

# Desarrollo de una geometría experimental en el proceso de conformado incremental de chapa aplicando la ley del seno

■■■■  
Gabriel Páramo-Bermudez y  
Adrian Benitez-Lozano  
Universidad EAFIT  
(Escuela de Administración y Finanzas –  
Instituto Tecnológico) Medellín-Colombia

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7186>

## 1. INTRODUCCIÓN

La deformación incremental de chapa metálica es un proceso de manufactura desarrollado por Matsubara [1] y la compañía AMINO®, en el que el conformado de la misma no requiere de troqueles o matrices convencionales. El proceso consiste en la deformación progresiva, por medio de una herramienta de conformado, aplicada a una chapa metálica que finaliza con la obtención de una geometría final. Con esta técnica, formas tridimensionales complejas son fácilmente producidas. Esta técnica de conformado es adecuada para clientes que requieren productos especializados, en cantidades discretas o únicas, a un menor costo incurrido por la no inversión en matrices o troqueles de conformación.

El proceso se inicia directamente a partir de un modelo tridimensional obtenido mediante diseño asistido por computador (CAD), el cual contiene la forma final de la geometría, se lleva a un sistema de manufactura asistida por computador (CAM), el cual implica el uso de computadores y tecnología de cómputo para ayudar en la fase directa de manufactura de un producto, en este sistema se configuran los parámetros más importantes del proceso de conformado incremental [3], tales como el avance (el cual se refiere a la velocidad relativa que se da entre la herramienta y la pieza), tamaño de paso (el cual da cuenta de la profundidad de capa arrancada de la superficie de la pieza en una pasada de la herramienta, es decir, incrementos constantes y progresivos entre niveles de profundidad de la pieza), revoluciones por minuto a las cuales gira el husillo donde está sujeta la herramienta, diámetro de herramienta de formado y una trayectoria de la misma sobre la superficie contenida en la geometría modelo, esta trayectoria de herramienta se refiere a la forma como se mueve la herramienta sobre la super-

ficie que se está conformando en la geometría. La pieza se conforma como resultado de pequeñas deformaciones que se imprimen de forma sucesiva e incremental, en pequeñas zonas localizadas en la chapa. La suma de estas pequeñas deformaciones genera la forma final de la pieza. El conformado incremental sin matriz es una de las tecnologías que ha surgido como alternativa a los procesos no convencionales para la formación personalizada. Basta trabajar con herramientas de máquinas fresadoras, tales como herramientas de punta esférica relativamente simples. En la Figura 1 se muestra un esquema general del proceso adaptado a la geometría en particular que aborda este trabajo.

La calidad superficial obtenida de la pieza se ve afectada por el tamaño de paso descrito anteriormente y depende del radio de la herramienta, tamaño de paso y el ángulo de inclinación, así como del sistema de lubricación y la velocidad de formación [3]. La velocidad de rotación de la herramienta (RPM), también tiene un papel importante ya que de esta depende la calidad del conformado y la temperatura generada por la fricción entre la herramienta y la chapa.

La deformación incremental se puede realizar en cualquier máquina fresadora universal, esta es una máquina herramienta cuya función es crear piezas de determinadas formas, a través de un proceso de mecanizado de las mismas, con el uso de una herramienta giratoria llamada fresa. Esta máquina debe contar con un sistema como mínimo de 3 ejes de movimiento, en control numérico computarizado (CNC). Por lo tanto, los elementos básicos de procesos de conformación incremental son: el material a ser formado, un anillo de sujeción de la pieza, la herramienta de conformado universal y la máquina de fresado CNC [4].

El conformado incremental de chapa mediante un solo punto de contacto (SPIF), está sufriendo defectos de fabricación que merecen ser investigados

## Generalidades del conformado incremental de lámina sin matriz

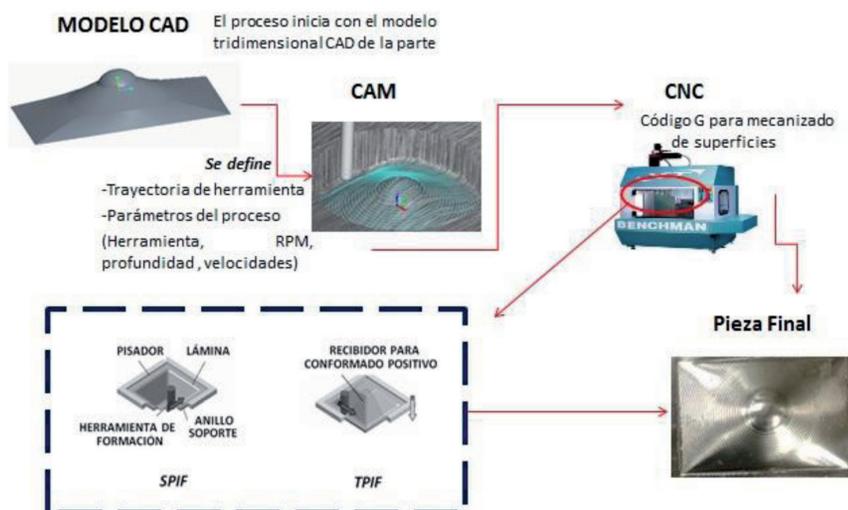


Fig. 1: Diseño CAD de geometría modelo y generalidades del proceso [2]

[5]. Estos defectos son adelgazamiento excesivo del material en diferentes zonas de una geometría que conllevan al agrietamiento de la pieza, y menor grado de conformabilidad de la misma por aumento de la acritud del material. Tales defectos podrían controlarse con el trabajo intensivo a través de diferentes pruebas en piezas a ser deformadas mediante esta técnica de conformado y análisis de los parámetros del proceso de fabricación, como los planteados en párrafos anteriores. La creación de prototipos de piezas de chapa complejas usando un solo punto de conformación incremental (SPIF), requiere la generación de trayectorias de herramientas óptimas y / o secuencias de trayectoria de herramientas, que garantizan que la pieza conformada está dentro de las especificaciones del diseño geométrico [6]. Tal afirmación es totalmente válida para el proceso de deformación con dos puntos de contacto, y hace que el tipo de trayectoria de herramienta sea uno de los parámetros importantes del proceso a tener en cuenta en este trabajo.

El presente trabajo enmarca el principio de un gran camino de investigación en las nuevas tecnologías de producción de chapa metálica para las industrias manufactureras con la mejor tecnología a nivel mundial, nutriéndose de los conceptos CAD-CAM/CNC. Se presenta un resultado de investigación con base a trabajos experimentales con chapas de aluminio en este proceso innovador en manufactura de chapa metálica, a través del desarrollo de un caso experimental en una geometría particular, analizando la aplicabilidad del proceso en la industria y las propiedades dimensionales de la geometría obtenida, su metrología, la relación entre los espesores obtenidos y los ángulos de formabilidad de la geometría, a fin de comprobar y aplicar la ley del seno para este proceso, a través de la cuantificación de la variación en porcentajes de la reducción del espesor, y también la variación en porcentaje entre el espesor real medido y el espesor a obtener según la Ecuación 1 de la ya conocida ley del seno para el repujado de chapa. Tal como esta ley es conocida y aplicada para el proceso de repujado. En el proceso de repujado con reducción de espesor se conforma el producto sobre el mandril por medio de un proceso de deformación reductora en el cual el diámetro exterior permanece constante

y el espesor de la pared se reduce. Esta ley anuncia una relación entre el ángulo de formabilidad y el espesor de chapa (Ver Figura 2), Para una forma cónica simple, el espesor resultante de la pared reducida puede determinarse fácilmente a través de la relación de la ley de los senos. En la Figura 2 se ilustra lo anteriormente mencionado, para el proceso de repujado de chapa.

mación incremental responda a la correcta deformación plástica y garantice la conformación del material, sin adelgazamientos pronunciados que puedan generar grietas o afectar la calidad dimensional y mecánica del producto. El material de la chapa de trabajo, es una aleación de aluminio serie 1100 (contenido de aluminio al 99% de pureza, con excelente resistencia a la corrosión,

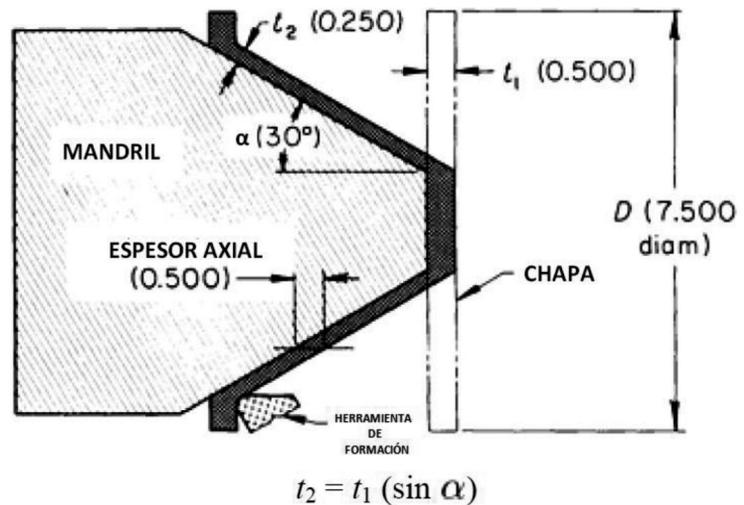


Fig. 2: Ilustración de la relación entre el ángulo de formación y espesor de chapa a través de la ley del seno para el proceso de repujado [10]

El conformado incremental de chapa sin matriz es relativamente nuevo, muy susceptible de investigación y perfeccionamiento, a fin de consolidarse como una gran opción entre los procesos alternativos de deformación de chapa metálica. Diversos autores han afirmado y validado la aplicabilidad del proceso, por lo tanto, es muy importante el desarrollo e investigación de nuevas tecnologías y procesos innovadores. Esto es particularmente válido para los pequeños lotes y producción de prototipos. El conformado incremental de chapa metálica puede ser considerado como uno de los desarrollos prometedores para estos fines [7-8].

## 2. MATERIALES Y METODOS

A partir de un modelado en particular de una geometría cónica con determinadas pendientes de inclinación y finalizada en punta esférica (ver Fig.1), es necesario generar la mejor estrategia CAM que defina la trayectoria de la herramienta, de tal modo que la defor-

buenas propiedades de formabilidad y ampliamente usado en trabajos sobre chapas de ese metal para diversos usos y aplicaciones), de 1.2 mm de espesor. La herramienta de formado es de acero cementado tipo fresa esférica de 10 mm de diámetro. La trayectoria de herramienta, un parámetro muy importante de este proceso, debe acomodarse al principio en particular de la deformación incremental en dos puntos de contacto (TPIF), en el cual el movimiento o trayectoria es de adentro hacia afuera y de arriba hacia abajo, sincrónicamente. En diferencia a lo anterior, para el método SPIF, el movimiento es de afuera hacia adentro y de arriba hacia abajo, por lo cual la conformabilidad de la chapa es mejor para el método TPIF y se convierte en la mejor alternativa para probar la hipótesis de la aplicabilidad de la ley del seno, la cual relaciona el espesor y los ángulos de formabilidad de la pieza. Bajo la técnica TPIF, se han obtenido mejores resultados en cuanto a la precisión geométrica de la pieza, y ausencia de cuellos o adelgazamientos

en la misma, debido a un menor grado de recuperación elástica luego de la conformación generada por la herramienta [9].

El método de conformación incremental en dos puntos, hace referencia a los puntos de contacto entre la herramienta y la parte superior de la chapa, y el molde completo o troquel (para el caso en particular) y la parte anterior (debajo de la chapa de aluminio). El molde completo es una pieza en madera de fibras de densidad media (MDF), mecanizada en la máquina *Benchmann* CNC, este molde y el dispositivo para

mecánicos que convierten una serie de impulsos eléctricos en desplazamientos angulares discretos) controlan el movimiento de los tornillos de bolas que administran el movimiento a lo largo de este eje vertical (eje z), estos tornillos permiten el movimiento longitudinal del plato móvil donde está contenida la chapa contra dicho molde o troquel de formación. Debe existir una sincronía entre este movimiento vertical del eje z que contiene el plato móvil, donde se encuentra sujeta la chapa de aluminio, y el desplazamiento vertical de la herramienta de fresado contenida en el

dispositivo y la herramienta de la fresadora, se logra gracias al programa o código G de la geometría trabajada, este programa se carga tanto en la máquina fresadora CNC MB 20, cómo en el software controlador que está conectado al dispositivo para deformación incremental en dos puntos, de esta forma habrá un movimiento sincrónico en los ejes verticales del dispositivo y la máquina fresadora comandada por un mismo programa de la geometría a trabajar.

La trayectoria de la herramienta ha sido programada usando incrementos

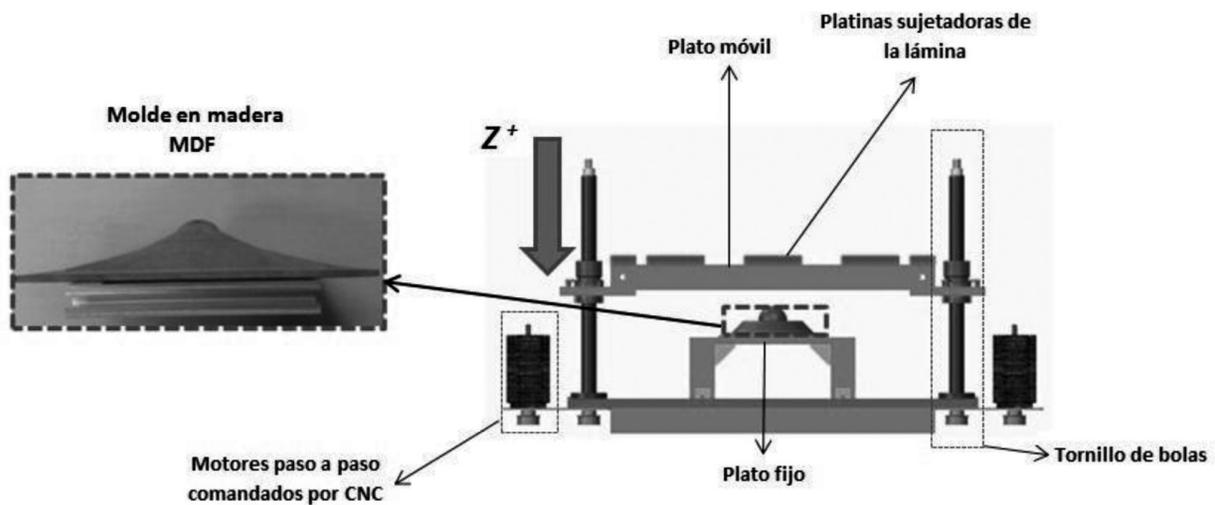


Fig. 3: Molde en madera y dispositivo usado para deformación incremental en dos puntos

el método de deformación incremental en dos puntos se muestra en la Figura 3. La máquina utilizada para el desarrollo de esta experimentación es una fresadora CNC MB20, la cual posee una mesa longitudinal con ranuras en T, para el montaje de sistemas de fijación. Estos sistemas proporcionan rigidez absoluta para manufacturar bajo la técnica de conformado incremental de chapa en dos puntos.

El dispositivo está anclado a la máquina fresadora CNC MB20 mediante bridas de sujeción con tuercas tipo T para su fácil inserción en las ranuras de la mesa longitudinal. Este dispositivo mostrado en la Figura 2, obedece un control independiente que comanda un eje z de movimiento (eje vertical sobre el cual la chapa será empujada hacia el molde o troquel de formación), los motores paso a paso (dispositivos electro-

eje vertical de la máquina fresadora. La sincronía del movimiento en el eje z del

consecutivos en el eje z ( $\Delta z$ ). Para evitar la entrada de la herramienta en un

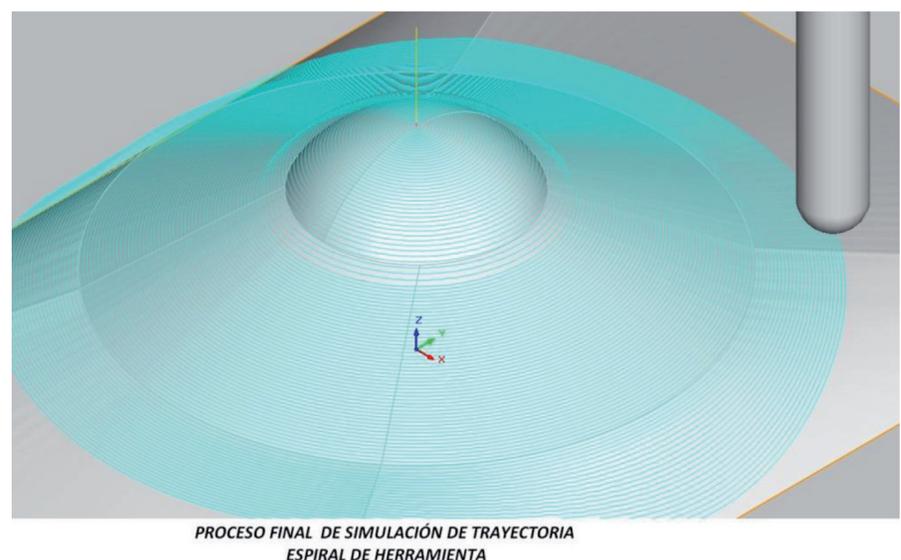


Fig. 4: Simulación trayectoria de herramienta en espiral, simulada por software CNC para geometría cónica finalizada en punta esférica

mismo lugar y la aparición de marcas en esa zona se ha usado una estrategia de tipo espiral (ver Figura 4).

Conformada la pieza, se presenta la medida de los espesores en función del ángulo de formabilidad en diferentes zonas de la pieza, la cual se muestra en la Figura 5. La pieza está dividida en tres zonas caracterizadas por diferentes ángulos de formabilidad ( $\phi_1$ ,  $\phi_2$ ,  $\phi_3$ ). Estos ángulos marcan el inicio de un trabajo de exploración de la técnica TPIF en materia de geometrías y aplicabilidad en futuras piezas cercanas a usos industriales.

tajes de reducción y la aplicabilidad de la ley del seno para el proceso de conformado incremental de chapa en dos puntos.

La tabla de parámetros iniciales y fundamentales para la técnica de conformado incremental de chapa en dos puntos, para la corrida del proceso en el centro de mecanizado CNC, se presentan en la Tabla I.

Con la pieza desarrollada, se procede a su análisis de apariencia visual, calidad dimensional, espesores en función de los ángulos de formabilidad y cumplimiento de la ley del seno.

Para la medición de los espesores se seccionará la pieza a la mitad, con el objetivo de ubicar debidamente el instrumento de medición y asegurar los criterios de una buena práctica metro-

Parámetros para conformado incremental de lámina en dos puntos	
Paso (mm)	2
Velocidad de rotación husillo (RPM)	1000
Velocidad de avance (mm/min)	650
Tiempo de proceso (MM:SS)	19:02
Trayectoria de herramienta	Espiral

Tabla I: Parámetros para proceso de conformado incremental de chapa en dos puntos

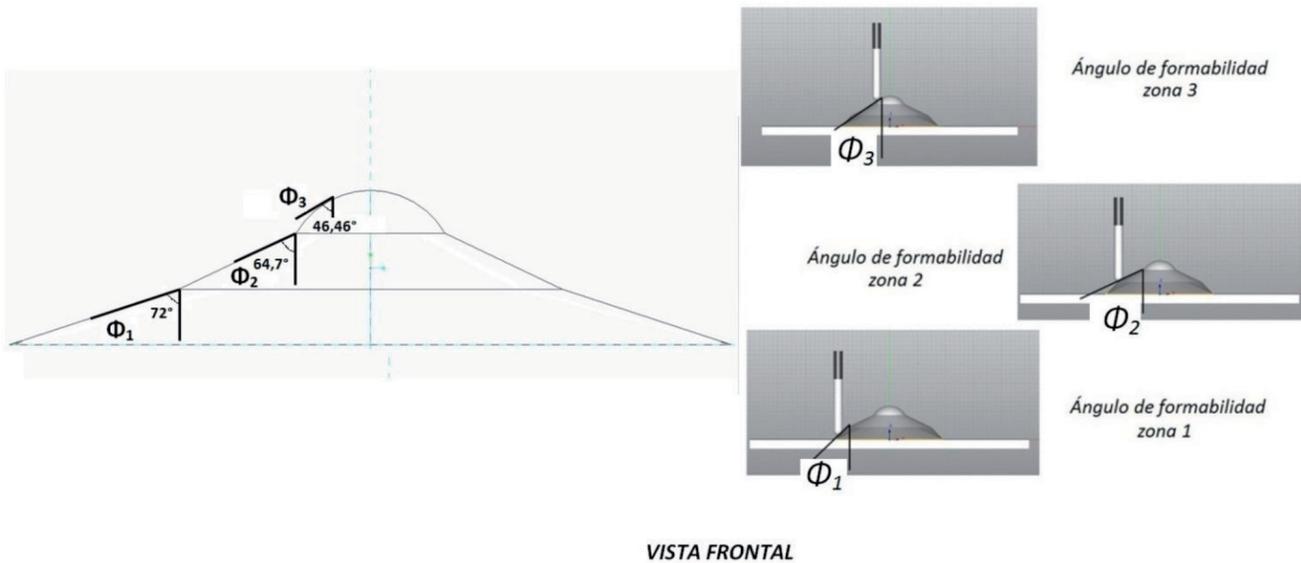


Fig. 5: Ángulos de formabilidad para diferentes zonas de la pieza

Con base a estos ángulos de formabilidad, se mide el espesor una vez obtenida la pieza, a fin de determinar la relación existente entre el ángulo y el espesor, con base a la ley de senos en el repujado de piezas, proceso análogo de conformado de hoja metálica. En la Ecuación 1 se muestra la ley que relaciona el ángulo y el espesor.

$$Ti = T \times \sin(\phi_i) \quad (1)$$

Ecuación 1: Ley del seno para repujado de chapa [10]

Se obtendrán diferentes mediciones en diferentes áreas y zonas para determinar la relación existente, los porcen-

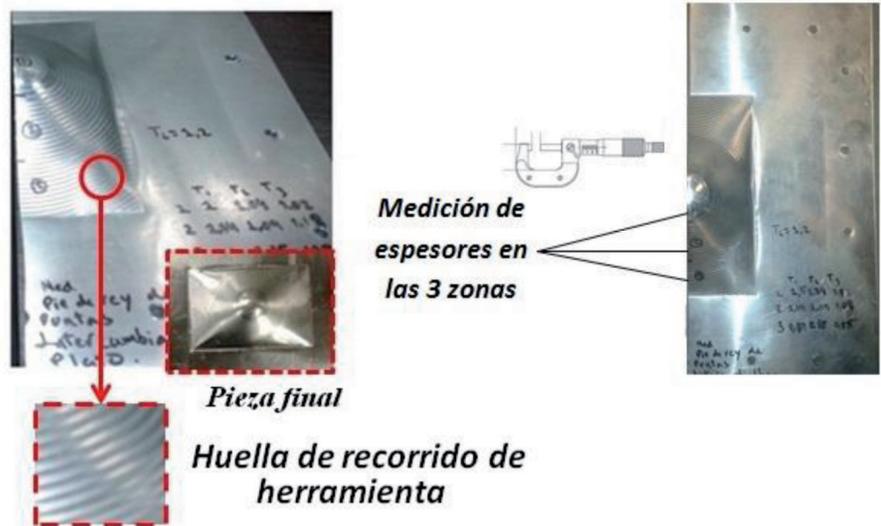


Fig. 6: Pieza final obtenida mediante proceso de conformado incremental de chapa en dos puntos, huella de recorrido de herramienta y medición de espesores

lógica. Para las mediciones de los espesores en diferentes zonas de la pieza, se toman varias medidas en cada una de ellas con micrómetros de exteriores especializados, previamente calibrados. Para el caso en particular se utiliza uno con campo de medida entre 0 y 25 mm, con división de escala 0.01 mm, la incertidumbre es de  $\pm 0.01$  mm lo cual determina la tolerancia o rango admisible en las cuales las medidas tomadas están contenidas. Se realizan tres mediciones por zona y se da cuenta del dato medio del espesor obtenido para cada una.

### 3. RESULTADOS

La pieza obtenida mediante proceso de conformado incremental en dos puntos (TPIF) arroja una buena apariencia visual, se presentan algunas huellas de mecanizado como producto de un paso de 2 mm, el cual podría ser más pequeño y fino, en la Figura 5 se muestra la pieza obtenida al finalizar el proceso.

Un acabado más fino dependerá de un menor paso, se ha demostrado en diferentes trabajos realizados a la luz de ésta técnica que a menor paso el acabado es mucho más fino [3-4], pero los tiempos y ciclos de producción son más altos. Esto sucede ya que a medida que el paso es más pequeño, el  $\Delta Z$  (Incremento en el eje z) es menor, lo cual hace que la diferencia en el incremento, entre plano y plano entre curvas de nivel, sea mínima, obteniéndose una figura más detallada y pulida.

Siguiendo la secuencia de la Figura 6, se midieron los espesores de la pieza en diferentes zonas de la geometría de

la misma, estas zonas están delimitadas cada una por un ángulo de formabilidad que las define (ver Figura 5). Los resultados obtenidos de acuerdo a tres mediciones que se realizaron por cada zona (Ti) se presentan en la Tabla II. El espesor inicial de la pieza trabajada es de 1.2 mm.

Como se puede observar de la Tabla II, hay notables reducciones de espesor en las diferentes zonas, esto obedece al estrechamiento generado en la chapa, como producto de las presiones ejercidas por la herramienta y microdeformaciones plásticas. La reducción de espesor puede ser predicha mediante el comportamiento del mismo en función de los diferentes ángulos de formabilidad contenidos en la geometría de la pieza a través de la ley del seno. En este trabajo se somete a discusión los resultados obtenidos, los cuales podrán argumentar o refutar esta ley de acuerdo a los datos obtenidos reales y comparados con los ideales. En la Tabla III, se puede observar la relación obtenida entre la ley del seno y el espesor real obtenido en la pieza, las variaciones y porcentajes de reducción obtenidos.

De acuerdo a la Ecuación 1, se muestran los valores del espesor en función del ángulo de formabilidad para el proceso TPIF y la ley del seno. La deformación de chapa metálica es tal que se rige por la ley del seno, la cual establece que el espesor de la pared de la chapa, después de deformación, depende del ángulo de formación.

Las variaciones obtenidas son mínimas (entre -0,4% y 2,1%), lo cual fortalece la tesis de la aplicabilidad de la ley del seno en este proceso similar

al repujado de chapa, se presentan reducciones significativas de espesor y se detalla a continuación, a la luz de la literatura consultada [10]. Hay una reducción de espesor significativa en la zona 3, correspondiente al 27,22% cuando se presenta un ángulo de  $46,46^\circ$ , también se presenta una reducción mínima en la zona 1 y 2 correspondiente al 5,28% y 8,06%, respectivamente, a mayor ángulo de formabilidad la reducción de espesor es menor, por lo cual se recomienda trabajar con geometrías con ángulos no muy rectos ni tendientes a  $0^\circ$ , ya que puede producirse ruptura y/o agrietamiento del material por efecto de la presión de la herramienta y mayor área de contacto entre ésta y la pieza.

### 4. DISCUSIÓN

A modo de discusión, y con base a los resultados obtenidos en este trabajo con respecto al espesor, en función del ángulo de formabilidad, algunos autores confirman y enuncian la ley del seno para procesos de repujado de chapa [2], pero no muestran experimentación concreta para la técnica con una geometría en particular y bajo el método que se estudia en este trabajo. Otros autores estudiados, no han podido predecir y/o estimar el espesor final de la pieza con base a la aplicación de la ley del seno en sus componentes experimentados mediante la técnica, también algunos autores han afirmado y experimentado en sus trabajos que el espesor final de la pieza puede ser estimado usando la ley del seno, la cual sugiere que en piezas con paredes verticales, el espesor tendería a ser cero, para el proceso SPIF, y, para lograr estas geometrías, se requiere hacer varias pasadas [11]. En este trabajo se corrobora lo mismo, pero para la otra técnica derivada de este proceso, la técnica TPIF, con resultados muy interesantes y que podrían sugerir realizar geometrías con paredes verticales en una sola pasada o pocas pasadas. Lo anterior propone un principio de investigación frente a la argumentación de los resultados obtenidos en materia de aplicabilidad de la ley del seno, lograda en este trabajo, pero aun susceptible de discusión en el medio científico para esta innovadora técnica.

La ley del seno ha sido ampliamente abordada, enunciada, experimentada

Relación entre la ley del seno y el espesor obtenido en diferentes zonas mediante proceso Dieless DPIF						
	Ángulo de formabilidad $\phi$ , °	Tm	SEN $\phi$	T x SEN $\phi$ (Ti)	% Variación	%Reducción T
Zona 1 $\phi$ 1	72°	1,14	0,951	1,14	-0,4%	-5,28%
Zona 2 $\phi$ 2	64,7°	1,10	0,9	1,08	2,1%	-8,06%
Zona 3 $\phi$ 3	46,46°	0,87	0,725	0,87	0,4%	-27,22%
Espesor inicial de la lámina T (mm)		1,2				

Tabla II: Espesores obtenidos en diferentes zonas de la pieza

Espesor (mm) obtenido mediante proceso Dieless DPIF					
	Ángulo de formabilidad $\phi$ °	T1	T2	T3	Tm
Zona 1 $\phi$ 1	72°	1,15	1,14	1,12	1,14
Zona 2 $\phi$ 2	64,7°	1,14	1,09	1,08	1,10
Zona 3 $\phi$ 3	46,46°	0,89	0,88	0,85	0,87
Espesor inicial de la lámina T (mm)		1,2			

Tabla III: Relación entre el ángulo de formabilidad y espesor obtenido a través de la ley del seno

en procesos de repujado de chapa, pero, para la técnica en particular (conformado incremental de chapa en dos puntos), ha sido poco estudiada y los resultados obtenidos en este trabajo empiezan a marcar una pauta de investigación y punto de partida o referencia, para fortalecer la tesis de su aplicabilidad al proceso abordado en este trabajo.

## 5. CONCLUSIONES

El proceso de conformado incremental de chapa que obedece a la técnica de deformación por dos puntos de conformado es muy aplicable como técnica de conformado CNC, desarrolla geometrías cónicas con ciertos grados de inclinación o pendiente y la relación ángulo de formabilidad – espesor es obediente a la ley del seno, la conformabilidad mecánica obtenida de la pieza es aceptable. Merece un buen desarrollo e investigación que soporte los resultados obtenidos en este y muchos trabajos ya realizados y lo enmarque como un proceso altamente competitivo en prototipado de piezas complejas y lotes o corridas de baja producción, como excelente alternativa de bajo costo en utillaje, buena calidad superficial y dimensional.

También se puede concluir que para este proceso en particular (conformado incremental de chapa en dos puntos) la ley del seno aplica para la geometría experimental trabajada y que se puede predecir el comportamiento del espesor del material en función del ángulo de formabilidad, tal es el caso presentado que aborda este trabajo.

Al obtener reducciones significativas de espesores con ángulos y paredes verticales, según el análisis de la ley del seno, el proceso de conformado incremental requiere para la formación de estas geometrías, realizar varias pasadas, aún con la existencia de un molde completo de apoyo (Método TPIF, con dos puntos de contacto), pero con mejores propiedades de conformado y menor cantidad de pasadas, respecto al método SPIF, ya que existen dos puntos de contacto los cuales garantizan una mejor formabilidad de la pieza trabajada.

Merece un análisis particular la estrategia y trayectoria de herramienta, ya se han hecho investigaciones y trabajos sobre la forma de optimizar este

parámetro bajo la técnica TPIF [12] [13], esto junto con el análisis de otras variables influyentes para el proceso de deformación incremental, aportaría importantes resultados en materia de investigación y desarrollo del proceso de conformado incremental de chapa.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a todo el personal del laboratorio de máquinas y herramientas de la universidad EAFIT, así como el laboratorio de metrología, ya que los equipos de trabajo y medición fueron esenciales para los resultados de investigación obtenidos en este trabajo. También al grupo de investigación tecnologías para la producción, por el apoyo y soporte académico en la realización de este trabajo de investigación.

## PARA SABER MÁS

- [1] Matsubara S. "Incremental back-ward bulge forming of a sheet metal with a hemispherical tool". *Journal of the JSTP*. 1994. Vol. 35. p. 1311-1316.
- [2] Jeswiet J, Micari F, Hirt G et al. "Asymmetric single point incremental forming of sheet metal". *CIRP Annals—Manufacturing Technology*. Agosto de 2005. Vol. 54-2. p. 623-649. ISSN: 0007-8506
- [3] Páramo G, Benítez A. "Deformación incremental de lámina sin matriz (dieless) como alternativa viable a procesos de conformación de chapa convencionales". *Revista INGE CUC*. Junio de 2013. Vol. 9-1. p. 115-128. ISSN 0122-6517. E-ISSN 2382-4700
- [4] García - Alejandro. "Análisis y caracterización del método Single Point Incremental Forming en la tecnología de control numérico para un caso de estudio". Director: Gabriel Páramo. [Tesis de grado]. Universidad EAFIT Medellín, Escuela de Ingenierías, 2011.
- [5] Hussain G, Al Ghamdi, Khalatbari H et al. "Forming parameters and forming defects in incremental forming process: Part B". *Materials and manufacturing processes*. Abril de 2014. Vol. 29-4. p. 454-460. DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/10426914.2014.880457>
- [6] Behera A, Lauwers B, Duflou J et al. "Tool path generation framework for accurate manufacture of complex 3D sheet metal parts using single point incremental forming". *Computers*

*in industry*. Mayo de 2014. Vol. 65-4. p. 563-584. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compind.2014.01.002>

- [7] Tisza M. "General Overview of sheet incremental forming". *Journal of achievements in materials and manufacturing engineering*. Noviembre de 2012. Vol. 55-1. p. 113-120. ISSN: 1734-8412
- [8] Tisza M, Kovács P, Lukács Z. "Incremental forming: An innovative process for small batch production". *Materials science forum*. 2013. Vol. 729-1. p. 85-90. DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.729.85>
- [9] Silva M, Martins P. "Two-point incremental forming with partial die: Theory and experimentation". *Journal of materials engineering and performance*. Abril de 2013. Vol. 22-4. p. 1018-1027. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11665-012-0400-3>
- [10] Metals Handbook, Vol 14. Forming and forging, 9a. ed., ASM Int., 1988
- [11] Tanaka S, Hayakawa K, Nakamura T. "Incremental sheet forming with direction control of path planes". En: *10 th International Conference on technology of plasticity, (Aachen, Alemania 25-30 de septiembre de 2011)*, [S.l.], 2011. p. 503-507. ISBN: 978-351400784-0
- [12] Attanasio A, Ceretti E, Giardini C et al. "Asymmetric two points incremental forming: Improving surface quality and geometric accuracy by tool path optimization". *Journal of materials processing technology*. Febrero de 2008. Vol. 197-1-3. p. 59-67. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.05.053>
- [13] Fiorentino A, Ceretti E, Attanasio A et al. "Analysis of forces, accuracy and formability in positive die sheet incremental forming". *International Journal of material forming*. Agosto de 2009. Vol. 2-1. p. 805-808. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12289-009-0467-z>