el coeficiente de endurecimiento por deformación, que difiere mucho entre los materiales, tenía una marcada influencia en la formabilidad. Generalmente, el coeficiente de endurecimiento más alto tendrá una formabilidad más alta.

### **2.3.2.3. Ángulo de formación**

El ángulo que forman las paredes laterales de una pieza con el plano  $xy$  horizontal se conoce como ángulo de formación. La extensión de este ángulo depende principalmente de las propiedades del material y del grosor de la lámina. Sin embargo, las partes del SPIF se controlan por el ángulo de formación máximo ( $\emptyset_{max}$ ) al que el material puede llegar antes de una falla catastrófica en un único paso de conformado. Martins et al, intentó predecir el ángulo de formación máximo utilizando las propiedades del material y formando parámetros como se describe en la ecuación a continuación:

$$\phi = \pi/2 - e^{\epsilon t} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde  $t$  es el espesor de fractura en el límite de conformabilidad, la deformación de espesor es  $\epsilon t$ . En esta forma, esta ecuación puede ser fácilmente evaluada usando el límite de fractura del espesor transversal  $\epsilon_3$  como un determinado plano o estiramiento equi-biaxial de prueba. La ecuación representa el inicio de la fractura porque combina las ideas tanto del límite de formación de fractura en el espacio de deformación de principio como del ángulo de formación máximo al inicio de la fractura.

#### **2.3.2.4. Tamaño de la herramienta**

El tamaño de la herramienta afecta en gran medida a la formabilidad y al acabado superficial de la pieza fabricada a través de este proceso. Los experimentos han demostrado que las herramientas de radio más pequeñas tienen mayor formabilidad que las más grandes. Las herramientas más grandes tienen una zona de contacto más grande y tienden a soportar mejor la lámina durante la formación. Además, en el caso de diámetros de herramienta más grandes hay un aumento en la cantidad de fuerzas de conformado debido al aumento en el área de contacto entre la herramienta y la placa metálica. En el caso de herramientas de diámetro pequeño hay una zona altamente concentrada de deformación que dan lugar a una mejor formabilidad. La disminución de las fuerzas observadas con herramientas pequeñas significa que se podrían alcanzar tensiones más bajas y, como resultado, hay menor probabilidad de que la lámina fracase en condiciones de baja tensión. Se cree que una mayor formabilidad que se ve con herramientas

de radio pequeño es una consecuencia de la concentración de fuerza y tensión a medida que disminuye la superficie de contacto en la punta de la herramienta. En este punto, el calentamiento por fricción es muy localizado y de gran magnitud. Se cree que el alto calentamiento permite que el material fluya fácilmente aumentando así la formabilidad.

### **2.3.3. Herramientas y Utillaje**

#### **2.3.3.1. Herramienta de conformado**

El elemento principal es la herramienta sólida de punta hemisférica que asegura un contacto continuo en un punto de la chapa donde se deforma plásticamente el material. Las herramientas son diseñadas y fabricadas por los usuarios, pues aún no son parte de un surtido a disposición en el mercado al ser una técnica relativamente nueva. En los ángulos de pared muy empinadas puede llegar a ser necesario el uso de un vástago de herramienta menor que el diámetro del extremo esférico. El contacto entre el vástago y la chapa se evita de esta manera. Esto debe tenerse en cuenta para la generación de la trayectoria.

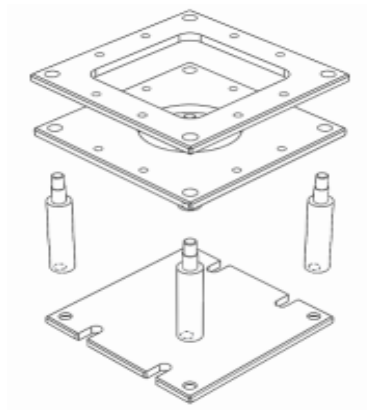
Los materiales que se usan en la mayoría de los casos y aplicaciones es un acero para herramientas. Para reducir la fricción, y para aumentar la vida útil de la herramienta, esta puede ser recubierta o incluso ser hecha de carburo cementado. El desgaste de la herramienta se puede llegar a ser una consideración importante. Además, la lubricación ayuda a reducir el desgaste.

Existe una amplia gama de tamaños de la herramienta, existen pequeños diámetros de 6 mm hasta grandes diámetros de herramienta de 100 mm para la fabricación de piezas grandes. Estos requieren de mucha más potencia debido al ángulo de contacto mucho más grande

involucrado. El diámetro usado depende del radio cóncavo más pequeño requerido en la parte. También tiene una influencia sobre la calidad de la superficie y el tiempo de fabricación.

### 2.3.3.2. Utillaje o Blankholder

Un soporte o utillaje rígido es necesario para sujetar los extremos de la chapa firmemente y evitar los movimientos relativos de esta. Para el caso del TIF la plataforma que sujeta la chapa debe poder deslizarse sobre guías en la dirección vertical.



*Figura 11:* Utillaje de sujeción del IF

Fuente: Sntaxi C. (2013)

### 2.3.4. Equipo para conformado incremental

En general todas las máquinas CNC de tres ejes o más son adecuadas para llevar a cabo el SPIF. Las altas velocidades, grandes volúmenes de trabajo y suficiente rigidez son favorables. Las máquinas de fresado son muy utilizadas ya que están disponibles en diferentes diseños, que difieren en el volumen de trabajo, máxima velocidad de avance, máxima carga, rigidez y costo.

Hasta el momento un solo fabricante produce una máquina especialmente diseñada para este propósito (Hirt, 2004). Cuenta con altas velocidades de avance, volúmenes de trabajo de tamaño medio y está equipado con un pisador móvil controlado. Se basa en la tecnología desarrollada en Amino et al. (2002) incluyendo una patente de Aoyama et al. (2000).



**Figura 12:** Máquina especializada para SPIF

Fuente: [http://www.aminonac.ca/product\\_e\\_dieless.asp](http://www.aminonac.ca/product_e_dieless.asp)

Otro conjunto de máquinas potencialmente utilizables están disponibles. Algunas pueden ser utilizadas para las formas reentrantes. Se están probando actualmente los robots industriales que tienen un gran volumen de trabajo, controladores rápidos, baja rigidez y fuerzas máximas admisibles. Este método de conformado está en sus primeras etapas de investigación.

### **2.3.5. Aplicaciones del proceso de conformado incremental**

Los procesos de formación incremental ofrecen la posibilidad de implementar una poderosa alternativa si se tienen que producir pocos productos (pequeño lote). Y esta posibilidad se

convierte en una necesidad en aquellas aplicaciones en las que está claro que el producto tiene que ser único.

Las aplicaciones del conformado incremental pueden ser divididas en dos grupos grandes:

- Prototipado rápido para la industria automovilística: superficies reflexivas para faros, piezas para evacuación del calor o para mejorar las vibraciones, silenciadores para camiones, entre otros.
- Aplicaciones fuera del mundo del automóvil: asientos de motocicletas, tanques de gasolina, moldes para producción de superficies, y sobre todo se está empezando a estudiar la aplicación del proceso para la creación de prótesis médicas.

Por último, hay otros campos de aplicación fuera de estos dos grandes grupos; como la arquitectura, electrodomésticos, náutica, y especialmente la industria aeronáutica; ya que uno de los principales objetivos de todos estos estudios es poder avanzar en dicho proceso para aplicarlo en piezas y componentes de aeronaves

### **2.3.6. Antecedentes teóricos**

En el SPIF, el modo de deformación ha sido objeto de fuertes discusiones y diferentes autores tienen diferentes opiniones con algunos autores que opinan que la deformación se produce por cizallamiento mientras que otros piensan que es debido al estiramiento.

En cuanto a los límites de formación de SPIF hay tres puntos de vista diferentes:

- Formabilidad en SPIF es limitado por estrechamiento.

- La curva de límite de formación en SPIF es significativamente más alta que las curvas de límite de formación convencionales por una aproximación de 2,7 veces mayor que los procedimientos convencionales.
- Este aumento en la formabilidad se debe a la gran cantidad de cizalladura del espesor de paso o debido a la trayectoria de deformación dentada derivada de la deformación plástica cíclica.

### **2.3.7. Formación de curvas límite**

Los límites de un proceso de conformado son importantes, ya que dan información valiosa en la predicción del fallo. Los límites de formación se determinan mediante el desarrollo de curvas límite de conformado (FLC). Las curvas límite son trazas de cepas principales y secundarias que muestran un estado definido y una zona de fallo, se mide habitualmente después del estrechamiento con la medida hecha justo fuera de la zona de estrechamiento.

Las curvas límite tradicionales se usan para predecir el fracaso en el conformado de chapa, pero carecen de la capacidad de estimar el fallo de las piezas hechas con el proceso SPIF como resultado de que se usan límites de fractura para predecir el fallo que se miden fuera de la zona de fractura en el SPIF.

La formabilidad en SPIF se puede definir en términos del ángulo de estiramiento máximo y se mide en términos de una línea tangente desde la superficie de la hoja no formada a la superficie deformada. Conociendo  $\theta$  máx. Se podría determinar si el proceso SPIF es una buena aplicación de formación para un material y espesor dados.



La curva límite de conformado en el conformado incremental es muy diferente de la correspondiente en el conformado convencional. Se pueden conseguir cepas mucho más altas en la formación incremental que en los procedimientos tradicionales. Tal circunstancia puede justificarse teniendo en cuenta la peculiaridad de la mecánica del proceso. La deformación plástica inducida por el punzón de tamaño pequeño está fuertemente localizada y confinada a la cercana proximidad del área de contacto, y luego progresa de forma incremental a medida que la herramienta se mueve a lo largo de la trayectoria asignada. Como consecuencia, pueden obtenerse mayores tensiones en el material antes de que se produzca la fractura. Además, la curva límite de formación para los procesos de formación incremental típicamente tienen la forma de una línea recta con una pendiente negativa en el primer cuadrante del Diagrama de Límites de Formación. El FLD para SPIF se determina en dos etapas, la primera es la formación incremental de un solo punto de la pieza de trabajo y la segunda es la medición de rejilla con sistema de medición de deformación óptica.

Existen dos estados de deformaciones diferentes:

- Sobre superficies planas el flujo de material principalmente en la dirección de la herramienta y la deformación plana se origina en la chapa metálica.
- En las superficies curvadas se desarrolla la chapa en deformación deformada longitudinal y biaxial en la chapa.

En el caso del SPIF hay dos modos de propagación de la grieta:

- La trayectoria de propagación de grieta "recta" circunferencial
- La trayectoria de propagación de grieta en zigzag circunferencial.

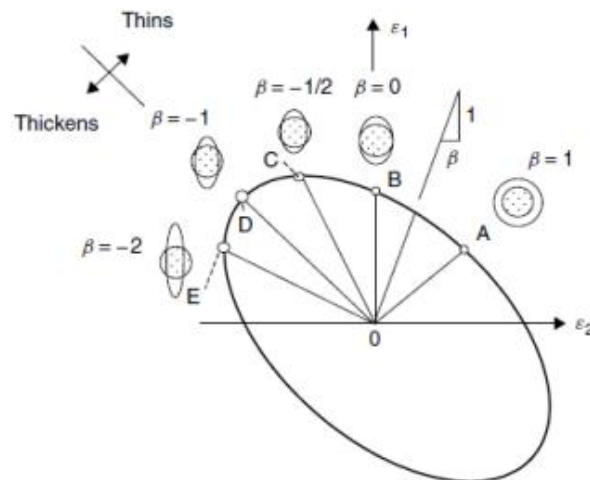
### 2.3.8. Límites de conformado

La conformabilidad de una chapa metálica es generalmente definida como la habilidad que tiene el metal para deformarse hasta la forma deseada sin producirse la fractura o la reducción excesiva del espesor por estricción. Cualquier tipo de metal sólo puede deformarse bajo estas condiciones hasta unos valores límites. Los diagramas límites de conformado representan estos límites.

La conformabilidad está relacionada con el estado de deformaciones (Marciniak 2002). El estado de deformaciones es la combinación de las deformaciones principales:  $\epsilon_1$ ,  $\epsilon_2$  y  $\epsilon_3$ . La suma de estas se asume igual a cero por la conservación de volumen. Solamente son requeridas dos de ellas para especificar el estado de deformaciones. La relación entre estas dos deformaciones es convencionalmente expresado como:

$$\epsilon_2 = \beta \epsilon_1 \quad \text{Eq. 2}$$

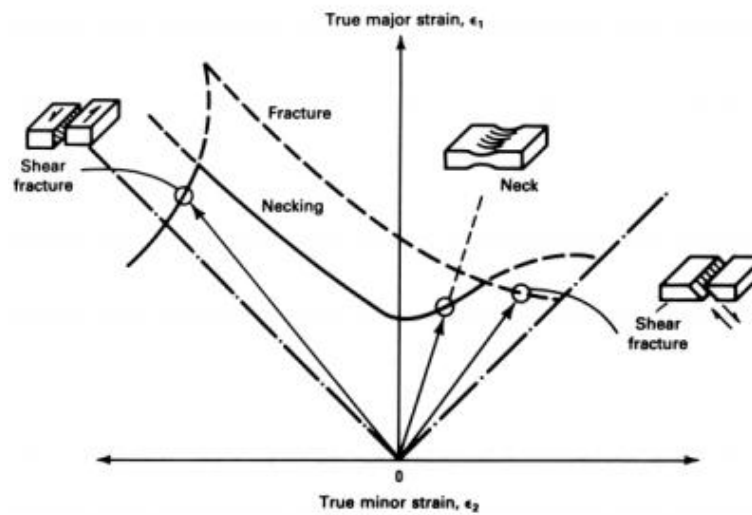
Los diagramas límites de conformado consisten en una gráfica que representa la deformación principal mayor  $\epsilon_1$  frente a la menor  $\epsilon_2$  y que muestra una línea denominada curva límite de conformado, la cual divide los estados de deformación entre aquellos que permiten el correcto conformado de la chapa y los que producen el fallo. La curva límite de conformado proporciona una medida simple de la severidad del conformado. En la práctica convencional se modifica el diseño de la matriz o punzón o el proceso de conformado hasta que las deformaciones en todos los puntos de la chapa estén dentro del margen de seguridad que proporciona dicha curva límite.



**Figura 13:** Diferentes estados de las deformaciones principales

Fuente: Suntaxi C. (2013)

El fallo de la chapa ocurre siempre a niveles de deformaciones diferentes como se ve en la figura 14, creándose una curva de fallo en la se ve que algunos caminos llegan antes a una curva llamada curva de estricción (Necking). En el fallo por estricción existe un adelgazamiento localizado del espesor de la chapa. Sin embargo al tomar otros caminos se puede llegar a otra curva llamada de fractura dúctil (Fracture). El que acontezca uno u otro mecanismo de fallo dependerá del material en estudio y del camino de deformaciones al que esté sometido el mismo.

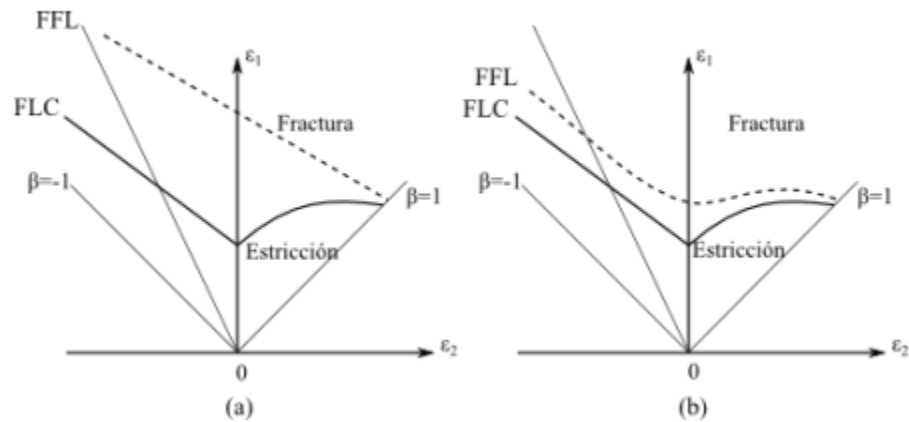


**Figura 14:** Curva representativa de los diferentes mecanismos de fallo

Fuente: Suntaxi C. (2013)

Los diagramas límites de conformado (Forming limit diagram FLD), desarrollados por Keeler (1965) y Goodwin (1968). Son herramientas muy útiles para la evaluación de la capacidad de conformado de las chapas metálicas en la práctica. Se utilizan en todas las fases de la producción de un producto de chapa, por ejemplo, en la simulación con elementos finitos durante el diseño de un producto y para diseñar el proceso de conformado, en las pruebas con las herramientas conformadoras y en el control de la calidad durante el proceso de producción.

Dependiendo del tipo de fallo se puede distinguir el inicio de la estricción localizada (FLC) y el principio de la fractura dúctil (FFL). La Figura siguiente, muestra la evolución típica de las FLC y FFL que se observan en los experimentos. Para chapas con una ductilidad relativamente alta, la FFL tiende a tener una forma lineal, como se ve en la Figura 15(a). En cambio, los materiales con relativa baja ductilidad exhiben una FFL mucho más compleja, Figura 15(b).



**Figura 15:** Diagramas límite de conformado para materiales dúctiles y poco dúctiles

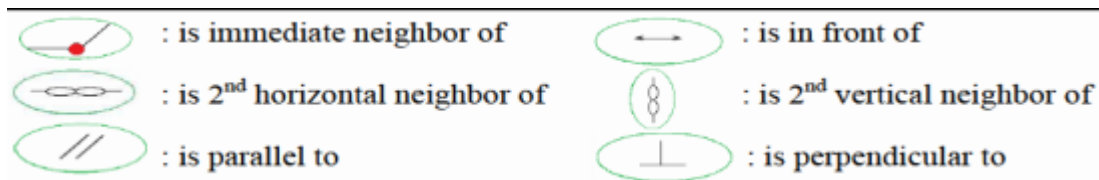
Fuente: Suntaxi C. (2013)

### 2.3.9. Técnicas de corrección

Se ha presentado un enfoque de topología gráfica que integra el efecto del comportamiento de todas las características presentes en la parte, en este caso se construye un gráfico conceptual representando todas las características presentes en la parte y conectándolas en función de su ubicación en la parte con relaciones conceptuales lo que ayuda a predecir la cantidad de desviaciones debidas a la interacción factible en una parte no compensada.

Dependiendo del análisis, se desarrolla una estrategia integral para la fabricación precisa de la trayectoria que, junto con la compensación de archivos CAD, también puede incluir estrategias de trayectoria de herramienta complementarias. Las relaciones conceptuales establecidas se basan en el conocimiento experimental de cómo las características interactúan entre sí cubriendo los requisitos específicos que las características deben cumplir con respecto al posicionamiento y alineación con respecto a la especificación de funcionalidad de la pieza y una vez que todas las

características son reconocidas y conectadas a través de relaciones conceptuales, forman la gráfica completa de la pieza.



**Figura 16:** Relaciones utilizadas para la definición de topología de gráficos basada en características

Fuente: Saad Arshad (2012)

La mejora en la exactitud de las partes completas se puede lograr siguiendo un procedimiento de tres pasos:

- Identificar las características de las partes y su interacción que resultan en precisiones.
- Introduzca estrategias de compensación para cada característica individual e interacción basada en el conocimiento de la característica o interacción específica.
- Seleccionar fuera de las estrategias enumeradas un conjunto comprensivo de estrategias complementarias para la parte completa.

## CAPÍTULO III

### 3. DISEÑO DE HERRAMIENTA DE CONFORMADO Y UTILLAJE RIGIDO

#### 3.1. Diseño de Herramienta de conformando

##### 3.1.1. Consideraciones generales

En el proceso de conformado incremental mono punto SPIF (*Single Point Incremental Forming*) la herramienta constituye un componente de gran influencia en los diversos parámetros del proceso. En vista de lo anterior, su diseño se encuentra sujeto a factores tales como: geometría de la pieza a conformar, material de la lámina metálica utilizada como materia prima, calidad superficial requerida en la pieza resultante, entre otros.

Actualmente, debido al poco tiempo que esta tecnología tiene en desarrollo, no existen proveedores que fabriquen herramientas para SPIF a nivel comercial, de modo que es necesario diseñar y fabricar la herramienta según el trabajo de conformado que se tenga previsto. El diseño y fabricación de herramientas para SPIF no está estandarizado, por ende, toda la información asociada al comportamiento operativo de la herramienta, materiales de fabricación, desgaste, fuerzas actuantes en el proceso, etc. será de carácter experimental.

##### 3.1.2. Consideraciones geométricas

En el aspecto geométrico, son dos los parámetros principales que afectan el proceso de conformado incremental: La forma y el radio de la herramienta. La adecuada selección de estos

últimos incide de manera directa en puntos como la formabilidad del material y la calidad superficial de la pieza.

Diversas investigaciones han demostrado que radios de herramienta reducidos incrementan el límite con formabilidad a expensas de una reducción en la calidad superficial del producto terminado. En el caso de radios más grandes, existe un incremento en las magnitudes de las fuerzas asociadas al proceso de conformado; dicho incremento es consecuencia del aumento del área de contacto entre la herramienta y la chapa metálica.

Herramientas más pequeñas conducen a una disminución en las tensiones de trabajo. Una superficie de contacto herramienta – chapa metálica más pequeña genera una alta concentración de deformaciones en un área reducida resultando en una mejor capacidad de conformado. Cabe resaltar que en la zona de contacto se genera un calentamiento por fricción muy localizado y alto en magnitud, este hecho permite que el material fluya con mayor facilidad.

La geometría del elemento a conformar también influye de manera determinante en la selección del diámetro de la herramienta. El diámetro utilizado dependerá del radio cóncavo más pequeño de la pieza requerida. Vale la pena mencionar que en algunos casos, para ángulos de pared muy inclinados, podría ser necesario el uso de un vástago de herramienta con menor diámetro que la punta semiesférica con la finalidad de evitar el contacto entre este y la chapa.

Se tiene información de que la gama de diámetros de la herramienta utilizada va desde 6 mm hasta 100 mm, en función de lo planteado anteriormente, se selecciona como diámetro de herramienta para cumplir los objetivos establecidos de 10 mm.



Si bien se han desarrollado investigaciones para evaluar el comportamiento de herramientas con puntas de diversas formas, en el presente trabajo se empleará una **punta semiesférica** por las siguientes razones:

- Garantiza un contacto uniforme y permanente con la superficie de la chapa metálica.
- Relativamente sencillo de maquinar.
- Ofrecen resultados con una calidad superficial aceptable.
- Los resultados experimentales utilizados para fundamentar el diseño de la herramienta han sido obtenidos empleando herramientas de punta semiesférica.

Un último parámetro geométrico que debe ser definido es la longitud del vástago de la herramienta. En este punto es importante considerar que parte de este va inserto en el portaherramientas y, además, la longitud debe ser suficiente para evitar cualquier contacto entre los componentes de la máquina CNC y la chapa metálica o incluso la estructura soporte (BlankHolder). Por otro lado, las longitudes excesivas deben ser evitadas con el fin de prevenir flexión excesiva (fenómeno de pandeo) en la herramienta producto de las cargas propias del proceso de conformado SPIF.

Para el caso específico en estudio, se requieren de al menos 70 mm para sujetar fijamente la herramienta con el portaherramientas, además, de anexar 30 mm más para cerciorarse de que la herramienta no choque con el BlankHolder, la profundidad máxima de las piezas a conformar es de 30 mm. Considerando lo anterior, se establece **130 mm** como longitud total de la herramienta.

### 3.1.3. Consideraciones dinámicas

Durante el proceso de conformado incremental, la herramienta se encuentra expuesta a fuerzas en los tres ejes cartesianos. Para efectos del estudio de las fuerzas sobre la herramienta, se considerará el siguiente sistema coordenado:

- Plano X,Y = Plano de la chapa metálica a conformar.
- Eje Z Positivo = A lo largo de la herramienta de conformado.

Ya que el proceso de conformado incremental es una tecnología relativamente nueva, actualmente no existen modelos matemáticos estandarizados, más allá de algunas propuestas generadas a base de procedimientos experimentales, que sean capaces de simular de manera precisa el conjunto de fuerzas a las que está sometida la herramienta.

Gracias a diversos estudios, ha sido posible detectar cuáles son los parámetros que inciden directamente en las cargas que actúan sobre la herramienta. A continuación se mencionan:

- Material a conformar.
- Diámetro de la herramienta.
- RPM de giro de la herramienta.
- Ángulo de conformado.
- Espesor de la plancha a conformar.

Con la finalidad de contar con una estimación realista de las cargas a las que estará sometida la herramienta utilizada en el presente proyecto, se tomarán los resultados experimentales de aquellos trabajos en los que se realizan procesos de medición en condiciones similares a las presentadas en el desarrollo de este trabajo.

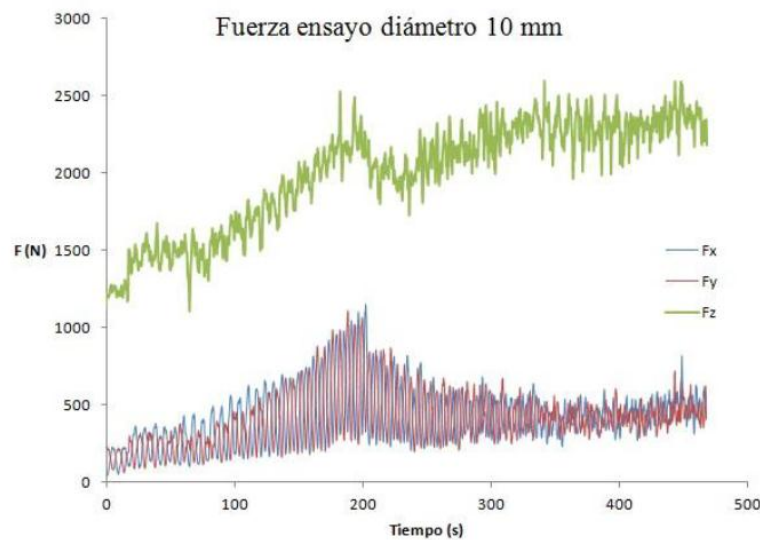
La primera referencia corresponde a un trabajo realizado en la universidad de Sevilla en 2014 por Francisco J Ruiz titulado *Análisis numérico de procesos de conformado incremental monopunto en chapas de aluminio AA 7075-O* [3]. El objetivo principal de dicho proyecto investigativo consisten en:

Creación de una serie de modelos numéricos de procesos de conformado incremental en chapas de aluminio 7075-O mediante un software basado en el método de los elementos finitos de carácter robusto que a su vez sirvan para caracterizar la influencia del diámetro de la herramienta de conformado en diferentes variables y en el aumento de la conformabilidad en el SPIF (Ruiz, 2014, P.9)

El trabajo en referencia destaca ya que se realiza una medición de fuerzas sobre la herramienta en condiciones muy similares a las planteadas en el presente trabajo:

- Material a conformar: Chapa AL 7075-O de  $e=1,6$  mm
- Diámetro de la herramienta: 10 mm & 20 mm
- Material de la herramienta: Acero al carbono templado.

Para el caso de la herramienta de 10 mm de diámetro, los resultados de las mediciones de fuerza se muestran a continuación:



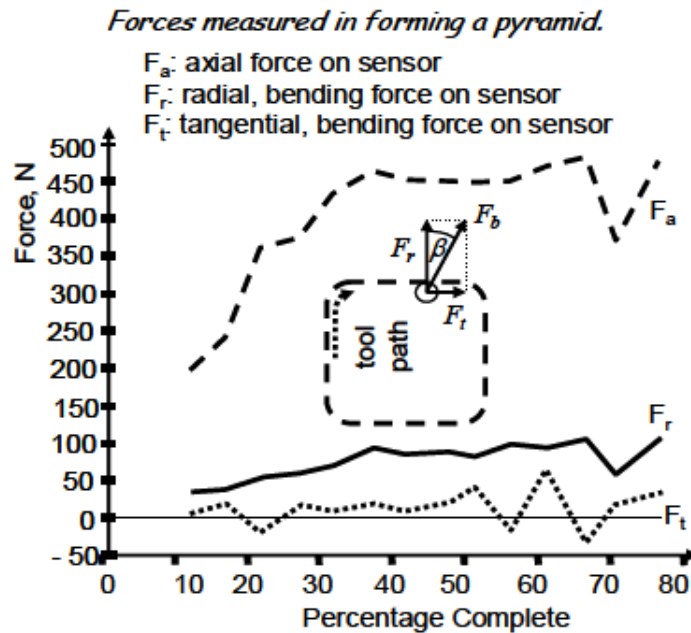
**Figura 17:** Fuerza en ensayo con herramienta de 10 mm

Fuente: Análisis numérico de procesos de conformado incremental monopunto en chapas de aluminio AA 7075-O Ruiz, Francisco.

Como podemos apreciar la mayor carga a la que se somete a la herramienta es la vertical, llegando a un valor máximo que ronda los **2500 N**. También observamos que la fuerza necesaria para conformar la chapa aumenta conforme vamos avanzando en el proceso, es decir; a mayores ángulos de inclinación de la pared la carga necesaria es mayor, este efecto se suaviza al llegar a un valor próximo al máximo dado debido, entre otras causas, a la ley de comportamiento del material; ésta alcanza un máximo que se mantiene a los 226.3 MPa en términos de tensión real, asemejándose a un comportamiento elastoplástico perfecto que a estas alturas de deformación no produce endurecimiento. (Ruiz, 2014, P.63)

Una segunda referencia es tomada del trabajo *Forces in Single Point and Two Point Incremental Forming*, desarrollado por J. Jeswiet, J. R. Duflou y A. Szekeres, pertenecientes a

Queen's University en el año 2005. En este caso el objetivo es caracterizar las fuerzas implicadas en el proceso de conformado de una Chapa de Aluminio AA-3003.



**Figura18:** Fuerzas medidas para SPIF de una chapa de Aluminio AA-3003-O de 1,21 mm de espesor

Fuente: Forces in Single Point and Two Point Incremental Forming, VARIOS

En este caso es notorio que la fuerza máxima reflejada es muy inferior al caso de estudio anterior, apenas 450N. Dicha diferencia se debe a las siguientes razones: uso de una aleación de aluminio con un menor grado de resistencia (más maleable), espesor de la chapa a conformar menor.

Sin embargo, en ambos ejemplos destaca una característica por sobre el resto: la fuerza en el eje longitudinal de la herramientas es mucho mayor (aproximadamente 2,75 veces) que las fuerzas tangenciales (en los planos X,Y), por lo tanto, esta es la principal carga a ser considerada durante el proceso de diseño.

Nótese que la fuerza de conformado utilizada para el cálculo de la longitud máxima corresponde a la fuerza longitudinal máxima obtenida experimentalmente por Ruiz [3] para una chapa de Aluminio AL 7075-O,  $F_c = 2500$  N.

### 3.1.4. Material de fabricación de la herramienta

Para fabricar la herramienta es necesario hacer uso de un acero de alta resistencia sobre el cual se aplique un tratamiento térmico que incremente la dureza superficial del material además de aplicar pulitura a la punta de la herramienta de conformado con la finalidad de disminuir la fricción y mejorar el acabado superficial.

Para el presente diseño y tomando como referencia el trabajo titulado *An Efficient Force Prediction Strategy in Single Point* desarrollado en 2016 por Jyhwen Wang, Mahesh Nair y Ying Zhang, de la Universidad de Texas, se selecciona el **Acero de Alta Resistencia 41L40** para la fabricación de la herramienta. A continuación se presentan las propiedades generales de dicho material:

#### Composición Química:

- Carbón: 0.38%-0.43%
- Manganeso: 0.75%-1.00%
- Fosforo: 0.35% (Max)
- Sulfuro: 0.04% (Max)
- Cromo: 0.80%-1.10%
- Molibdeno: 0.15%-0.25%
- Plomo: 0.15%-0.35%

Propiedades estructurales:

- Resistencia última a la tracción: 105,000 PSI
- Resistencia a la fluencia: 85,000 PSI
- Elongación: 15% (in 2")

Como recomendación adicional, para evitar el desgaste excesivo se recomienda emplear continua lubricación en el área de trabajo durante todo el proceso de conformado.

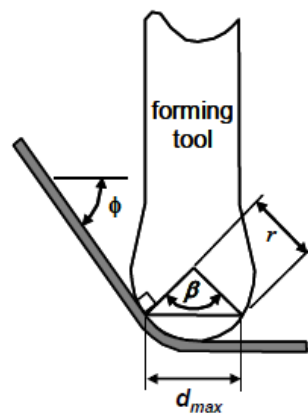
### **3.1.5. Giro de la herramienta**

Al momento de realizar el conformado incremental monopunto hay dos formas en que la herramienta se desplaza al momento de deformar la lámina de aluminio, la primera es girando y la segunda es de manera estática. Para esta investigación la herramienta se desplazara girando, debido al calentamiento que ocurre en la superficie de la lámina, si la herramienta en vez de quedarse estática esta disipara mejor el calor que la fricción genera, otra ventaja que presenta esta manera de realizar el conformado incremental es que deforma de manera correcta y no arrastra la lámina de aluminio.

Hay diversos factores a tener en consideración en cuanto a esta velocidad de giro, ya que si la herramienta gira a una velocidad demasiado excesiva se desliza por la superficie de trabajo y en vez de disipar el calor este lo hará de manera excesiva. En el proceso de conformado incremental en la figura 19 podremos ver plasmados los datos necesarios para tener en cuenta el giro de la herramienta, en dónde la forma semiesférica de la herramienta entra en contacto de manera tangente con la lámina, deformándola en un ángulo  $\emptyset$  (ángulo de avance), este genera un  $d_{max}$ . El cual asumiremos como el diámetro de contacto total entre el comienzo de la tangencia y el final

de la forma esférica de la herramienta en contacto con la lámina. Asumiremos un diámetro promedio de contacto de deformación el cual viene dado por:

$$d_{prom} = \frac{d_{max}}{2} \quad \text{Eq. 3}$$



**Figura 19:** Contacto de la herramienta con la lamina

Fuente: Forces in Single Point and Two Point Incremental Forming, VARIOS

Lo que se busca es que la herramienta gire por la superficie de trabajo mientras se forma. Este resultado requiere que la distancia recorrida por la herramienta sea igual al círculo de contacto de la herramienta en contacto con el material multiplicado por el giro. Arrojando la siguiente ecuación:

$$\pi d_{prom} w = v \quad \text{Eq. 4}$$



En donde:

w : giro de la herramienta

v: avance en el área de trabajo.

Para obtener los datos necesarios necesitamos aplicar la ley del coseno al triángulo formado en la herramienta por el ángulo  $\beta$ ,  $d_{max}$  y  $r$  tenemos que:

$$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab \cos \alpha, \text{ para } c = d_{max}, a = b = r, \text{ y } \alpha = \beta = 2\phi$$

Entonces al reemplazar se tiene:  $d_{max}^2 = 2r^2 - 2r^2 \cos \beta$

$$d_{max}^2 = 2r^2 - 2r^2 \cos 2\phi \quad \text{Eq. 5}$$

Despejando se tiene que:

$$d_{max} = r\sqrt{2(1 - \cos 2\phi)}$$

$$d_{prom} = r\sqrt{\frac{1}{2}(1 - \cos 2\phi)}$$

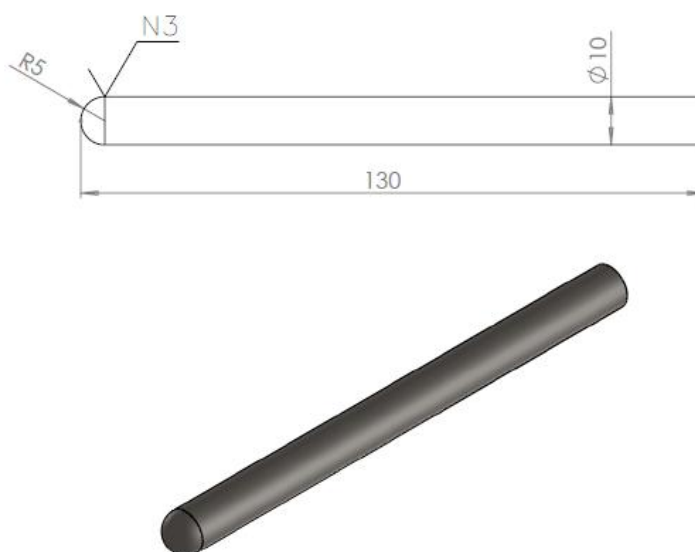
Teniendo en cuenta esta ecuación y despejando en la ecuación 4 tendremos que:

$$\omega = \frac{v}{\pi r \sqrt{\frac{1}{2}(1 - \cos 2\phi)}} \quad \text{Eq. 6}$$

Esta ecuación nos da el giro necesario de la herramienta para un avance dado y un ángulo de deformación. Esta ecuación solo se puede usar para una herramienta con un extremo de radio hemisférico específico, y las velocidades están en revoluciones por minuto.

### 3.1.6. Dimensionamiento final de la herramienta

Finalizado el proceso de diseño, se procede a mostrar los resultados obtenidos a través de un plano sencillo



**Figura 20:** Dimensiones de Herramienta para SPIF

**Tabla 1**

*Relación entre rugosidad y grados según norma DIN4769*

Ra ( $\mu\text{m}$ )	Nº de grado de Rugosidad
0,1	N3

Fuente: Grupo de tecnología mecánica, procesos de fabricación

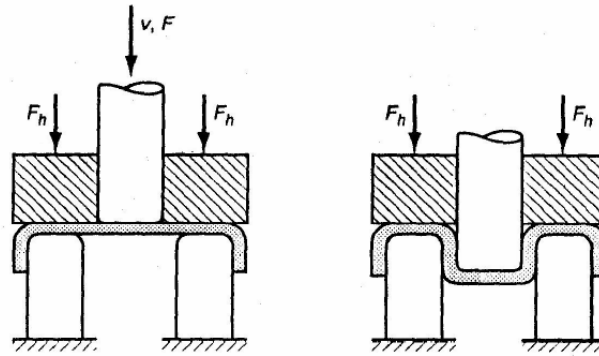
**Tabla 2***Características de la Herramienta para SPIF*

<b>Material:</b>	Acero Alta Resistencia 41L40		
<b>Longitud:</b>	130 mm	<b>Diámetro:</b>	10 mm (punta semiesférica)
<b>Dureza HB:</b>	241	<b>Rugosidad:</b>	N3

### 3.2 Diseño del soporte o utillaje rígido (BlankHolder)

#### 3.2.1 Homologación del proceso de embutido con el conformado incremental

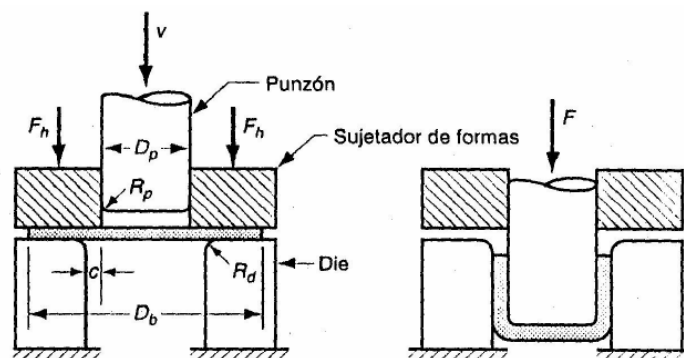
Para realizar el soporte requerido vamos a tomar en consideración el diseño del utillaje del trabajo “Análisis experimental de deformaciones límites en chapas de acero AISI 304 en conformado incremental” realizado en la Universidad de Sevilla en 2014, para lo que tenemos que tener en cuenta el proceso de embutido debido a las similitudes del proceso de conformado con este. Teniendo en cuenta ya que el punzón para el conformado incremental es esbelto, facilitara de manera práctica los cálculos de las fuerzas de soporte del BlankHolder. Entre la gama de distintos procesos de embutido el embutido al aire (figura 19), es la que más se asemeja al proceso de conformado incremental ya que cuenta solamente con soportes y no con una matriz.



**Figura 21:** Embutado al aire

Fuente: Fuerzas del embutado. Ingeniería mecánica-tecnología mecánica II

Una vez teniendo en cuenta estas condiciones procedemos a realizar los cálculos de las fuerzas que actúan sobre la superficie del embutado.



**Figura 22:** Fuerzas que actúan sobre el embutado y consideraciones geométricas

Fuente: Fuerzas del embutado. Ingeniería mecánica-tecnología mecánica II

En la figura 20 se representan las fuerzas que actúan sobre el embutado al aire, en donde:

- C: claro.
- $D_p$ : diámetro del punzón.

- $D_b$ : diámetro de la forma inicial.
- $R_d$ : radio de la placa de soporte.
- $R_p$ : radio de la esquina del punzón.
- $F$ : fuerza de embutido.
- $F_h$ : fuerza de sujeción.

Esta última  $F_h$ , es la que necesitamos para saber cuánta carga debe sostener el blankholder y cómo será distribuida a través de los diferentes pernos de sujeción de este. Hay tres consideraciones importantes al momento de realizar el diseño del soporte, las cuales se mencionan a continuación.

1. Debido a que el  $R_d$  viene dado por la forma de una matriz al aire en este caso por el tipo de embutido al cual se le está realizando la homologación este valor se tomará en cuenta con la deformación máxima del conformado es decir un límite de profundidad de este y al realizar una chapa circular teniendo como límite los bordes del sistema de sujeción para el conformado. De la misma manera se realizará con el valor de  $D_p$  teniendo en cuenta un máximo de los límites de conformado de forma circular.
2. Los cálculos realizados con estas consideraciones de diseño hacen que estén definidos los parámetros dimensionales en un exceso, esto quiere decir que las fuerzas son superiores y por tanto las geometrías y los materiales se adaptaran bien al conformado incremental.
3. Debido a que estas características dadas en la figura 22 se rigen por un embutido cilíndrico y como en el conformado incremental es indistinta la forma cilíndrica original

del embutido nos centraremos para el diseño solamente en las fuerzas que actúan sobre el embutido y el soporte ( $F$  y  $F_h$ ).

### 3.2.2 Fuerzas aplicadas al sistema de sujeción

Teniendo en cuenta el cálculo anterior de la herramienta donde nos dice que nuestra  $F_c = 2500$  N esta “fuerza de corte” será nuestra fuerza de embutido.

Según el Ing. Julio M. Torrejón autor de Tecnología Mecánica II para Ingeniería Mecánica de la universidad Mayor de San Simón UMSS, en el capítulo III nos da un análisis de embutido, usando así la ecuación 7 que a continuación es la que usaremos en nuestro caso para la homologación.

La fuerza de sujeción es la que tendremos en consideración para el diseño del sistema de sujeción rígido. Esta fuerza vendrá dada con la homologación en el embutido en el aire, y para facilitar los cálculos se realizará con la brida inferior suponiendo que la apertura es de sección circular de diámetro 130mm. Tendríamos que la fuerza de sujeción  $F_h$  viene dada por la ecuación. Las características del material se ven reflejadas en las condiciones dinámicas del aluminio AL-7075-0 ya que es el que presenta las mayores cargas.

$$F_h = c\gamma\pi \left[ D_b^2 - (D_p + 2,2t + 2R_d)^2 \right] \quad \text{Eq. 7}$$

Fuente: Torrejón, J. UMSS, Tecnología Mecánica II, recuperado de <http://materias.fcyt.umss.edu.bo/tecno-II/PDF/cap-333.pdf>

En donde:

- $\gamma$  : esfuerzo de fluencia de la lámina del metal. (para el caso del aluminio AL-7075-O este valor es de 145 MPa debido al espesor de la lámina.)
- $t$ : espesor de la lámina del metal. (1,0 mm).
- C: factor de iteración. Debido a que esta fórmula es utilizada para el proceso de embutido al aire el factor de iteración varía con respecto a este para nuestro caso utilizaremos un  $c=0,0015$

Tenemos que tener en cuenta los distintos valores de espesor de las láminas que se utilizarán de manera experimental para realizar el cálculo del BlankHolder. Para estos cálculos influye el espesor a utilizar ya que para que el cálculo de la herramienta de conformado, las propiedades mecánicas se mantienen en el espesor utilizado que es de 1mm. El Rd es despreciable debido a que el diámetro por lo tanto el radio del borde de la brida inferior es muy pequeño. Sustituyendo los valores tenemos que:

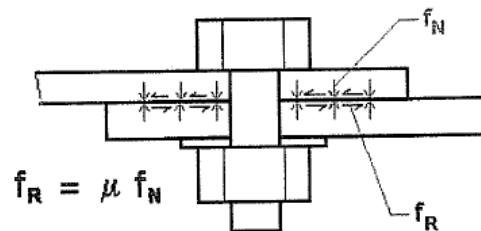
$$F_h = 0,0015 * 145 \text{ Mpa} * \pi [130^2 - (10 + 2,2 * 1)^2]$$

$$F_h = 11428,65 \text{ N.}$$

Esta carga tiene que verse distribuida en 8 pernos los cuales mantienen firmes las bridas al momento en que se realiza el conformado. El diagrama mostrado en la figura 21 nos indica que a la fuerza que estarían sometidos estos pernos sería la fuerza de fricción la cual es generada por la fuerza normal de sujeción necesaria para mantener fija la lámina de aluminio. Esta fuerza viene

dada por la ecuación 8, en donde  $\mu=0,33$  debido a la poca rugosidad que existe entre los elementos

$$F_r = \mu F_h \quad \text{Eq. 8}$$



**Figura 23:** Fuerzas que actúan en uniones empernadas

Fuente: Instituto Chileno del Acero. Capítulo 6 uniones empernadas

$$F_r = 0,33 * 11428,65 \text{ N}$$

$$F_r = \frac{3771,46 \text{ N}}{8}$$

$$F_r = 471,43 \text{ N}$$

Una vez teniendo la  $F_r$  ver los tornillos necesarios para la unión desmontable de las bridas inferior y superior según *Decker diseño de elementos de máquinas*. Con la ecuación (9).

$$\sigma_z = F_r / A_k \quad \text{Eq. 9}$$



En donde:

- $\sigma_z$  : en  $N/mm^2$ , tensión de tracción en el núcleo debido a  $F_h$ .
- $A_k$ : en  $mm^2$ , sección transversal del tornillo.

Para este caso elegiremos unos pernos M8 con una sección transversal de  $32,8 \text{ mm}^2$ , valores en tablas, *Decker diseño de elementos de máquinas*. Hay que tener en cuenta que son ocho pernos por lo tanto la carga se distribuye entre esos 8 pernos de manera que el cálculo de  $\sigma_z$  sería:

$$\sigma_z = \frac{471,43 \text{ N}}{32,8 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma_z = 14,37 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Teniendo en cuenta los valores la tabla 3 del *Decker diseño de elementos de máquinas*, tenemos que, es bajo en comparación a los esfuerzos que pueden ser sometidos los pernos ajustados DIN 7968 M8.

Tipo de construcción	Tipo de esfuerzo	Tornillos ajustados DIN 7968				Tornillos sin pulir DIN 7990			
		4.6 <sup>1)</sup>		5.6 <sup>2)</sup>		4.6 <sup>1)</sup>		5.6 <sup>2)</sup>	
		Carga		Carga		Carga		Carga	
		H	HZ	H	HZ	H	HZ	H	HZ
Estructuras de edificios	Tracción $\sigma_t$	112	112	150	150	112	112		
Estructuras de grúas		100	110	140	154	100	110	140	154
Estructuras de edificios	Cortadura $\tau_a$	140	160	210	240	112	126		
Estructuras de grúas <sup>3)</sup>		112	128	168	192	70	80	70	80
Estructuras de edificios	Carga $\sigma_1$	280	320	420	480	240	270		
Estructuras de grúas <sup>3)</sup>		280	320	420	480	130	180	160	180

1) Para piezas de acero 33 o acero 37.  
2) Para piezas de acero 46 o acero 52.  
3) Sólo para uniones de secciones; para uniones de una sola sección  $\approx 0,87$  del valor.

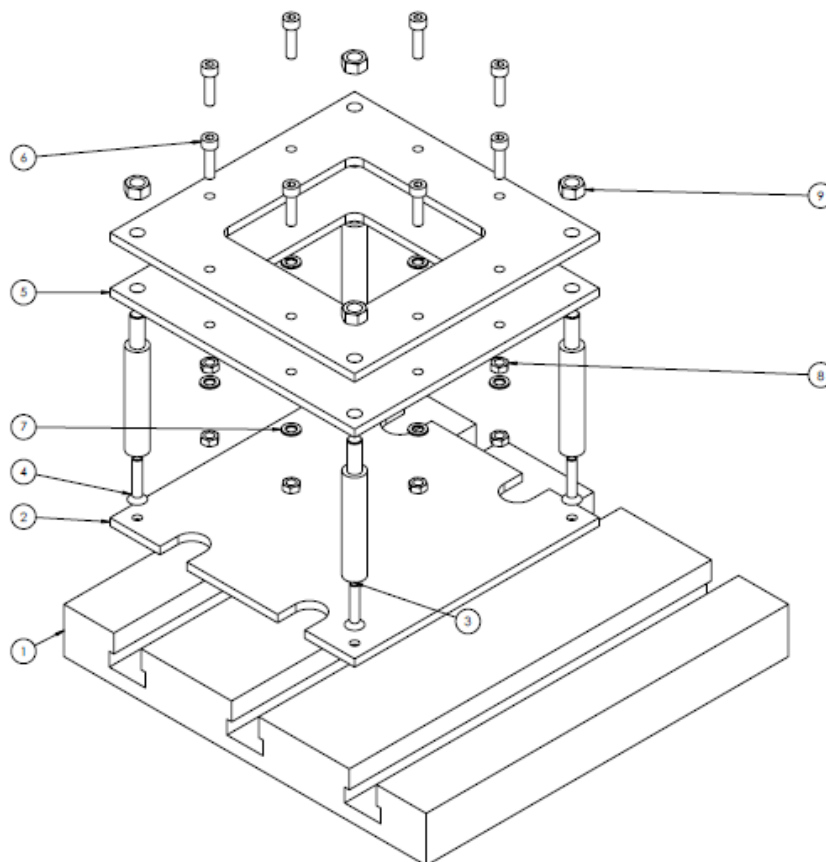
**Figura 24:** Tensiones permitidas, en uniones roscadas

Fuente: Metals Handbook décima edición, propiedades y selección de materiales

### 3.2.3 Elementos del sistema de sujeción

El sistema de sujeción viene dado por los siguientes elementos:

- Mesa de trabajo: donde va anclado el BlankHolder.
- Tornillo avellanado: este mantiene los pilares sujetos a la base inferior.
- Base inferior: es la que sostiene los pilares.
- Pilares: son los que dan la distancia entre la base inferior y las bridas, generando así una profundidad, necesaria para el proceso de conformado incremental.
- Brida: son los elementos que sujetan la lámina de aluminio mientras se deforma con la herramienta de conformado.
- Tuerca M12: tuerca que mantiene los pilares sujetos al sistema de sujeción.
- Tornillos M8 DIN 7968, arandela M8 y tuerca M8: este conjunto es el que mantendrá la lámina en su lugar de manera firme mientras se deforma.



**Figura 25:** Vista de los elementos del BlankHolder

**Tabla 3**

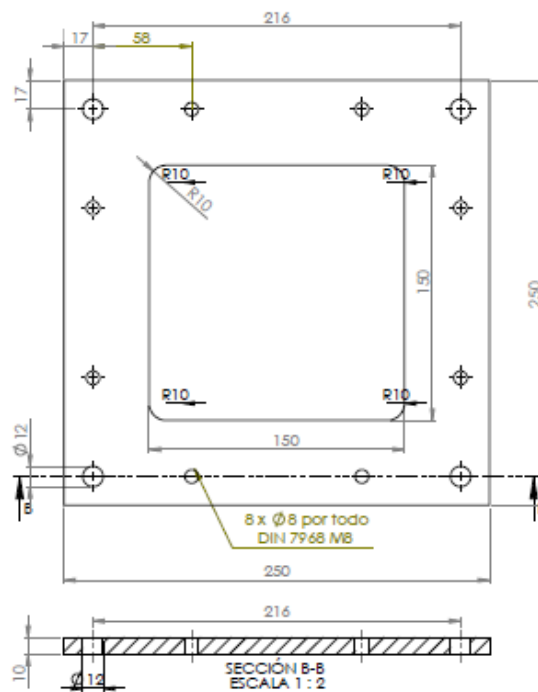
*Descripción de elementos del BlankHolder*

Número	Descripción de la pieza	Cantidad
1	Mesa de trabajo	1
2	Base inferior	1
3	pilar	4

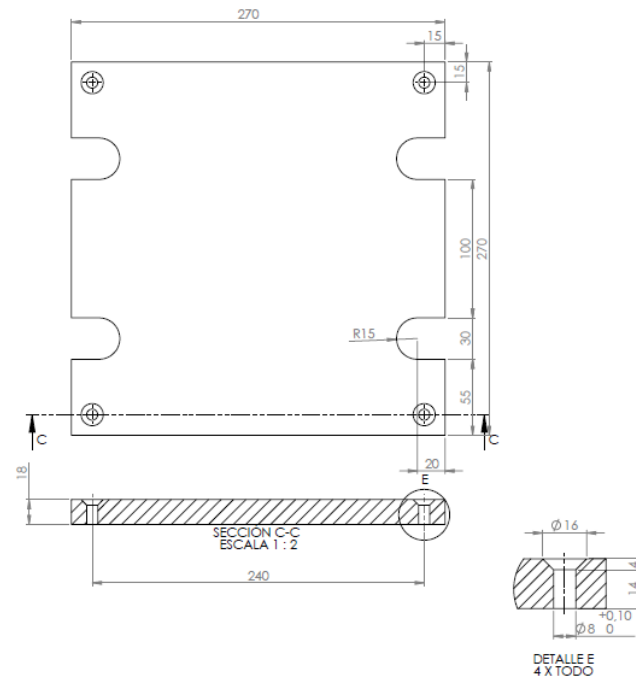
Continua ➡

4	Perno avellanado M8	4
5	Brida	2
6	Tornillo de sujeción M8 DIN 7968	8
7	Arandela M8	8
8	Tuerca M8	8
9	Tuerca M 12	2

Uno de los elementos más importantes en el blankholder es la brida de la cual se sujeta la lámina de aluminio, por lo cual son dos bridas del mismo tamaño. Teniendo así para nuestro caso una área de trabajo total de 150 mm x150 mm.



**Figura 26.** Vista del elemento Brida superior del BlankHolder



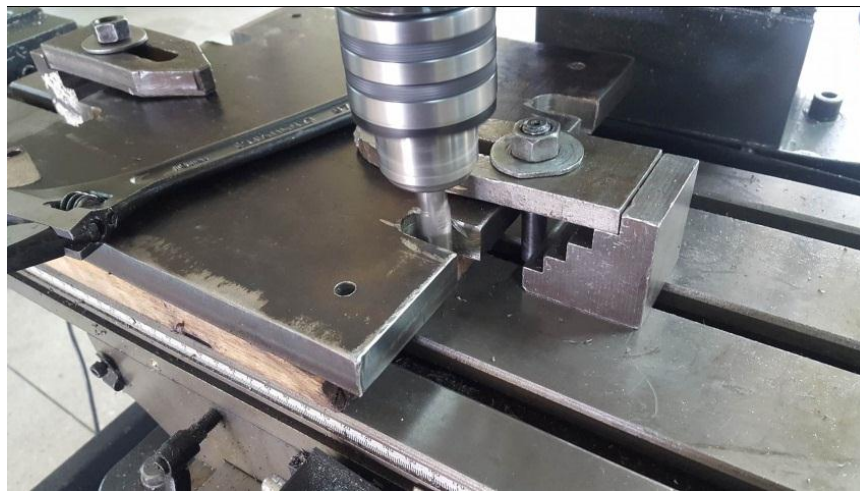
**Figura27.** Vista del elemento Base inferior del BlankHolder

### 3.2. Construcción

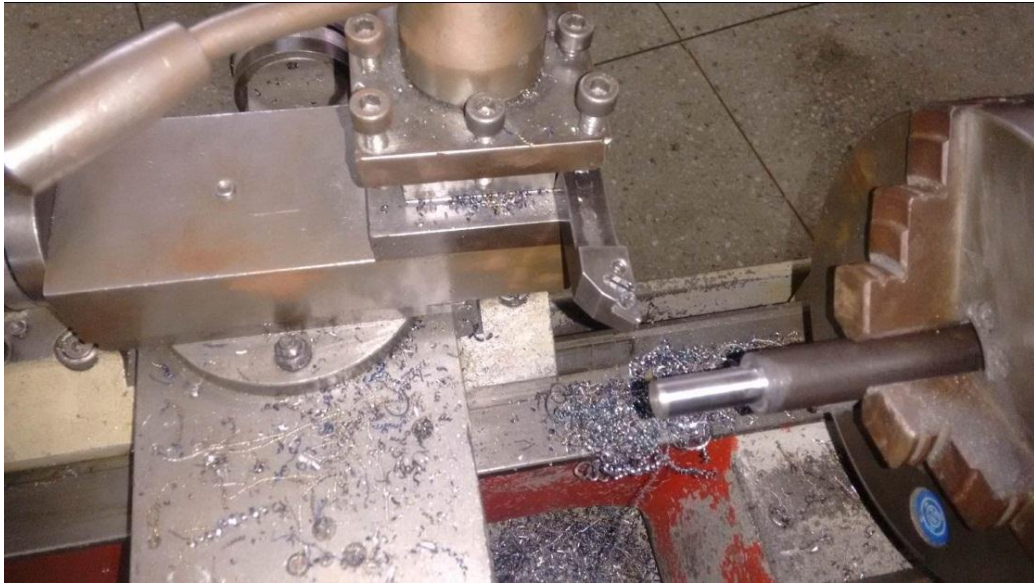
El proceso de construcción consiste en el ensamblado del montaje al sistema de sistema de sujeción en un centro de mecanizado, adaptable indiferentemente de la maquina teniendo en cuenta las dimensiones de la mesa de trabajo y del sistema de sujeción del conformado incremental.



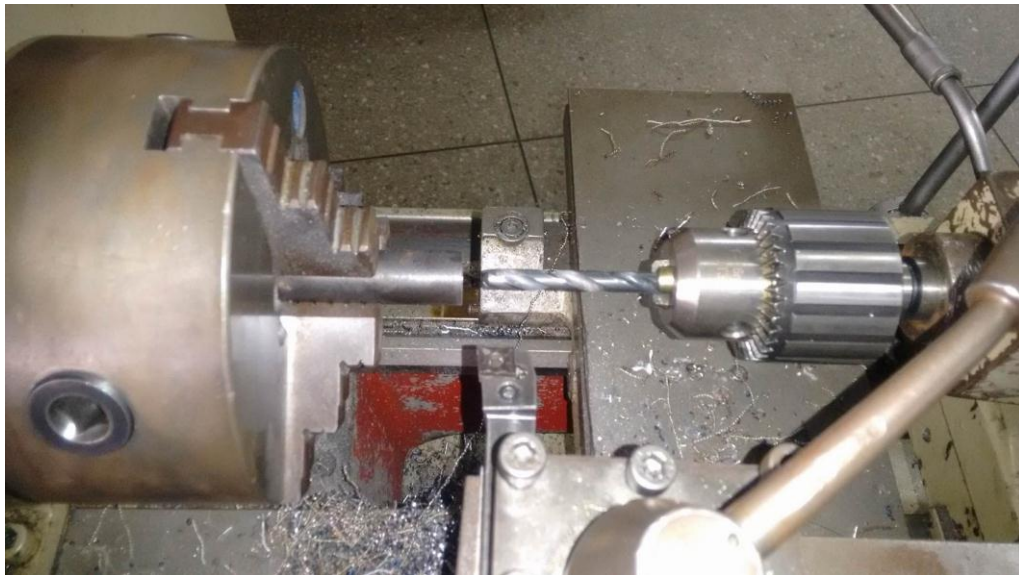
**Figura 28.** Fabricación del elemento Brida del BlankHolder



**Figura 29.** Fabricación del elemento Base inferior del BlankHolder



*Figura 30.* Fabricación del elemento Base pilar del BlankHolder



*Figura 31.* Perforación del elemento Base pilar del BlankHolder



*Figura 32.* Vista del Utillaje BlankHolder armado



## CAPÍTULO IV

### 4. DISEÑO Y DESARROLLO DE PROTOTIPOS

#### 4.1. Plan de experimentos

Para cumplir con el objetivo de ésta investigación, se ha propuesto realizar dos prototipos mediante el método de conformado incremental monopunto (SPIF).

Para la elaboración del modelado geométrico tridimensional de dichos prototipos, se utiliza el programa de tipo CAD/ CAM, el cual permite realizar el modelado geométrico tridimensional y posteriormente calcular la ruta de puntos donde se debe aplicar la presión para moldear la figura previamente diseñada, sobre la lámina u hoja de metal (sheet metal). Luego de ello, se puede obtener el archivo de texto con los códigos G, específicos para cada máquina CNC, según la normativa de las mismas.

Para la realización de los prototipos, se seleccionó una máquina CNC de tipo Fresadora, modelo VMC 3016, la cual cuenta 3 ejes de operación, X, Y y Z, la cual se observa en la figura 33; y permite la realización de los prototipos propuestos, mediante la utilización de la herramienta diseñada para el proyecto descrita en los capítulos anteriores. A la máquina CNC, anteriormente expuesta, se le adapta el BlankHolder, donde se colocará la lámina de metal a deformar.



**Figura 33.** CNC Fresadora FADAL VCM 3016

**Tabla 4**

*Características de la CNC Fresadora FADAL VCM 3016*

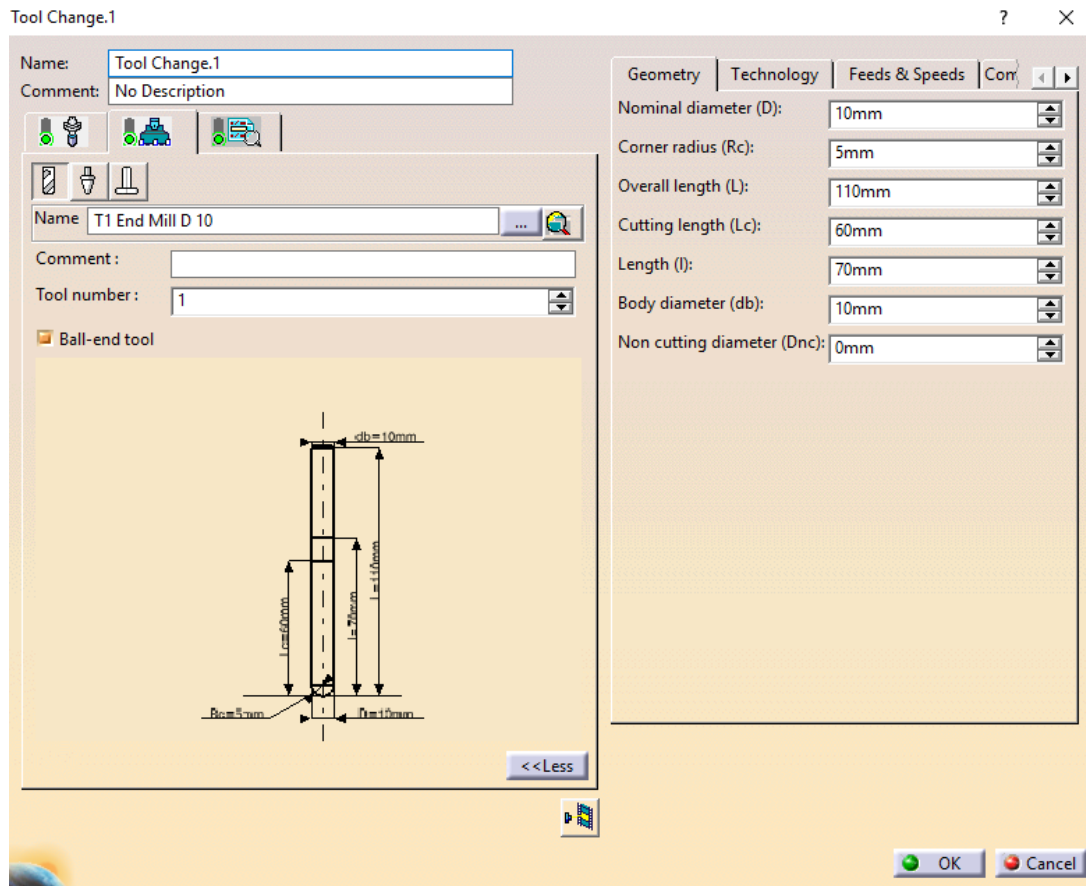
Especificaciones y características de la fresadora CNC Fadal VCM 3016			
<b>Modelo</b>	VCM 3016	<b>Rango Velocidades del husillo</b>	75-10.000RPM
<b>Año</b>	2006	<b>Desplazamiento X</b>	762 mm
<b>Voltaje</b>	240 VTLS	<b>Desplazamiento Y</b>	406 mm
<b>Fases</b>	3	<b>Desplazamiento Z</b>	508 mm
<b>Frecuencia</b>	50/60 Hz	<b>Medida de la mesa</b>	990 mmx 450 mm
<b>Corriente</b>	38A	<b>Potencia de trabajo</b>	11 Kw
<b>Potencia Requerida</b>	16kVA	<b>Tasa de Desplazamiento rápido en X</b>	10,160 mm/min
<b>Peso</b>	3750 Kgrs	<b>Tasa de Desplazamiento rápido en y</b>	17,180 mm/min
<b>Tamaño</b>	2.3x2.5x2.3 m	<b>Tasa de Desplazamiento rápido en Z</b>	17,180 mm/min

## 4.2. Desarrollo del diseño CAD / CAM

Basado en lo anteriormente expuesto, para la realización de los modelados geométricos tridimensionales, se utiliza el programa CAD/CAM, el cual permite la elaboración del modelo tridimensional mediante la ejecución de la sección Generative Sheet Metal Design, posteriormente, el recorrido de la herramienta de deformación, utilizando la aplicación Advance Machining y por último, permite la generación del texto de códigos G para la máquina CNC, mediante la método de procesamiento Z level.

Para la elaboración de ambos modelos se utiliza aluminio 7075-O con espesor 1mm, también se toman en cuenta los parámetros de diseño del BlankHolder, el cual cuenta con capacidad de soporte para una lámina de aluminio 7075-O de 200 mm x 200 mm, pero el área de trabajo real para realizar la deformación es de 150 mm x 150 mm. También se toma en cuenta que la herramienta a utilizar es de un largo de 130 mm totales, pero la longitud máxima para deformaciones es de 30 mm, la cual posee una punta semiesférica con un radio de 5mm, siendo el diámetro total de la herramienta de 10 mm.

A continuación, se visualiza en la figura 34, la configuración de la herramienta en el software de modelado.



**Figura 34:** Configuración de herramienta de deformación en el Software CAD/CAM

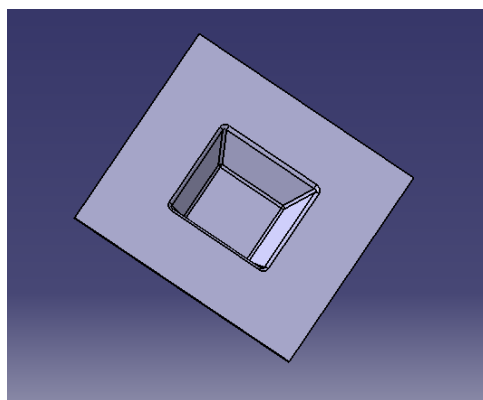
#### 4.2.1. Características de diseño del Prototipo 1

El prototipo inicial consta de un cuadro de 60 mm de lado, alineado al centro del área de trabajo, con el cual se conformará un área de trabajo sobre la lámina de 150 mm x 150 mm, con el cual se podrá colocar a prueba la capacidad de la técnica de conformado incremental monopunto para realizar líneas rectas anexando que el prototipo es lo más simple posible en vista de que es un trabajo experimental de inicio con el objetivo de que en futuros estudios se realicen trabajos con geometrías más complejas, otro aspecto a considerar en este estudio es que hay

variables que no se podrán estudiar a precisión por la ausencia de herramientas y equipos de mediciones de última tecnología.

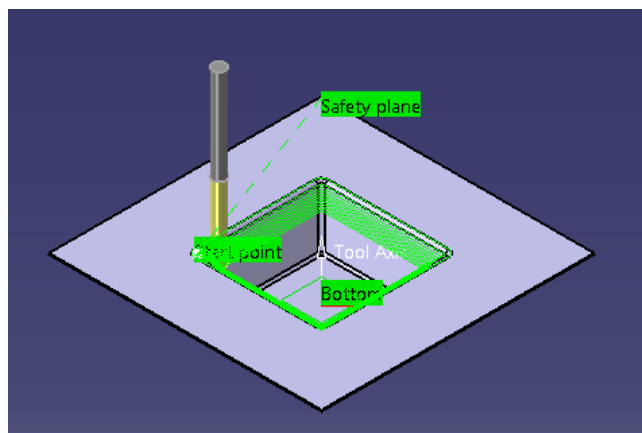
Para la realización del modelo, tomando en cuenta que el área de trabajo es de 150 mm x 150 mm, se evaluará el desempeño del proceso frente a situaciones de cambio de dirección de los ángulos.

Respecto a la deformación de la lámina de metal, se estudiará el desempeño con una profundidad de 30 mm, los radios de curvatura son de 2.5 mm para todos los prototipos. La deformación se configuran con ángulos de penetración de 50°, 60° y 65° con lo cual se planea evaluar la capacidad de la técnica de conformado incremental monopunto de lograr ángulos cercanos a 90°, puesto que en investigaciones anteriores, se han experimentado solo hasta los 60°, en donde se produjo la rotura.



**Figura 35:** Prototipo 1 de 65°

Se realizó la simulación en programa CAD/CAM del cual surgieron los Gcodes necesarios para el proceso de fabricación en el equipo fresador CNC.

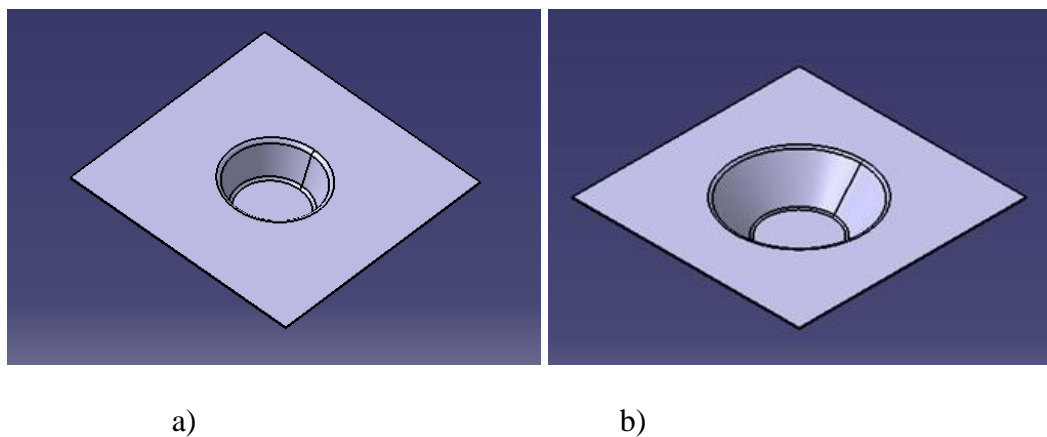


**Figura 36:** Modelado y simulación en programa CAD/CAM del prototipo 1

#### **4.2.3. Características de diseño del Prototipo 2**

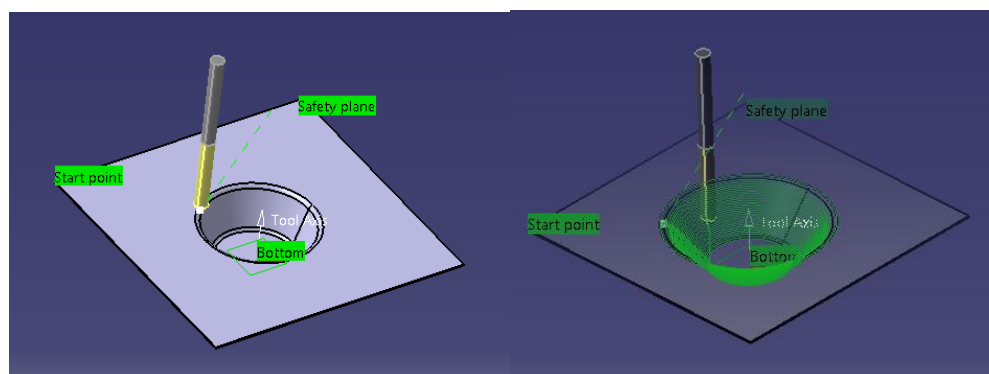
El prototipo secundario consta de un círculo de 60 mm de diámetro, centrado en la lámina, como se observa en la figura, como se mencionó en el apartado anterior la idea de la sencillez de los prototipos es hacer un estudio más detallado con las herramientas que se disponen en campo.

Para los parámetros de deformación, se eligió una profundidad de 30 mm, con radio de curvatura interno al fondo del objeto de 2.5 mm y externo en la superficie de la lámina de metal de la misma longitud. En lo que respecta al ángulo de penetración, esta vez se eligen  $75^\circ$ ,  $70^\circ$  y  $50^\circ$  con la finalidad de suavizar la pendiente de las paredes al ser una figura más profunda. Cabe destacar que el radio de curvatura de 2.5 mm, le provee a la figura un acabado final más suave y circular, principalmente en el fondo. En la figura 37, se observa el modelo del diseño final.



**Figura 37:** Prototipo 2 a) ángulo de 70°, b) ángulo de 50°

De igual forma se realizó la simulación en programa CAD/CAM del cual surgieron los Gcodes necesarios para el proceso de fabricación en el equipo fresador CNC.



**Figura 38:** Modelado y simulación en programa CAD/CAM del prototipo 2

#### 4.3. Parámetros a evaluar.

Los parámetros a tomar en cuenta para la evaluación de la técnica de conformado incremental, son los siguientes:

- Longitud del radio de curvatura de interno y externo de las piezas.
- Capacidad de formar líneas rectas.
- Capacidad de formar segmentos curvos.
- Medición del ángulo de penetración.
- Capacidad de realizar la deformación de la hoja de metal sin generar fracturas.
- Medición de la profundidad de la pieza.
- Acabado de la figura.



## CAPÍTULO V

### 5. ENSAYOS EXPERIMENTALES

#### 5.1. Construcción de los prototipos seleccionados

Una de las etapas más importantes del proceso de diseño es la construcción, en esta etapa las teorías, cálculos e ideas se ponen en práctica para obtener un resultado con errores y aciertos. Una buena manufactura de los prototipos nos traerá buenos resultados en cuanto a: mantener uniformidad de las propiedades mecánicas, reducción de las concentraciones de esfuerzos mecánicos en ciertas áreas y por sobretodo el aspecto estético que mejore y de buen acabado superficial. Es de tener en consideración que los aspectos y parámetros calculados científicamente en algunos casos son modificados dentro del proceso real de construcción, esto a consecuencias de factores externos, como por ejemplo: herramientas desgastada, impurezas dentro del material a conformar, mal aseguramiento de herramientas y piezas a trabajar, falta de elementos de enfriamiento durante el proceso, falta de lubricación, etc.

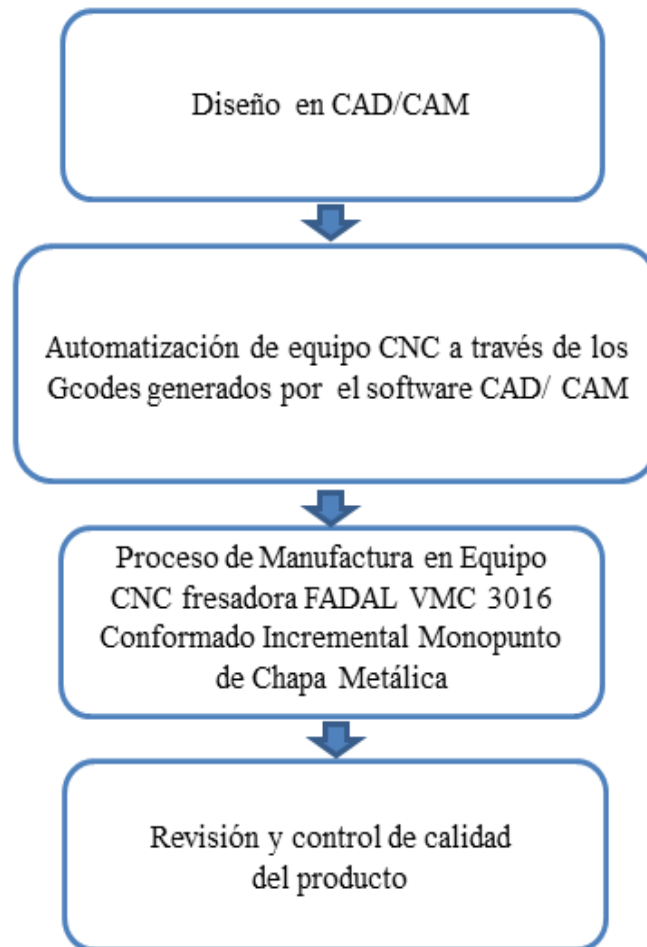
A continuación se presenta una ligera descripción del proceso de construcción de los dos prototipos, es de mencionar nuevamente que el presente trabajo es de tipo experimental, en la cual se manipularán una o más variables y otros tipos de variables que serán controladas y medidas. Se realizará el conformado con el equipo CNC Fresadora FADAL VCM 3016 como ya se había mencionado anteriormente

**Tabla 5***Variables presentes en el proceso de construcción*

<b>Variables Fijas</b>	
Profundidad de Penetración	30 mm
Velocidades del husillo	100 RPM
Potencia de trabajo	11 Kw
Tasa de Desplazamiento rápido en X	10,160 mm/ min
Tasa de Desplazamiento rápido en y	17,180 mm/ min
Tasa de Desplazamiento rápido en Z	17,180 mm/ min
<b>Variables Modificables</b>	
Angulo de Penetración	50°, 60°, 65°, 70° y 75°
Área de trabajo sobre la lamina	15 x 15 cm, 225 cm <sup>2</sup>
Sistema de Enfriamiento	Agua, Aire
Lubricación	Aceite

Anterior al trabajo de construcción de los prototipos se había realizado la selección y construcción de la herramienta de trabajo de la cual resulto: herramienta de Acero de Alta Resistencia 41L40, tratada con un proceso de pulitura, con longitud de 130 mm y diámetro de 10

mm y paralelo a esto se desarrolló el trabajo de construcción del utillaje (BlankHolder) para el posicionamiento y soporte de las placas metálicas para nuestro caso aluminio 7075- O.



**Figura 39:** Diagrama del proceso de conformado

La figura 39 muestra un diagrama representativo del proceso de construcción de los prototipos sometidos estudio teniendo en consideración las variables mencionadas anteriormente las cuales serían sometidas a estudio. El proceso inicia con el diseño de los dos prototipos en un software

de CAD/CAM, posterior a esto se tendrán los códigos Gcodes utilizados para realizar el proceso de automatización del equipo CNC, teniendo como premisa que este equipo mencionado sería una variable fija, estaríamos sujetos al desarrollo de estos prototipos bajo las condiciones de trabajo que este equipo ofrece las cuales se mencionan en la tabla, una vez realizada la automatización se procede con la instalación de las herramientas de utillaje (BlankHolder) en él se realiza el posicionamiento de la chapa de aluminio de medidas 250 mm x 250 mm, es de acotar que se estimó un tiempo de montaje del utillaje de 10 min que involucra el aseguramiento con pernos de la lámina de aluminio, posterior se procede con la instalación de la herramienta de conformado, se selecciona y se termina de programar el patrón o modelo a seguir para el equipo CNC, es de considerar que el trabajo de conformado incremental de monopunto se efectuó sin usar un elemento refrigerante o disipador de calor aire durante todo el proceso de conformado, en el cual no se presentó elevados gradientes de temperatura que llevaran a tomar la decisión de utilizar un refrigerante, pero se usó por precaución lubricante en aceite.



*Figura 40.* Preparación del equipo CNC para la conformación de la placa

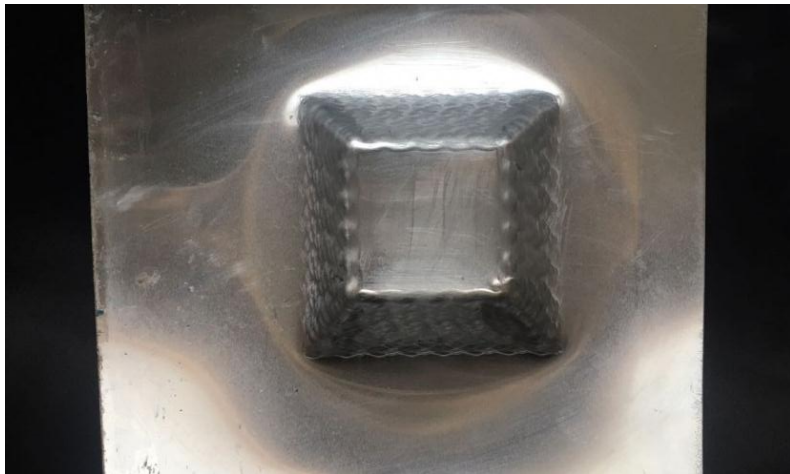


*Figura 41:* Realización de los ensayos con SPIF

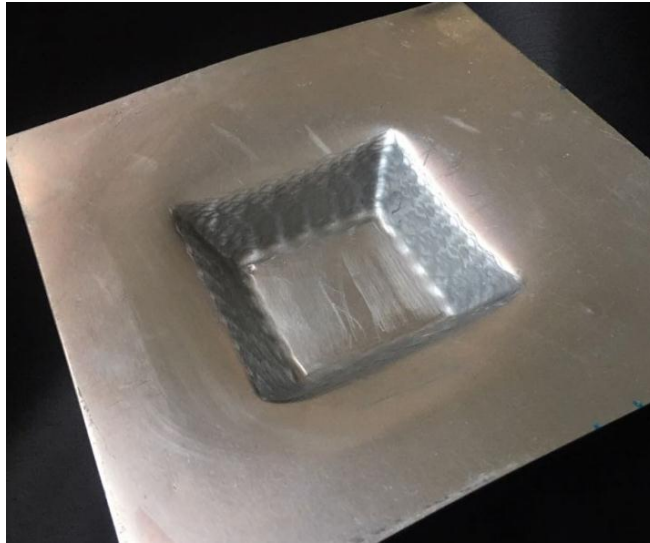
Una vez finalizado el proceso que se estimó dura alrededor de 10 min para cada prototipo, se desmonta el modelo obtenido y se somete a inspección visual y a análisis de resultado obtenido.

Se realizó 6 conformados los cuales se mencionan a continuación y de los que se tienen el siguiente resultado:

- Ensayo 1 para obtener primer prototipo cuadrado, se trabajó con velocidad del husillo de 100 RPM, potencia del husillo 11 Kw, un ángulo de penetración de  $60^\circ$  sobre un área de 150 mm x 150 mm, para una profundidad programada de 30 mm, se obtuvo después de la conformación un área en la base de 58,35 mm x 58,35 mm y una profundidad de 28,48 mm.



**Figura 42:** Ensayo 1 vista superior de la lámina conformada



**Figura 43:** Ensayo 1 vista isométrica de la lámina conformada



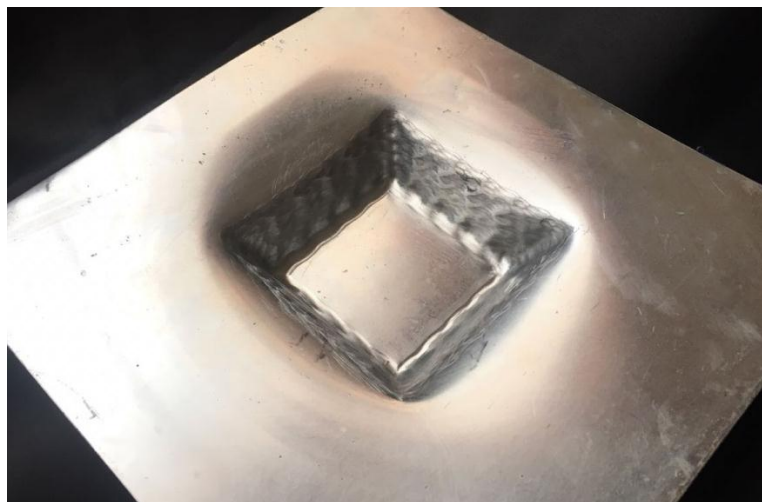
**Figura 44:** Ensayo 1 vista lateral de la lámina conformada

- Ensayo 2 para obtener segundo prototipo cuadrado, se trabajó con velocidad del husillo de 100 RPM, potencia del husillo 11 Kw, un ángulo de penetración de  $65^\circ$  sobre un área de 100 mm x 100 mm, para una profundidad programada de 30 mm, se obtuvo

después de la conformación un área en la base de 56,74 mm x 58,35 mm y una profundidad de 28,21 mm.

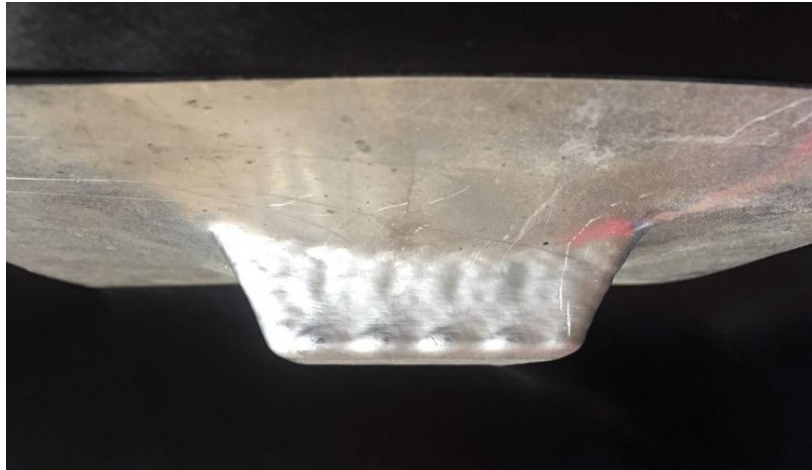


**Figura 45:** Ensayo 2 vista superior de la lámina conformada



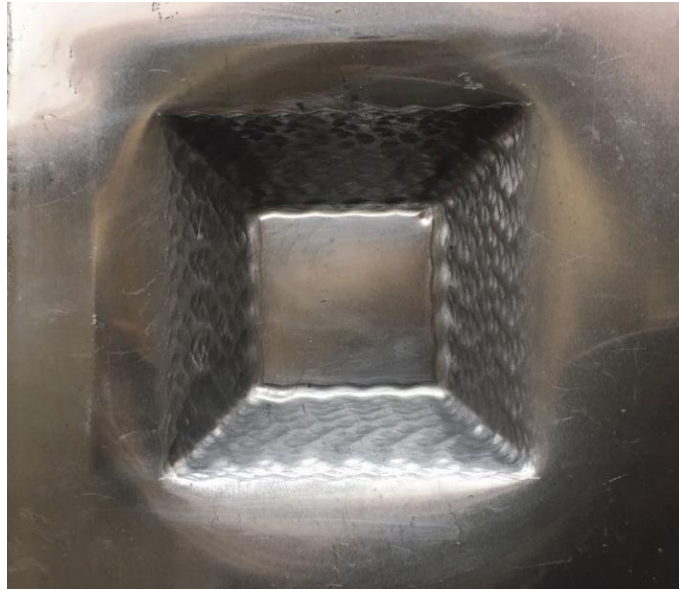
**Figura 46:** Ensayo 2 vista isométrica de la lámina conformada



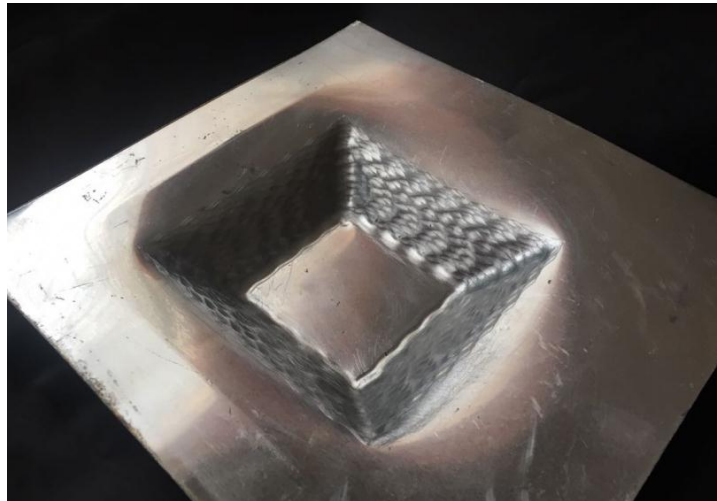


**Figura 47:** Ensayo 2 vista lateral de la lámina conformada

- Ensayo 3 para obtener tercer prototipo cuadrado, se trabajó con velocidad del husillo de 100 RPM, potencia del husillo 11 Kw, un ángulo de penetración de  $50^\circ$  sobre un área de 100 mm x 100 mm, para una profundidad programada de 30 mm, se obtuvo después de la conformación un área en la base de 58,11 mm x 58,35 mm y una profundidad de 28,86 mm.



**Figura 48:** Ensayo 3 vista superior de la lámina conformada



**Figura 49:** Ensayo 3 vista isométrica de la lámina conformada



**Figura 50:** Ensayo 3 vista lateral de la lámina conformada

- Ensayo 4 para obtener primer prototipo circular, se trabajó con velocidad del husillo de 100 RPM, potencia del husillo 11 Kw, un ángulo de penetración de  $75^\circ$  sobre un diámetro de 60 mm, para una profundidad programada de 30 mm, se obtuvo después de la conformación que a una profundidad de 10,70 mm se produjo fractura del material, con un diámetro de 58.52 mm.



**Figura 51:** Ensayo 4 vista superior de la lámina conformada



**Figura 52:** Ensayo 4 vista isométrica de la lámina conformada



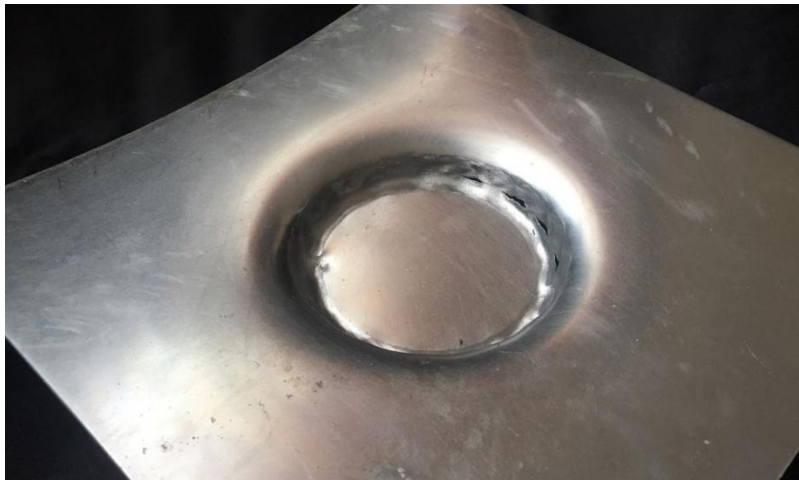
**Figura 53:** Ensayo 4 vista lateral de la lámina conformada

- Ensayo 5 para obtener segundo prototipo circular, se trabajó con velocidad del husillo de 100 RPM, potencia del husillo 11 Kw, un ángulo de penetración de  $70^\circ$  sobre un diámetro de 60 mm, para una profundidad programada de 30 mm, se obtuvo después

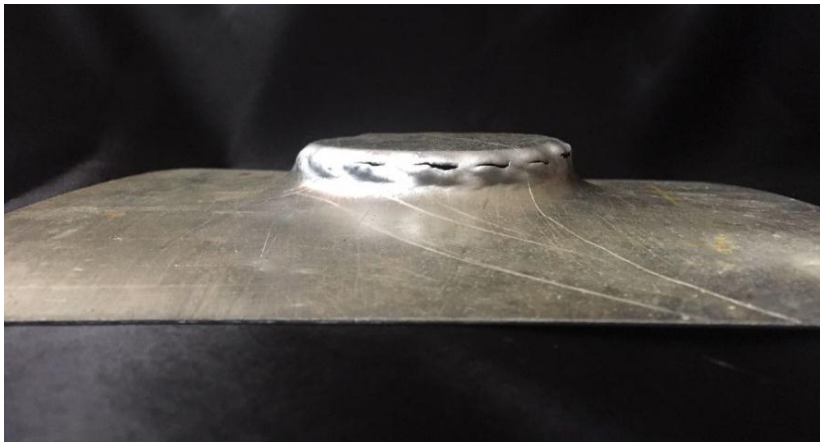
de la conformación que a una profundidad de 12,20 mm se produjo fractura del material.



**Figura 54:** Ensayo 5 vista superior de la lámina conformada



**Figura 55.** Ensayo 5 vista isométrica de la lámina conformada

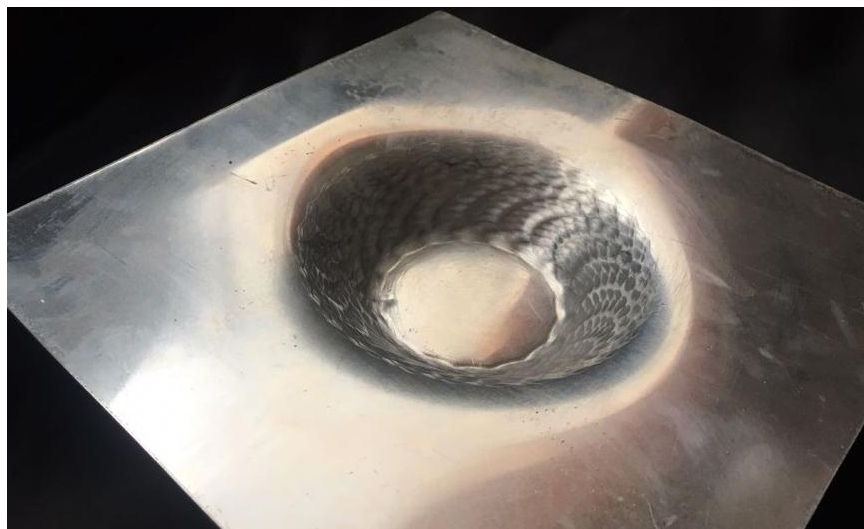


**Figura 56.** Ensayo 5 vista lateral de la lámina conformada

- Ensayo 6 para obtener segundo prototipo circular, se trabajó con velocidad del husillo de 100 RPM, potencia del husillo 11 Kw, un ángulo de penetración de  $50^\circ$  sobre un diámetro de 60 mm, para una profundidad programada de 30 mm, se obtuvo después de la conformación una profundidad de 27,93 un diámetro de 58,77 mm.



**Figura 57.** Ensayo 6 vista superior de la lámina conformada



*Figura 58.* Ensayo 6 vista isométrica de la lámina conformada



*Figura 59:* Ensayo 6 vista lateral de la lámina conformada

**Tabla 6**  
*Resultados*

Ensayos		Medidas (mm)		Error	Observaciones
Geometría	Ángulo de penetración	Teórico	Real	(%)	
Cuadrado de lado 60mm	Ensayo 1:	Prof.: 30	28.48	5.06	Mayor error en la profundidad
	60°	Lado: 60	58.35	2.75	
	Ensayo 2:	Prof.: 30	28.21	5.96	Mayor error en la profundidad
	65°	Lado: 60	57.55	4.08	
	Ensayo 3:	Prof.: 30	28.86	3.80	Mayor error en la profundidad
	50°	Lado: 60	58.23	2.95	
Círculo de diámetro 60mm	Ensayo 4:	Prof.: 30	10.70	64.33	Rotura a los 10.70mm
	75°	Ø: 60	58.52	2.46	
	Ensayo 5:	Prof.: 30	12.20	59.33	Rotura a los 12.20mm
	70°	Ø: 60	59.12	1.46	
	Ensayo 6:	Prof.: 30	27.93	6.90	Mayor error en la profundidad
	50°	Ø: 60	58.77	2.05	

Como se puede observar en la tabla 6, los errores más grandes de los ensayos son en la profundidad, más no tanto en la geometría de la pieza, ya que esta tiene valores de error aceptables. Se produjo rotura en los ensayos 4 y 5, ya que estos tenían un ángulo de penetración



mayor por tanto se comprueba anteriores teorías de que esta técnica como tal no puede llegar a ángulos cercanos a los 90°.

## **5.2. Costos asociados al desarrollo del proyecto**

La tabla siguiente muestra un desglose de los gastos más significativos de se presentaron durante el desarrollo de la investigación, pudiéndose dar una conclusión al respecto que la mayor concentración de costos económicos se encuentran para nuestro caso de estudio en la adquisición del material para la fabricación de herramientas, utillaje y material para ensayo, pero hay que tomar en cuenta que este gasto se realiza una sola vez, y se puede fabricar cualquier tipo de diseño de prototipos, lo cual no sucede en otros procesos de conformado en los que al cambiar el diseño cambia la matricería sumando gastos al total.

Por otro lado la adquisición de las licencias para la utilización de los programas para el diseño en CAD/CAM también representó un costo e inversión.

En cuanto a los gastos del personal o recurso humano para la realización de la investigación es de recordar que el autor fue responsable intelectual del desarrollo y ejecución de las tareas de logística, ubicación y adquisición de material, fabricación de herramienta y de utillaje, y por otro lado encargado del ensayo o conformado de la placa, claro todo esto bajo supervisión de personal docente. Otros gastos no se incluyeron en tabla pero es necesario recordarlos como son gastos relacionados al consumo energético para los procesos de fabricación y manufactura de conformado, y algunos costos indirectos no precisados que fueron de bajo valor.

**Tabla 7***Gastos asociados al desarrollo de la investigación*

Rubro o Actividad	Descripción	Costos (\$)	
		Valor unitario	Valor Total
Materiales e Insumos de Investigación			
Material de oficina	Insumos de oficina	25	25
Materiales para la construcción de la herramienta	Material para realización de la herramienta	80	80
	Tratamiento térmico	40	40
Material para construcción del soporte o utillaje de sujeción (blankholder)	Placas para las bridas 250x250mm e:10mm y corte CNC	75	150
	Placa de soporte 270x270mm e:18mm y corte CNC	50	50
	Ejes de 140mm, Ø:30mm	15	60
	Tuercas, pernos y arandelas	10	10
Materiales de prototipos	Láminas de aluminio e:1mm	5	30
Servicios Técnicos de Apoyo			
Contratación de profesionales de apoyo	Tutorías personalizadas	50	50
	Tutoriales descargados de páginas oficiales	50	50
Movilidad	Gastos de movilización	25	25
Recursos Humanos			
Mano de obra contratada	Mano de obra extra	100	100
<b>Total</b>			<b>670</b>

## CAPITULO VI

### 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1. Conclusiones

- Se estudió el proceso de conformado incremental, sus características y propiedades más importantes, así como sus ventajas y desventajas para las futuras aplicaciones. Pero al ser un proceso que no está matemáticamente definido y del cual aún no existe mucha información, se podría cuantificar en que se logró un estudio del 70%, lo que quiere decir que el estudio podría ampliarse.
- Se pudo comprobar que el proceso de conformado incremental posee las siguientes ventajas frente a otros procesos de conformado de chapa: bajo costo de la lámina, buena relación resistencia y peso, fácil conformación, automatización del proceso de producción, precisión de trabajo, acabado superficial y trabajo en frío, aunque aspectos en contra a considerar son: los tiempos de producción se incrementan, en relación a otros procesos de producción a gran escala, la producción puede verse limitada a baja escala, para el caso de ángulos rectos requiere varios pases de la herramienta para lograr un mejor acabado y precisión.
- En vista de que el proceso de conformado incremental no requiere de matrices de ningún tipo abarata los costos de fabricación, además de poder realizar cambios de

medidas y tallas en los diseños sin ninguna complicación alguna, lo cual lo hace viable para el prototipado rápido.

- Se puede contar con un proceso que no requiere altas velocidades de giro del usillo, por lo cual no es ruidoso, ni requiere de una supervisión excesiva.
- Se observó un springback o cambio de geometría de la pieza al momento del desmontaje una vez terminado el proceso de conformado incremental, esto posiblemente a consecuencia de diseño de la herramienta, así como también el diseño del utillaje y al tipo de material utilizado en nuestro caso aluminio por ser un material altamente dúctil.
- Según los resultados obtenidos se pudo observar una imprecisión de geometría entre el diseño deseado y el obtenido al final del proceso de conformado en las medidas, pero este error no pasa del 6% en las piezas que no tuvieron rotura, por lo que podemos decir que para ser las primeras pruebas y ensayos los resultados son satisfactorios.
- Se observó en nuestros resultados que el acabado superficial no fue el deseado, en los seis ensayos, en este caso por el diseño de la herramienta la cual tenía un ligero desnivel, por lo que el acabado de las piezas es bajo en comparación al deseado.
- Se presentó ruptura en dos ensayos del prototipo circular el de  $70^\circ$  y  $75^\circ$  en momentos cuando aún no alcanzaba la profundidad deseada, este efecto lo ocasiona el ángulo de la herramienta, pues se observó para los ensayos realizados que al acercarse el ángulo de la herramienta a los  $90^\circ$  y en nuestro caso específico ángulos superiores a  $65^\circ$  se produce ruptura del material conformado.

## 6.2. Recomendaciones

- Se recomienda y se hace muy necesario evaluar la calidad de la chapa metálica que se adquiriera para el análisis de manera de asegurar las mejores condiciones de esta, pues en el caso de nuestro proyecto, se presentó el inconveniente de la falta de disponibilidad del producto, y una vez ubicada, la calidad de la misma en cuanto a acabado superficial no era el más aceptable, aun cuando sus propiedades físicas y estructurales cumplían con lo requerido.
- Se recomienda verificar el acabado superficial tanto en la herramienta de conformado como también en el soporte rígido, en las bridas de sujeción.
- Es necesario en futuros estudios poder manipular y controlar variables de estudio que en nuestro caso no pudo ser evaluado como fue variar el espesor de la lámina, variar el diámetro de la herramienta a utilizar, así como las velocidades de paso, esto con el objetivo de tener un estudio y resultados más concluyentes.
- Se recomienda la utilización de mejores mecanismos de medición y control de variables como por ejemplo: galgas extensiométricas, medición de espesores para láminas, medición con ultrasonido, medición de tensiones, medición de torque y fuerza con la que se ajusta el soporte rígido a la chapa, etc, con el objetivo de dar una mejor conclusión cuantificada del estudio realizado.
- Se recomienda analizar más a profundidad cada tema para futuros estudios, y para poder realizar una implementación de este tipo de conformado en el país, ya que este al

ser el primer trabajo sobre el tema, solo es un escalón de subida hacia este nuevo e innovador proceso.

- Se recomienda un uso de utillaje que permita el cambio de lámina o chapa metálica más eficiente, ya que este proceso se hace un tanto tedioso al momento de realizar el cambio de lámina para realizar un nuevo prototipo.
- Se recomienda realizar para futuros trabajos, un completo estudio de deformaciones y tensiones a las cuales es sometido el material durante el proceso de conformado incremental monopunto, este puede llevarse a cabo haciendo uso de un software de elementos finitos.
- A partir de este estudio, se recomienda también para futuros trabajos, un completo estudio de la influencia del diámetro y velocidad de giro de la herramienta en el acabado superficial del proceso de conformado incremental monopunto.

## BIBLIOGRAFIA

Centeno, G. et al., (2012). *Hole-flanging by incremental sheet forming*. International Journal of Machine Tools and Manufacture.

Fahrettin, O. Murat, D. y Turkoz, M. (2009). *Grid Marking and Measurement Methods for Sheet Metal Formability*.

Filice, L., Fantini, L. & Micari, F., (2002). *Analysis of Material Formability in Incremental Forming*. Annals of the CIRP, Vol 51.

Guerrero, B. (2014). *Aplicación de conformado incremental mono punto al diseño de una prótesis médica individualizada*. Universidad de Sevilla. Recuperado de <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/60217/fichero/PFC+-+BLANCA+GUERRERO+MUNOZ.pdf>

Hariharan K., Balaji C. (2009). *Sheet Metal-Forming Analysis*. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 209

Jeswiet, J. et al., (2010). *Asymmetry Single Point Incremental Forming of Sheet Metal*.

Kim, Y. & Park, J., (2002). *Effect of process parameters of formability in incremental forming of sheet metal*. Journal of Materials and Processing technology.

Marciniak, Z., Duncan, J. & Hu, S., (2002). *Mechanics of Sheet Metal Forming*. London: Butterworth-Heinenrmann.

Powell, N. & Andrew, C., (1992). *Incremental forming of flanged sheet metal components without dedicated dies*. IMECHE parte B, J. of Engineering Manufacture, Vol 206.

Powell, N. & Andrew, C., 1992. *Incremental forming of flanged sheet metal components without dedicated dies*. IMECHE of Engineering Manufacture, Vol 206.

Sellés, M. & Sanchez, S (2012). *El conformado incremental como nueva técnica de prototipado rápido*. Recuperado en diciembre de 2017 de <https://www.3ciencias.com/wp-content/uploads/2012/08/4.conformado-incremental1.pdf>

Suntaxi, G. (2013). *Análisis experimental de deformaciones límites en chapas de acero AISI 304 en conformado incremental*. E.T.S. de ingenieros, Universidad de Sevilla. Recuperado en febrero 2017 de <http://repositorio.educacionsuperior.gob.ec/bitstream/28000/1203/1/T-SENESCYT-000334.pdf>



Taylor B. (1985). *Sheet Formability Testing, Metals Handbook*. 9th ed. Mechanical Testing, American Society for Metals.

Urrutia, B. & Aranzabal, N. (2013). *Utilización del conformado incremental de chapa para fabricar pieza de electrodoméstico industrial*. Fagor Industrial, Congreso de Máquina-Herramienta. Recuperado de <http://www.interempresas.net/Deformacion-y-chapa/Articulos/113712-Utilizacion-conformado-incremental-chapa-fabricar-pieza-electrodomestico-industrial.html>