



EL PROCESO DE ESTAMPADO INCREMENTAL DE CHAPAS CON PUNTO SIMPLE. INFLUENCIA DE LA VELOCIDAD DE ROTACIÓN Y EL AVANCE SOBRE EL ACABADO SUPERFICIAL EN UNA CHAPA DE ALUMINIO.

Alexis Alonso-Martínez^{1a}, José R. Marty-Delgado^{1b}, Arcelio Jimenez Abreu^{1c}, Miguel Morales Jiménez

¹ Facultad de Ingeniería Mecánica. Departamento de Ingeniería Mecánica. Carretera a. Camajuaní Km 5 ½. Santa Clara Villa Clara. Cuba. C.P 50300

^a alexisam@uclv.edu.cu, ^b jmarty@uclv.edu.cu, ^c arcelio@uclv.cu

Resumen

Actualmente, diversos sectores industriales (aeronáutico, automoción,...) utilizan procesos de conformado para producir componentes de geometrías complejas a partir de chapas metálicas. Los procesos tradicionales de conformación que utilizan matrices son apropiados para la producción de grandes volúmenes de piezas, pero no son rentables en el caso de series reducidas. El conformado incremental es un proceso diferente, inteligente y flexible, que se presenta como una alternativa a los métodos de conformado tradicionales. Este proceso se basa en metodologías de Rapid Manufacturing, y permite reducir enormemente los costes de utillaje, ya que solo requiere de una herramienta simple de soporte. Se adecua perfectamente a la fabricación de prototipos y series cortas por los bajos costes de producción, pero el tiempo necesario para conformar una pieza, típicamente varias horas, lo hace inviable para series más largas.

De la revisión bibliográfica realizada se demostró que este proceso puede ser aplicado en la industria en la fase de desarrollo de los productos o para la producción de pequeños lotes de piezas. Se analizaron los factores tecnológicos que inciden sobre el proceso y se realizaron varios experimentos con el fin de determinar la influencia de la velocidad de rotación (rpm) y el avance (mm/min) sobre el acabado superficial en una chapa de aluminio.

Palabras Claves

Estampado Incremental por Punto Simple. Conformación de chapas de metal.

Abstract

Various industrial sectors (aerospace, automotive,) use forming processes nowadays to produce components of complex shapes from sheet metal. Traditional processes that use arrays are suitable for the production of large volumes of parts, but are not profitable for small series. Incremental forming is a different process, intelligent and flexible, which presents itself as an alternative to traditional forming methods. This process is based on Rapid Manufacturing methodologies, and greatly reduces

tooling costs, since it only requires a simple tool support. It's well suited to the manufacture of prototypes and small series by low production costs, but the time required to manufacture a part, typically several hours, which makes it impractical for longer runs.

From the literature review showed that this process can be applied in the industry in the development phase of the product or to the production of small batches of parts. Technological factors affecting the process and several experiments to determine the influence of the rotation speed (rpm) and feed rate (mm / min) on the surface finish on the aluminum sheet were performed.

Key words

Single Point Incremental Forming. Sheet Metal Forming.

Introducción

En las últimas décadas las industrias metalúrgicas tienen que hacer frente a nuevas necesidades como la producción de lotes más pequeños y la constante demanda de procesos más flexibles. Estas nuevas necesidades se contradicen con las tradicionales tecnologías de fabricación por conformado y han dado lugar a la aparición de las tecnologías que utilizan el conformado incremental. [6]

La deformación incremental de lámina sin matriz es un proceso relativamente nuevo y su origen a nivel mundial se remite a menos de dos décadas (año 1994). Fue desarrollado por Matsubara y la compañía manufacturera AMINO, el cual, ha sido desarrollado e investigado, gozando de grandes oportunidades de ser aplicado en casos específicos de la industria. Por lo tanto, como punto de partida, se genera la inquietud acerca de la necesidad de profundización del mismo, sus parámetros y variables fundamentales y casos aplicables de estudio en particular, según geometría y aplicación del producto final.

Aunque existen numerosos procesos de manufactura orientados a la fabricación masiva de productos de chapa metálica, los diseñadores de estos componentes carecen de procesos aptos para fabricar prototipos funcionales eficientemente. Por otro lado, los fabricantes de series cortas o componentes únicos, como los dispositivos biomédicos, dependen de procesos manuales inherentemente lentos, costosos y poco precisos.

El conformado incremental de chapa (ISF por sus siglas en inglés) es un proceso relativamente nuevo que promete aliviar los problemas anteriormente mencionados. Los componentes fabricados por ISF son totalmente funcionales y pueden ser de complejidad geométrica difícilmente alcanzable con otros medios. En principio, la tecnología de conformado incremental es potencialmente accesible para cualquier taller equipado con un centro de maquinado de control numérico (CNC) en combinación con paquetes comerciales de diseño y manufactura asistida por computadora (CAD/CAM por sus siglas en inglés). [8]

Aplicaciones y características generales de los procesos de (EI) chapas.

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. [6]

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. [10]

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 [5]. Estas cuatro configuraciones se muestran en la figura 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.

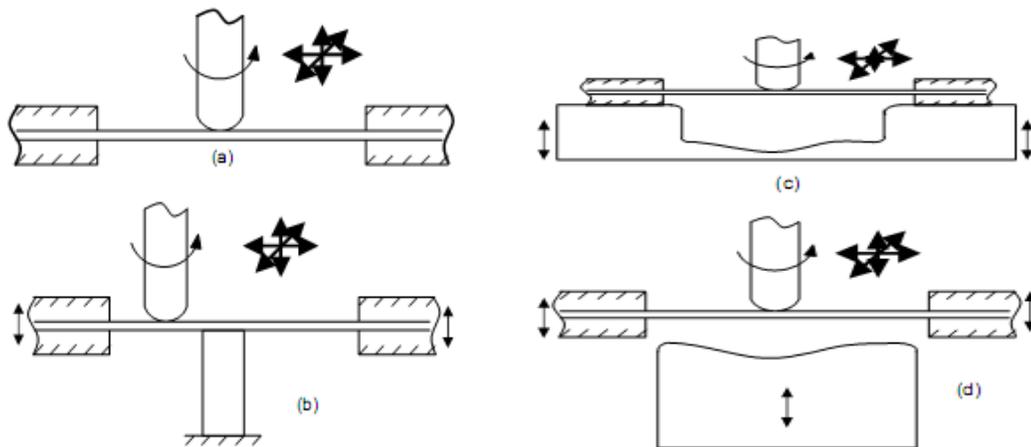


Figura 1: Variantes del proceso de estampado incremental. (a) Conformado negativo sin matriz, también conocido como estampado incremental por punto simple. (b) Conformado positivo sin matriz, también conocido como estampado incremental de dos punto. (c) Conformado negativo con matriz. (d) Conformado positivo con matriz. [10]

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. [9]

Descripción general del proceso de (EIPS).

Debido a la gran flexibilidad del estampado incremental de punto simple (*SPIF- single point incremental forming*), se toma como viable su aplicación a pequeños lotes de producción y así mismo a lotes de piezas individuales, ya que el costo de herramientas utilizadas en el proceso es mucho menor que el normalmente utilizado en los procesos de estampado tradicional. Considerando que el estampado puede ser realizado con matriz bastante simplificada o sin matriz, con apenas una herramienta de conformación, el proceso se torna también viable para prototipados rápidos para materiales no metálicos y también para trabajos artísticos. [1]

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. [3 y 22]

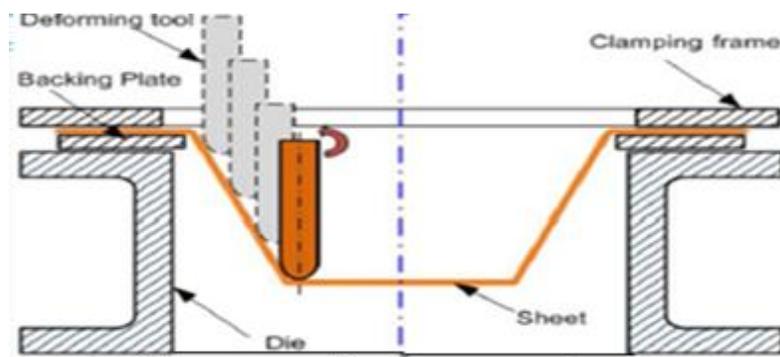


Figura 2: Estampado incremental de un punto o punto simple. [9]

Parámetros esenciales del proceso de (EI) 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.

Principales ventajas y desventajas del proceso.

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: [7]

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 máquinas convencionales y 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 está 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 respecto 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. [2, 4]

Sin embargo, aun teniendo en cuenta todas estas ventajas, sigue siendo un proceso que necesita ser estudiado con mayor detenimiento. Ya 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 proceso está 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. [2]

Selección de un caso de estudio

Para el caso que se desea estudiar se eligió como figura geométrica un cono truncado, esta es una figura geométrica sencilla la cual permite, según la literatura, estudiar los parámetros tecnológicos del proceso de estampado incremental por punto simple. Las dimensiones de la misma son: diámetro 62 mm, una profundidad de 6mm, un ángulo de 45° y un espesor de 0,55 mm. Ver figura 3

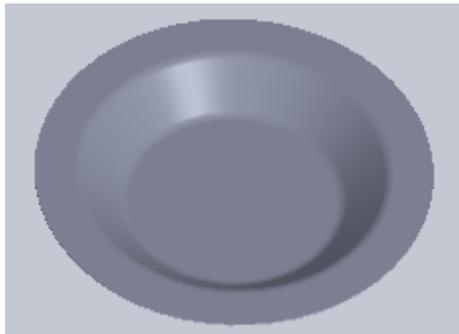


Figura 3: Cono truncado. [Elaboración propia]

Factores tecnológicos críticos que deciden sobre el proceso de estampado incremental para el caso de estudio.

Los factores tecnológicos críticos que deciden sobre el proceso de estampado incremental para el caso de estudio son la velocidad (rpm), incremento vertical, diámetro de la herramienta y trayectoria de la herramienta, que no por ser los más esenciales son los únicos que intervienen en el proceso.

Velocidad de rotación (RPM): La velocidad a la cual la herramienta está girando depende de factores como la calidad, tipo de herramienta, la dureza y maquinabilidad del material, se ha establecido como punto de partida para pruebas experimentales valores promedio de 3000 rpm para ambos materiales (aluminio y acero), puesto que se recomienda trabajar con valores no mayores a 4.000 rpm. [3]

Avance: Es la velocidad relativa que se da entre la herramienta y la pieza. Luego de que la herramienta finaliza un primer recorrido, realiza un incremento entre plano y plano. Si ese incremento es pequeño

no existirá mayor distancia entre planos y la figura podrá ser más detallada y pulida. Generalmente se especifica en mm/min, y se ha trabajado con valores de 2.000-3.500-5.000 mm/min, tanto para el aluminio como para el acero. [3]

Incremento vertical: La profundidad de corte o profundidad de pasada (p) es la profundidad de la capa arrancada de la superficie de la pieza en una pasada de la herramienta; en otras palabras, es el incremento que se da en el eje z y determina la profundidad de la pieza luego de varios y progresivos incrementos. Habitualmente se expresa en milímetros (mm). Se ha trabajado en pruebas experimentales con profundidades entre 0,2-0,6 mm para el acero y 0,5-1 mm para el aluminio (Ver Figura 4).

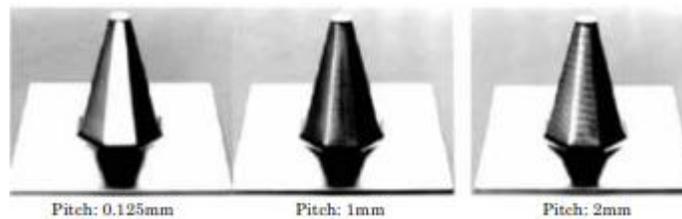


Figura 4 Calidad superficial obtenida [3]

Diámetro de la herramienta: Se recomienda que el diámetro de la herramienta sea hasta 10 veces mayor que el espesor de la lámina metálica pero dependiendo de la geometría de la pieza y de los ángulos que tiene la misma, se puede trabajar con diámetros de herramientas menores. [3]

Ángulo de formabilidad: Es una característica muy importante en el proceso; el ángulo de formación estará determinado por la geometría de la pieza (Figura 5), el mayor ángulo de diseño, debe ser menor que el parámetro del material definido por el máx., se ha trabajado con ángulos no mayores a los 70° , ya que según experiencia en procesos de deformación dieless-SPIF se han presentado rupturas de material en ángulos de formabilidad cercanos a los 90° , por ello la formación de ángulos semirrectos está limitada por las estrategias de manufactura a varias etapas de formación.[8]

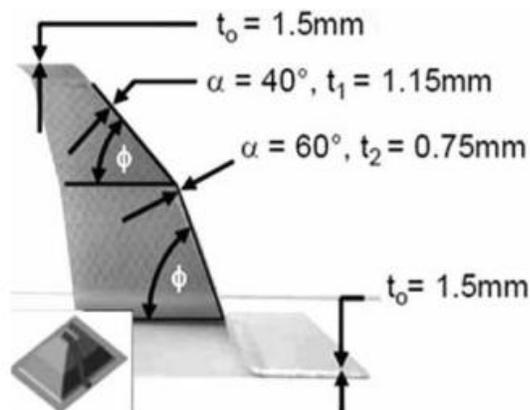


Figura 5: Ángulo de conformación. [8]

Recorrido de herramienta (Tool-path): Es un factor muy importante ya que con este se determina el resultado final de la pieza. Este recorrido se basa en dividir un número n de planos que serán recorridos por la herramienta de trabajo con una profundidad específica, cada vez que termine su recorrido anterior. En esta etapa se define la entrada, las trayectorias que realizará la herramienta en los tres ejes de posicionamiento y la salida, al finalizar la manufactura de la pieza. [8]

Selección de las herramientas de conformación.

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 nuestro caso se utilizara una herramienta con forma cónica de punta semiesférica, con un diámetro de 18 mm. La cual tienen una influencia directa sobre varios parámetros en el proceso tales como el acabado superficial y la distribución de tensiones en la región que está siendo conformada.

La herramienta fue obtenida por un proceso de maquinado, cuya secuencia de maquinado se expresa en el anexo 1. Después de maquinada la herramienta se le realizó el tratamiento térmico en un horno, se empleó una afiladora para cortarle el moño tecnológico y por último un rectificado en la punta con el objetivo de dar un acabado que favorezca al proceso para mejorar su calidad superficial y aumentar la resistencia al desgaste. El material utilizado para la fabricación de la herramienta fue de acero AISI 4140. (Ver figura 6).

Tabla 1: Componentes del acero AISI 4140.

Carbono(C)	Cromo(Cr)	Silicio (Si)	Magnesio (Mn)	Molibdeno (Mo)	Azufre (S)	Fosforo (P)
0.38-0.43%	0.80-1.10%	0.15-0.30%	0.75- 1%	0.15- 0.25%	0.04%	0.35%

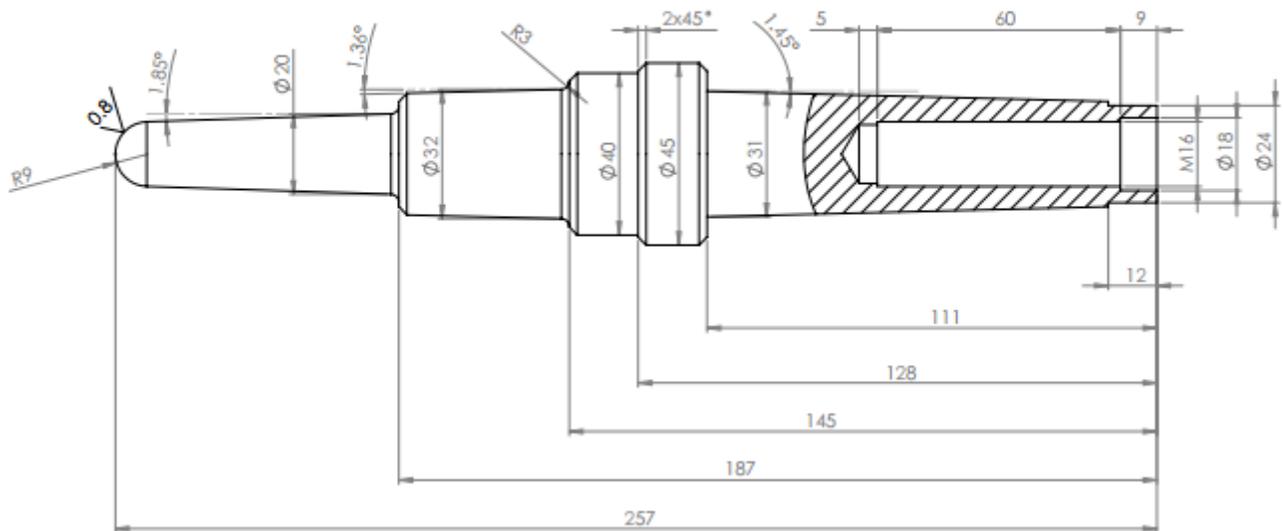


Figura 6: Herramienta de conformación obtenidas mediante el proceso de maquinado.

Máquina – herramienta empleada en el proceso.

Según la literatura consultada, para este proceso se utilizan máquinas – herramienta por control numérico lo cual no deja exento las máquinas – herramienta convencional. En nuestro caso se emplea una Fresadora CNC ZAYER 1700 AF 3V de mando programado la cual presenta movimiento en los tres ejes de coordenada. La misma se encuentra en la empresa EINPUD “1ro de mayo” en el taller de moldes y troqueles.

Fresadora CNC ZAYER 1700 AF3V:

- Eje X = 1320 mm
- Eje Y = 610 mm
- Eje Z = 610 mm
- Máxima rpm 1800

Dispositivo de fijación de la chapa a conformar.

Para este ensayo se utilizaron dos platillos circulares con los cuales sujetan la chapa entre los dos platos y de manera que sean prensados mediante tornillos, luego el dispositivo es fijado con bridas en la mesa de la fresadora CNC (Anexo 2). Este dispositivo desempeña diversos papeles durante el proceso de conformación. Es el responsable de la fijación, posicionamiento en algunos casos y de la aplicación de las fuerzas de tracción de la chapa.

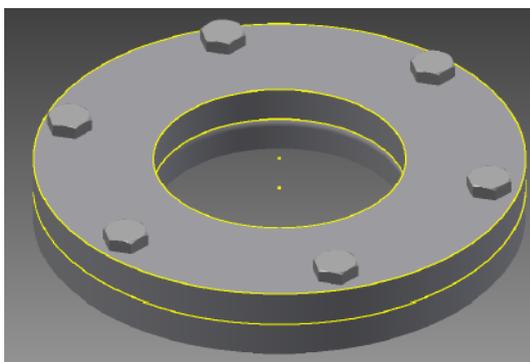


Figura 7: Dispositivo de fijación de la chapa. [Elaboración propia]

Influencia de la velocidad de conformación en los valores de acabado superficial.

Materiales y métodos.

Para este ensayo fue utilizada una chapa de aluminio 3003 con un espesor de 0.55 mm y una composición como se muestra en la tabla 2. En estos procesos es necesaria 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 aceite hidráulico. De los parámetros que influyen en el proceso de estampado incrementa por punto simple (EIPS), se decidió en este trabajo, ver la influencia de la velocidad de conformación en función de la acabado superficial obtenida, la misma relaciona dos factores que son la velocidad de rotación de la herramienta y el avance. Se mantuvo fijo el incremento vertical de la herramienta y la trayectoria de la herramienta.

Tabla 2: Componentes del Aluminio 3003.

Fe	Cu	Silicio (Si)	Magnesio (Mn)	Zn	Aluminio
0.7	0,05-0,20	0.6	1,0-1,15	0.10	El resto

- Primer ensayo: Variación de la velocidad de avance.

En este primer ensayo se analizará la velocidad de avance de la herramienta manteniendo el incremento vertical y la velocidad de rotación de dicha herramienta constante. Se tomaron dos valores de velocidad de avance (800mm/min; 1200 mm/min) manteniéndose constante el incremento vertical (1mm) y la velocidad de rotación (1000 rpm). Los resultados medidos se presentan en el siguiente gráfico.

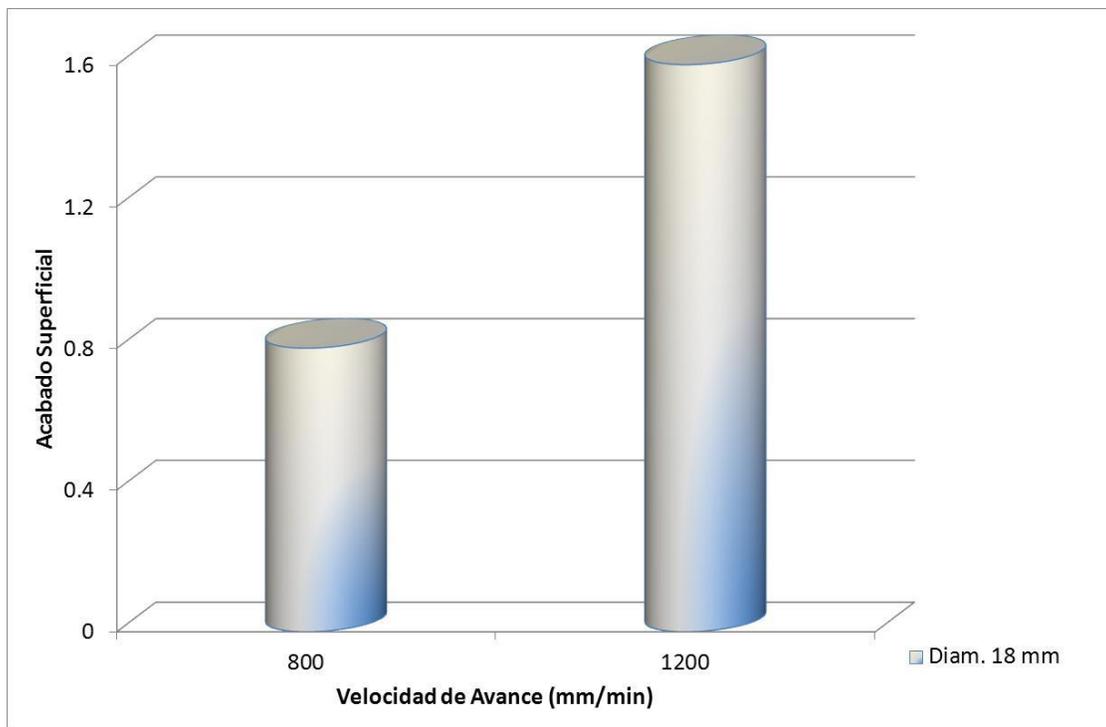


Figura 8: Influencia de la velocidad de avance vs acabado superficial. [Elaboración propia]

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. 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.

- **Segundo ensayo: Variación de la velocidad de rotación.**

En este ensayo, similar al anterior, se decidió analizar la variación de las RPM y su influencia en el acabado superficial fijando el incremento vertical y la velocidad de avance de la herramienta. Se tomaron dos valores de velocidad de rotación (1000 y 1500 rpm respectivamente) manteniéndose constante el incremento vertical (1mm) y la velocidad de avance (1200 mm/min). Los resultados medidos se presentan en el siguiente gráfico.

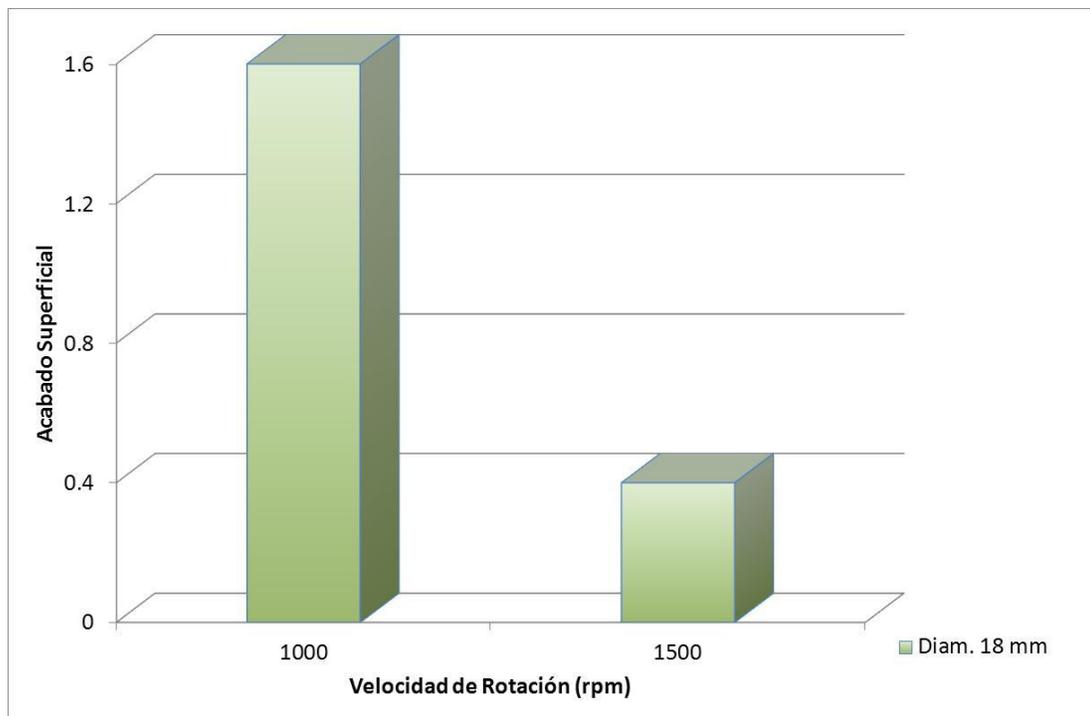


Figura 9: Influencia de la velocidad de rotación vs rugosidad superficial. [Elaboración propia]

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.

Analizando los dos ensayos en conjunto se puede apreciar 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.

Conclusiones generales.

1. Se dieron a conocer las principales aplicaciones y características generales de los procesos de estampado incremental de chapas (EI).
2. Se realizó una descripción general de los procesos de estampado incremental. Parámetros esenciales del proceso.
3. Se plantearon las principales ventajas y desventajas del proceso como alternativa a la producción de series cortas de piezas y en la elaboración de prototipos.
4. Existen determinados factores que influyen en el proceso de estampado incremental como son la velocidad (rpm), penetración vertical, diámetro de la herramienta y trayectoria de la herramienta, que no por ser los más esenciales son los únicos que intervienen en el proceso.
5. Es posible la introducción y aplicación del proceso de Estampado Incremental por Punto Simple (EIPS) en las condiciones del taller de moldes y troqueles de la Empresa EINPUD “1ro de mayo”.

Bibliografía.

- 1- Castelan, J. *“Utilización de tecnologías CAD.CAM para el estampado incremental”*. (2007).
- 2- Castelan, J; L. Schaeffer; A. Daleffe. *“Desenvolvimento de produtos personalizados a través de estampagem incremental para aplicações na medicina ortopédica”*. (2009)
- 3- G. Páramo and A. Benítez, “Deformación incremental de lámina sin matriz (dieless) como alternativa viable a procesos de conformación de lámina convencionales,” *I nge CuC*, vol. 9, no. 1, pp. 115-128, Jun, 2013.
- 4- Jeswiet, J., F.M., G. Hirt, A. Bramley, J. Duflou, J. Allwood, , *“Asymmetric single point incremental forming of sheet metal”*,. (2005).
- 5- Miguel Ángel Sellés Cantó, Miguel A. *“El conformado incremental como nueva técnica de prototipado rápido”*. Instituto de Tecnología de Materiales. Universidad Politécnica de Valencia. Revista de investigación Editada por Área de Innovación y Desarrollo, S.L. (2012)
- 6- 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).
- 7- Padrão de Brito J. L. *“Single Point Incremental Forming”*. Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica. (2009).
- 8- Pérez-Santiago, Rogelio; Bagudanch Frigolé, Isabel; García-Romeu, Marialuisa; Hendrichs, Nicolás J. *“Fuerza de formado en piezas fabricadas por conformado de chapa”*. Tecnológico de Monterrey - Centro de Innovación en Diseño y Tecnología E. Garza Sada 2501 Sur; 64849, Monterrey, N.L.; México.
- 9- Tiburi, F. *“Aspectos do processo de estampagem incremental”*. Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul: Porto Alegre (2007).
- 10- Venkata, N. R.; J. Cao. *“Incremental Sheet Metal Forming: A Review”*. Department of Mechanical Engineering. Indian Institute of Technology Kanpur.

Anexos.

Anexo 1: Secuencia de maquinado de la herramienta de conformar.

Para la herramienta de \varnothing 18 mm en la punta:

A. Colocar al plato, centrar y fijar.

1. Refrentar a una longitud de 259 mm.
2. Cilindrar en desbaste desde \varnothing 50 mm hasta \varnothing 46 mm a una longitud de 150 mm.
3. Cilindrar en desbaste desde \varnothing 46 mm hasta \varnothing 41 mm a una longitud de 130 mm.
4. Cilindrar en desbaste desde \varnothing 41 mm hasta \varnothing 33 mm a una longitud de 113 mm.
5. Cilindrar en desbaste desde \varnothing 35 mm hasta \varnothing 21 mm a una longitud de 71 mm.
6. Perfilar cono en desbaste.

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

7. Refrentar a dar longitud final de 257 mm.
8. Cilindrar en desbaste desde \varnothing 50 mm hasta \varnothing 32 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 20 mm.
14. Cilindrar en acabado en \varnothing 32 mm.
15. Cilindrar en acabado en \varnothing 40 mm.
16. Cilindrar en acabado en \varnothing 45 mm.
17. Perfilar cono en acabado.

Anexo 2: Plano del dispositivo soporte de la chapa

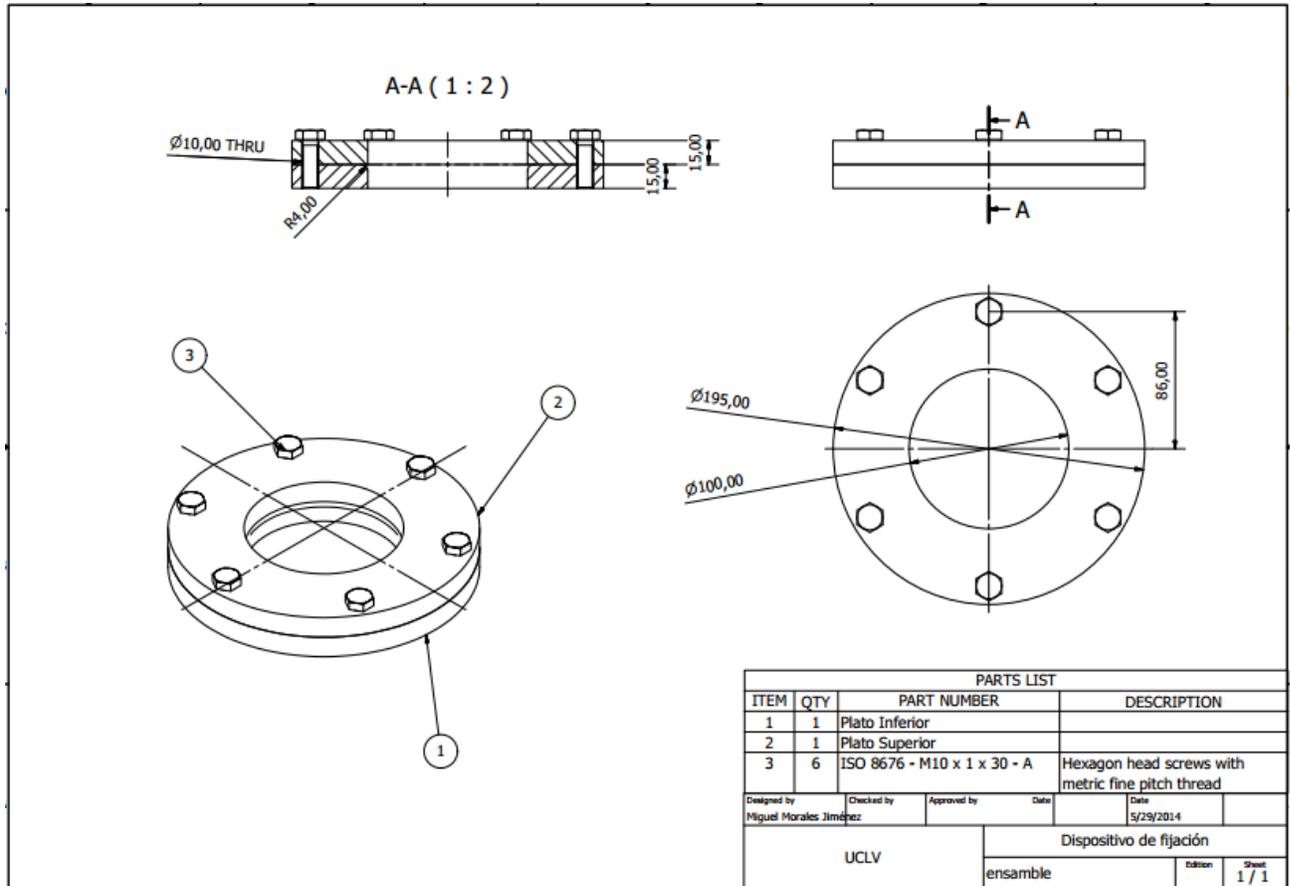


Figura a.1: Dispositivo de fijación de la chapa

Anexo 3:



Figura a.2: Herramienta fabricada para el proceso.

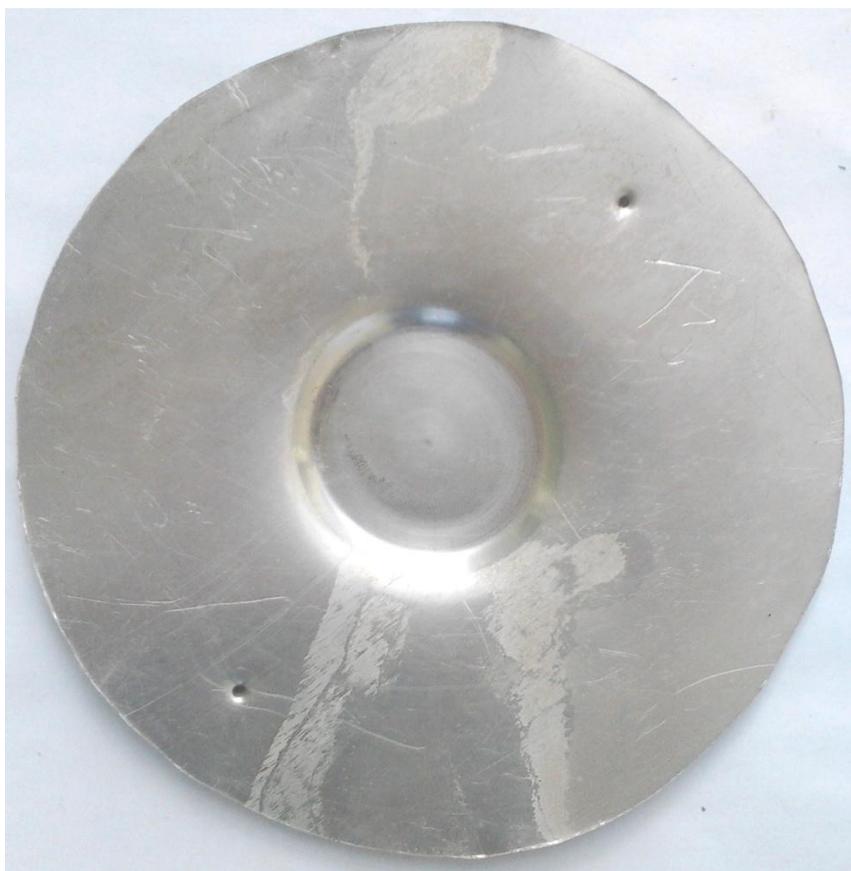


Figura a.3: Chapa conformada para su estudio.