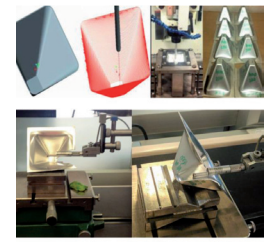


Análisis estadístico de los principales parámetros del proceso de deformación incremental–SPIF que contribuyen al cambio de la rugosidad en una geometría experimental



Statistical analysis of the main incremental forming–SPIF process parameters that contribute to the change the roughness in an experimental geometry

Gabriel-Jaime Paramo-Bermúdez, Frank-Alexander Bustamante-Correa y Adrián-José Benítez-Lozano

Universidad EAFIT. Dpto. Ingeniería de producción. Grupo de investigación Tecnologías para la Producción. Carrera 49 # 7 Sur, 50 – Medellín (Colombia).
Tfno.: +574 261 95 00. gparamo@eafit.edu.co

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/7959> | Recibido: 05/02/2016 • Aceptado: 12/07/2016

ABSTRACT

- Over time the process of incremental deformation of sheet metal without matrix in its variant (SPIF), has been developed in different countries with the aim of meeting the needs of flexible production with no investment in tooling and low production costs. As in any manufacturing process is important to obtain a surface quality of the part that meets customer needs, this variable is evaluated by the average roughness (Ra). For this reason the purpose of this study is to investigate the influence of the variation of three process parameters and determine which of them contributes in greater proportion to the change in the average roughness (Ra) measured parallel and perpendicular to the path followed by the tool. Besides this, it wants to validate the impact that has the spindle speed in the analyzed variable and the orange peel defect. To this end, a full multifactorial design of experiments with three factors and two levels () and three replicates were performed, in order to obtain greater reliability in the model. Subsequently, an analysis of variance is executed and the results are formalized, finding which parameters influence more than others in changing roughness and how the orange peel defect depends on the spindle speed. Additionally, the results are compared with the authors cited. The aspects developed in this study highlight the importance of improving quality variables in any field of sheet metal processing in the international industrial environment.
- Keywords:** Incremental forming, SPIF, Roughness, Statistical analysis, Design of experiments, CAD, CAM; Parameters, Spindle speed, feed rate, depth increase.

RESUMEN

A través de los tiempos el proceso de deformación incremental de lámina metálica (SPIF), ha sido desarrollado en diferentes países con la intención de atender las necesidades de producción flexible, con nula inversión en herramientas y bajos costos de producción. Al igual que en todo proceso de manufactura es importante el poder obtener una calidad superficial de la pieza que satisfaga las necesidades del cliente, esta variable es valorada mediante la rugosidad media (Ra). Por tal razón el propósito de este estudio es investigar la influencia que tiene la variación de tres parámetros del proceso, así como establecer cuál de ellos contribuye en mayor proporción al cambio en la rugosidad media (Ra) medida en dirección paralela y perpendicular a la trayectoria seguida por la herramienta. Además de esto, se quiere validar la incidencia que tiene la

velocidad de husillo en la variable analizada y en el defecto de piel de naranja. Para tal fin se realiza un diseño de experimentos multifactorial completo con tres factores y dos niveles () y tres réplicas, en aras de obtener mayor confiabilidad en el modelo. Posteriormente, se ejecuta un análisis de varianza y se formalizan los resultados, encontrándose cuales parámetros influyen más que otros en el cambio de rugosidad y como el defecto de piel de naranja si depende de la velocidad de husillo. Adicionalmente, se comparan los resultados con los autores citados. Los aspectos desarrollados en el presente trabajo destacan la gran importancia de mejorar las variables de calidad en cualquier campo de transformación de lámina metálica en el entorno industrial internacional.

Palabras clave: Deformación incremental, SPIF, Rugosidad, Análisis estadístico, Diseño de experimentos, CAD, CAM; Parámetros, Velocidad de husillo, velocidad de avance, incremento en profundidad.

1. INTRODUCCIÓN

Con el fin de alcanzar ahorros significativos en tiempo, dinero, herramientas y materiales a través de los años, se ha justificado el afán que tiene la industria de hacer sus procesos manufactureros cada vez más eficientes y flexibles. Es por esto que en la actualidad el proceso de deformación incremental de lámina metálica se presenta como una alternativa práctica y confiable para la fabricación de prototipos y bajos lotes de producción con múltiples ventajas respecto a los procesos convencionales. [1-3], además de esto, al ser un proceso controlado numéricamente se puede deformar láminas de diferentes materiales en distintas formas complejas [4]. Una de las variantes propuestas de este proceso es la deformación incremental con un solo punto de contacto, tomado del termino en inglés (SPIF) [5-6] que consiste, en la deformación progresiva de la lámina metálica por medio de una herramienta de punta esférica, la cual sigue una trayectoria previamente definida, y finaliza con la obtención de la geometría deseada. Este proceso es mostrado en la Fig. (1).

Estudios acerca del proceso y la influencia de sus parámetros en distintas variables de salida o de control, tales como: calidad superficial, fuerzas de formación, formabilidad, precisión geométrica, entre otras, han sido realizados por distintos autores a través del tiempo. Ham y Jeswiet [7-8] presentaron investigaciones formalizadas por medio del diseño factorial de experimentos para identificar los efectos en la formabilidad de varias aleaciones de aluminios que tienen los parámetros avance, velocidad de husillo,

Proceso SPIF

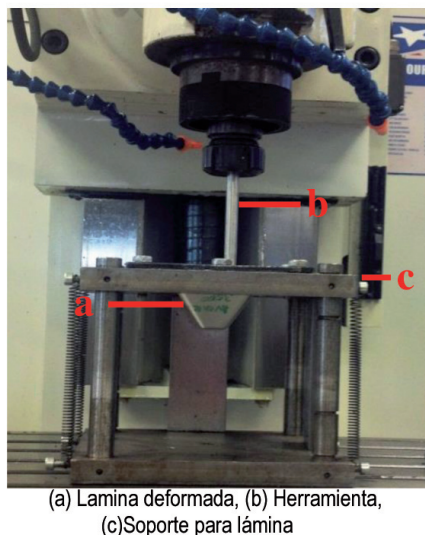


Fig. 1: Representación gráfica del proceso SPIF

incremento en profundidad y ángulo de inclinación de pared, concluyeron que a mayores velocidades del husillo, la formalidad de la chapa mejora y que el incremento en profundidad presenta un pequeño efecto en el máximo ángulo obtenido. Duflou et al. [9] investigaron la influencia en la fuerza de formabilidad que tienen los parámetros diámetro de herramienta, incremento en profundidad, espesor de la lámina y ángulo de inclinación de pared y exponen que se tiene un aumento de la fuerza con el incremento de todos estos parámetros. También, Arfa et al. [10] presentaron una modelación por medio de elementos finitos para hallar la influencia de los parámetros anteriores y el de la resistencia del material en dichas fuerzas. Bahloul et al. [11] ejecutaron un diseño de experimentos junto con un análisis de elementos finitos para determinar la influencia que tienen los parámetros: diámetro de la herramienta, espesor del material, incremento en profundidad y ángulo de inclinación de pared en los cambios de espesor y la fuerza ejercida en la herramienta. Así mismo, Bagudanch et al. [12] analizaron por medio un diseño de experimentos la importancia que tienen el incremento en profundidad, la velocidad de husillo, la velocidad de avance, el diámetro de la herramienta y el espesor de la chapa, en la fuerza de formabilidad, en la mayor profundidad alcanzada y calidad superficial en láminas de policloruro de vinilo (PVC). Adicionalmente, Radu et al. [13] evalúan la eficiencia de dos métodos de optimización con el fin de mejorar la precisión dimensional estableciendo una apropiada combinación de parámetros. Por último, otros autores [14-16] han enfocado sus investigaciones, en hallar los mayores ángulos de formabilidad y Centeno et al. [17] concluyen que la formabilidad en SPIF incrementa cuando el diámetro de la herramienta se reduce.

Varios parámetros antes mencionados contribuyen a la obtención de diversos valores de calidad superficial, los cuales son medidos en micrones (μm) por medio de la caracterización de la rugosidad media R_a . Está definida como el conjunto de irregularidades que posee una superficie durante el proceso de fabricación. [18] Al ser esta una variable de control clave en el proceso, varios autores han enfocado sus esfuerzos particularmente en cómo obtener un mejor acabado superficial con parámetros específicos. Estudios realizados por Ham et al [19] muestran que la rugosidad interna es afectada por el radio de la herramienta y el incremento en profundidad. Hagan and Jeswiet [20] analizaron los parámetros de velocidad de husillo e incremento en profundidad y concluye

que el acabado superficial se puede ver como ondulaciones a gran escala creadas por las trayectorias de la herramienta, las cuales desaparecen con la disminución del incremento en profundidad. Echrif y Hrairi [21] además de examinar los dos parámetros anteriores, analizaron velocidad de avance y diámetro de la herramienta obteniendo que la velocidad de avance y la velocidad de husillo no son significativos en el cambio de la rugosidad. Liu et al [22] consideraron los parámetros: velocidad de avance, incremento en profundidad, diámetro de la herramienta y espesor de la lámina, propusieron un modelo de optimización y concluyen que el espesor de la lámina es el parámetro que más influye en la rugosidad, seguido del incremento en profundidad. Durante et al. [23] consideraron el incremento en profundidad, el diámetro de la herramienta y el ángulo de inclinación de pared, evaluaron la rugosidad, realizaron un modelo predictivo y los resultados fueron comparados experimentalmente, obteniendo así un error por debajo del 10%. Powers et al. [24] escogieron velocidad de avance y dirección de deformación y mostraron que la rugosidad es mayor en las marcas dejadas por la herramienta de forma perpendicular a la orientación de la deformación. Lasunon et al. [25] evaluaron los efectos de los tres parámetros por medio de un diseño factorial y mostraron que el incremento en profundidad, el ángulo de inclinación de pared y la interacción entre ellos son significativos en el cambio de la rugosidad.

Por otra parte autores como Hosford y Caddell [26] aseguran que la rugosidad interna repercute en el acabado superficial externo como un defecto conocido como piel de naranja. Asimismo, Hamilton et al. [27] han investigado la influencia que tienen la velocidad de avance y las altas velocidades del husillo en tal defecto. Este se produce en la parte externa de la pieza cuando la herramienta de deformación está en contacto con solamente la parte interna y se caracteriza por dar una apariencia rugosa a la superficie la cual se puede apreciar a simple vista.

Por lo anterior, se sabe que en el proceso (SPIF) algunos de los parámetros están más relacionados con el cambio en la rugosidad que otros, por tal razón el propósito de este estudio derivado del proyecto de investigación financiado por la Universidad EAFIT y titulado: "Desarrollo y simulación del proceso de conformado de lámina metálica SPIF – DPIF", es investigar la influencia que tiene la variación de tres parámetros del proceso, así como establecer cuál de ellos contribuye en mayor proporción al cambio en la rugosidad media (R_a) medida en dirección paralela y perpendicular a la trayectoria seguida por la herramienta de forma independiente. En la primera se desea validar el efecto en la textura de la superficie que deja la velocidad de avance y la velocidad de husillo y en la segunda validar el efecto dado por el incremento en profundidad en esta variable de control. Adicionalmente, se quiere confirmar la incidencia que tiene la velocidad de husillo en el defecto de piel de naranja.

El *diseño de experimentos* (DOE) se toma como metodología para realizar el análisis estadístico, esto debido a que es ampliamente aplicado al estudio de los procesos de producción. Este posee una variedad de estrategias experimentales adecuadas para generar la información que se busca, el diseño multifactorial completo es una de ellas. Este es apto para conocer qué efecto tienen k factores sobre una variable de respuesta.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. DISEÑO DE EXPERIMENTOS Y PARÁMETROS

Se realiza un diseño de experimentos multifactorial completo con tres factores, dos niveles (), y tres réplicas que son el número

recomendado por la literatura, estas son la reiteración de la medida de rugosidad, con esto los efectos de las variables incontroladas pueden compensarse. Los factores escogidos y su dominio experimental son mostrados en la Tabla 1. Estos han sido considerados como parámetros de importancia en proceso y los valores tomados por los niveles se encuentran dentro del rango de valores utilizados por varios de los autores antes citados. El dominio experimental de un factor se expresa con los valores mínimos y máximos que puede tomar el parámetro evaluado, y se asigna la notación codificada -1 al nivel inferior y +1 al superior. Adicionalmente se incluye el valor de las (RPM) iguales a cero a fin de evaluar el proceso con y sin velocidad de husillo.

Factores		Dominio Experimental	
		Nivel (-)	Nivel (+)
A:	Velocidad de husillo (RPM)	0	1500
B:	Velocidad de avance (mm/min)	2000	3500
C:	Incremento en profundidad (mm)	0.5	1

Tabla 1: Factores y dominio experimental

Para notar los efectos de los factores es suficiente con hacerlos variar conjuntamente entre los extremos del dominio experimental [28]. Esto permitirá descubrir si el efecto en el cambio de rugosidad, depende de la combinación de todos los factores o son independientes, como se indica en la matriz de experimentación que se muestra en la Tabla 2.

Posteriormente al obtener las mediciones de la rugosidad en las tres réplicas proporcionadas, se procede a ejecutar un análisis de varianza por medio de un software estadístico.

2.2. MATERIALES Y PROCEDIMIENTO

El proceso SPIF parte del diseño de una geometría en un sistema de diseño asistido por computador (CAD), para el caso de estudio se optó por una figura piramidal. Después se realiza una simulación del proceso en un sistema de manufactura asistida por computador (CAM) y se obtienen las trayectorias que recorrerá la herramienta. Fueron creadas dos trayectorias con valor del incremento en profundidad de 0.5 y 1mm. Por último, se ejecuta el montaje en un centro de fresado de control numérico (CNC) de tres ejes y se programan los parámetros con respecto a la matriz de experimentos. El suministro empleado es aluminio AL1100-H0 de dimensiones 110 mm x 110 mm con un espesor de 1 mm y propiedades mecánicas E (GPa) =69, Y (MPa)=62, UTS (MPa)=90 y ϵ_r (%)=35. La herramienta es un eje redondeado de punta esférica de acero cementado de 8 mm de diámetro y como lubricante se utiliza aceite refrigerante. Lo anterior y las geometrías obtenidas se evidencian en la Fig. (2a).

2.3. MEDICIÓN DE RUGOSIDAD SUPERFICIAL

El dispositivo para medir la rugosidad se conoce como rugosímetro, este consta de un palpador punta de diamante con un radio de 2.5 o 10 μm que recorre una pequeña longitud de muestreo sobre la superficie estudiada como se muestra en la Fig. (2b). Los valores normalizados de dicha longitud son 0.08, 0.25, 0.8, 2.5, 8 y 25 mm, se escoge 2.5 mm para efectuar la medición en las piezas obtenidas.

Con este dispositivo se obtienen la rugosidad media (R_a), que se especifica como la suma de los valores absolutos de las áreas delimitadas por el perfil de rugosidad y su línea media divididas

por la longitud del muestreo; la rugosidad promedia (R_z), definida como el valor que se obtiene al promediar la diferencia obtenida entre el pico más alto y el bache más profundo en cada una de las cinco secciones en las que se divide la longitud de muestreo; y la rugosidad (R_y) precisada como la distancia máxima entre el pico más alto y el bache más profundo [18]. La rugosidad media (R_a) se escogió como parámetro de medición debido a su utilización en la mayoría de procesos de fabricación. Esta será medida en dirección paralela a la trayectoria de la herramienta, ya que lo que se busca es evaluar la influencia de la velocidad de avance y la velocidad de husillo en las huellas que se obtienen en el material después de ejecutado el proceso, así como ver el efecto que tienen la combinación de los parámetros en el defecto piel de naranja. Adicionalmente será medida en forma perpendicular a la trayectoria con el fin de comparar los resultados con estudios previamente citados.

2.4. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Con los datos obtenidos por medio de la medición de la rugosidad y la matriz expuesta en la tabla 2, se realiza el análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia del 5%. ($\alpha=0.05$), este emplea la razón de estimaciones F creada por el matemático Ronald Fisher (1890-1962). El análisis se efectúa con el fin de comprobar la siguiente hipótesis:

- H0: Los efectos de A, B, C, AB, AC, BC, ABC son cero; no significativos.
- H1: Alguno de ellos es diferente de cero.

La hipótesis nula supone que si todos los efectos de todos los niveles de los factores son nulos, todas las medias de todos los grupos considerados son iguales entre sí e iguales a la media general y no se tendrá interacción alguna. Si el valor de Prueba obtenido en el análisis es menor que α se concluye que el efecto correspondiente es estadísticamente diferente de cero, es decir, tal efecto influye de manera significativa en la respuesta y mientras más pequeño sea este valor, más importante es tal efecto. También se puede concluir comparando el valor del F calculado con el respectivo de la tabla. Se rechaza H0, si el F calculado es mayor que el F de la tabla.

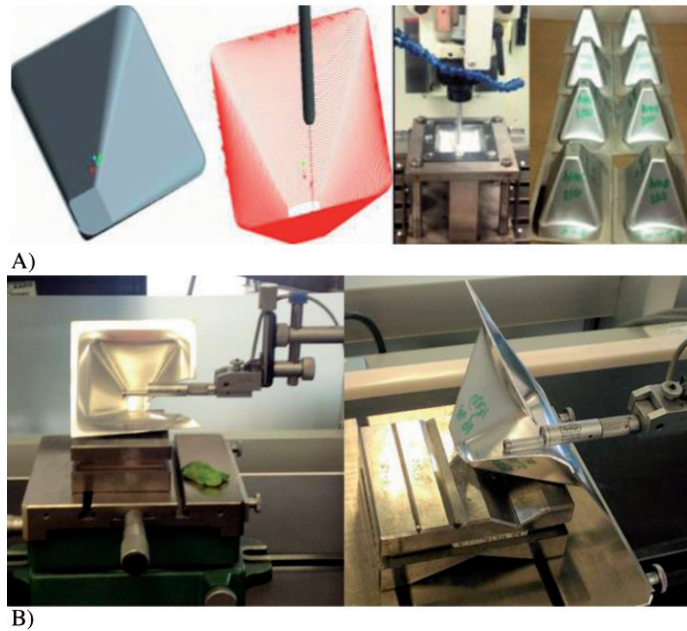


Fig. 2: (A) Diseño CAD de geometría, trayectorias CAM, montaje y geometrías obtenida. (B) Medición de la rugosidad media R_a en sentido horizontal (izquierda) y perpendicular (derecha) a la trayectoria.

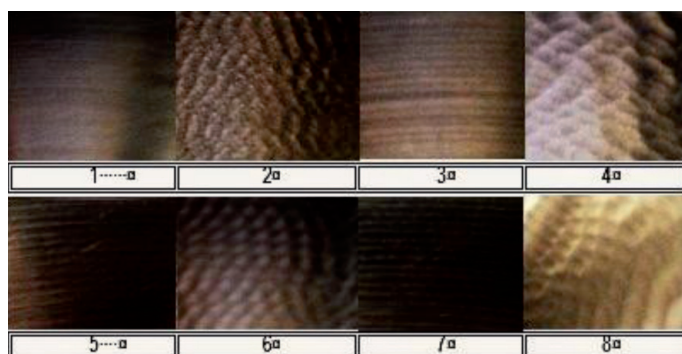
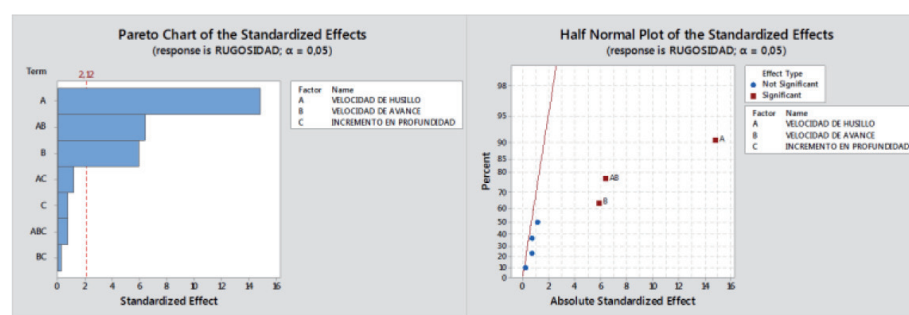
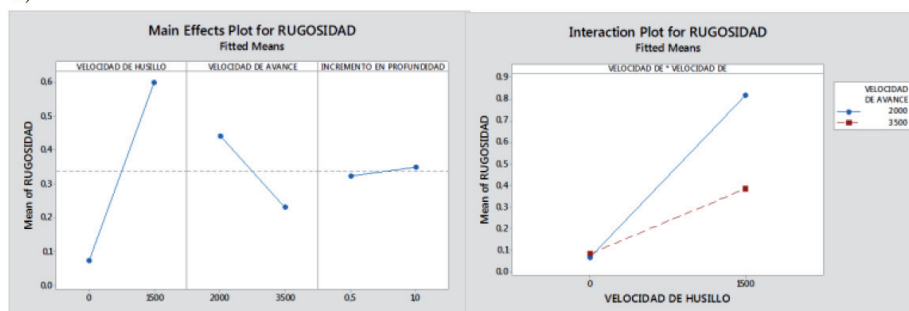


Fig. 3: Acabados superficiales obtenidos en las piezas de experimentación



A)



B)

Fig. 4: (A) Diagrama de Pareto (izquierda) y efectos estandarizados (derecha). (B) Gráfica efectos principales (izquierda) e interacciones de los parámetros analizados (derecha)

3. RESULTADOS

En la Fig. (3) se presentan los acabados superficiales obtenidos en las piezas. Se obtienen buenos resultados en términos de conformabilidad, ya que no se presentaron agrietamientos y arrugas. Adicionalmente se evidencia la aparición del defecto piel de

naranja en la parte externa de las piezas trabajadas con (RPM) iguales a 1500 (piezas 2, 4, 6 y 8).

Los resultados de la medición en forma paralela y perpendicular a la trayectoria se muestran en la Tabla 2, Entre ambas mediciones se perciben diferencias significativas en los valores de rugosidad media (R_a).

Los resultados del análisis del diseño de experimentos basado en las mediciones paralelas son presentados en la Fig. (4). Del diagrama de Pareto Fig. (4a) que muestra el valor absoluto de los efectos con la línea de referencia indicando que si el efecto es mayor a esta es importante, se infiere que los parámetros que contribuyen al cambio en la rugosidad de la pieza son únicamente la velocidad de husillo con un valor de efecto del 14,85, la velocidad de avance con un valor de 5,84 y por último la interacción entre ellos con valor de 6,36. También se evidencia que el incremento en profundidad no presenta un efecto significativo, esto era de esperarse puesto que la medición de rugosidad se realizó de forma paralela a la trayectoria. La contribución de manera porcentual de los efectos y sus interacciones se muestra en la gráfica de efectos estandarizados, la velocidad de husillo alcanza un valor del 90%, la velocidad de avance del 64% y la interacción del 78%. La cercanía de los puntos azules a la línea ajustada obedece a los parámetros e interacciones que no presentan efecto alguno.

De la gráfica de efectos principales Fig. (4b) se deduce que la velocidad de husillo afecta en buena proporción a la medida promedio de la rugosidad ya que su pendiente es muy inclinada. Cuando la rotación de la herramienta tuvo un valor de 1500 (RPM), las piezas presentaron una rugosidad promedio de 0.6 μm , sin embargo, cuando la herramienta no tuvo rotación se obtuvo una medida de 0.1 μm . El efecto de la velocidad de avance es menor que el parámetro anterior debido a que una inclinación moderada de su pendiente, de hecho con la variación de este, se alcanzan medidas promedio de 0.25 μm a 0.45 μm . La gráfica de interacciones presenta los valores promedios de la rugosidad con la combinación de ambos parámetros significativos; con los parámetros en sus niveles +1 se alcanzan

Matriz de experimentos				Experimentación			Medición Horizontal (μm)			Medición vertical (μm)		
	X1	X2	X3	Velocidad de husillo (RPM)	Velocidad de avance (mm/min)	Incremento en profundidad (mm)	Réplica I	Réplica II	Réplica III	Réplica I	Réplica II	Réplica III
1	-	-	-	0	2000	0,5	0	0,1	0,1	1,3	1,2	1,4
2	+	-	-	1500	2000	0,5	0,9	0,7	0,8	2,2	1,8	1,7
3	-	+	-	0	3500	0,5	0,1	0,1	0,1	1,1	1,2	1
4	+	+	-	1500	3500	0,5	0,3	0,3	0,4	2,9	2,9	3
5	-	-	+	0	2000	1	0,1	0,1	0	3,1	2,9	3
6	+	-	+	1500	2000	1	0,9	0,7	0,9	2,8	2,9	3
7	-	+	+	0	3500	1	0,1	0	0,1	2,7	2,9	2,8
8	+	+	+	1500	3500	1	0,6	0,3	0,4	2,4	2,7	2,9

Tabla 2: Matriz de experimentos, experimentación a realizar y resultado mediciones de rugosidad media R_a horizontales y verticales

valores promedios de rugosidad de 0.35 μm , con estos en niveles -1 se obtienen valores de 0.1 μm y con la velocidad de husillo en +1 y la velocidad de avance en -1 se logran valores de 0.9 μm .

Los resultados de la (ANOVA) son presentados en la tabla 3. Esta muestra los resultados de la suma de cuadrados (SS), de los cuadrados medios (MS), del estadístico de prueba F y los valores de prueba (P-value) para cada parámetro y las interacciones.

Para los parámetros significativos se observa que el valor de prueba es cero, éste comparado con el nivel de significancia de $\alpha=0.05$, hace que se rechace la hipótesis nula, se acepte la hipótesis alternativa y se concluya que los efectos de los dos parámetros expuestos y su interacción son estadísticamente significativos en el cambio de la rugosidad media (Ra).

Los resultados del análisis de experimentos basado en las mediciones perpendiculares, son mostrados en la Fig. (5). Según el diagrama de Pareto, los parámetros que influyen en el cambio de la rugosidad son el incremento en profundidad, la velocidad de husillo, la respectiva interacción entre ellos y la interacción entre todos los parámetros, con valores de efecto de 16.57, 8.81, 10.69 y 5.08 respectivamente. Igualmente, se evidencia que el parámetro velocidad de avance por sí solo no presenta un efecto significativo. En la gráfica de efectos estandarizados la mayor contribución porcentual es dada por el incremento en profundidad, seguida de la interacción entre este y la velocidad de husillo, y este último, con valores de 90.54, 77.03 y 63.51% respectivamente. Todas las interacciones aportan valores menores al 50 % y la velocidad de avance un efecto solo del 9.46%.

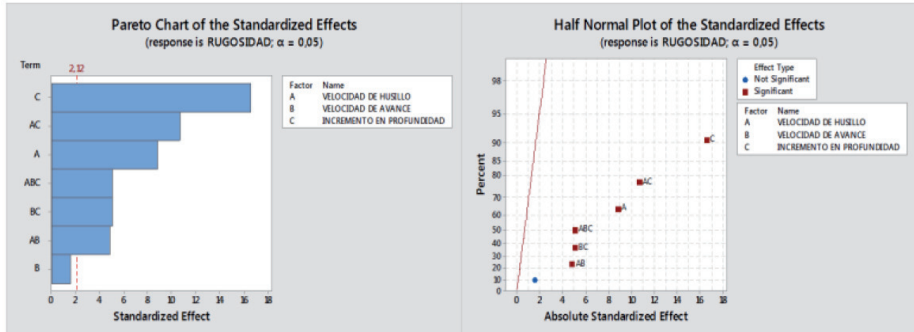


Fig. 5: Diagrama de Pareto y efectos estandarizados

ANÁLISIS DE VARIANZA					
Componentes	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	2,2363	0,3195	42,6	0
Linear	3	1,9179	0,6393	85,24	0
Velocidad de husillo	1	1,6538	1,6538	220,5	0
Velocidad de avance	1	0,2604	0,2604	34,72	0
Incremento en profundidad	1	0,0038	0,0038	0,5	0,49
2-way interactions	3	0,3146	0,1049	13,98	0
Velocidad de husillo*velocidad de avance	1	0,3038	0,3038	40,5	0
Velocidad de husillo*incremento en profundidad	1	0,0104	0,0104	1,39	0,256
Velocidad de avance*incremento en profundidad	1	0,0004	0,0004	0,06	0,817
3-way interactions	1	0,0038	0,0038	0,5	0,49
Velocidad de husillo*velocidad de avance*incremento en profundidad	1	0,0038	0,0038	0,5	0,49
Error	16	0,12	0,0075		
Total	23	2,3563			

Tabla 3: Resultado análisis de varianza

4. DISCUSIÓN

Según los resultados obtenidos en las tablas y los análisis de experimentos, se deduce que la rugosidad media (Ra) medida de manera paralela a la trayectoria es afectada mayormente por el parámetro de velocidad de husillo seguido de velocidad de avance, y que las piezas trabajadas sin velocidad del husillo (piezas 1, 3, 5,7) no presentan marcas de ondulaciones. Se obtuvieron valores de rugosidad media (Ra) mucho menores a los que se obtienen cuando se usó velocidad de husillo igual a 1500 (RPM) (ver Tabla 2), esto se contrasta con las afirmaciones realizadas por los autores Durante et al. [29]. Igualmente, haciendo un análisis cualitativo del defecto piel de naranja en las piezas obtenidas se evidencia que este desaparece en la cara externa de las piezas antes enumeradas, por lo que el uso del proceso sin velocidad del husillo es recomendable. Sin embargo, esto abre también el camino para indagar como hipótesis para futuras investigaciones, los efectos a los que conlleva realizar el proceso SPIF con la herramienta sin rotación, para lo cual se planea realizar estudios detallados a la microestructura de la lámina trabajada, igualmente analizar si se presenta un desgaste crítico en la herramienta durante el proceso, y evaluar si se obtienen ahorros energéticos significativos cuando se realiza el proceso sin velocidad de husillo. Todo esto a fin de realizar un mayor y enriquecedor aporte científico que continúe argumentando la aplicabilidad del proceso y se fortalezca cada vez más su viabilidad industrial.

Al igual que lo propuesto por Powers et al. [24], el análisis de las mediciones de rugosidad realizadas en ambas direcciones indicó mayores valores de esta para las mediciones realizadas de manera perpendicular a la trayectoria seguida por la herramienta. La tabla 2 muestra que para la rugosidad medida paralelamente se obtuvieron valores entre 0 y 0.9 μm , y para las realizadas de manera perpendicular se alcanzaron valores entre 1.1 y 3.1 μm . Por su parte el análisis del diseño de experimentos ejecutado a las mediciones perpendiculares expone que el incre-

mento en profundidad es el parámetro que más afecta el cambio en la rugosidad y la velocidad de avance es el único parámetro que no tiene un efecto significativo, esto confirma lo dicho por los autores antes citados [19-22], [25]. Sin embargo para el caso de estudio desarrollado en esta investigación, el parámetro velocidad de husillo, también presentó un efecto significativo según la Fig. 5, situación que amerita un futuro análisis detallado.

5. CONCLUSIONES

Un diseño de experimentos multifactorial fue desarrollado con el fin de evaluar la influencia que tiene en el cambio en la rugosidad los parámetros velocidad de husillo, velocidad de avance e incremento en profundidad. Se halló que la velocidad de husillo afecta el valor de esta, medida tanto perpendicular como paralelamente con un efecto mayor en esta última. Igualmente, se evidenció que la velocidad de avance solo afecta la rugosidad obtenida en sentido paralelo. Del mismo modo, se pudo constatar que al no utilizar (RPMs) el defecto de piel de naranja no se presenta, ya que en la cara interna de la pieza no se exhiben las marcas de ondulaciones dejadas por la herramienta cuando está en rotación como las que se presentan en las piezas trabajadas con velocidad de husillo.

La velocidad de avance presenta un efecto significativo solo en el cambio de rugosidad medida paralelamente pero es insignificante en la medida perpendicular. Además de esto, los valores de rugosidad obtenidos en forma perpendicular son notablemente mayores a los logrados paralelamente, esto se debe a que el incremento en profundidad genera un efecto altamente significativo en dichas mediciones y no es considerado en la medición paralela.

La interacción entre todos los parámetros presentes en los diseños de experimentos, muestran que estos tienen efectos entre el 20 y 50 % en el cambio de la rugosidad medida perpendicularmente. Por otra parte solo la interacción entre los parámetros velocidad de husillo y velocidad de avance genera un efecto en el cambio de rugosidad medida paralelamente.

BIBLIOGRAFÍA

- [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] Paramo G, Benítez A, "Deformación incremental de lámina sin matriz (DIELESS) como alternativa viable a procesos de conformación de lámina convencionales". *INGE CUC*. Julio. 2013 Vol. 9-1. p. 115-128.
- [3] 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.
- [4] Amino M, Mizoguchi M, Terauchi Y, et al. "Current Status of 'Dieless' Amino's Incremental Forming," *Procedia Eng*. 2014. Vol. 81. p. 54-62. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2014.09.128>.
- [5] Iseki H, Kato K, Sakamoto S. "Flexible and Incremental Sheet Metal Bulging using a Path-Controlled Spherical Roller". *Trans. Japan Soc. Mech. Eng. Ser. C*. January. 1992. Vol. 58- 554. p. 3147-3155. DOI: <http://dx.doi.org/10.1299/kikaic.58.3147>.
- [6] Jeswiet J, Micari F, Hirt G, et al. "Asymmetric single point incremental forming of sheet metal". *Annals-Manufacturing Technology*. 2005. Vol.54. p. 88-114.
- [7] Ham M, Jeswiet J. "Single point incremental forming and the forming criteria for AA3003". *Ann CIRP-Manuf Technol*. 2006. Vol. 55-1. p. 241-244.
- [8] Ham M, Jeswiet J. "Single point incremental forming limits using a box-behnken design of experiment". *Key Eng Mater*.2007. Vol. 344. p. 629-636.
- [9] Dufloy JR, Tunçol Y, Szekeres A, Vanherck P. "Experimental study on force measurements for single point incremental forming". *J Mater Process Tech*. July 2017. Vol.189. p. 65-72.
- [10] Arfa H, Bahloul R, BelHadjSalah H. "Finite element modelling and experimental investigation of single point incremental forming process of aluminum sheets: influence of process parameters on punch force monitoring and on mechanical and geometrical quality of parts". *Int J Mater Form*. December 2013. Vol.6-4. p. 483-510. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12289-012-1101-z>.
- [11] Bahloul R, Arfa H, BelHadjSalah H. "A study on optimal design of process parameters in single point incremental forming of sheet metal by combining Box-Behnken design of experiments, response surface methods and genetic algorithms," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. September 2014. Vol. 74 1-4. p. 163-185.
- [12] Bagudanch I, Garcia-Romeu M, Centeno G, et al. "Forming force and temperature effects on single point incremental forming of polyvinylchloride". *Journal of materials processing technology*. May 2015. Vol. 219. p. 221-229.
- [13] Radu C, Cristea I, Hergehegiu E, et al. "Improving the Accuracy of Parts Manufactured by Single Point Incremental Forming." *Appl. Mech. Mater*. July 2013. Vol. 332. p. 443-448. DOI: <http://dx.doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.332.443>.
- [14] Paramo G, Benítez A. "Developing an experimental case in aluminium foils 1100 to determine the maximum angle of formability in a piece by Dieless-SPIF process." *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng*. July 2014. Vol. 65-1. p. 1-10. DOI: <http://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/65/1/012027>.
- [15] Stoughton T, Yoon J, "A new approach for failure criterion for sheet metals," *Int. J. Plast*. March. 2010. Vol. 27- 3. p. 440-459. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jiplas.2010.07.004>.
- [16] Vallellano C, Morales D, Martínez A, et al. "On the Use of Concave-Side Rule and Critical-Distance Methods to Predict the Influence of Bending on Sheet-Metal Formability," *Int. J. Mater. Form*. June 2010. Vol. 3-S1. p. 1167-1170. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12289-010-0980-0>.
- [17] Centeno G, Bagudanch I, Martínez- Donaire A, et al. " Critical analysis of necking and fracture limit strains and forming forces in single- point incremental forming". *Materials & Design*. November 2014. Vol. 63. p. 20-29.
- [18] González González C. *Metrología*. 1ª edición. Mexico: MacGraw-Hill, 1995. 427p. ISBN: 970-10-0370-5.
- [19] Ham M, Powers B, Brown C A, et al. "Roughness Evaluation of Single Point Incrementally Formed Surfaces". *Transactions of the North American Manufacturing Research Institute of SME*. 2009. Vol. 37. P. 411-418.
- [20] Hagan E, Jeswiet J. "Analysis of surface roughness for parts formed by computer numerical controlled incremental forming". *Proc Inst Mech Eng B*. 2004. Vol 218. p. 1307-1312.
- [21] Echrf S, Hrairi M. "Significant parameters for the surface roughness in incremental forming process," *Materials and Manufacturing Processes*. June 2014. Vol. 29-6. p. 697-703.
- [22] Liu Z, Liu S, Li Y, et al. "Modeling and optimization of surface roughness in incremental sheet forming using a multi-objective function". *Materials and Manufacturing Processes*. 2014. Vol. 29-7.p. 808-818.
- [23] Durante M, Formisano A, Langella A. "Comparison between analytical and experimental roughness values of components created by incremental forming". *Journal of Materials Processing Technology*. November 2010. Vol. 210-14. p.1934-1941.
- [24] Powers B, Ham M, Wilkinson M. "Small data set analysis in surface metrology: An investigation using a single point incremental forming case study". *Scanning*. 2010. Vol. 32-4. p. 199-211.
- [25] Lasunon O. "Surface roughness in incremental sheet metal forming of AA5052 ". *Advanced Materials Research*. 2013. Vol.753-755. p. 203-206.
- [26] Hosford William *Metal forming: mechanics and metallurgy*. 4ª edición. New York: Cambridge University Press, 2011. 290p. ISBN: 978-1-107-00452-8.
- [27] Hamilton K, Jeswiet J. "Single point incremental forming at high feed rates and rotational speeds: Surface and structural consequences". *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2010. Vol. 59-1. p. 311-314.
- [28] Ferré J, Rius X, "Diseño factorial completo 2k," *Técnicas de Laboratorio*. Octubre 2003. Vol. 25- 287. p. 999-1004.
- [29] Durante M, Formisano A, Langella A, et al. "The influence of tool rotation on an incremental forming process". *Journal of Materials Processing Technology*. 2009. Vol. 209-9. p. 4621-4626.