

*Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas*

*Facultad de Ingeniería Mecánica*

*Departamento de Ingeniería Mecánica*

## *Trabajo de Diploma*

*Título: Parámetros tecnológicos del proceso de estampado incremental de chapas por punto simple.*

*Autor: Yunisbel García Padrón*

*Tutor: Ing. Alexis Alonso Martínez*



2013

*“Año 55 de La Revolución”*

*Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas  
Facultad de Ingeniería Mecánica  
Departamento de Ingeniería Mecánica*



## *Trabajo de Diploma*

*Título: Parámetros tecnológicos del proceso de estampado  
incremental de chapas por punto simple.*

*Autor: Yunisbel García Padrón*

*Tutor: Ing. Alexis Alonso Martínez*

2013

*“Año 55 de La Revolución”*

## **Resumen**

La aplicación de los procesos de estampado incremental se presenta como una técnica innovadora en los procesos de conformación de materiales en todo el mundo desarrollándose distintas variantes tecnológicas del mismo. Entre estas está el estampado incremental por punto simple (EIPS). El presente trabajo tiene como objetivo exponer las principales características de este proceso de estampado incremental, sus aplicaciones, ventajas y limitaciones. Se analizaron los factores tecnológicos que inciden sobre el proceso destacándose entre ellos el tamaño de la herramienta, la profundidad de estampado, la utilización de lubricantes, el ángulo de conformación, velocidad de conformación, espesor de la chapa y como influyen estos en la calidad superficial de la chapa, demostrando la influencia de algunos de estos factores tecnológicos con experimentos realizados. Se relacionan las características y requisitos que deben tener las máquinas empleadas en el proceso, así como las herramientas utilizadas. Se realizó una comparación económica entre el proceso de estampado incremental y el convencional, comprobándose que el estampado incremental es un proceso más económico para pequeños lotes de piezas.

## **Abstract**

The application of the incremental forming process presents is presented an innovative technique in the material forming process worldwide, developed different technological variants out of it. Among them, it is the single point incremental forming (SPIF). This paper aims to present the main features of the incremental forming process, its applications, its advantages and its limitations. The technological factors that influence the process were analyzed, highlighting the tool size, the step size, the employment of lubricants, the forming angle, forming speeds, sheet thickness and their influence on the sheet surface quality, demonstrating the influence of some of these factors technological experiments carried. The characteristics and requirements that the machines in the process must have are related, as well as the tools used. It was also carried out an economical comparison between the incremental forming and the conventional forming process, resulting the first are as the more economical for small amounts of pieces.

## Índice.

Pág.

<b>Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>Capítulo I: Resultados de la revisión bibliográfica sobre los procesos de estampado incremental de chapas .....</b>	<b>4</b>
1.1.- Aplicaciones y características generales de los procesos de estampado incremental de chapas .....	4
1.2.- Descripción general del proceso de estampado incremental con punto simple (EIPS).....	8
1.2.1.- Parámetros esenciales del proceso de estampado incremental con punto simple .....	8
1.3.- Perspectivas de desarrollo de los procesos de estampado incremental con punto simple (EIPS).....	9
1.4.- Aplicaciones industriales del estampado incremental con punto simple.....	9
1.5.- Principales ventajas y desventajas del proceso como alternativa a la producción de series cortas de piezas y en la elaboración de prototipos.....	11
1.6.- Máquinas herramientas empleadas para el proceso .....	13
1.7.- Trayectorias generadas por la herramienta de conformación.....	14
1.8.- Lubricación .....	16
1.9.- Determinación de la fuerza de conformación .....	17
1.10.- Consideraciones económicas en el proceso de estampado incremental de chapas .....	19
Conclusiones parciales .....	20
<b>Capítulo II: Aspectos tecnológicos del proceso de estampado incremental con punto simple .....</b>	<b>21</b>
2.1.- Estampado incremental con punto simple (EIPS). Factores tecnológicos críticos que deciden sobre el proceso .....	21
2.2.- Factores que influyen en la precisión de las piezas .....	26
2.3.- Limitaciones del proceso de estampado incremental con punto simple .....	26
Conclusiones Parciales.....	30
<b>Capítulo III: Ensayos experimentales del proceso de estampado incremental con punto simple. (EIPS) .....</b>	<b>31</b>
3.1.- Selección de las herramientas de conformación .....	31
3.2.- Máquina - herramienta empleada en el proceso .....	32
3.3.- Diseño del experimento .....	34

3.4.- Resultados y discusión .....	37
3.4.1.- Influencia del paso vertical en los valores de Rugosidad superficial.....	37
3.4.2.- Influencia de la velocidad de conformación en los valores de Rugosidad superficial .....	38
3.4.3.- Influencia de la trayectoria de la herramienta .....	40
Conclusiones parciales .....	41
<b>Conclusiones generales.....</b>	<b>42</b>
<b>Recomendaciones .....</b>	<b>43</b>
<b>Referencias bibliográficas .....</b>	<b>44</b>
<b>Anexos.....</b>	<b>47</b>

## Introducción.

El estudio de los procesos de conformado y del comportamiento de los diferentes tipos de materiales utilizados para estas operaciones está en pleno desarrollo en el mundo, y han alcanzado en los últimos años una gran importancia en el mundo industrial debido al papel que juegan en el desarrollo del transporte: (la aeronáutica, el ferrocarril, los vehículos de transporte por carreteras y los barcos) ya que en todos estos medios, su efectividad depende en gran parte de la reducción de su peso.

Las tecnologías tradicionales resultan costosas debido al alto coste de equipos, punzones, y matrices que han de ser fabricados con un perfil muy parecido al de la pieza final, y debido también al tiempo de set-up de las máquinas. Por tanto, estas tecnologías sólo resultan rentables para grandes lotes de producción. Por otro lado, las tecnologías tradicionales permiten alcanzar un alto nivel de automatización renunciando, sin embargo, a la flexibilidad.

Para lograr la deformación de un material este debe poseer la propiedad de ser conformable. No obstante la conformación de materiales no se puede definir en función de una única propiedad del material, ya que depende del proceso de conformación en particular, como por ejemplo el embutido profundo (*Deep-drawing*), el tenso estampado (*Stretch-forming*); el estampado incremental (*ISP - Incremental Sheet Forming*) que tiene gran aplicación en la producción de lotes pequeños, donde la forma de los productos tiende a variar en un corto espacio de tiempo, siendo estos productos, tanto de geometrías simples, como también complejas.[41]

La aplicación de los procesos de estampado incremental se presenta como una técnica que está marcando un punto de cambio en la interpretación y aplicación de los procesos de conformación de materiales en todo el mundo. De hecho, los procesos de estampado incremental de chapas representan un concepto radicalmente diferente en relación a los procesos convencionales de conformación de chapas, en el que se introducen las ventajas tecnológicas que los hacen sostenibles y energéticamente muy competitivos.

La tecnología de ISF es un enfoque de conformado que utiliza la tecnología de control numérico para fabricar una pieza a partir del material en chapa. Se compone de una serie de operaciones locales de conformado que conducen a la geometría final de la pieza sin la necesidad de herramientas costosas o matrices, implica el uso de una única herramienta de punta redondeada para realizar deformaciones locales progresivamente en chapas metálicas. Este proceso ofrece ventajas como: reducción del tiempo de entrega de la pieza finalizada, alta fiabilidad y bajo coste para aplicaciones de lotes pequeños. [41]

El desarrollo de la tecnología de estampado incremental permite analizar procesos muy importantes que se utilizan para deformar chapas metálicas como son: el estampado incremental con punto simple que permite obtener piezas con simetría axial, con herramientas de perfil simple y dispositivos prensa – chapa fijado a la mesa del centro de maquinado CNC y el estampado incremental de dos puntos o múltiples puntos.

### **Principal resultado a obtener.**

Hasta el momento, esta tecnología está siendo desarrollada por numerosos investigadores alrededor del mundo y se presentan diversos resultados para determinadas condiciones tecnológicas y aplicaciones. Por tal motivo, como principal resultado se obtendrá un estudio sobre la tecnología de estampado incremental de chapas con punto simple que permita comprender sus ventajas tecnológicas y limitaciones.

### **Objetivo general.**

Presentar los principales aspectos y factores tecnológicos del estampado incremental de chapas con punto simple y su influencia mediante la realización de varios ensayos experimentales.

### **Objetivo específicos.**

1. Estudiar las características de los procesos de estampado incremental de chapas.
2. Analizar los principales factores tecnológicos que influyen en el proceso de estampado incremental de chapas con punto simple como alternativa en la manufactura de piezas conformadas.
3. Evaluar el comportamiento de la rugosidad superficial en función de algunos parámetros tecnológicos del proceso de estampado incremental por punto simple.

### **Hipótesis:**

Una correcta selección de los parámetros del proceso de estampado incremental por punto simple posibilitará una mejora de la rugosidad superficial en las piezas conformadas.

### **Tipo de investigación a desarrollar.**

Atendiendo a las orientaciones para la realización de este trabajo de diploma fue seleccionada, la modalidad de investigación diseño experimental, debido a se asignan determinadas condiciones iniciales (experimentales) para el estudio de las variables seleccionadas, además de que se manipulan intencionalmente dichas variables buscando comprobar una hipótesis determinada; y

correlacional – explicativa ya que se intenta obtener mediante la correlación de las variables, la explicación del comportamiento de unas variables frente a otras.

### **Estructura del trabajo.**

El trabajo consta de una síntesis o resumen, introducción, tres capítulos, conclusiones, recomendaciones y bibliografía.

En el primer capítulo se realiza una búsqueda bibliográfica donde se plasman los conceptos generales sobre los procesos de conformación incremental de chapas, propiedades tecnológicas de interés, limitaciones, ventajas, aplicaciones, etc. Se expone un modelo teórico para determinar las fuerzas de conformado y se abordan además las perspectivas de desarrollo de los procesos de estampado incremental.

En el segundo capítulo se abordan los aspectos tecnológicos del proceso de EIPS con más profundización, relacionando las herramientas, máquinas, materiales, limitaciones y que influencia tienen sobre la calidad superficial del producto y la variación del espesor de la chapa.

Para finalizar, en el tercer capítulo se realizan diferentes ensayos para ver el comportamiento de la calidad superficial en función de algunos parámetros del proceso de EIPS como son la velocidad de conformación, incremento vertical y diámetro de la herramienta.

## **Capítulo I: Resultados de la revisión bibliográfica sobre los procesos de estampado incremental de chapas.**

Los procesos de deformación plástica se definen y clasifican conforme a sus características técnicas y aplicaciones. El forjado, la extrusión, el perfilado, el trefilado, laminado son ejemplos de procesos de deformación plástica. Las dos mayores y más importantes aplicaciones del proceso de estampado se encuentran en la industria automovilística y en la industria aeronáutica.

El término “estampado” generaliza varias operaciones de manufactura realizadas en chapas de metal, donde siempre ocurren alteraciones en su forma geométrica, produciendo dobleces, embutidos, punzonados, etc. Su principal ventaja está en el gran aprovechamiento de la materia prima, con una reducida pérdida de material, diferente a otros procesos de manufactura como el maquinado. [3]

El (*ISF – Incremental Sheet Forming –*) estampado incremental de chapas, es un proceso de conformación innovador, el cual es capaz de producir piezas de geometrías complejas, utilizando la tecnología por control numérico (CNC) ya ampliamente difundida en los procesos de manufactura de metales. Presenta como principales ventajas: a) bajos costos de preparación de la máquina herramienta, b) utilización de máquinas CNC de tres ejes comunes, c) gran flexibilidad, ya que nuevos productos se obtienen al cambiar solo el modelo de diseño (*CAD – Computer Assisted Design*), permitiendo así la producción de pequeños lotes de piezas. [31]

Uno de los principales obstáculos para la aplicación industrial de la tecnología *ISF* está relacionado con la exactitud entre el modelo *CAD* y la pieza real debido a las deformaciones elásticas que se producen en el proceso. Existen recursos que compensan este efecto, pero que pueden variar mucho, dependiendo de la complejidad geométrica del producto, requiriendo su corrección y ajuste.[27]

Estudios recientes han analizado la viabilidad técnica-comercial, demostrando que la precisión dimensional del producto final es un factor importante que limita tecnología de conformado. [16]

### **1.1.- Aplicaciones y características generales de los procesos de estampado incremental de chapas.**

Las operaciones de conformación de chapas por métodos convencionales requieren del uso de componentes específicos y herramientas costosas en su diseño y fabricación, lo cual demora tiempo de elaboración según la complejidad de la pieza. El proceso de conformado incremental es una de las tecnologías que ha surgido como una alternativa a los procesos de estampado convencional para diferentes producciones. Este normalmente se considera un proceso de conformación sin matriz con

el cual se pueden obtener formas complejas tridimensionales usando herramientas relativamente simples. La idea básica de las operaciones de conformado incremental es la obtención de una pieza con la forma deseada mediante una herramienta de pequeñas dimensiones cuyo movimiento sigue una trayectoria determinada por el usuario. Por tanto, ya no son necesarios punzones y matrices convencionales ya que la forma final de la pieza sólo depende de la trayectoria asignada a la herramienta y es obtenida al sumarse localmente las deformaciones plásticas inducidas por la herramienta a lo largo de su trayectoria. [32]

Este proceso ha recibido una creciente atención de la comunidad de ingeniería debido a su flexibilidad y los bajos costos. Esta nueva tecnología posibilita la elaboración de prototipos rápido de piezas antes de su producción. [42]

La realización de diferentes experimentos para este proceso de conformado incremental han podido ser clasificados ampliamente en dos categorías: con matriz y sin matriz, teniendo cada uno dos variaciones, conformado incremental negativo y conformado incremental positivo [3]. Estas cuatro configuraciones se muestran en la figura 1.1.

El conformado incremental negativo sin matriz, también conocido como estampado incremental por punto simple, es el método más reciente del estampado incremental. El conformado incremental positivo sin matriz es llamado también como estampado incremental de dos puntos. Otra variante de este proceso es un conformado incremental negativo en el cual se utiliza una matriz de forma parcial en uno de los lados de la chapa metálica a conformar.

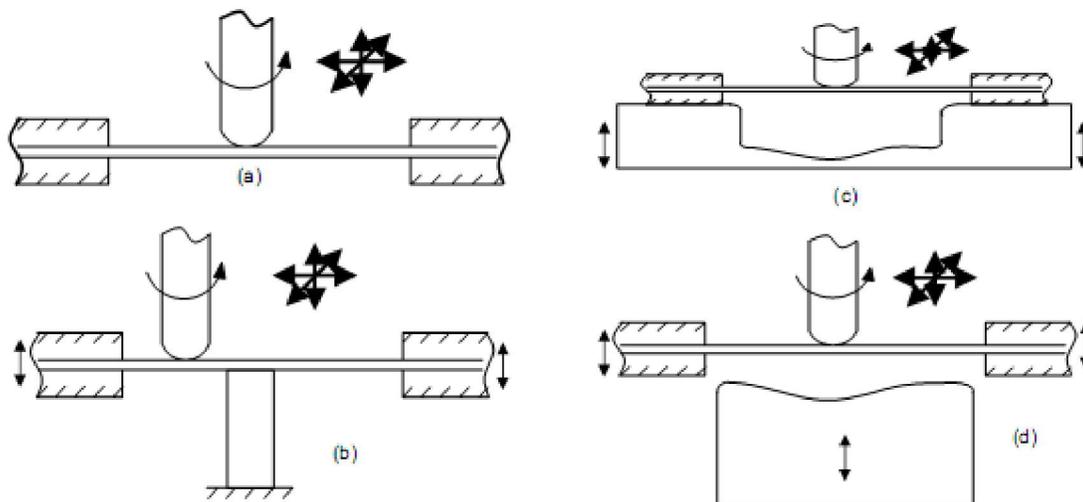


Figura 1.1: Variantes del proceso de estampado incremental. (a) Conformado negativo sin matriz, también conocido como estampado incremental por punto simple. (b) Conformado positivo sin matriz, también conocido como estampado incremental de dos punto. (c) Conformado negativo con matriz. (d) Conformado positivo con matriz. [42]

El proceso de estampado incremental se puede utilizar para conformar todo tipo de metales, siempre y cuando sean lo suficientemente dúctiles. Hasta el momento, se han realizado piezas en aluminio, cobre, acero, acero inoxidable y titanio, siendo también posible su aplicación en aleaciones especiales. Es aplicable potencialmente en cualquier sector: automoción, aeronáutica, bienes de equipo, arte, etc. [41]

Una característica presente en los procesos de estampado en general, que también acontece en el estampado incremental es que se pueden encontrar límites de agudeza geométrica y retorno elástico. Además de la deformación plástica programada, la deformación elástica produce diferencias geométricas entre el producto final y su modelo correspondiente en CAD.

Según las revisiones bibliográficas realizadas, en la literatura se encontraron muchas observaciones útiles y pautas asociadas al conformado incremental las cuales se resumen a continuación.

- La conformabilidad en el estampado incremental por punto simple aumenta con la disminución en el tamaño de la herramienta así como el paso incremental vertical.
- El coeficiente de anisotropía presenta una influencia marcada en la conformabilidad del material, se pueden lograr grandes deformaciones con herramientas de diámetro más pequeños en la dirección transversal.
- La conformabilidad disminuye con el espesor de la chapa metálica.
- Un paso incremental grande incrementa la rugosidad superficial.
- Un aumento en el paso incremental vertical y el tamaño de la herramienta incrementa las fuerzas de conformación.
- Existen limitaciones en el ángulo máximo a obtener en el proceso en una pasada, se recomienda la metodología de pasadas múltiples para la conformación de grandes ángulos.

De lo anterior se deduce que la conformabilidad es una propiedad importante en los materiales que se deseen conformar. 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 puede deformarse bajo estas condiciones hasta unos valores límites, los cuales se representan en los diagramas límites de conformado.

Los diagramas límites de conformado consisten en un conjunto de curvas de conformado en el plano de las deformaciones principales. Es considerado como una propiedad del material; sin embargo, es función de los parámetros del proceso. A continuación, en la figura 1.2 puede verse una representación general de este tipo de diagramas.

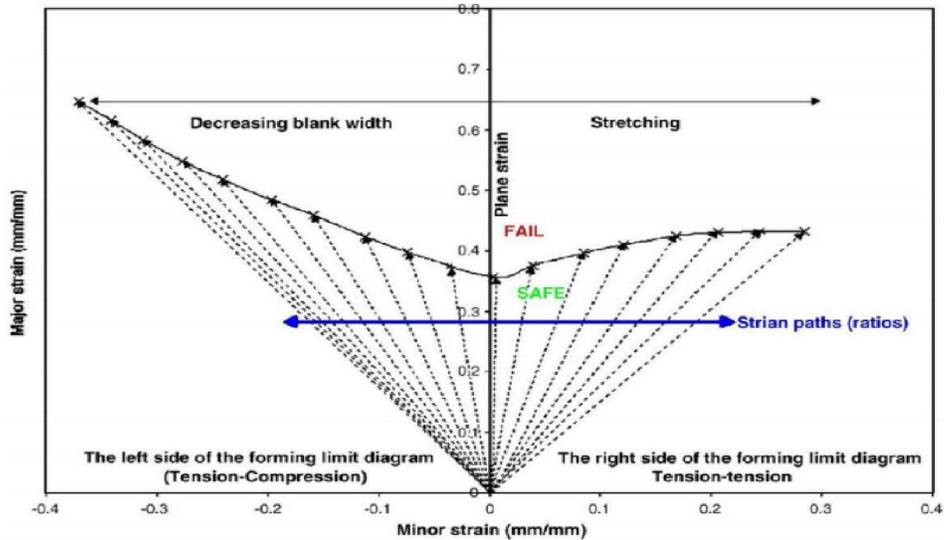


Figura 1.2: Representación esquemática del diagrama límite de conformado. [32]

Los valores a los que pueden llegar las deformaciones sin que se produzca la fractura del componente son conocidos como los límites de conformado.

En la siguiente figura se puede ver como se consiguen mayores deformaciones con un proceso de conformado incremental que con un proceso de conformado tradicional. Esta diferencia se debe a la peculiaridad de los procesos mecánicos que ocurren durante el conformado incremental. La deformación plástica inducida por la herramienta es muy localizada y está confinada en el área de contacto vecino y va progresando incrementalmente con el movimiento de la herramienta según la trayectoria asignada. Como consecuencia, se alcanzan mayores deformaciones en el material antes de que se produzca la rotura de éste.

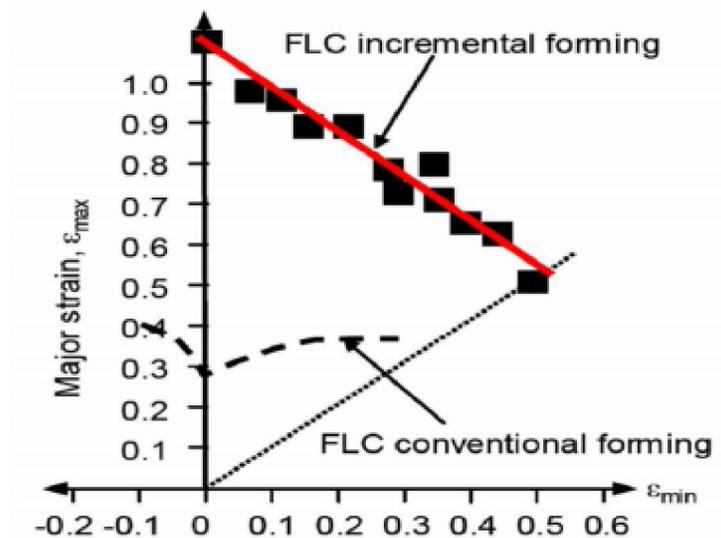


Figura 1.3: Curvas de conformado convencional y de conformado incremental para el AA1050-0. [32]

## 1.2.- Descripción general del proceso de estampado incremental con punto simple (EIPS).

El proceso de estampado incremental con punto simple (EIPS), se basa en la conformación de una chapa, el cual depende del tipo de material y sus características mecánicas. Esta chapa es puesta en un dispositivo móvil, deslizándose paralelamente en el eje z de un sistema CNC (eje vertical), el elemento de fijación evita el movimiento de la chapa mientras se está realizando el proceso de estampado, creando así una deformación plástica en la chapa, esa deformación plástica es generada por una herramienta rotatoria que se encuentra acoplada al husillo de una fresadora o centro de maquinado CNC, que inicia el proceso de estampación de la chapa deslizándose sobre su superficie deformándola gradualmente. [5 y 41]

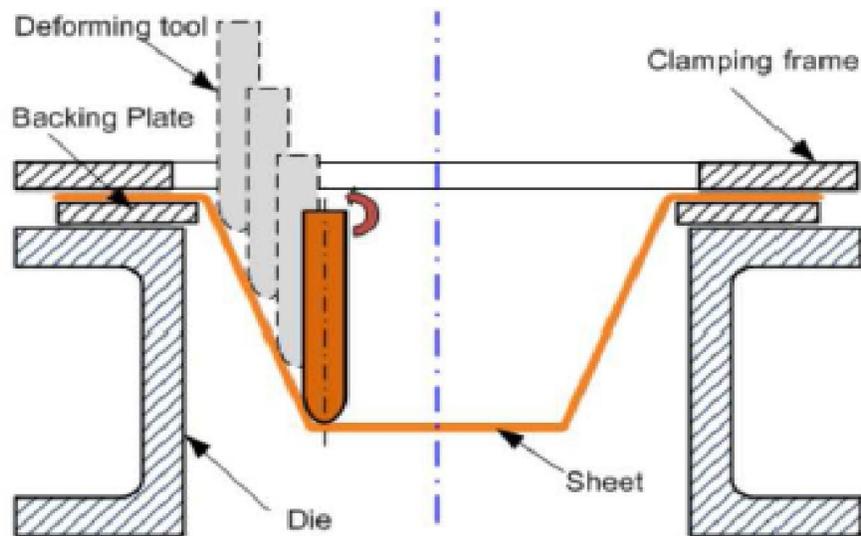


Figura 1.4: Estampado incremental de un punto o punto simple. [41]

### 1.2.1.- Parámetros esenciales del proceso de estampado incremental con punto simple.

Entre los parámetros que presentan marcada influencia en este proceso está la herramienta de estampado. Su tamaño (diámetro), forma y material de que está compuesta influyen en el tiempo de conformación, el acabado superficial y las limitaciones geométricas del producto final. El material de la chapa y su espesor definen las limitaciones del proceso de estampado de acuerdo con sus características mecánicas de conformabilidad. El desplazamiento de la herramienta y su paso vertical (profundidad de estampado), definidos por el software CAM, las velocidades radiales en (rpm) en el eje Z y las velocidades lineales en (mm/min) en los tres ejes, también ejercen una gran influencia en el acabado superficial y en el tiempo de obtención del producto final. La utilización de lubricantes o no y el tipo de lubricante que se utilice, produce alteración en la rugosidad superficial de la chapa y el desgaste de la herramienta. La principal limitación del proceso es el ángulo de inclinación máximo

que es posible dar a la chapa, siendo complejo actualmente conseguir paredes verticales sin que éstas se rompan antes.

### **1.3.- Perspectivas de desarrollo de los procesos de estampado incremental con punto simple (EIPS).**

La aplicación de los procesos de estampado incremental se presenta como una técnica que está marcando un punto de cambio en la interpretación y aplicación de los procesos de conformación de materiales en todo el mundo. De hecho, los procesos de estampado incremental de chapas representan un concepto radicalmente diferente en relación a los procesos convencionales de conformación de chapas.

Esta nueva tecnología deberá reemplazar los procesos tradicionales empleados para producir series cortas, prototipos y para el prototipado rápido (en este caso para materiales no metálicos). En un futuro esta tecnología, generará cambios fundamentales en el mundo de la fabricación por conformación de chapas, permitiendo la fabricación de productos con diseños avanzados cuya elaboración tradicional es demasiado costosa y poco efectiva para las tecnologías actuales. Gracias a la tecnología de conformado incremental de chapas, se podrá dar una solución tecnológica y económica a las empresas que producen series cortas de piezas o prototipos que se ven obligadas en la actualidad a elaborar sus productos en otros materiales, con otros diseños o por otros procesos de manufactura para evitar los problemas asociados a las tecnologías tradicionales de estampado.

### **1.4.- Aplicaciones industriales del estampado incremental con punto simple.**

De forma general, la conformación de los materiales se utiliza ampliamente en aplicaciones industriales, sin embargo, el uso del proceso de conformación incremental es factible en las siguientes aplicaciones: [3, 5, 41]

- ❖ **Industria Automovilística:** en la fabricación de chapas de automóviles (interiores y exteriores). La ventaja en este caso sería la gran flexibilidad de alteración del diseño y el costo básico, ya que no sería necesario la producción con nuevos moldes.
- ❖ **Piezas de repuesto:** la fabricación de piezas de repuesto, en situaciones en las que el fabricante original ya no hace parte de ella o no tiene las herramientas de estampado convencional disponible. Un ejemplo típico es la fabricación de piezas para vehículos más antiguos.
- ❖ **Industria mobiliaria:** en la fabricación de muebles de acero con formas redondas, de difícil producción comercial, debido a su costo.
- ❖ **Utensilios domésticos de pequeño porte:** en objetos metálicos de espesor fino y forma geométrica compleja.

- ❖ Pequeños lotes: la producción de pequeños lotes por el método de impresión convencional requiere la fabricación de la herramienta que se utiliza en una prensa. Por lo tanto, el costo final de cada parte del lote será alto debido a la distribución del coste de fabricación de las herramientas. Como el proceso ISF presenta un costo herramental bajo, el precio unitario de cada pieza es significativamente menor.
- ❖ Industria médica: en la fabricación de prótesis metálicas para sustituir partes de huesos perdidos en accidentes.
- ❖ Piezas decorativas: en la fabricación de piezas exclusivas que son muy utilizadas en el campo artístico. También constituye una importante aplicación comercial del proceso de estampado incremental en la restauración de antigüedades. También pueden ser reproducidas obras de arte y objetos decorativos.

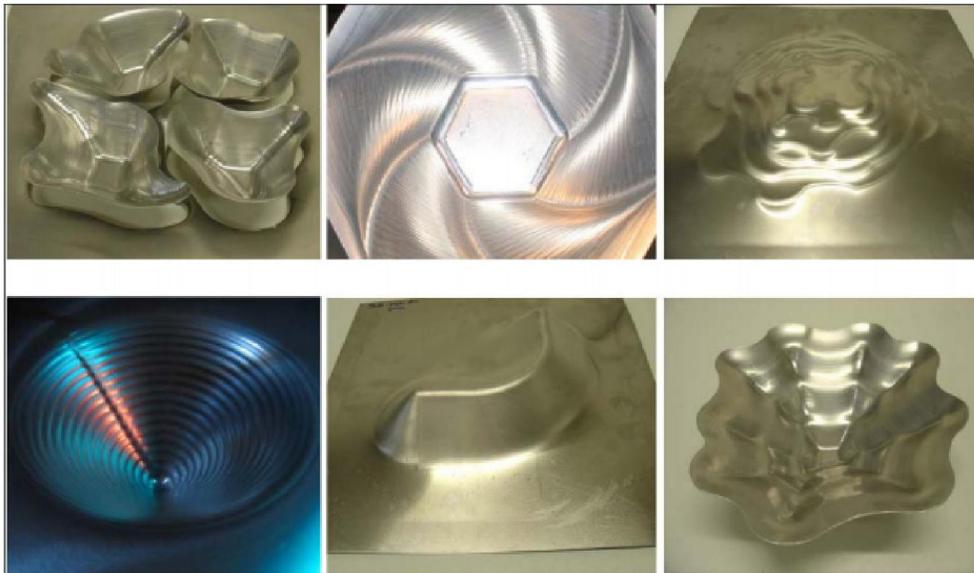


Figura 1.5: Aplicación artística del proceso de estampado incremental. [19]

Ejemplos similares se pueden encontrar en otras áreas de la medicina como la neurocirugía o la estomatología tal como se muestra en las siguientes figuras.

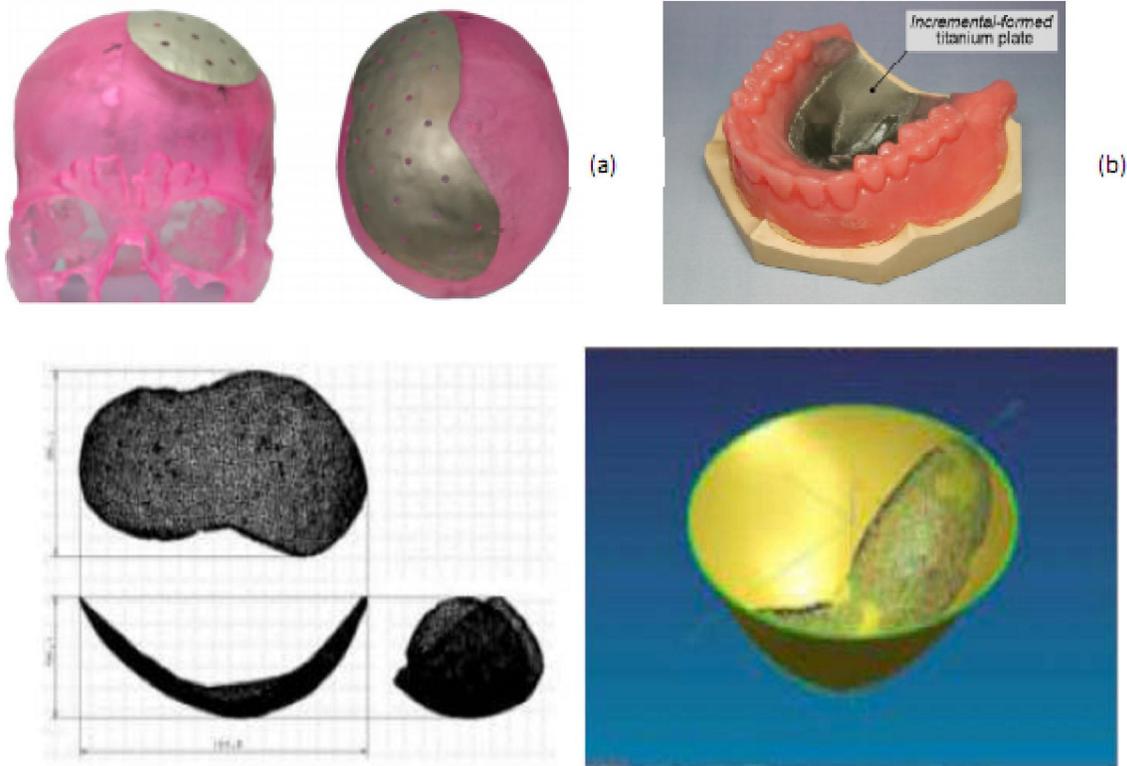


Figura 1.6: Aplicación del proceso de estampado incremental en la medicina. (a) - Prótesis craneal. (b) - Prótesis dental. (c) - Caso real de reconstrucción de cráneo de una víctima de un accidente [5, 33]

### **1.5.- Principales ventajas y desventajas del proceso como alternativa a la producción de series cortas de piezas y en la elaboración de prototipos.**

Debido a un grupo de ventajas que presenta el proceso EIPS, este representa una potente alternativa en la industria del conformado de metales. La velocidad de producción de este nuevo proceso no es tan alta como la de los ya existentes; sin embargo, las ventajas que ofrece, como la alta flexibilidad, el bajo coste de las herramientas y el alto grado de deformación alcanzado en el estado de deformación plana lo hace rentable para la fabricación de pequeños lotes para varias aplicaciones. Se pueden citar las siguientes ventajas concretas: [33]

1. Producciones de partes directamente de ficheros CAD
2. Incrementos en la conformabilidad del material.
3. Línea de producción flexible, sujeto a constantes cambios.
4. Rapid prototyping: utilizando SPIF resulta un proceso económico.

5. Este método produce grandes regiones con una deformación homogénea y evita grandes gradientes de tensión y de deformación.
6. Pueden ser realizados en maquinas convencionales de CNC.
7. Debido a la naturaleza incremental del proceso las fuerzas son menores.
8. Las dimensiones de las partes son solamente limitadas por la herramienta de conformar.
9. Se alcanza una elevada calidad superficial de la pieza.

Se alcanza una reducción de los tiempos de preparación de la máquina ya que para diferentes piezas es posible utilizar las mismas herramientas o los mismos dispositivos prensa - chapa. La flexibilidad del proceso esta en la adaptación de este a diferentes diseños de piezas, una alteración en la geometría de la pieza diseñada es cambiado en el modelo CAD, inmediatamente es reprogramado en el software CAM y enviado los códigos a la máquina CNC. La obtención de mayores valores de conformabilidad del material con respectos a otros procesos convencionales están dado porque las fuerzas de conformación son menores, debido a que solo se deforman plásticamente una pequeña zona de la pieza haciendo más fácil la deformación. [6, 23]

Sin embargo, aun teniendo en cuenta todas estas ventajas, sigue siendo un proceso que necesita ser estudiado con mayor detenimiento. Existen varios estudios relacionados con este tipo de procesos, pero aun no se ha alcanzado su completo entendimiento. Por lo que también presenta una serie de limitaciones las cuales se relacionan a continuación.

1. Gran tiempo de conformación comparado con los procesos convencionales de estampado.
2. El procesos esta limitado a producciones pequeñas.
3. La conformación de grandes ángulos tiene que ser realizado en múltiples pasos.
4. Menos exactitud geométrica, particularmente en radios convexos y áreas de superficies curvas.

Esta última desventaja puede ser reducida utilizando diferentes estrategias en el recorrido de la herramienta o alterando otros parámetros del proceso como el tamaño o la velocidad de la herramienta, variando el incremento vertical o variando el lubricante utilizado. [6]

### **1.6.- Máquinas herramientas empleadas para el proceso.**

El principal requisito para la ejecución del estampado incremental es que debe ser controlado numéricamente y tener al mínimo tres ejes de comandos. Aunque existan fabricantes de equipamiento específico para este proceso, como presenta la figura 1.7, la utilización del centro de maquinado o fresadoras CNC posibilitan el empleo de esta técnica en la mayoría de las industrias actualizadas tecnológicamente. [41]

La gran ventaja en la utilización de un centro de maquinado para aplicaciones de estampado incremental es que la misma máquina es utilizada para fabricación de herramientas utilizadas en el proceso. [41]



Figura 1.7: Máquina especialmente construida para EIPS. [1]

Estas máquinas poseen como ventajas:

1. Alto grado de calidad debido a la precisión, repetitividad y ausencia de variaciones introducidas por un operador.
2. Desperdicios reducidos. Son menos probables los errores debidos a la fatiga del operador, interrupciones y otros factores.
3. Inspección simplificada. Una vez que la primera pieza ha pasado la inspección, se requiere una inspección mínima en las partes subsecuentes.
4. Menores costos de herramientas debido a la menor necesidad de montajes y reparaciones complejas.
5. Tiempo de servicio reducido.
6. Las operaciones complejas se realizan fácilmente debido al control avanzado de la máquina.

Como desventajas presenta:

1. No elimina la necesidad de herramientas caras. Además, hay un gasto inicial mayor.
2. No elimina los errores por completo. Los operadores todavía se pueden equivocar al presionar los botones equivocados, al realizar alineaciones erradas, y fallan al ubicar las piezas en un montaje.
3. Se necesita escoger y entrenar a programadores y al personal de mantenimiento.

### 1.7.- Trayectorias generadas por la herramienta de conformación.

La trayectoria de la herramienta es programada cuando se conocen todas las características y propiedades del material a conformar. Existen varias alternativas disponibles para describir dicha trayectoria. Estas son:

- Generación de la trayectoria por el contorno de la chapa de afuera hacia adentro.

En este caso se realizan pasadas finales, usualmente definidas por incrementos en el eje z entre pasadas continuas. Esta técnica es la más utilizada pero tiene la desventaja de que deja huellas en los puntos de transición entre las diferentes secciones conformadas y crea además crestas en la superficie. La calidad superficial depende del radio de la herramienta, del incremento del paso, del ángulo de inclinación, del sistema de lubricación y de la velocidad del husillo. [10, 22, 23]

Para la programación de esta trayectoria es definido un plano llano sobre la chapa de metal antes de comenzar a conformarla, definido como plano x - y; ver figura 1.8.

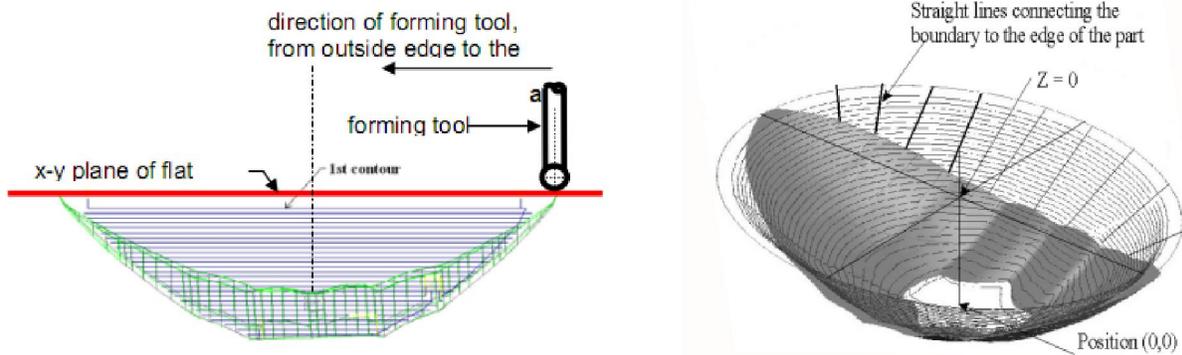


Figura 1.8: Plano x – y definido para la programación de la trayectoria de la herramienta. [23]

Este plano es asumido como si fuera la chapa original y el mismo sirve de referencia cuando se conforme a lo largo del eje z, el cual es igual a cero en ese punto. La geometría de la pieza debe estar por debajo de este plano. En el caso del proceso de EIPS el movimiento de la herramienta es a partir del borde exterior hacia el centro. [23] El resultado final de esta trayectoria es mostrada en la figura 1.9. En este caso el incremento en el eje z ( $\Delta z$ ) son enumerados como 5, 9, 13, etc y los incrementos de x ( $\Delta x$ ) son 4, 8, 12, etc. La hipotenusa de  $\Delta x$  y  $\Delta z$  es el ángulo de conformación.

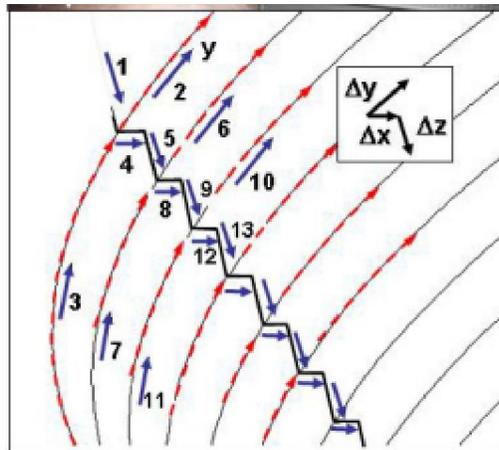


Figura 1.9: Trayectorias de la herramienta en el EIPS de la superficie del reflector [23]

- Trayectoria de la herramienta en espiral.

En este caso el recorrido de la herramienta es de forma continua con descensos incrementales en el eje z (incremento vertical) distribuidos sobre toda la superficie de la pieza. [23, 29]

Con este método se obtiene un mejor acabado superficial de la pieza ya que disminuyen las rugosidades superficiales y se eliminan las marcas de la herramienta dejadas sobre la superficie del producto, las cuales son observadas en el método anteriormente analizado siendo esta una de sus diferencias. La figura 1.10 muestra la trayectoria de la herramienta.

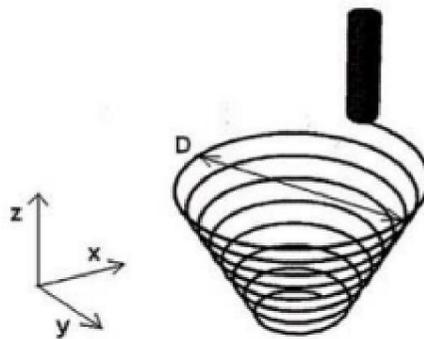


Figura 1.10: Trayectoria en espiral de la herramienta de conformar. [23]

Sin embargo los programas CAM por lo general no permiten el empleo de trayectorias en espiral. Filice [10] solucionó este problema introduciendo una aproximación simplificada y sin utilizar cualquier software CAM en particular. Desarrolló una trayectoria en espiral dentro del EXCEL, de este modo obtuvo un gran conjunto de puntos que definieron una trayectoria, se unieron los puntos consecutivos a través de una interpolación lineal y se enviaron a una fresadora CNC. Esta propuesta sin embargo se hace difícil de implementar, ya que las diferentes compañías utilizan programas CAM que generalmente no permiten el uso de trayectorias en espiral. [10, 23]

### **1.8.- Lubricación.**

Las investigaciones sobre la lubricación han sido limitadas en los procesos de estampado incremental por punto simple. Los estudios solo han llegado hasta como reducir la fricción entre la herramienta y la chapa a conformar y como influye en la calidad superficial del producto final. Además se ha demostrado que el tipo de lubricante no influye significativamente en las fuerzas de conformación, sino la utilización de lubricante o no. [13]

En algunos experimentos encontrados en la literatura se hace referencia a tres lubricantes tradicionales los cuales son: la vela del sebo, el sebo mezclado con aceite, y jabón mezclado con aceite. El lubricante de vela de sebo es directamente aplicado al material, mientras las otras dos mezclas deben prepararse de antemano. Estos lubricantes son de viscosidades diferentes, obteniéndose como resultado un aumento de la fuerza de conformación en dirección del avance de la herramienta con viscosidades mayores del lubricante. [12, 36]

Ventajas que trae consigo una buena lubricación:

La lubricación es importante en la mayoría de los procesos de estampado, así como en el proceso de estampado incremental, todo esto garantiza: [8]

1. Reducir la fricción.
2. Reducir el calentamiento de la pieza y la herramienta.
3. Reducir al mínimo el desgaste de la herramienta de estampado.
4. Mejorar el acabado superficial de la pieza.
5. Establecer una reducción al mínimo de la fuerza de trabajo ejercida por la herramienta.

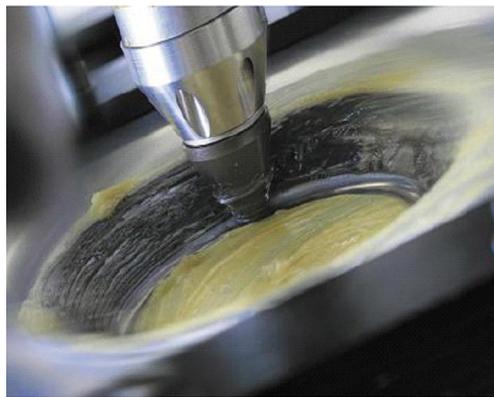


Figura 1.11: Punta de la herramienta de ejecución de un ciclo de estampado, tomando como lubricante grasa convencional. [32]

### 1.9.- Determinación de la fuerza de conformación.

Las fuerzas originadas en el proceso de conformado incremental por punto simple pueden medirse experimentalmente o determinarse empleando algún modelo teórico. Los instrumentos para medir dichas fuerzas no se encuentran estandarizados, o sea, que cada investigador ha desarrollado sus propios métodos de medición, por lo que no se hace referencia a ellos en este trabajo. Debido a esto solo se describirá un modelo teórico aproximado referenciado en la literatura.

El modelo expuesto fue desarrollado por Iseki. En el mismo se hacen una serie de consideraciones entre las que se encuentran un comportamiento de anisotropía normal y condiciones de deformación plana del material, por tanto se asume el criterio de (Hill, 1979) para describir el comportamiento del material. Las resultantes de las componentes de la fuerza de conformado originada en el proceso se determinan mediante las siguientes expresiones: [34]

$$\begin{aligned} F_x &= F_t * (1 - \cos(\psi)) \\ F_z &= F_t * \text{sen}(\psi) \end{aligned} \tag{1.1}$$

Donde:

$F_x$  – es la componente de la fuerza de tensión en la dirección del movimiento de la herramienta.

$F_z$  – es la componente de la fuerza de tensión en la dirección vertical.

$F_t$  – es la fuerza de tensión.

$\psi$  – es el ángulo de contacto o de conformación.

El ángulo  $\psi$  es determinado mediante relaciones geométricas. La interpretación geométrica de este ángulo se muestra en la siguiente figura.

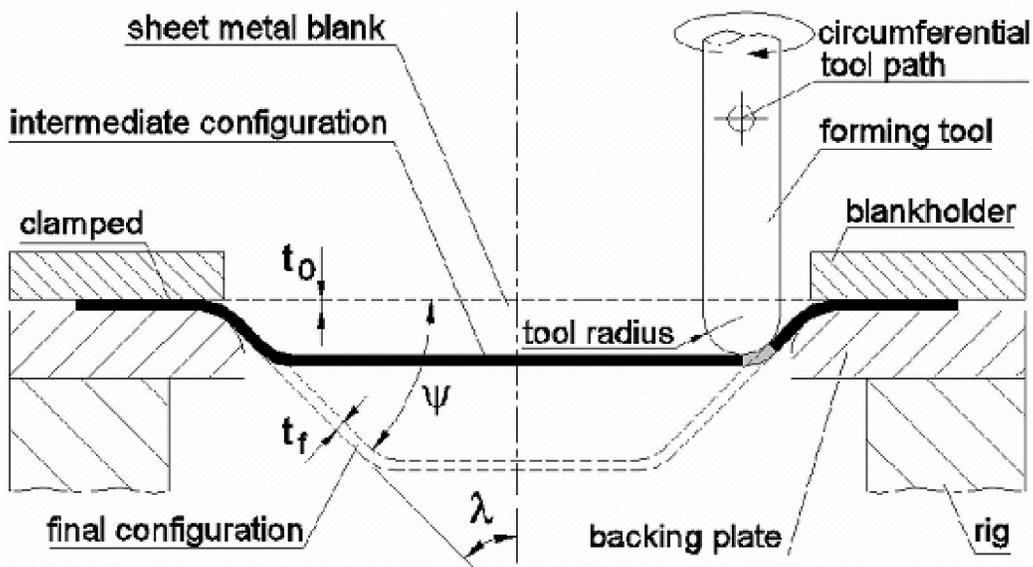


Figura 1.12: Proceso de estampado incremental por punto simple y algunos de sus parámetros [33]

Conociendo como determinar el ángulo de contacto el siguiente paso consiste en determinar la fuerza de tensión  $F_t$ , la cual depende fundamentalmente de las propiedades del material. Despreciando las tensiones de doblado (*bending stress*), las fuerzas de fricción, la componente de la tensión en la dirección del espesor  $\sigma_t$  y la componente de deformación  $\epsilon_y$  (el eje "y" es perpendicular a la dirección del movimiento de la herramienta) la fuerza de tensión es determinada aproximadamente como:

$$F_t = A \sigma_x = 2R t \sigma_x . \quad 1.2$$

Donde:

A – es el área de la sección transversal de la zona deformada.

$\sigma_x$  – es la componente de la tensión en el eje "x".

R – es el radio de la herramienta

t – es el espesor de la chapa.

Con el propósito de determinar las componentes de tensión y asumiendo el criterio de (Hill, 1979), tal como se planteó anteriormente. El coeficiente de anisotropía ( $R_a$ ) es otro parámetro que influye de manera marcada en el cálculo de las fuerzas de conformado. El mismo está definido por la relación entre las deformaciones del ancho  $\epsilon_w$  y el espesor de la chapa  $\epsilon_t$  tal como se muestra a continuación y es único para cada material.

$$R_a = \frac{\epsilon_w}{\epsilon_t} .$$

Mediante dicho coeficiente puede relacionarse la tensión equivalente  $\bar{\sigma}$  y la componente de la tensión  $\sigma_x$ . En el momento en que el metal es deformado, en la región plástica, el comportamiento del material es expresado según la regla de flujo:

$$\bar{\sigma} = K \bar{\epsilon}^n . \quad 1.3$$

Donde:

K – es el coeficiente de plasticidad.

n – es el coeficiente de endurecimiento.

Sustituyendo los parámetros mencionados anteriormente y la relación de espesores  $t = t_0 e^{-\epsilon_x}$  se obtiene la fuerza de tensión  $F_t$  en función de los parámetros del material y la componente de deformación  $\epsilon_x$  como:

$$F_t = 2RK \left\{ \frac{[2(1+R_a)]^{\frac{1}{m}}}{2} \left[ 1 + \frac{1}{(1+2R_a)^{\frac{1}{m-1}}} \right]^{\frac{m-1}{m}} \right\}^n \times \left( \frac{(1+R_a)}{(1+2R_a)} \right)^{\frac{1}{m}} \left( \frac{(1+2R_a)^{\frac{1}{m-1}} + 1}{2} \right)^{\frac{m-1}{m}} t_0 e^{-\epsilon_x} \epsilon_x^n$$

1.4

La componente de deformación  $\epsilon_x$  es obtenida de forma geométrica. Ya obtenida la ecuación para determinar la fuerza de tensión del proceso mediante un modelo teórico propuesto en la literatura la misma puede ser sustituida en la ecuación 1.1 con el objetivo de obtener las componentes de la fuerza  $F_x$  y  $F_z$ . [34]

### 1.10.- Consideraciones económicas en el proceso de estampado incremental de chapas.

Algunos investigadores como Hirt, Ames and Bambach [24] han realizado estimaciones con respecto a aspectos económicos y ecológicos entre el Embutido Profundo y el Estampado Incremental. Acorde a sus cálculos el proceso de estampado incremental tiene un costo efectivo por encima de las 700 piezas para producciones seriadas y 250 piezas para series cortas con respecto al proceso de embutido. Esta consideración puede verse en la figura 1.13, donde se puede observar y afirmar la eficiencia del estampado incremental para producciones cortas, unitarias o diseño de prototipos.

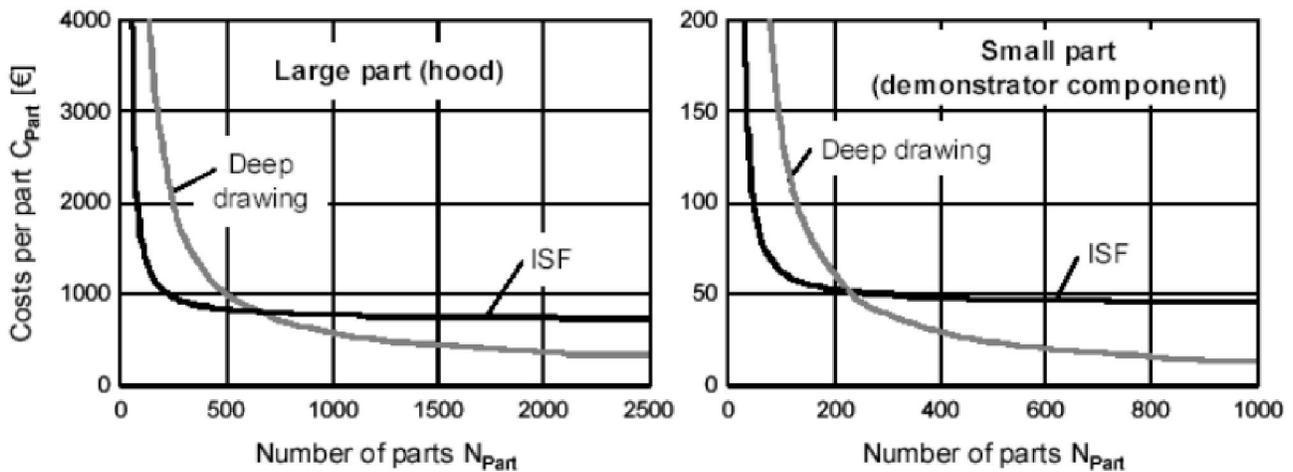


Figura 1.13: Estimación del costo por pieza en el EIPS y el embutido profundo [24]

Según Syrjälä [24], en la comparación de los costos entre los procesos de conformado convencional y los procesos de conformado incremental influyen los cambios en la forma geométrica del producto, el uso de la herramienta y los defectos o desgaste de la misma, lo que puede ocasionar la existencia de otros puntos de intersección en las curvas de costos. Un ejemplo de este caso puede ser observado en la siguiente figura.

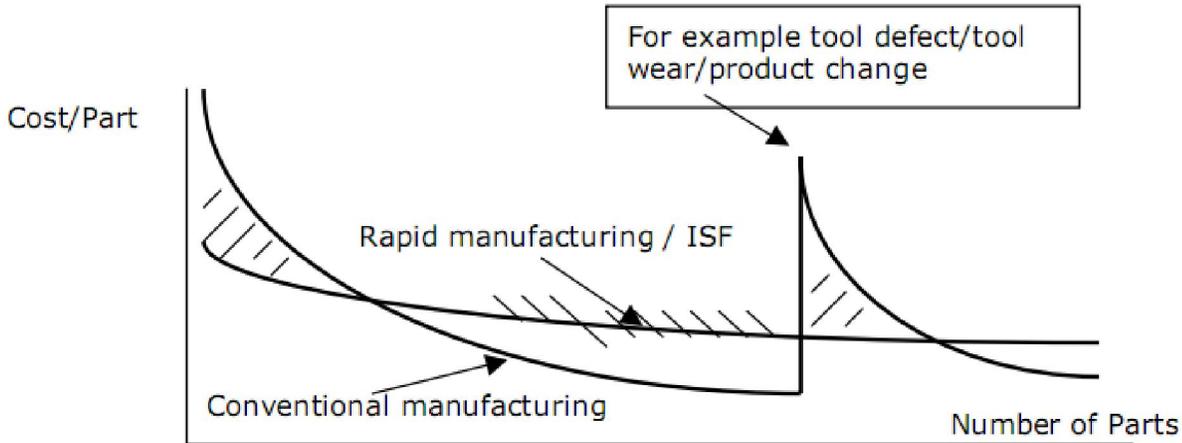


Figura 1.14: Comparación de los costo del EIPS y el proceso de estampado convencional. [24]

### Conclusiones parciales.

- ❖ La utilización de herramientas de pequeño diámetro en el EIPS permite lograr altas concentraciones de las deformaciones en la zona conformada, obteniéndose grandes deformaciones lo que favorece la conformabilidad del material.
- ❖ El EIPS es un proceso menos costoso para producciones de series cortas, principalmente por las herramientas utilizadas y la flexibilidad del mismo aunque presenta un mayor tiempo de conformado.

## **Capítulo II: Aspectos tecnológicos del proceso de estampado incremental con punto simple.**

### **2.1.- Estampado incremental con punto simple (EIPS). Factores tecnológicos críticos que deciden sobre el proceso.**

#### **Parámetros tecnológicos esenciales del EIPS.**

Como en cualquier proceso de fabricación, en el proceso de estampado incremental existen algunos parámetros y variantes inherentes al proceso como el paso vertical, el tamaño de la herramienta, el espesor de la chapa y la velocidad de avance de la herramienta, que de una forma u otra tienen gran influencia sobre la calidad y productividad óptima en la obtención de la pieza final. [41] Además de estos parámetros existen otros que influyen de manera significativa en el proceso, entre los que están las propiedades del material, el ángulo de conformado y la lubricación de la superficie de la chapa. Todos estos factores se relacionan a continuación. [13]

#### **❖ Tamaño de la herramienta.**

Es conocido que el tamaño de la herramienta de conformar influye grandemente en la conformación de la chapa. Experimentos realizados por diferentes investigadores muestran que radios pequeños de la herramienta favorecen más la conformabilidad que el uso de grandes radios. Además las fuerzas de conformación se incrementan con el incremento del tamaño de la herramienta (diámetro) debido a que el área de contacto es mayor. Herramientas más pequeñas, sin embargo, presentan una alta concentración de la deformación en la zona conformada, obteniéndose grandes deformaciones favoreciendo la conformabilidad del material. La disminución de las fuerzas de conformado con herramientas de menor diámetro hace que las tensiones generadas en el proceso sean menores.

Otros factores que dependen del tamaño de la herramienta utilizada en el proceso de estampado incremental son la calidad superficial de la pieza fabricada y el tiempo de fabricación. Cuanto mayor sea el diámetro de la herramienta mejor será la calidad superficial de la pieza para un mismo valor de paso vertical, no obstante es importante destacar que este aumento del diámetro ocasiona una disminución de la conformabilidad del material. Sin embargo, una herramienta con un valor de diámetro muy elevado no puede copiar pequeños detalles de la pieza a fabricar. [32]

Se han realizado diversas investigaciones con herramientas de diferentes diámetros. La tabla 2.1 muestra ejemplos de diámetros de algunas herramientas utilizadas por diferentes investigadores para realizar el proceso de estampado.

Pesquisadores	Diâmetro da ferramenta	Formato da ferramenta
Ambrógio et al., 2006	ø10, ø20	Semi-esférica
Duflou et al., 2007	ø10	Semi-esférica
Allwood et al., 2005	ø10, ø20 e ø30	Semi-esférica
Hirt et al., 2003	ø6, ø10 e ø30	Semi-esférica
Duflou et al., 2005	ø12,7	Semi-esférica
Ambrogio et al., 2007	ø12, ø24	Semi-esférica
Carrino et al., 2004	ø5, ø10	Semi-esférica
Pohlak et al., 2004	ø12, ø20	Semi-esférica
Lamminen et al., 2003	ø10, ø20	Semi-esférica
Jeswiet et al., 2005	ø12,5	Semi-esférica
Kim e Park , 2002	ø5, ø10 e ø15	Semi-esférica

Tabla 2.1: Diámetro de herramientas utilizadas. [32]

❖ **Incremento vertical.**

La influencia de este parámetro en la conformabilidad es muy debatida. La mayoría de los investigadores sostienen que el incremento vertical no influye en la conformabilidad sino que afectan solamente la rugosidad superficial y el tiempo de conformación. Otros plantean que si presenta marcada influencia, donde un incremento del paso vertical disminuye la conformabilidad de la chapa.

Pequeños incrementos verticales favorecen el acabado superficial de la pieza conformada, pero se produce un significativo aumento en los tiempos de conformación. El aumento del incremento vertical reduce el tiempo de conformación, pero forma una superficie con una calidad superficial inferior. En investigaciones realizadas se observa que cada incremento del paso vertical de la herramienta deja una pequeña marca en la superficie de la pieza, la misma puede ser reducida con una disminución del paso vertical. También fueron realizados estudios en los cuales se efectuaron ensayos con valores de pasos verticales que varían desde 0.1 a 1.0 mm con herramientas de 5 a 15 mm de diámetro. Fue verificado que un aumento del paso vertical reduce la calidad superficial pero los valores de rugosidad superficial (Rz) medidos aumentan, esto puede ser visto en la figura 2.1 que se muestra a continuación. [32]

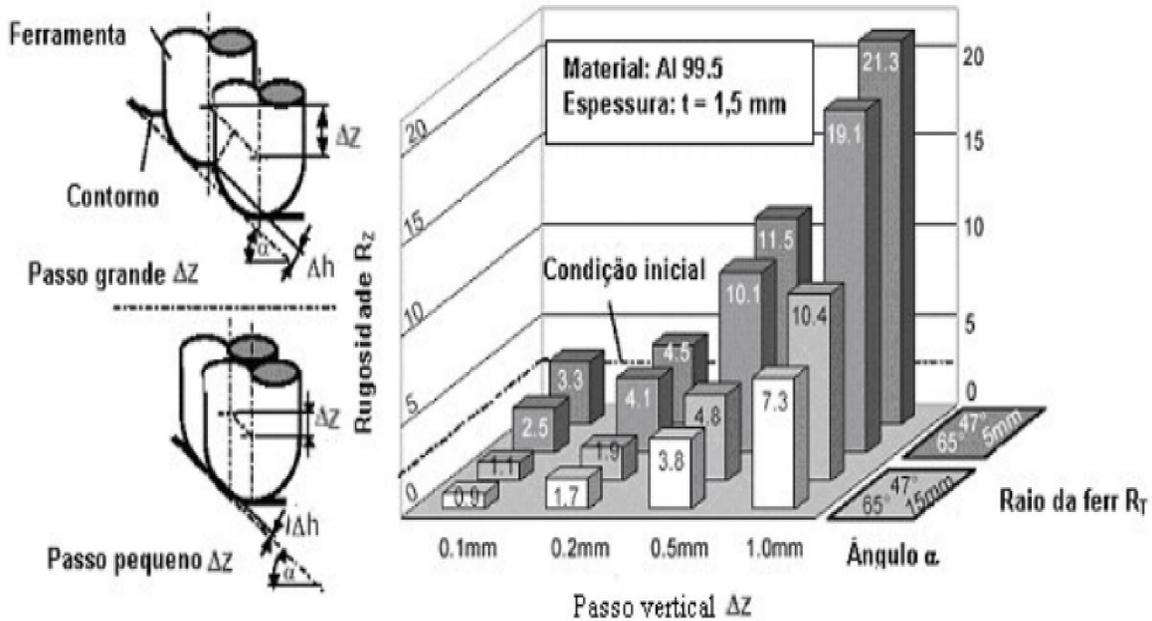


Figura 2.1: Influencia del valor del paso vertical en la calidad superficial de la pieza. [32]

❖ **Material de la chapa.**

Es conocido que la propiedad de conformabilidad difiere entre los materiales y que está influenciada por las propiedades de cada material. Sobre esta propiedad influye también el coeficiente de endurecimiento  $n$ , así como su relación con el coeficiente de plasticidad  $K$ . Generalmente un alto coeficiente de endurecimiento conlleva a una alta conformabilidad del material. [13]

❖ **Ángulo de conformación.**

El ángulo de la zona de la chapa que es conformada con la horizontal (plano x-y) es denominado ángulo de conformación (Ver figura 1.18). La amplitud de este ángulo depende principalmente de las propiedades del material y el espesor. En el proceso de estampado por punto simple el ángulo máximo de conformación es controlado en cada pasada de la herramienta para evitar una fractura en el material. Investigadores como Martins han intentado predecir este ángulo utilizando las propiedades del material y los parámetros de conformación mediante la siguiente ecuación.

$$\Psi = \frac{\pi}{2} - e^{\varepsilon_t}$$

2.1

Donde:

$\varepsilon_t$  – es la deformación en el espesor.

Esta ecuación puede ser evaluada utilizando el valor de deformación límite  $\epsilon_t$  en la dirección del espesor en el área de la fractura determinada en un ensayo de deformación plana o ensayo de tracción equi-biaxial. [13]

❖ **Velocidad de conformación.**

La influencia de la velocidad de conformación (velocidad de rotación (rpm) y de traslación de la herramienta (mm/min)) ha originado muchas controversias en los trabajos de estampado incremental por punto simple. Un aspecto indiscutible es que la rotación de la herramienta y su velocidad de traslación influyen en la fricción y el calor generado debido al rozamiento entre la chapa y la herramienta. El movimiento relativo entre la herramienta y la chapa es directamente proporcional al calor que se origina por la fricción. Debido a esto es lógico pensar que existe un incremento de la conformabilidad con el aumento de la velocidad de conformación por el efecto del calor, y es importante tener en cuenta que un aumento de dicha velocidad puede generar resultados negativos. Entre estos pueden encontrarse altas rugosidades superficiales, mayor utilización de herramientas y problemas en la película de lubricante. Las rugosidades superficiales pueden ser más ásperas con el incremento de la velocidad de conformación así como la aparición de defectos superficiales como ondulaciones en la chapa. [13]

El aumento de la temperatura generado por la fricción origina que el lubricante utilizado para reducir la fricción sea inefectivo. Si el calentamiento aumenta con el aumento de la velocidad los lubricantes pueden calentarse hasta llegar a su temperatura de fusión. En ese momento comienzan a corromperse el lubricante y pierde su efectividad, dando como resultado un aumento del contacto metálico e incrementos drásticos de fricción.

❖ **Espesor de la chapa.**

Así como en otros procesos de conformado (forja, estampado convencional), existen valores máximos de ángulos que definen ciertas regiones de la pieza de trabajo, a fin de que sea posible su fabricación. Si se supera este valor, se vuelve muy frecuente una rotura o en el mínimo de los casos, una disminución drástica del espesor de la chapa, causando una baja resistencia mecánica localizada. [41]

El ángulo máximo de estampado  $\lambda$  está determinado por la relación entre el espesor de la chapa y su ángulo de conformación  $\psi$  definido en la figura 1.18, dado por la ecuación:

$$t_1 = t_0 * \text{sen}(\psi) \tag{2.2}$$

Donde:

$t_0$  - es el espesor original de la chapa.

$t_1$  - es el espesor final de la chapa en un determinado tiempo del proceso de conformación.

$\psi$  - Es el ángulo de conformación de la chapa.

Un ejemplo de esto se puede observar en la figura que aparece a continuación. En la misma se muestra la sección de una pieza producida, a la cual se le realiza un análisis para determinar como se comporta el espesor de la chapa al ser conformada. El primer análisis se le realiza a la sección de la chapa que tiene un espesor inicial de  $t_0 = 1.5mm$  presentando un valor medido de  $t = 1.14mm$  para un ángulo de inclinación  $\alpha = 40^\circ$  y realizando el cálculo utilizando la ley de los senos se obtiene un espesor de chapa final  $t_1 = 1.15mm$ . En el segundo análisis se toma un valor de espesor inicial  $t_0 = 1.5mm$ , un valor medido de  $t = 0.77mm$ , para un ángulo de inclinación  $\alpha = 60^\circ$  y realizando los cálculos correspondientes se obtiene un valor de espesor final de  $t_1 = 0.75mm$ . Como se puede observar, a medida que aumenta el ángulo de inclinación disminuye el espesor final de la chapa, por lo tanto si se aumenta gradualmente el ángulo de inclinación podría llegar a aparecer una rotura en la chapa que se está conformando. [41]

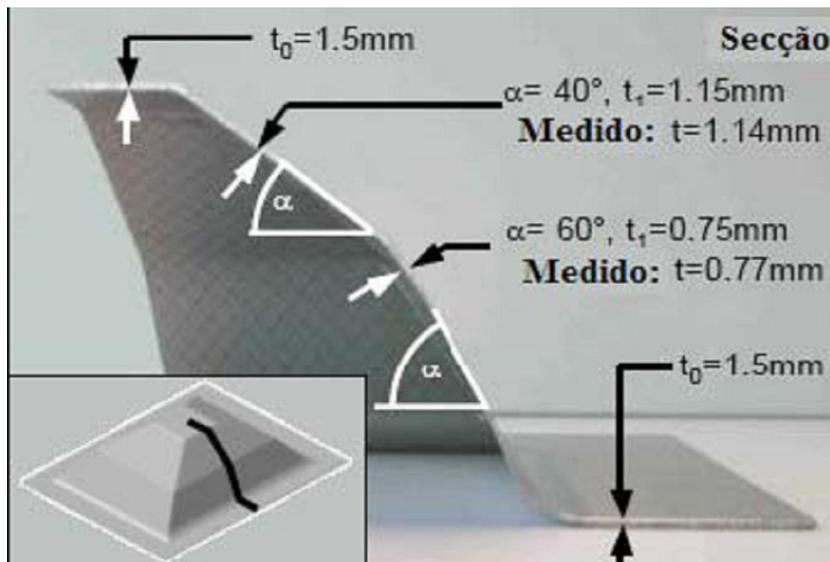


Figura 2.2: Demostración de la ley del seno [41]

## **2.2.- Factores que influyen en la precisión de las piezas.**

Varios parámetros afectan al proceso de estampado incremental con punto simple tal como se ha planteado anteriormente y, por tanto, desempeñan un papel importante en la precisión de las piezas a obtener. Se deberán resaltar entre ellos los parámetros del proceso (el diámetro de la herramienta, la profundidad entre los pasos, velocidad de rotación de la herramienta y el uso de lubricante), parámetros del material (endurecimiento por deformación, la anisotropía normal) y los parámetros relacionados con el diseño de la pieza a ser fabricadas (el espesor de la chapa, la geometría) [23]. Es bastante obvio que las modificaciones en el proceso de diseño se relacionan principalmente con la elección de los parámetros del proceso, mientras que la parte material y la geometría en general, no se puede modificar. Como consecuencia, la selección de los parámetros del proceso se deriva del mejor equilibrio entre las diferentes limitaciones.

Las consideraciones anteriores destacan la cuestión de la idoneidad para el SPIF. En realidad, además del alto tiempo de procesamiento, el SPIF es hoy limitado por la falta de conocimientos disponibles que lo hace apto sólo para determinadas aplicaciones industriales, donde la satisfacción de una necesidad muy personalizada puede justificar las actividades de investigación necesarias para el proceso de puesta en marcha [2 y 22].

## **2.3.- Limitaciones del proceso de estampado incremental con punto simple.**

El proceso de EIPS es rentable para producciones de piezas unitarias y series cortas. También es utilizado como un método en la elaboración de prototipos y para producciones seriadas. La capacidad de producción máxima del EIPS es alrededor de 500 piezas al mes, variando según el tamaño y la geometría del producto final. Este método es muy lento comparado por ejemplo con el proceso de embutido profundo y otros métodos tradicionales de conformación, pero es mucho más flexibles. No obstante existen algunas limitaciones las cuales se describen a continuación.

### **En relación a los materiales:**

Existen varios materiales utilizados en el proceso de estampado incremental por sus propiedades de conformabilidad, pero en la mayoría de los casos el aluminio es el material más utilizado [5]. En general posee un límite de fluencia no tan pronunciado como la mayoría de los aceros (el límite de fluencia del aluminio puro es de aproximadamente 12,7 MPa). En el caso del acero dulce (que contiene menos de 0,06% de carbono cuya estructura es esencialmente ferrítica), la presencia del nivel de fluencia permite una fácil identificación de tensión de fluencia. Para el aluminio, esta tensión es identificada gracias a una deformación específica residual convencional de 0,2 % como puede ser observado en la siguiente figura.

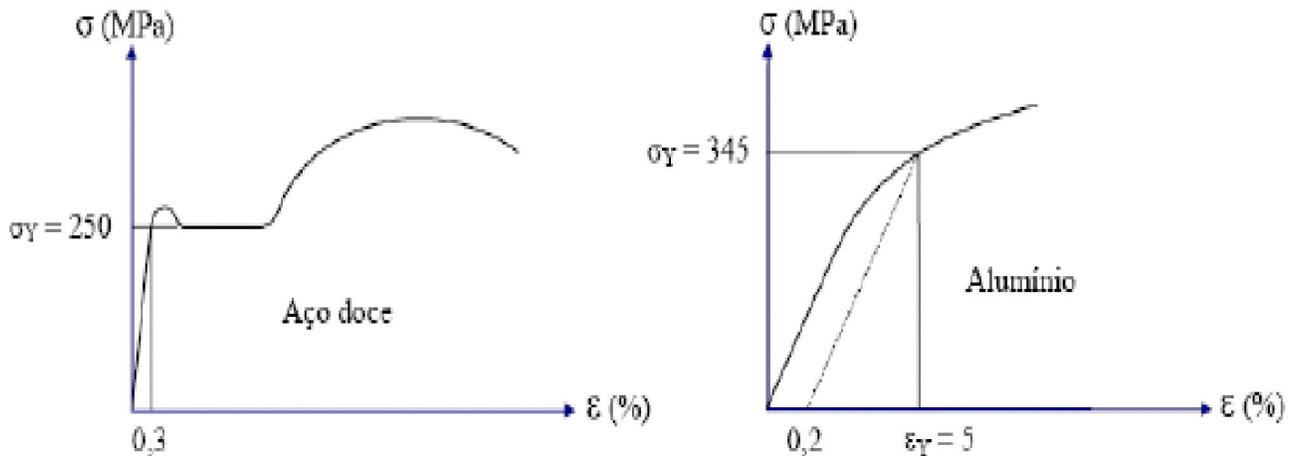


Figura 2.3: Curva de tensión por deformación para acero y para aluminio [41]

Con relación a las condiciones de conformabilidad, las chapas de aluminio no presentaban, al principio, buenos resultados. Esto ocurría porque el aluminio comercialmente puro (99,33%) es un material anisotrópico, o sea, para una misma solicitud mecánica, la deformación del espesor es mayor que el largo ( $m > 1$ ). De esa forma se deforma la chapa en un proceso de estampado, produciéndose una gran reducción del espesor para una pequeña variación del alargamiento.

A pesar de estas condiciones iniciales adversas, el proceso de estampado incremental para chapas de 0,5 mm de espesor presenta algunas ventajas observadas en los siguientes aspectos:

❖ Cuando es comparado con el estampado incremental de aceros. [41]

1. Las profundidades alcanzadas (50-70mm), permiten grandes deformaciones, considerándose una anisotropía, o sea, presenta baja ductilidad.
2. Pequeñas discrepancias geométricas entre los modelos CAD y la pieza real (bajo retorno elástico).
3. La herramienta utilizada para deformar la pieza en las máquinas CNC realiza poco esfuerzo al desplazarse en el eje Z, ya que el material ofrece menor resistencia a la deformación elástica.
4. Hay una reducción del tiempo para el estampado, pues se utilizan pasos verticales de hasta 1mm y velocidades de avances de hasta 1.500 mm/min.
5. Tiene un coeficiente de rozamiento de 0,05 que es igual al de los aceros en general, siendo menor que el de los aceros inoxidables, que presentan un valor de 0,1.

❖ En cuanto a las propiedades mecánicas del aluminio en general [41]

1. El valor de la densidad es aproximadamente un tercio de la del acero.
2. Tiene gran resistencia a la corrosión, ofreciendo durabilidad para el producto final.
3. Pueden ser conformadas variedades de piezas de diferentes formas.
4. Es buen conductor del calor, siendo muy utilizado en utensilios domésticos (generalmente en la cocina).
5. Posee bajo peso específico.

❖ En cuanto a la adaptación de estrategias CAM. [41]

Aunque no sea una característica exclusiva, la conformación de chapas de aluminio por estampado incremental obtuvo éxito con el uso de la trayectoria helicoidal, definida y configurada en software CAM. Esta trayectoria hace que la herramienta este en contacto permanente con la chapa, evitando deformaciones y marcas indeseadas en el producto final. Estas combinaciones traen como consecuencia tres mejoras considerables:

1. Aumento de la conformabilidad geométrica.
2. Mejoras en el acabado superficial de las piezas.
3. Disminuye el tiempo de manufactura.

Entre las ventajas que se describen anteriormente, la relación entre los módulos de elasticidad, es el más importante si se trata del costo de producción, ya que la energía consumida para deformar la chapa de aluminio es menor. Además esa propiedad del aluminio tiene la ventaja de dar a las estructuras una elevada capacidad de amortiguar golpes y reducir las tensiones producidas por la variación de la temperatura.

### **Geometría:**

El EIPS es un método satisfactorio para la producción de formas complejas tridimensionales. La geometría del producto puede ser bastante libre, pero existen algunas limitaciones en función del espesor de la chapa y el equipamiento utilizado.

El tamaño de la herramienta (diámetro) define los radios de redondeos mínimos, los cuales están dados por la mitad del diámetro de la herramienta. El tamaño de la herramienta depende del espesor de la chapa, ya que herramientas pequeñas y delgadas no son lo suficientemente fuertes para las fuerzas de conformación requeridas en chapas gruesas.

La herramienta conforma solamente en la dirección Z. Esto hace imposible la conformación de manera libre de ángulos interiores. El ángulo de la pared de la chapa es limitado por el espesor, una

mayor curvatura o ángulo de la pared de la chapa conlleva a un mayor espesor de la misma como se muestra en la figura 2.2. La conformabilidad del material también afecta el ángulo mínimo de la pared de la chapa. Ensayos de conformabilidad realizados por algunos investigadores han dado como resultado que el ángulo mínimo de la pared para chapas de acero es aproximadamente de 25°, para el aluminio puro de 20° y para el aluminio con tratamiento térmico de 30 - 35°. [28]

### Dimensiones de la pieza:

El tamaño del producto esta definido por el tamaño de la máquina. Existen cinco tamaños diferentes de máquinas ya sea para uso comercial o investigativo. Los datos técnicos de estas máquinas son mostrados en la tabla 2.2.

	Research use		Commercial use		
	DLNC-RA	DLNC-RB	DLNC-PA	DLNC-PB	DLNC-PC
Maximum blank size (mm)	400X400	600X600	1100X900	1600X1300	2100X1450
Maximum forming size (mm)	300X300	500X500	1000X800	1500X1200	2000X1350
Maximum forming depth (mm)	150	250	300	400	500
X-axis stroke	330	550	1100	1600	2100
Y- axis stroke	330	550	900	1300	1450
Z- axis stroke	200	300	350	450	550
Maximum work holder size (mm)	500X500	750X950	1300X110	1800X1500	2300X1650
Maximum sheet thickness	Stainless steel	0,5-1	0,5-1	0,5-2	0,5-2
	Aluminium	0,5-3	0,5-3	0,5-4	0,5-4

Tabla 2.2: Datos técnicos de diferentes máquinas para conformar. [28]

El espesor máximo de la chapa es diferente para cada máquina. El factor crítico es la fuerza necesaria de conformación. Como las tensiones de fluencias varían acorde al material utilizado, las fuerzas de conformación y el espesor máximo de la chapa dependen del material y la máquina utilizada. Como puede verse en la tabla 2.2, los posibles espesores del material en el proceso de conformación están entre 0,5 - 2 mm para aceros inoxidables y entre 0,5 - 4 mm para aluminio.

El EIPS permite una mayor relación de embutición con respecto a otros procesos, como por ejemplo, el embutido profundo. En el embutido profundo el material sufre un alargamiento, principalmente en el fondo de la pieza embutida, lo cual puede generar protuberancias en esas zonas de deformación. [28]

### Calidad superficial:

Es conocido que en cada pasada de la herramienta incrementalmente en el eje Z, la misma deja marcas sobre la superficie conformada. Estas marcas pueden ser reducidas utilizando herramientas

de mayores diámetros y reduciendo el ángulo de conformación. Ángulos mas pequeños de conformación conlleva a un mayor tiempo de conformación, esto hace que se deba considerar un compromiso entre el tiempo de conformación y la calidad superficial. Si la inclinación es menor de 0,01 mm el material es conformado varias veces en el mismo lugar, y el material se endurece por deformación, por lo general esto provoca grietas en la chapa. El endurecimiento por deformación también se incrementa con las tensiones. [28]

Estas marcas dejadas por la herramienta y que afectan la calidad superficial del producto final, pueden prevenirse utilizando una chapa metálica sobre la chapa de la pieza real en el proceso. Sobre esta chapa metálica quedan las marcas de la herramienta, pero la transferencia de la geometría producida por la herramienta sobre la chapa de la pieza es menor, por lo que la geometría del producto final no es tan precisa como el contacto directo entre la herramienta y la chapa de la pieza, aunque la calidad superficial es mejor. Otra solución para mejorar la calidad superficial es conformar mas de una vez la chapa resaltando los detalles de diseño, muchas veces, este método satisface la calidad exigida.

El diámetro de la herramienta es otro factor que influye sobre la calidad superficial de la chapa, al incrementarse este disminuye la rugosidad superficial. La rugosidad superficial también disminuye cambiando la dirección de conformación en cada pasada y disminuyendo la inclinación de las paredes de la chapa. [28]

Todas las partes en el mismo producto no son de la misma forma, algunas partes son uniformes y otras no, por lo que la rugosidad superficial no es constante sobre toda su superficie.

### **Conclusiones Parciales.**

- ❖ La utilización de este proceso nos permite lograr una mayor relación de embutición con respecto a otros procesos de deformación de chapas.
- ❖ No existe un consenso entre los investigadores con respecto a la influencia del incremento vertical sobre la conformabilidad del material.
- ❖ Variando la inclinación de la chapa a lo largo de la profundidad se logra una mayor capacidad de estampado que si se utiliza una inclinación constante.

### Capítulo III: Ensayos experimentales del proceso de estampado incremental con punto simple. (EIPS)

En este trabajo uno de los objetivos es realizar una serie de ensayos del EIPS por el método no asistido por matriz como base para definir algunos parámetros del proceso. Esto conlleva a una serie de interrogantes que surgen con relación a diferentes aspectos como son:

- ¿Cuál es la influencia del diámetro de la herramienta en el proceso?
- ¿Cuál es la influencia de la forma de la punta de la herramienta en el proceso?
- ¿Cuál es la influencia de la rugosidad superficial según la punta de la herramienta en el proceso?
- ¿En el caso de que un incremento vertical pequeño sea aplicado a la chapa la misma presentará un régimen elástico de deformación dificultando la conformación?
- ¿Cuál es la mejor estrategia a ser adoptada en relación al camino de la herramienta?
- ¿Cuáles deben ser los valores de avance y rotación utilizados en el proceso?

#### 3.1.- Selección de las herramientas de conformación.

La herramienta utilizada en el proceso de estampado incremental tiene una influencia directa sobre varios parámetros del mismo tales como la rugosidad superficial y la distribución de tensiones en la región que está siendo conformada como ya se planteó anteriormente.

Según la bibliografía consultada generalmente la forma de la herramienta utilizada es de tipo cilíndrica con punta semiesférica, con diámetros que pueden variar según la geometría de la pieza a conformar. O sea, para piezas con radios pequeños se usan herramientas con radios pequeños y para piezas con superficies libres de detalles pequeños se pueden utilizar herramientas con mayor diámetro.

Cuanto mayor es el diámetro de la herramienta mayor puede ser el incremento vertical durante el proceso de conformación, manteniéndose una calidad superficial aceptable y una reducción significativa del tiempo de conformación.

En este caso el ensayo fue realizado con dos herramientas con forma cónica de punta semiesférica, con un diámetro de 10 y 16 mm respectivamente. El material utilizado para la fabricación de las herramientas fue de acero AISI 40.

Composición química	Carbono (C)	Hierro (Fe)	Manganeso (Mn)	Fósforo (P)	Azufre (S)
%	0.37 - 0.44	98.6 - 99	0.60 - 0.90	<= 0.040	<= 0.050

Tabla 3.1: Propiedades químicas del acero utilizada en la herramienta de conformar.

Las herramientas se fabricaron mediante un proceso de maquinado, en los anexos se muestra la secuencia de fabricación por maquinado de ambas herramientas. Después de maquinadas las herramientas de conformación las mismas recibieron un tratamiento térmico superficial en la punta con el objetivo de mejorar su calidad superficial y aumentar la resistencia al desgaste. Las siguientes figuras muestran la forma de la herramienta y la herramienta en pleno funcionamiento.



Figura 3.1: Herramienta de conformación realizando una pasada.



Figura 3.2: Herramienta de conformación utilizadas en los experimentos.

### **3.2.- Máquina - herramienta empleada en el proceso.**

Según la literatura para la realización de este proceso es recomendable el uso de fresadoras o centros de maquinado por control numérico o máquinas que presenten movimientos en al menos tres ejes de coordenadas. No obstante no queda exento el uso de máquinas – herramientas convencionales. Para la realización de los experimentos desarrollados en este fue utilizada la fresadora convencional **FU2A** ubicada en el taller de la Facultad de Ingeniería Mecánica. Los datos de la misma se dan a continuación.

Modelo de la Fresadora	FU2A
Longitud de la mesa. (mm)	1500
Escalones de (rpm).	31.5 ;40 ; 50 ; 63 ; 80 ; 100 ; 125 ; 160 ; 200 ; 250 ; 315 ; 400 ; 500 ; 630 ; 800 ; 1000.
Escalones de avances transversal. (mm/min)	10, 14, 19,28, 37.5, 50, 75, 106, 145, 210, 292, 395.
Escalones de avances longitudinales. (mm/min)	20, 28, 35, 38.5, 56, 75, 100, 150, 212, 290, 420, 585, 790.
Potencia del motor principal. (kw)	5.25

Tabla 3.2: Parámetros fundamentales de la Fresadora FU2A

Además de la máquina – herramienta seleccionada es importante también el sistema de fijación para la chapa utilizado. Este desempeña diversos papeles durante el proceso de conformación. Es el responsable de la fijación, posicionamiento en algunos casos y responsable de la aplicación de las fuerzas de tracción de la chapa.

En este ensayo la chapa fue fijada en la mesa de la fresadora mediante bridas y dos soportes haciendo la función de un prensa – chapa. Se reconoce que esta no es la fijación óptima para este tipo de proceso, pero según las condiciones y lo que se desea estudiar esta fijación fue suficiente. En la siguiente figura se muestra la fijación de la chapa.



Figura 3.3: Esquema de fijación de la chapa utilizado.

### **3.3.- Diseño del experimento.**

#### **Materiales y métodos.**

Para este ensayo fue utilizada una chapa de acero galvanizado con un espesor de 0.55 mm. En estos procesos es necesario la lubricación de la chapa para disminuir las fuerzas de fricción entre la punta de la herramienta y la chapa y disminuir la generación de calor. El lubricante utilizado en este ensayo fue grasa de copilla para el engrase de rodamientos.

De los parámetros que influyen en el proceso de estampado incremental por punto simple (EIPS) se decidió en este trabajo ver la influencia de la velocidad de conformación en función de la rugosidad superficial obtenida, la misma relaciona dos factores que son la velocidad de rotación de la herramienta y el avance. Se varió también el incremento vertical de la herramienta y la trayectoria de la herramienta.

#### **- Primer ensayo:**

En este primer ensayo se decidió variar el incremento vertical para ver su influencia en el acabado superficial. Para esto se fijaron algunos parámetros como la velocidad de rotación y la velocidad de avance y se variaron los incrementos tanto para una herramienta como para la otra, realizándose una inspección visual de los resultados obtenidos.

#### **- Segundo ensayo:**

En este caso fue analizada la variación de la velocidad de avance de la herramienta sobre la superficie a conformar fijando la velocidad de rotación y el incremento vertical. Se tomaron dos valores de velocidad de avance y se realizaron los ensayos con las dos herramientas fabricadas. Se decidió realizar un experimento de  $2^2$  factorial tomando como variables independientes la velocidad de avance y el diámetro de la herramienta y como variable dependiente la rugosidad superficial. A continuación se describe el diseño del experimento y la ecuación de regresión obtenida.

#### Datos:

Incremento vertical: 5 mm

RPM de la herramienta de conformar: 200 rpm

k – cantidad de factores o variables independientes.

p – base del diseño factorial.

N – cantidad de corridas experimentales.

Factor A: Diámetro de la herramienta. ( $\varnothing$  10 mm ;  $\varnothing$  16 mm)

Factor B: Velocidad de avance. (50 mm/min ; 395 mm/min)

- Preparación de los datos para el análisis estadístico:

Corridas	A (X <sub>1</sub> )	B (X <sub>2</sub> )	AB (X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> )	Mediciones (μm)	ΣXi <sup>2</sup>	(ΣXi) <sup>2</sup>	X <sub>1</sub> *y	X <sub>2</sub> *y	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> *y
1	-	-	+	0,8	0,64	0,64	-0,8	-0,8	0,8
2	+	-	-	6,3	39,69	39,69	6,3	-6,3	-6,3
3	-	+	-	1,6	2,56	2,56	-1,6	1,6	-1,6
4	+	+	+	12,5	156,25	156,25	12,5	12,5	12,5
Σ							16,4	7	5,4

- Ecuación de regresión del modelo para el diseño de 2<sup>2</sup>.

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2$$

- Determinación de los coeficientes de la ecuación del modelo.

$$b_0 = \frac{\sum y}{N} = \frac{21,2}{4} = 5,3$$

$$b_0 = \frac{\sum X_1y}{N} = \frac{16,4}{4} = 4,1$$

$$b_0 = \frac{\sum X_2y}{N} = \frac{7}{4} = 1,75$$

$$b_0 = \frac{\sum X_1X_2y}{N} = \frac{5,4}{4} = 1,35$$

La ecuación del modelo queda:

$$y = 5,3 + 4,1x_1 + 1,75x_2 + 1,35x_1x_2$$

- Tercer ensayo:

En este ensayo, similar al anterior, se decidió analizar la variación de las RPM y su influencia en la rugosidad superficial fijando el incremento vertical y la velocidad de avance de la herramienta. Se tomaron dos valores de RPM y se realizaron los ensayos con las dos herramientas fabricadas. Se decidió realizar un experimento de 2<sup>2</sup> factorial tomando como variables independientes las RPM y el diámetro de la herramienta y como variable dependiente la rugosidad superficial. A continuación se describe el diseño del experimento y la ecuación de regresión obtenida.

Datos:

Incremento vertical: 5 mm

Velocidad de avance: 106 mm/min

k – cantidad de factores o variables independientes.

p – base del diseño factorial.

N – cantidad de corridas experimentales.

Factor A: Diámetro de la herramienta. (Ø 10 mm ; Ø 16 mm)

Factor B: RPM (200 rpm ; 1000 rpm)

- Preparación de los datos para el análisis estadístico:

Corridas	A (X <sub>1</sub> )	B (X <sub>2</sub> )	AB (X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> )	Mediciones (µm)	ΣX <sub>i</sub> <sup>2</sup>	(ΣX <sub>i</sub> ) <sup>2</sup>	X <sub>1</sub> *y	X <sub>2</sub> *y	X <sub>1</sub> X <sub>2</sub> *y
1	-	-	+	1,6	2,56	2,56	-1,6	-1,6	1,6
2	+	-	-	0,8	0,64	0,64	0,8	-0,8	-0,8
3	-	+	-	3,2	10,24	10,24	-3,2	3,2	-3,2
4	+	+	+	1,6	2,56	2,56	1,6	1,6	1,6
Σ							-2,4	2,4	-0,8

- Ecuación de regresión del modelo para el diseño de 2<sup>2</sup>.

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2$$

- Determinación de los coeficientes de la ecuación del modelo.

$$b_0 = \frac{\sum y}{N} = \frac{7,2}{4} = 1,8$$

$$b_1 = \frac{\sum X_1 y}{N} = \frac{-2,4}{4} = -0,6$$

$$b_2 = \frac{\sum X_2 y}{N} = \frac{2,4}{4} = 0,6$$

$$b_{12} = \frac{\sum X_1 X_2 y}{N} = \frac{-0,8}{4} = -0,2$$

La ecuación del modelo queda:

$$y = 1,8 - 0,6x_1 + 0,6x_2 - 0,2x_1x_2$$

- Cuarto ensayo:

Este ensayo consistió en ver la influencia que tiene la estrategia de conformación o trayectoria de la herramienta. En capítulos anteriores se describieron algunas de las trayectorias existentes de las cuales, para este caso, se decidió por la trayectoria en forma de pirámide pero variando el punto del incremento vertical, esto es debido a que es la trayectoria que nos permite obtener la máquina – herramienta seleccionada.

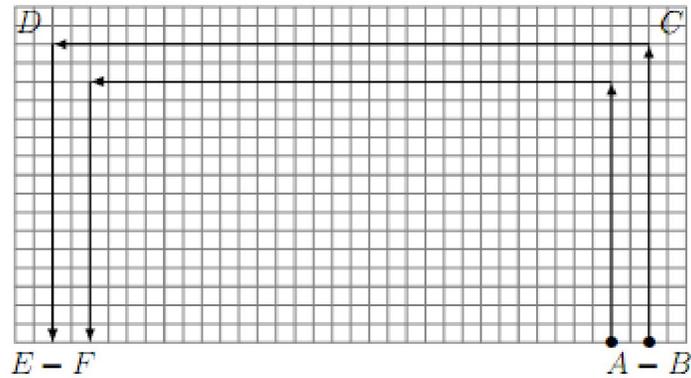


Figura 3.4: Trayectoria seguida por la herramienta para la geometría de la pirámide.

### 3.4.- Resultados y discusión.

#### 3.4.1.- Influencia del paso vertical en los valores de Rugosidad superficial.

Para ver la influencia del paso vertical en la calidad superficial de la chapa estampada fueron realizados cuatro ensayos con diferentes valores de incremento vertical tal como se muestra en la figura siguiente.

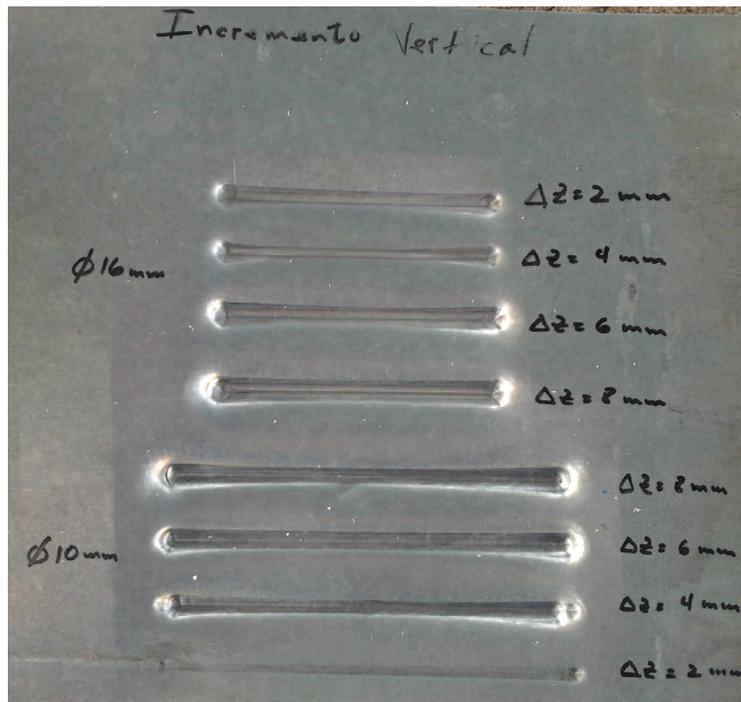


Figura 3.5: Variación de la rugosidad superficial vs incremento vertical.

El material utilizado, la máquina herramienta, las herramientas de conformación y el sistema de fijación son los mismos a los descritos anteriormente. La primera pasada fue producida con

incremento vertical de 2 mm, la segunda pasada fue realizada con un incremento vertical de 4 mm, la tercera fue realizada con un incremento vertical de 6 mm y la cuarta realizada con un incremento vertical de 8 mm tanto para la herramienta de diámetro de 10 mm como para la herramienta de 16 mm.

Después de elaborados los experimentos fueron realizadas las mediciones de la rugosidad superficial. En este caso no se contaba con un rugosímetro por lo que las mediciones fueron hechas con un comparador de rugosidad. Como las diferencias eran tan pequeñas no se pudieron obtener resultados con la precisión deseada por lo que se decidió realizar una inspección visual para ver las diferencias de las crestas entre las diferentes pasadas.

Aunque se pudo observar como una variación del incremento vertical y el diámetro de la herramienta influyen en la rugosidad superficial no se consideró exitoso este experimento.

#### **3.4.2.- Influencia de la velocidad de conformación en los valores de rugosidad superficial.**

Para el estudio de la velocidad de conformación es necesario analizar la influencia que tiene sobre el proceso la velocidad de rotación de la herramienta y la velocidad de avance. En este caso se decidió realizar dos experimentos variando además el diámetro de las herramientas de conformación. Para ello fueron realizados cuatro ensayos en cada caso. Se realizaron posteriormente las mediciones de las rugosidades superficiales viendo la influencia de estos factores sobre el acabado superficial de la pieza.

##### **- Variación de la velocidad de avance y el diámetro de la herramienta.**

Las diferentes pasadas fueron realizadas con velocidades de avance de 50 mm/min, 106 mm/min, 292 mm/min y 395 mm/min con un incremento vertical constante de 5 mm y una velocidad de rotación de la herramienta de 200 rpm. Los resultados medidos se presentan en el siguiente gráfico.

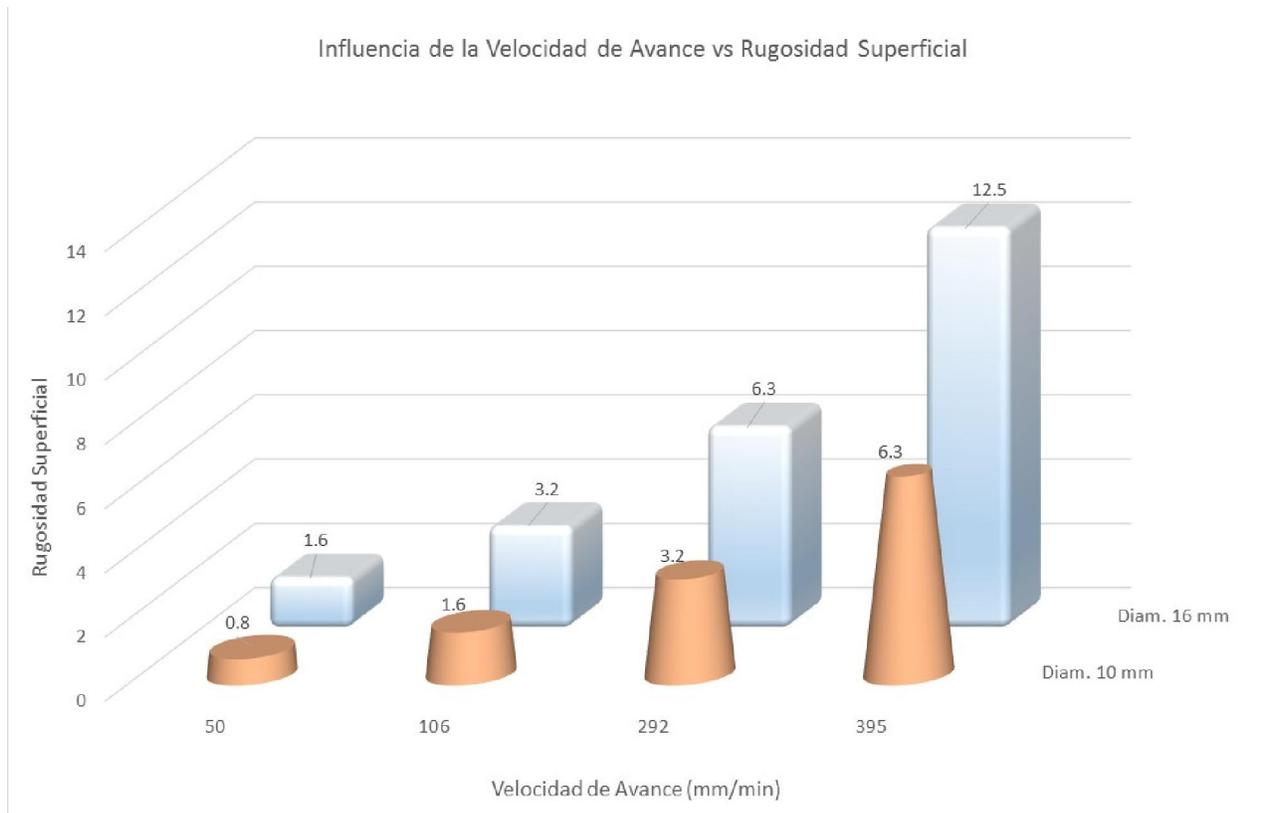


Figura 3.6: Influencia de la velocidad de avance vs rugosidad superficial.

Como se puede observar para un mismo diámetro de la herramienta de conformación, un incremento de la velocidad de avance afecta negativamente la calidad superficial de la pieza a conformar. Lo mismo ocurre si se es analizado el aumento del diámetro de la herramienta para un mismo valor de velocidad de avance. Esto es provocado por el aumento de la fricción entre la herramienta y la chapa, lo que genera temperaturas mayores rompiendo la película de lubricante afectando la calidad superficial.

#### - Variación de la velocidad de rotación y el diámetro de la herramienta.

En este caso las diferentes pasadas fueron realizadas con una velocidad de rotación de 200 rpm, 400 rpm, 630 rpm y 1000 rpm con un incremento vertical constante de 5 mm y una velocidad de avance de la herramienta de 106 mm/min. Los resultados medidos se presentan en el siguiente gráfico.

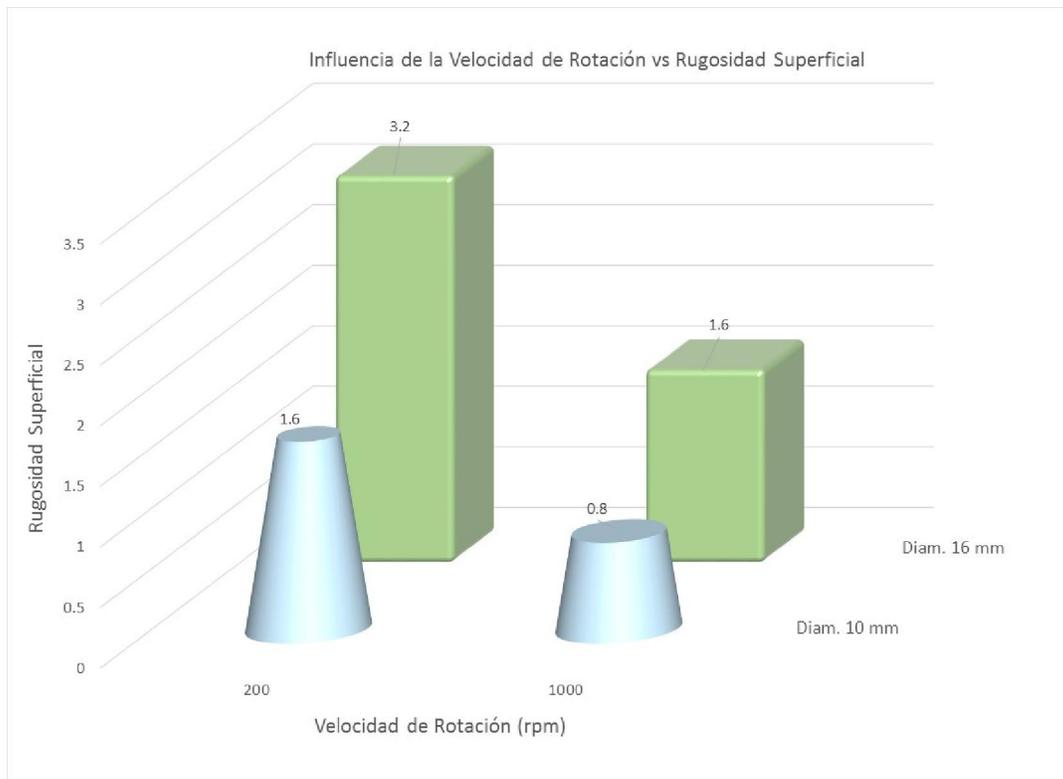


Figura 3.7: Influencia de la velocidad de rotación vs rugosidad superficial.

Como se puede constatar, a diferencia del ensayo anterior, para un mismo diámetro de la herramienta de conformación, un incremento de la velocidad de rotación favorece la calidad superficial de la pieza a conformar. No siendo así si es aumentado diámetro de la herramienta para un mismo valor de velocidad de rotación.

Analizando los dos ensayos en conjunto se puede demostrar que ambos parámetros estudiados afectan el acabado superficial de la pieza, pero de forma diferente, por lo que se debe buscar un compromiso entre ambos para obtener piezas con la calidad adecuada.

### 3.4.3.- Influencia de la trayectoria de la herramienta.

Se hizo un análisis de la trayectoria de la herramienta para determinar cómo influye esta en la conformabilidad de la pieza estampada. Se eligieron dos trayectorias, ambas para realizar una pirámide truncada pero con variación en el punto donde se varía el incremento vertical. Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes figuras.

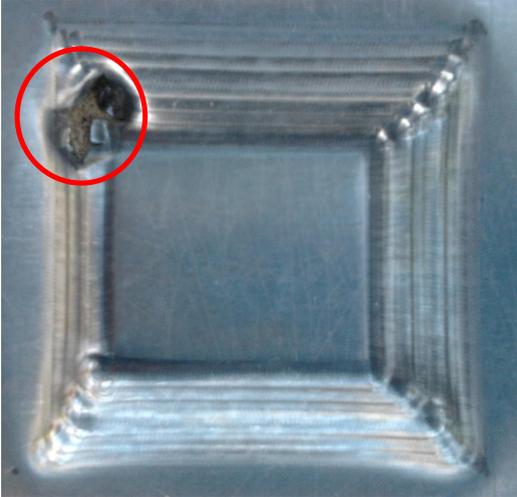


Figura 3.8: Influencia de la trayectoria de la herramienta con incremento vertical fijo.

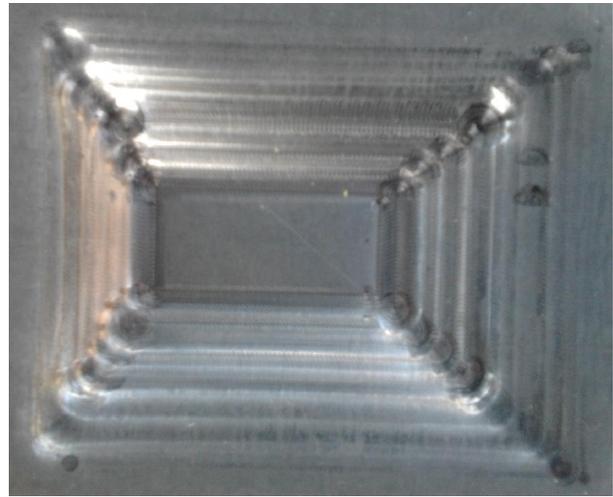


Figura 3.9: Influencia de la trayectoria de la herramienta con incremento vertical variable.

En el 1er caso el incremento vertical siempre fue dado en el mismo punto, como resultado la pieza fracturó y se rompió, esto es debido a la concentración de tensiones y generación de calor concentrada en un mismo punto de contacto. En el segundo caso no ocurrió así, el incremento vertical fue dado en diferentes puntos de la trayectoria obteniéndose una pieza sana no llegando a fracturarse. Esto demuestra la influencia de la trayectoria de la herramienta en la conformabilidad de la pieza, aunque la dirección de la trayectoria fue la misma en ambos casos con solo variar el lugar del incremento vertical los resultados obtenidos fueron diferentes.

### Conclusiones parciales.

- Se elaboraron dos herramientas necesarias para los ensayos con características similares a las consultadas en la literatura utilizadas en estos procesos de conformación.
- Se obtuvieron las ecuaciones de regresión de los ensayos experimentales realizados.
- Se lograron obtener resultados aceptables que permitieron reflejar la influencia de algunos de los parámetros tecnológicos del proceso de EIPS.

### **Conclusiones generales.**

1. Con respecto a otros procesos convencionales, el estampado incremental nos permite obtener mayores valores de conformabilidad del material ya que las fuerzas de conformación son menores debido a que solo se deforma plásticamente una pequeña zona de la pieza.
2. Entre los parámetros del proceso de estampado incremental por punto simple, la herramienta de conformar es la que presenta mayor influencia; su tamaño, forma, su velocidad, desplazamiento y el incremento vertical definen la conformabilidad, acabado superficial, limitaciones geométricas y tiempo de conformado del producto final.
3. Una adecuada lubricación de la superficie de contacto entre la herramienta y la chapa disminuye la temperatura de trabajo, favoreciendo el acabado superficial de la pieza.
4. Es posible realizar un proceso de EIPS en máquinas – herramientas convencionales.
5. La estrategia de conformación con incrementos verticales en diferentes puntos de la trayectoria de la herramienta favorece la conformabilidad de la pieza.
6. Un aumento del incremento vertical no trajo variaciones considerables en la calidad superficial de la superficie.
7. Un aumento de la velocidad de rotación trajo consigo un mejor acabado superficial de la superficie.
8. Un aumento de la velocidad de avance influye negativamente en la calidad superficial de la pieza conformada.
9. El proceso de estampado incremental por punto simple es vialmente económico para la fabricación de lotes pequeños comparado con otros procesos de estampado convencional.

### **Recomendaciones.**

1. Profundizar en los estudios sobre el fenómeno de fricción entre la herramienta y la chapa metálica.
2. Realizar estudios experimentales con el objetivo de determinar la fuerza de conformación durante el proceso de estampado.
3. Simular el proceso EIPS variando los diferentes factores que influyen sobre el mismo y verificarlo con casos reales.

**Referencias bibliográficas.**

1. “Dieless Forming”. Industrias Teysa S.A., (2012). Disponible en: <http://www.industriasteysa.com/tech.html>
2. Ambrogio, G., L.D.N., L. Filice, F. Gagliardi, M. Muzzupappa. “Application of IF process for high customised medical product manufacturing”. (2005).
3. Ambrogio, G.; L. Filice; F. Gagliardi; F. Micari. “Three-dimensional FE simulation of single point incremental forming: experimental evidences and process design improving”. VIII International Conference on Computational Plasticity. COMPLAS VIII. CIMNE, Barcelona, (2005)
4. Avitzur, B. and C.T. Yang, “Analysis of power spinning of cones” (1960).
5. Castelan, J. “Utilización de tecnologías CAD.CAM para el estampado incremental”. (2007).
6. Castelan, J; L. Schaeffer; A. Daleffe. “Desenvolvimento de produtos personalizados através de estampagem incremental para aplicações na medicina ortopédica”. (2009)
7. Cavallini, B. “Conformado de chapa mediante deformación incremental asimétrica.” Responsable Unidad de Materiales y Fabricación. (2009). Disponible en: <https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/32107-Conformado-de-chapa-mediante-deformacion-incremental-asimetrica.html>
8. Daleffe, A. “Descrição do Processo de Estampagem Incremental e Dados Concretos Práticos do Process” Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul, (2007).
9. Duflou R. ; B. Lauwers; J. Verbert; Y. Tunckol, H. De Baerdemaeker. “Achievable Accuracy in Single Point Incremental Forming: Case Studies”. Katholieke Universiteit Leuven – Department of Mechanical Engineering, Belgium, (2005).
10. Filice, L., Fantini, L., Micari, F. “Analysis of Material Formability in Incremental Forming”, Annals of the CIRP, vol. 5. (2002).
11. García-Romeu, M. L. “Contribución al estudio del proceso de doblado al aire de chapa. modelo de predicción del ángulo de recuperación y del radio de doblado final”. Tesis Doctoral, Departament d’ Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial, Universitat de Girona, (2005).
12. Hagan, E and J. Jeswiet. “A review of conventional and modern single-point sheet metal forming methods” Department of Mechanical Engineering, Queen’s University, Kingston, Ontario, Canada. (2003)
13. Hamilton, K. S.. “Friction and external surface roughness in single point incremental forming: A study of surface friction, contact area and the ‘orange peel’ effect.” Department of Mechanical and Materials Engineering. Queen’s University. Kingston, Ontario, Canada. (2010).

14. Hirt G., Ames J., Bambach M., *“Basic Investigation into the Characteristics of dies and support tools used in CNC-Incremental Sheet Forming, Proceedings of the International Deep Drawing”* Research Group Conference, IDDRG, Porto, Portugal (2006)
15. Hirt, G., J.A., M. Bambach, R. Kopp, *“Forming Strategies, Process modelling for CNC incremental sheet forming”*. (2004).
16. Hirt, G.; Junk, S.; Bambach, M.; Chouvalova, I.; Ames, J. *“Flexible CNC Incremental Sheet Forming: Process Evaluation and Simulation”*. Institute of Materials Technology / Precision Forming (LWP), Saarland University, Germany, (2005)
17. Hussain G.; Dar N. U.; Gao I.; Chen m. H. *“A comparative study on the forming limits of an aluminum sheet-metal in negative incremental forming”*. Journal of Materials Processing Technology, (2007).
18. Ismail, N.a. and S.M. Mahdavian, *“Hydrodynamic lubrication in metal spinning”* (1994)
19. Jacson, K. P.; Allwood, M. *“Incremental sheet forming research at Cambridge University”*. Institute for Manufacturing – University of Cambridge, Mill Lane, Cambridge, U.K., (2006)
20. Jadhav S., *“Basic Investigations of the Incremental Sheet Metal Forming Process on a CNC Milling Machine”*, Institut für Umformtechnik und Leichtbau, Germany (2004)
21. Jeswiet J., *“Incremental single point forming, Proceedings of NSF Design and Manufacturing”* Research Conference (2000).
22. Jeswiet, J., E. Hagan., *“Rapid proto-typing of a headlight with sheet metal, in: Proceeding of Shemet”*. (2001)
23. Jeswiet, J., F.M., G. Hirt, A. Bramley, J. Duflou, J. Allwood, , *“Asymmetric single point incremental forming of sheet metal”*,. (2005)
24. Jukka Tuomi, J. and L. Lamminen. *“Incremental Sheet Forming as a Method for Sheet Metal Component Prototyping and Manufacturing”*. BIT Research Centre, Helsinki University of Technology. (2004).
25. Kalpakcioglu, S., *“On the mechanics of shear spinning”*. (1961).
26. Kobayashi, S., I.K. Hall, and E.G. Thomsen, G. *“A theory of shear spinning of cones”*. (1961).
27. Kopac, J., Z. Campus. *“Incremental sheet metal forming on CNC-milling machine tool”*. Journal of Materials Processing Technology, n. 162-163, p. 622-628. University of Ljubljana, Faculty of Mechanical Engineering, Ljubljana, Slovenia, (2005).
28. Lamminen, L.; B. Wadman; R. Küttner; T. Svinning. *“Prototyping and low volume production of sheet metal components”*. Research report. (2003)

29. Leach, D., Green, A. J., Bramley, A. N., "A new incremental sheet forming process for small batch and prototype parts". 9th International Conference on Sheet Metal, Leuven, (2001).
30. Matsubara S., "A computer numerically controlled dieless incremental forming of a sheet metal". Proceedings Institution of Mechanical Engineers, Vol 215 Part B, IMechE (2001).
31. Micari, F.; Ambrogio, G.; Filice, L. "Shape and dimensional accuracy in Single Point Incremental Forming: State of the art and future trends". Journal of Materials Processing Technology, (2007)
32. Moreau, J. D.; E. Ruiz. "Evolución Microestructural De Chapas Metálicas Bajo Procesos De Larga Deformación". Departamento de Ciencia e Ingeniería de Materiales. Escuela Politécnica Universidad Carlos III de Madrid. (2009)
33. Padrão de Brito J. L. "Single Point Incremental Forming". Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica. (2009).
34. Pohlak, M. "Rapid Prototyping of Sheet Metal Components with Incremental Sheet Forming Technology". Thesis on mechanical and instrumental engineering E34. Faculty of Mechanical Engineering. Department of Machinery. Tallinn University Of Technology. (2007)
35. Pohlak, M.; Küttner, R.; Majak, J.; Karjust, K. & Sutt, A. "Simulation of incremental forming of sheet metal products" 4th International DAAAM Conference. (2004).
36. Reagan, J. and E. Smith, "Metal Spinning". Lindsay Publications, Bradley, Illinois, (1991).
37. Rodríguez, P. P. "Incremental Sheet Forming - Industrial Applications". International Seminar on Novel Sheet Metal Forming Technologies Jyväskylä (Finland), (2006)
38. Shankar R., Jadhav S., Goebel R., Homberg W., Kleiner M., "Incremental Sheet Metal Forming of Preformed Sheets", Proceeding of the 8th International Conference on Technology of Plasticity, Verona, Italy (2005).
39. Shim, M.; J. Park. "The formability of aluminium sheet in incremental forming". Journal of Materials Processing Technology 113, p. 654-658. Department of Mechanical and system Design Engineering, Hong-ik University, Seoul, South Korea, (2001).
40. Tiburi F., Schaeffer L., "Aspectos Técnicos e Econômicos da Estampagem Incremental". XXVII Senafor, X Conferencia Nacional de Conformação de Chapas, Brazil (2007).
41. Tiburi, F. "Aspectos do processo de estampagem incremental". Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul: Porto Alegre (2007).
42. Venkata, N. R.; J. Cao. "Incremental Sheet Metal Forming: A Review". Department of Mechanical Engineering. Indian Institute of Technology Kanpur.

## Anexos.

### Anexo I:

#### Secuencia de maquinado de las herramientas de conformar.

Para la herramienta de Ø 10 mm en la punta:

A. Colocar al plato, centrar y fijar.

1. Refrentar a limpiar.
2. Cilindrar en desbaste desde Ø 50 mm hasta Ø 46 mm a una longitud de 144 mm.
3. Cilindrar en desbaste desde Ø 46 mm hasta Ø 41 mm a una longitud de 125 mm.
4. Cilindrar en desbaste desde Ø 41 mm hasta Ø 25 mm a una longitud de 100 mm.
5. Cilindrar en desbaste desde Ø 25 mm hasta Ø 15 mm a una longitud de 62 mm.
6. Perfilar cono en desbaste.

B. Invertir, colocar al plato, centrar y fijar.

7. Refrentar a dar longitud final de 250 mm.
8. Cilindrar en desbaste desde Ø 50 mm hasta Ø 33 mm a una longitud de 110 mm.
9. Perfilar cono en desbaste.
10. Perfilar cono en acabado.
11. Taladrar agujero de Ø 20 mm.
12. Perfilar rosca interior.

C) Invertir, colocar al plato, centrar y fijar.

13. Cilindrar en acabado en Ø 45 mm.
14. Cilindrar en acabado en Ø 40 mm.
15. Cilindrar en acabado en Ø 24 mm.
16. Perfilar cono en acabado.

Para la herramienta de Ø 16 mm en la punta:

A. Colocar al plato, centrar y fijar.

1. Refrentar a limpiar.
2. Cilindrar en desbaste desde Ø 50 mm hasta Ø 46 mm a una longitud de 144 mm.
3. Cilindrar en desbaste desde Ø 46 mm hasta Ø 41 mm a una longitud de 130 mm.
4. Cilindrar en desbaste desde Ø 41 mm hasta Ø 35 mm a una longitud de 110 mm.
5. Cilindrar en desbaste desde Ø 35 mm hasta Ø 21 mm a una longitud de 70 mm.

6. Perfilar cono en desbaste.

B. Invertir, colocar al plato, centrar y fijar.

7. Refrentar a dar longitud final de 255 mm.

8. Cilindrar en desbaste desde  $\varnothing$  50 mm hasta  $\varnothing$  33 mm a una longitud de 110 mm.

9. Perfilar cono en desbaste.

10. Perfilar cono en acabado.

11. Taladrar agujero de  $\varnothing$  20 mm.

12. Perfilar rosca interior.

C) Invertir, colocar al plato, centrar y fijar.

13. Cilindrar en acabado en  $\varnothing$  45 mm.

14. Cilindrar en acabado en  $\varnothing$  40 mm.

15. Cilindrar en acabado en  $\varnothing$  34 mm.

16. Perfilar cono en acabado.

**Anexo II:**

Se han realizado estudios para la implementación del proceso de estampado incremental en máquinas CNC. Para esto se fabricó un dispositivo por Puigjaner y se instaló en Edaetech en un centro de mecanizado.



Figura a.1: Adaptación de un centro de mecanizado por Edaetech y Puigjaner. [7]