

Deformación incremental de lámina sin matriz (dieless) como alternativa viable a procesos de conformación de lámina convencionales¹

Artículo de Investigación Científica - Fecha de recepción: 22 de marzo de 2013 - Fecha de aceptación: 6 de junio de 2013

Gabriel Páramo Bermúdez

Ingeniero Mecánico. Magíster en Educación y Desarrollo Comunitario. Universidad EAFIT. Medellín, Colombia. gparamo@eafit.edu.co

Adrián Benítez Lozano

Ingeniero de Producción. Magíster en Ingeniería. Universidad EAFIT. Medellín, Colombia. abenite2@eafit.edu.co

Para citar este artículo / to reference this article:

G. Páramo and A. Benítez, "Deformación incremental de lámina sin matriz (dieless) como alternativa viable a procesos de conformación de lámina convencionales," *INGE CUC*, vol. 9, no. 1, pp. 115-128, Jun, 2013.

RESUMEN

El proceso de deformación incremental sin matriz (dieless) es un proceso reciente (año 1994) con respecto a otras técnicas de procesos convencionales de deformación de lámina metálica tales como el repujado, estampado, embutido, entre otros, los cuales son costosos y suponen altos volúmenes y lotes de producción para su construcción y funcionamiento. El objetivo del presente trabajo es demostrar a través de pruebas experimentales la viabilidad de este proceso tecnológico y analizar los resultados obtenidos, con fines de aplicabilidad industrial. Se presenta a dieless como un proceso de manufactura alternativo, su principio de funcionamiento, parámetros del mismo, ventajas y desventajas, así como el estado del arte respecto a resultados de proyectos e investigaciones que se han hecho a la luz del mismo en láminas de aleaciones de aluminio, acero y aplicaciones industriales en específico, que se han desarrollado en el último par de años en la Universidad EAFIT, de Medellín.

Palabras clave

Deformación incremental de lámina, matriz de formación, control numérico computarizado (CNC), manufactura asistida por computador (CAM), diseño asistido por computador (CAD), conformado dieless.

¹ Artículo derivado del proyecto de investigación titulado: *Estudio del proceso de manufactura de deformación incremental por doble punto de apoyo - DPIF*. Universidad EAFIT, 2013.

Incremental sheet forming without die (dieless) as a feasible alternative to the conventional process of sheet forming

ABSTRACT

Incremental sheet forming process without die (dieless) is a recent process (1994) compared to the more conventional processes of forming sheet like embossing, metal spinning, and stamping, which suppose expensive tools and high production volumes and lots for its construction and operation. The goal of this paper is to show through experimental tests the feasibility of this technological process, and to analyze the results for industrial applicability. Hence, Dieless is presented as a manufacturing alternative process, and its functioning principles, parameters, advantages and disadvantages are also offered; as well as the state of the art regarding project and research results about this topic in aluminum and steel alloys, and its industrial applications recently developed at the EAFIT University, Medellín.

Keywords

Incremental sheet forming, forming die, Computer numerical control (CNC), computer-aided manufacturing (CAM), computer-aided design (CAD), Dieless forming.

INTRODUCCIÓN

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 [8] y la compañía manufacturera AMINO® [1], el cual, en nuestro entorno colombiano, ha sido discretamente desarrollado e investigado, gozando de grandes oportunidades de ser aplicado en casos específicos de la industria local. 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.

En los procesos de transformación de lámina metálica, la producción de piezas para bajos lotes de producción o prototipos, representa algunos de los mayores inconvenientes. En el caso de los procesos como el embutido o el estampado, se requiere una alta inversión para la fabricación de herramientas debido al costo inicial de los materiales, su transformación, adecuación para el proceso y la adquisición de la tecnología [6]; esto se configura como una de las principales ventajas del proceso dieless, como alternativa de los convencionales en deformación de lámina metálica.

El proceso de transformación de lámina inicia a partir del modelo CAD (Computer-aided design) tridimensional de la pieza donde se diseña el tipo de

geometría final o producto, y se lleva a un sistema de manufactura asistida por computador CAM (Computer aided manufacturing), en el cual se genera un camino para la herramienta (toolpath) y también se definen las estrategias del movimiento de la misma a fin de lograr un mejor conformado final de la lámina; la herramienta presionará la lámina, delineando toda su superficie hasta llegar a la geometría final, diseñada en la primera fase del proceso. En la Fig. 1(a-b) se puede ver el montaje general del proceso para las variantes y tipos de deformación incremental, SPIF² (Deformación incremental en un solo punto) y TPIF³ (Deformación incremental en dos puntos).

Las partes principales y fundamentales al proceso se componen de una lámina, la cual será la pieza final deformada; ésta debe ser maleable y dúctil, de tal forma que permita la conformación de la geometría final de la pieza. A la luz de los resultados actuales, en la Universidad EAFIT se ha trabajado con aleaciones de aluminio y acero en principio, pero este radio de materiales podría ser ampliado, si se profundiza y se ponen a punto las variables relacionadas con el proceso, siempre teniendo en cuenta los límites y alcances del mismo. Una herramienta de formación que cumple las veces de punzón, cuya función será presionar la lámina a medida que sigue un camino (toolpath) según la trayectoria generada en el código CNC (Computer numerical control), puede ser de geometría en su punta esférica o semiesférica,

-
- 2 **SPIF:** Hace referencia a la deformación incremental en un solo punto donde no existe molde ni matriz de conformado, hay un punto de contacto localizado entre la herramienta y la superficie exterior de la lámina.
 - 3 **TPIF:** Hace referencia a la deformación incremental en dos puntos ya que la lámina se deforma simultáneamente en dos puntos, uno localizado en la zona de contacto entre la herramienta y la lámina, y otro, entre la zona interior de la lámina y el molde positivo de formación.

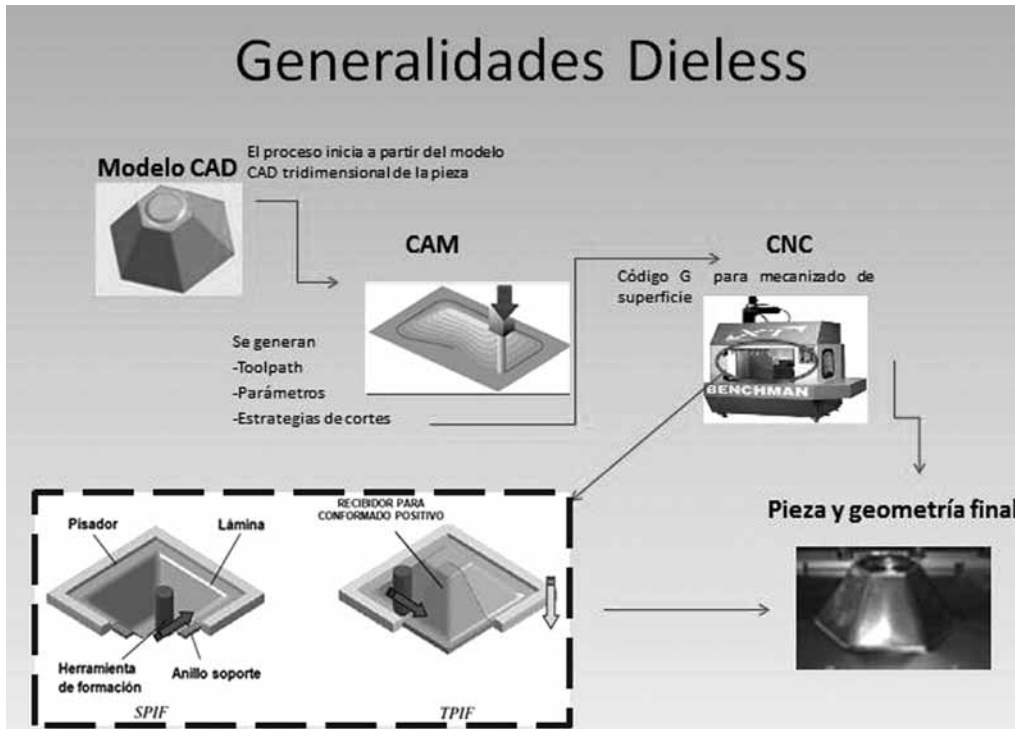


Fig. 1a. Esquema de las fases de deformación incremental de lámina mediante dieless

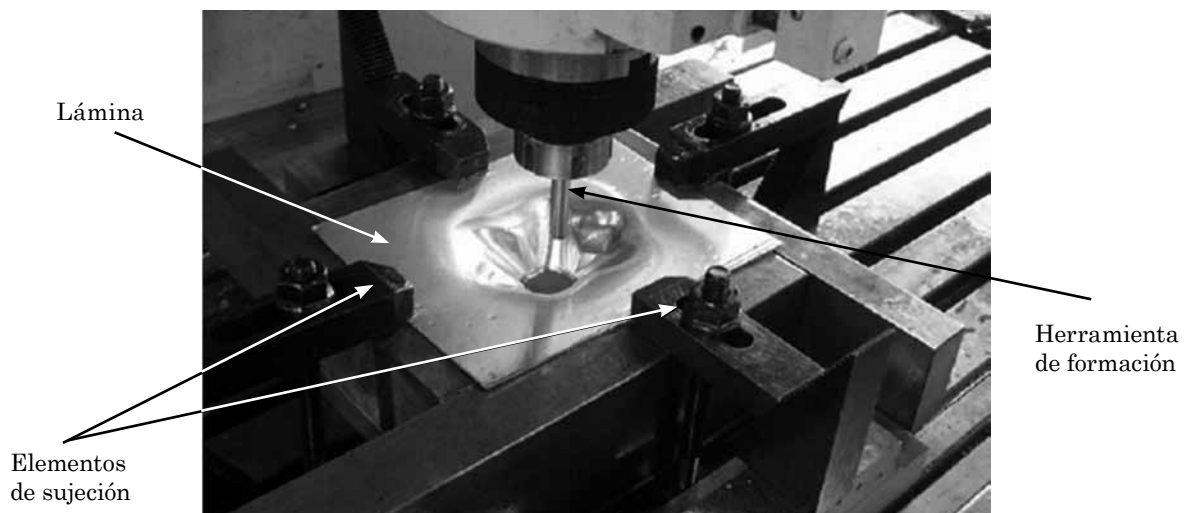


Fig. 1b. Deformación incremental de lámina SPIF [6]

como se muestra en la Fig. 2, según la literatura consultada [4], [7] y pruebas experimentales realizadas con láminas de aluminio y acero [2]. Se ha trabajado con herramientas de material como el

acero templado, carburo cementado, y se recomienda realizar un tratamiento térmico que le dé una mayor dureza, por las condiciones de fricción a las cuales está sometida en el proceso [6].

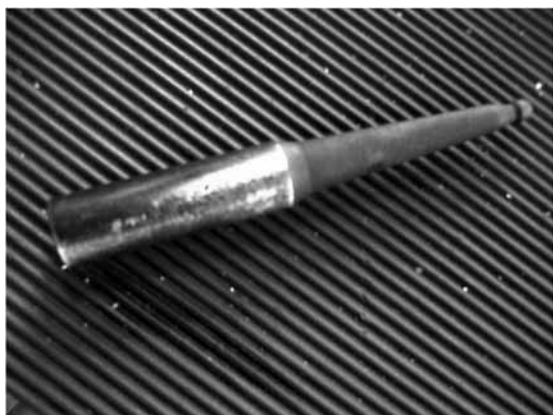


Fig. 2. Tipo de herramienta para Dieless para pruebas experimentales EAFIT [5]

Se debe escoger un sistema o placa de sujeción que permita la deformación de la lámina y a su vez sujete completamente la misma durante todo el proceso de deformado. Según el método dieless (SPIF-TPIF) el sistema podría o no tener un molde para mejorar el conformado y la calidad dimensional del producto final.

Con el presente artículo se pretende demostrar, a través de pruebas experimentales, la viabilidad de este proceso tecnológico y analizar los resultados obtenidos, con fines de una cercana aplicabilidad industrial, presentando resultados relevantes en materia de investigación que se han alcanzado en los últimos años luego de varias pruebas y ensayos que se han realizado en el taller de máquinas y herramientas de la Universidad EAFIT, los cuales permiten profundizar e interiorizar en sus variables y la estructura del sistema, dejando la puerta abierta a nuevas estrategias y formas de conformabilidad de lámina metálica en la industria colombiana.

ESTADO DEL ARTE

Se ha trabajado a lo largo de los últimos de años en el proceso de deformación incremental en un solo punto (dieless-SPIF) obteniendo diversas formas y geometrías [2], [3], [5], [6], meritorias de análisis en particular para cada una de ellas, ya que estas responden a condiciones de proceso y parámetros particulares para lograr la geometría del producto final. En principio se parte de la identificación de una matriz comparativa frente a otros procesos de conformación de lámina metálica como el repujado, embutido, estampado y superformado, como se muestra en la Tabla 1, en la cual se establece una analogía entre dichos procesos, se da cuenta de algunas características comunes entre los mismos tales como costos, calidad, producción, velocidades, aplicaciones típicas y presenta a dieless como alternativa aplicable para el trabajo de conformado de lámina metálica.

En la Tabla 1, como se mencionó, se muestra una matriz de comparación respecto a las generalidades de los procesos de formación de lámina metálica comunes y el proceso dieless (SPIF-TPIF).

El utillaje⁴ requerido por el proceso dieless no es costoso, ya que solo se requiere un dispositivo, que en comparación con el montaje en otros procesos no es de mayor costo; el mecanizado, tratamiento de la herramienta y el molde, que puede ser en madera o un material sintético, no requiere de grandes inversiones en herramientas y representa una baja complejidad del sistema.

4 Utillaje es un conjunto de instrumentos y herramientas que optimizan la realización de las operaciones de proceso de fabricación, mediante el posicionamiento y sujeción de una pieza o conjunto de piezas a un sistema de referencia, para poder ejecutar operaciones de diversa índole.

TABLA 1. MATRIZ COMPARATIVA DE PROCESOS DE DEFORMACIÓN DE LÁMINA

	Embutido	Super-formado	Estampado	Repujado	Dieless Forming
Costos	- Alto valor en utillaje/Dieset - Alto valor en máquina en producción (Prensa).	- Bajo valor en utillaje - Alto valor de máquina en producción (Prensa + unidad de calentamiento).	- Alto valor en utillaje. - Alto valor de máquina en producción (Prensa + sistemas de actuación)	- Bajo valor en utillaje. - Bajo valor de máquina en producción (Formador + torno)	- Bajo valor en utillaje. - Alto valor de máquina en producción (Prensas + herramienta de copiado)
Calidad	- Buena calidad superficial. - Espesores constantes.	- Calidad superficial buena. - Espesores controlados.	- Alta calidad superficial. - Espesores controlados.	- Alta calidad superficial. - Espesores controlados. - Alto factor dimensional.	- Moderada calidad superficial. - Espesores variables. - Bajo factor dimensional.
Producción	- Altos volúmenes o lotes de producción. - Producto único.	- Medio-alto en volúmenes o lotes de producción.	- Altos volúmenes o lotes de producción.	- Altos volúmenes de producción. - Modelos funcionales. - Formas con perfil de revolución.	- Bajos volúmenes o lotes de producción. - Prototipos a escala. - Modelos funcionales.
Velocidad	- Ciclos de proceso alto desde segundos hasta minutos, dependiendo del número de operaciones para embutido.	- Ciclos de proceso moderados, dependiendo del número de operaciones.	- Rápidos ciclos de proceso.	- Rápidos ciclos de proceso. - Operaciones de post-proceso para terminación de la parte.	- Rápidos ciclos de proceso.
Aplicaciones	- Empaque de alimentos y bebidas. - Mobiliario e iluminación. - Aeroespacial, transporte férreo y automotriz. - Electrodomésticos.	- Aeroespacial. - Mobiliario. - Transporte férreo y automotriz. - Arte arquitectónico.	- Transporte férreo y automotriz. - Mobiliario en general. - Productos de consumo masivo. - Sector marítimo.	- Transporte férreo y automotriz. - Joyería. - Mobiliario en general. - Productos de consumo masivo. - Utensilios domésticos.	- Transporte férreo y automotriz. - Productos de consumo masivo. - Utensilios decorativos. - Sector biomédico.

Los procesos como estampado y embutido requieren de la construcción de matrices para su proceso, las cuales tienen un costo alto, herramientas complejas y un sistema montado que justifique altos volúmenes de producción para satisfacer una economía de escala y justificar la inversión en los mismos. Para bajos lotes de producción, se limitan las fabricaciones

de matrices para estos procesos, lo que se constituye como ventaja principal para el proceso dieless al no requerir de matrices y herramientas complejas, lo cual facilita la puesta en marcha en la manufactura de estos pequeños lotes de producción.

Se muestra en la Fig. 3 el dispositivo y su montaje.

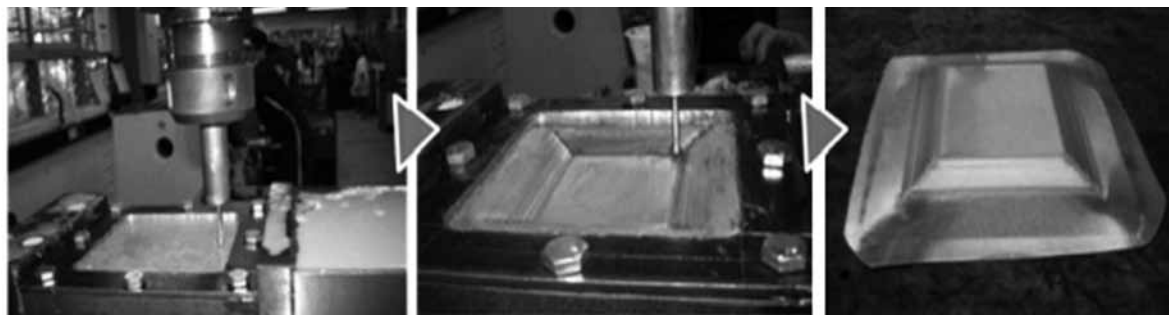


Fig. 3. Montaje preliminar dieless - SPIF laboratorio de máquinas y herramientas EAFIT [3]

En principio se han obtenido piezas resultado de pruebas experimentales en centros de mecanizado-fresadoras con tecnología CNC, como fue el caso particular donde se escogió como punto de partida la fresadora vertical de 3 ejes, disponible en los laboratorios de la Universidad EAFIT.

Variables y parámetros identificados en las pruebas para proceso dieless

Las variables y parámetros identificados en el proceso se pueden resumir en las siguientes:

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 aluminio; para el caso particular de las pruebas realizadas, se ha establecido como punto de partida para pruebas experimentales valores promedio de 3.000 RPM para ambos materiales (aluminio y acero), puesto que se recomienda trabajar con valores no mayores a 4.000 RPM [5].

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.

Profundidad de corte (Step Over):

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, atendiendo a la maleabilidad del material y a valores obtenidos luego de varios ensayos y “puesta a punto” del montaje del proceso. Se observa mayor calidad superficial y conformado en valores menores (tendientes a cero) (Fig. 4).

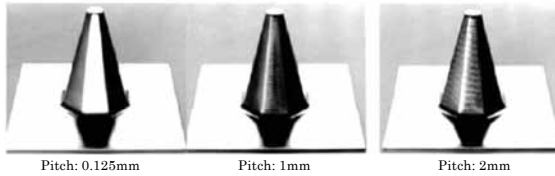


Fig. 4. Calidad superficial en función de la profundidad [5]

Recorrido de herramienta (Toolpath): 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.

Diámetro de herramienta: Se recomienda que el diámetro de la herramienta sea hasta 10 veces mayor que el espesor de la lámina metálica [5]; pero dependiendo de la geometría de la pieza y de los ángulos que tiene la misma, se puede trabajar con diámetros de herramientas menores. Para el caso de estudio de investigación se trabajó con diámetros de entre 5 y 10 mm, para el acero y aluminio, respectivamente.

Ángulo de formabilidad (Φ): Es una característica muy importante en el proceso; el ángulo de formación estará determinado por la geometría de la pieza (Fig. 5), el mayor ángulo de diseño de la parte ϕ_d , debe ser menor que el parámetro del material definido por el ϕ_{max} . [6], se ha trabajado con ángulos no mayores a los 70° , ya que según experiencia [3], [5] en procesos de defor-

mación dieless-SPIF se han presentado rupturas de material en ángulos de formabilidad cercanos a los 90° , por ello la formación de ángulos semi-rectos está limitada por las estrategias de manufactura a varias etapas de formación.

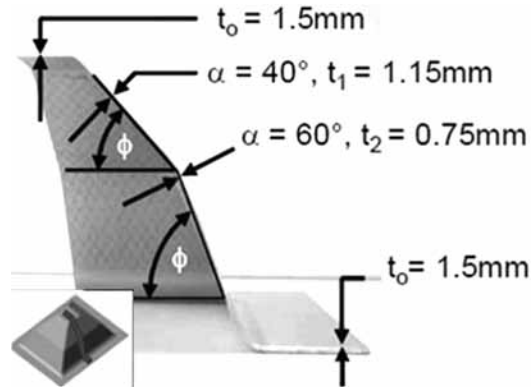


Fig. 5. Caracterización del ángulo de formabilidad [6]

METODOLOGÍA

La fase inicial parte del análisis del proceso dieless-SPIF, donde se establecen diferentes valores para los parámetros del mismo, para lo cual se parte de distintas combinaciones en los parámetros como el avance y profundidad en tres grados de operación, obedeciendo a previas recomendaciones de la literatura [4], [7] y proyectos de grado aplicados al proceso dieless-SPIF [2], [3], [5], dando cuenta de parámetros trabajados en aluminio y acero como punto de referencia y partida para las pruebas experimentales.

En segunda instancia, se establece y define el diseño de montaje y arquitectura del proceso dieless-SPIF, para lo cual fue necesaria la selección de una máquina con tecnología CNC, y la adecuación de un dispositivo a la misma que permitiese sujetar el material a medida que este se deforma por la acción de la herramienta.

Se evalúa un caso en particular para la industria, como lo es el caso de una pieza automotriz, para someterla a conformado dieless-SPIF y desarrollar pruebas experimentales con el fin de medir las deformaciones del material obtenido en forma incremental, los porcentajes en variación de sus espesores, según los valores escogidos y trabajados, para el caso de láminas de aluminio AA8112-H14 y acero 1020 con espesores de 1 mm y 0,5 mm, respectivamente.

Con la pieza obtenida en el proceso dieless, la cual es una pieza comercial del sector automotriz, se procede a la realización de mediciones de las deformaciones obtenidas en las piezas trabajadas por medio de la metrología óptica, para lo cual se utilizó el equipo y software Gom-Argus®, a fin de analizar el proceso y establecer un punto de partida para futuras investigaciones.

RESULTADOS

Se desarrollaron numerosas pruebas experimentales con la pieza seleccionada, se identificaron en principio posibles valores para los parámetros del proceso dieless-SPIF anteriormente explicados, y se escogieron los puntos críticos de éstos, para ser sometidos a análisis con los valores obtenidos en deformaciones y variaciones de espesores.

Para el trabajo con láminas de aluminio se desarrollaron nueve pruebas (correspondientes al diseño de experimentos para 2 variables con 3 grados de operación).

En la Tabla 2 se muestran las combinaciones posibles trabajadas para el aluminio.

TABLA 2. COMBINACIONES DE EXPERIMENTOS PARA EL ALUMINIO AA8112-H14 [5]

Aluminio		
Nom-bre	Avance (mm/min)	Profundidad (mm)
AL 1	2.000	0,5
AL 2	2.000	0,75
AL 3	2.000	1
AL 4	3.500	0,5
AL 5	3.500	0,75
AL 6	3.500	1
AL 7	5.000	0,5
AL 8	5.000	0,75
AL 9	5.000	1

Igualmente, para el trabajo con el acero 1020, se muestran las combinaciones trabajadas en la Tabla 3.

TABLA 3. COMBINACIONES DE EXPERIMENTOS PARA EL ACERO 1020 [5]

Acero		
Nom-bre	Avance (mm/min)	Profundidad (mm)
AL 1	2.000	0,2
AL 2	2.000	0,4
AL 3	2.000	0,6
AL 4	3.500	0,2
AL 5	3.500	0,4
AL 6	3.500	0,6
AL 7	5.000	0,2
AL 8	5.000	0,4
AL 9	5.000	0,6

Resultados obtenidos de piezas industriales

La pieza desarrollada corresponde a un insumo de la industria automotriz, el cual fue trabajado por el método dieless-SPIF.

A continuación, en la Fig. 6, se muestran las etapas del mecanizado y la pieza final obtenida.

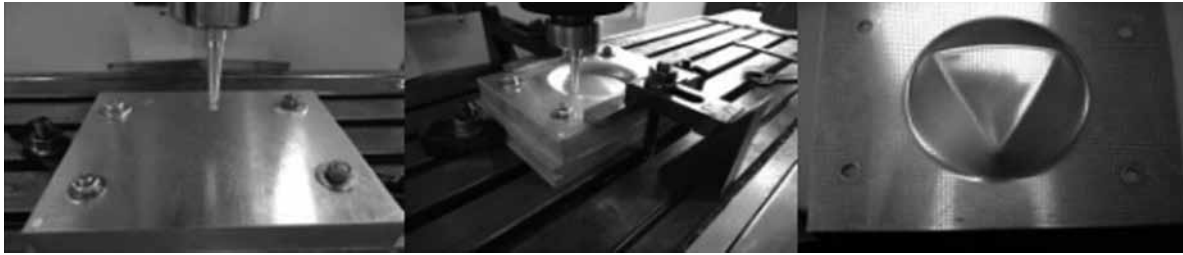


Fig. 6. Proceso y pieza final obtenida [5]

Se observa visiblemente un buen resultado en términos de conformado final y apariencia visual, pero es necesario inspeccionar la pieza por medio de metrología óptica, a fin de analizar las deformaciones obtenidas y confrontar los resultados obtenidos con la calidad final de la pieza.

La pieza obtenida fue previamente marcada en su superficie por medio de un mallado por puntos o círculos, con una distancia entre puntos de 2 mm y el método de grabado electroquímico.

Metrología óptica del producto

Para la realización de la metrología óptica se seleccionaron las piezas que se consideraban más críticas en el proceso; es decir, las piezas que se encontraban en los valores límites de los parámetros trabajados. Los valores límites fueron

clasificados en límites superior e inferior, y considerados como valores críticos por analizar en el proceso. En cada tabla se muestran estos valores y su clasificación, de acuerdo con su límite.

En la Fig. 7 se muestra un análisis dimensional de los puntos en la pieza final, los cuales dan cuenta de las deformaciones mayores y menores de la pieza, así como la variación de espesores en los diferentes puntos de la misma.

Las deformaciones mostraron lo siguiente: en las láminas trabajadas con los límites inferiores de los parámetros, se obtuvo un porcentaje menor en la reducción de los espesores en las zonas críticas de la pieza, mientras que las láminas trabajadas con los límites superiores presentaron un porcentaje mayor (los máximos cambios en espesores fueron de 54,9% vs. 65,2% para los valores de

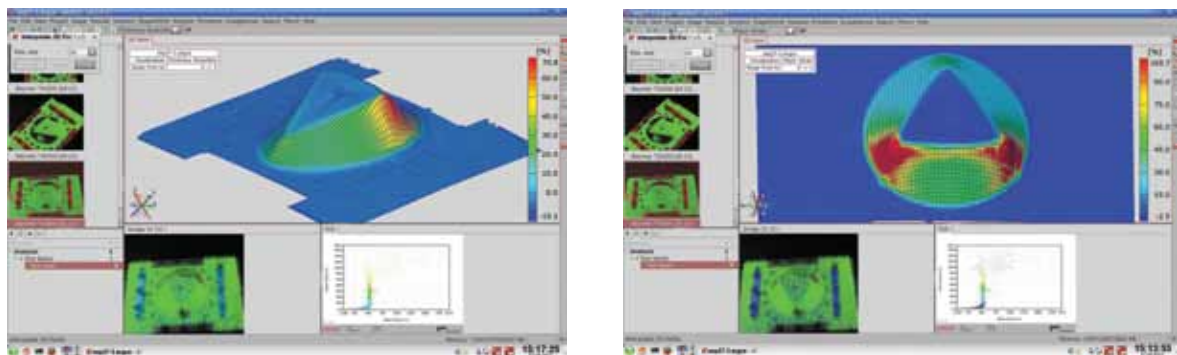


Fig. 7. Deformaciones obtenidas Gom-Argus® [5]

TABLA 4. DEFORMACIONES Y CAMBIOS DE ESPESOR OBTENIDOS PARA PIEZAS DE ALUMINIO [5]

Parámetros en valor límite (Inferior-Superior)	Prof. 0,5 mm Vel. Av.: 2.000 mm/min		Prof. 1 mm Vel. Av.: 5.000 mm/min	
	Eje mayor	Eje menor	Eje mayor	Eje menor
Deformación mayor %	113,8	19,5	150,2	42,25
Deformación menor %	-3,7	-30,1	-3,3	-21,85
Max. cambio en el espesor %	54,9		65,2	
Min. cambio en el espesor %	-43,2		-28,1	

TABLA 5. DEFORMACIONES Y CAMBIOS DE ESPESOR OBTENIDOS PARA PIEZAS DE ACERO [5]

Parámetros en valor límite (Inferior-Superior)	Diámetro hta: 5 mm Prof. 0,2 mm		Diámetro hta: 10 mm Prof. 0,6 mm	
	Eje mayor	Eje menor	Eje mayor	Eje menor
Deformación mayor %	105,7	42,74	129,8	14,1
Deformación menor %	-2,5	-13,18	-7	-21,3
Max. cambio en el espesor %	51,17		63,7	
Min. cambio en el espesor %	-15,15		-29,5	

los parámetros en sus límites inferiores y superiores, presentados en la Tabla 4, tal como debía esperarse, ya que al someterse el proceso a valores altos de avances, profundidades y velocidades angulares las deformaciones observadas son mucho mayores que las presentadas con valores en el límite inferior.

Tal como se había descrito anteriormente, los valores para las deformaciones mayores (150,2% con valores límite superior frente a 113,8% límite inferior), presentados en la Tabla 4, reflejan mayores valores en los resultados de esfuerzos producidos cuando la lámina se somete a condiciones de valores mayores para las variables estudiadas en nuestro caso, lo que representa un mayor desgaste del material y una mayor variación del espesor cuando existen las condiciones de los parámetros en el límite superior.

Igualmente, para el acero, se observó similitud en el patrón de resultados de deformación y variación en los resultados obtenidos, como se explica a continuación.

Tal como sucedió en el material de aluminio, el patrón de comportamiento de las deformaciones y variación en los espesores fue similar, ya que se presentan mayores valores en los límites superiores de los parámetros escogidos (129,8%, con valores correspondientes a los parámetros en su límite superior, y 105,7% para el límite inferior) (Tabla 5); igualmente lo anterior para las variaciones presentadas en los espesores (63,7% vs. 51,17% para los máximos cambios en espesor en ambos límites y -29,5% vs. -15,15% para los mínimos cambios en espesor en ambos límites) (Tabla 5), para los límites inferior y superior.

Esto indica que el valor de los parámetros trabajados en las pruebas (diámetro, profundidad, velocidad de avance) influye proporcionalmente en las deformaciones y los cambios de espesor sufridos por la lámina; a valores mayores, en límite superior, mayores deformaciones obtenidas y mayores variaciones en el cambio de espesor. Esto puede deberse a diversas razones, pero la de mayor argumento es que las condiciones de trabajo de la herramienta y los esfuerzos producidos entre la misma y la lámina de trabajo, incrementan al responder al aumento de los valores de los parámetros; por ello los resultados reflejados en las tablas anteriores.

Tanto para el aluminio como para el acero, el proceso de conformado se llevó exitosamente a cabo; no se presentaron fracturas ni rupturas que dañaran la pieza (para los valores seleccionados) y afectaran su funcionalidad final, pero se someten a continua investigación y análisis los resultados obtenidos en la metrología óptica de la pieza, donde los límites superiores de los parámetros seleccionados deformaron y variaron el espesor de la pieza final en mayor grado, para ambos casos de estudio, tal como se puede inferir del proceso ya que, a mayores valores, mayores condiciones y esfuerzos en la herramienta, que se transfieren, en últimas, a la calidad final dimensional de la pieza.

A través de las tablas y resultados obtenidos, analizados y estudiados anteriormente, claramente se cumple con el objetivo planteado, el cual es demostrar la viabilidad y aplicabilidad de este innovador proceso tecnológico, en términos de formabilidad del material, las deformaciones sufridas, cambios de espesor,

lo cual induce a una constante investigación.

A partir de los datos obtenidos se establece como punto de partida el continuo análisis de conformado de lámina metálica, según calidad dimensional y funcional obtenida de la pieza final y los mejores valores para los parámetros que garanticen dichas calidades. El trabajo continuo y las pruebas experimentales en láminas de aluminio y acero son punto de partida para futuras investigaciones y aplicaciones en el entorno metal-mecánico colombiano, acorde a nuevas tecnologías de producción y manufactura de clase mundial.

CONCLUSIONES

Para encontrar los parámetros adecuados para el desarrollo de la etapa de experimentación, fue necesario realizar una serie de ensayos previos donde se encontraron las constantes del proceso como: RPM (para aluminio y acero), y el avance (en el caso del acero). Debido a que durante esta etapa de ensayo se produjeron algunas fallas en las piezas en las que se trabajó con una velocidad de avance muy baja y unas RPM muy altas, es necesario, después de determinadas pruebas, la realización de un diseño de experimentos para los parámetros de avance y profundidad en tres diferentes grados de operación, que en principio arrojó como resultado valores aplicables para las condiciones de trabajo del proceso dieless en láminas de aluminio y acero. Se establece un punto de partida, y se obtuvieron piezas funcionales aceptables, pero sometidas a criterio de evaluación en su calidad dimensional, tal como se presentaron en los resultados.

Es necesario analizar previamente todo el proceso y la realización de la prueba, el diseño y geometría de la pieza final, ya que dependiendo de estos factores se tendrá en cuenta los puntos críticos del diseño donde se evaluarán las mayores concentraciones de esfuerzos y deformaciones de la pieza al momento de realizar el producto.

Se ha observado en la gran mayoría de las pruebas experimentales realizadas tanto en láminas de aluminio como de acero que la herramienta no debe entrar con ángulos mayores a 70 grados para trabajar en la superficie de la pieza, ya que con ángulos de entrada muy rectos se presenta fractura y corte del material, y si las geometrías son semi-rectas el proceso estará condicionado a varias etapas de formación [6]. Lo anterior también estará muy relacionado con el ángulo de formabilidad del material, el cual ha sido considerado por algunos autores que han trabajado el método dieless por un solo punto (APIF) [6] como el parámetro más importante en la etapa de diseño y posterior manufactura. Para ello, se debe tener en cuenta que el mayor ángulo en el diseño de la parte debe ser menor que el ángulo de formabilidad, el cual es una característica definida para cada material.

El proceso de deformación incremental dieless es un proceso alternativo y aplicable a geometrías complejas, y cuando en una industria se presentan demandas cortas o bajos lotes de producción donde un proceso manufacturero análogo, como lo es el embutido o el estampado, requiere de altos costos en la fabricación del herramental, prensas y matrices, lo cual no justificaría esas inversiones. Entonces, el proceso dieless forming se presenta como una efectiva

y viable alternativa para la realización de dichos lotes de producción, y también puede ser otra técnica análoga al prototipado rápido, con la ventaja de que el modelo o producto obtenido responde a un prototipo funcional.

REFERENCIAS

- [1] H. Amino, Y. Lu, S. Ozawa, K. Fukuda, and T. Maki, "Dieless NC forming of automotive service panels". *Advd Technol. of Plasticity*, (2002), Vol. 2. pp. 1015-1020.
- [2] M. Arbeláez, D. Posada and G. Páramo, *Dispositivo mecánico para la técnica dieless en la manufactura de piezas embutidas*. [Proyecto de grado] Medellín: Universidad EAFIT, Departamento Ingeniería Mecánica, (2009), 79 p.
- [3] S. Arbeláez, C. Arenas and G. Páramo, *Aplicación de la técnica ieless Forming (sin dado) en la manufactura de piezas embutidas*. [Proyecto de grado] Medellín: Universidad EAFIT. Departamento de Ingeniería de Producción; Grupo de Investigación Tecnologías para la Producción, (2010), 104 p.
- [4] M. Bambach, M. Cannamela, M. Azaouzi, G. Hirt and J. Batoz, "Computer-aided toolpath optimization for single point incremental sheet forming". *Advanced methods in material forming* (2007). pp. 233-250. ISBN 978-3-540-69844-9.
- [5] S. Botero, A. Espinoza and G. Páramo, *Estudio del comportamiento de lámina metálica en el proceso incremental Dieless Forming en dos puntos de apoyo (herramienta y molde)*. [Proyecto de grado] Medellín: Universidad EAFIT. Departamento Ingeniería de Produc-

- ción; Grupo de Investigación Tecnologías para la Producción, (2011), 106 p.
- [6] A. García and G. Páramo, *Análisis del comportamiento y caracterización del Single Point Incremental Forming utilizando tecnología de control numérico para un caso de estudio en un componente del mobiliario de exteriores*. [Tesis de Maestría] Medellín: Universidad EAFIT. Departamento Ingeniería Mecánica; Grupo de Investigación en Ingeniería de Diseño, (2011), 121 p.
- [7] J. Jeswiet, E. Hagan and A. Szekeres, “Forming parameters for incremental forming of sheet metal”, *CIRP Annals. Manufacturing technology*, Volume 54, Issue 2, (2005). pp. 1367-1371.
- [8] S. Matsubara, “Incremental back-ward bulge forming of a sheet metal with a hemispherical tool”. *J. JSTP*, (1994), Vol. 35. pp. 1311-1316.