

## Original

### PUNZONADO ROTATORIO VERTICAL CON MECANISMO EPICICLOIDAL

Vertical rotary punching with epicycloidal mechanism

Ing. Maikel Diéguez-Rodríguez, Universidad de Granma [mdiequezz@udg.co.cu](mailto:mdiequezz@udg.co.cu), Cuba

Dr. C. Raúl Santana-Milán, Universidad de Holguín, [santana@uho.edu.cu](mailto:santana@uho.edu.cu), Cuba

Recibido: 23/05/2017 – Aceptado:16/06/2017

#### RESUMEN

Las empresas metal mecánicas utilizan punzonadoras rotatorias acopladas a las líneas de perfilado complejo para aumentar la velocidad de producción, por requerir menos utensilios y ocupar menos espacio que las punzonadoras intermitentes. En el presente trabajo se demuestra que los valores dimensionales de un sistema de punzonado continuo influyen sobre la calidad del punzonado y la vida de la herramienta. Para el logro de este objetivo se utilizaron herramientas matemáticas básicas y un algoritmo general para ecuaciones de una variable en la ubicación de raíces, a objeto de demostrar que en las punzonadoras rotatorias el punzón penetra de manera angular en la matriz, generando un ángulo de ataque que conlleva a limitaciones de vida en el punzón, dimensionales en el sistema, baja calidad en el punzonado y aumento de peso, producido por la búsqueda de la minimización del juego de corte o distancia requerida entre el punzón y la matriz al inicio del punzonado.

**Palabras claves:** Línea de perfilado compleja, punzonado continuo, punzonado rotatorio, sistemas parásitos, el juego de corte.

#### ABSTRACT

Companies metal mechanical using rotary punching coupled to lines complex profiles to increase production speed, because it requires less equipment and occupying less space than intermittent punching. In the present work shows that dimensional values of a system continuous punching have influence on the quality of drilling and tool life. To achieve this objective tools were used basic math and a general algorithm for equations of one variable in the location of roots, to demonstrate that in the rotary punching the punch penetrates so angular into the array, creating an angle of attack leading to limitations of life in the punch, dimensional system, poor quality drilling and weight gain,

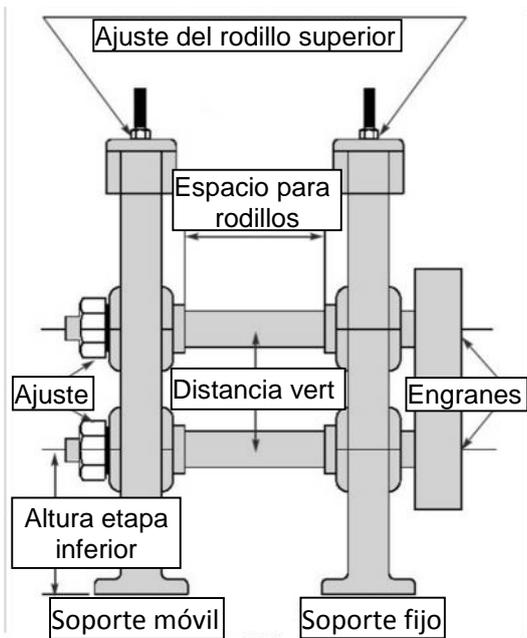
produced by the search of minimize clearance or required distance between the punch and array at the beginning of punching.

**Key words:** complex line profiling, continuous punching, punching angle, parasite systems, clearance punching.

## **INTRODUCCIÓN**

En la industria moderna las piezas manufacturadas en producciones en masas se obtienen generalmente a través del conformado [1, 2], y la mayoría de estas requieren sólo ser perforadas y perfiladas. Para aumentar la velocidad de producción en los procesos metal mecánicos y bajar el costo de los productos manufacturados se combinan los dos procesos de punzonado y perfilado, en lo que se denomina una línea de perfilado compleja. Para el punzonado en estos procesos lo habitual era utilizar una punzonadora intermitente, la cual demanda el manejo de múltiples utensilios que encarecen el sistema y requieren mucho espacio para su uso. Actualmente hay empresas que prefieren acoplar a la línea de perfilado compleja una punzonadora rotatoria, por cuanto necesita menos utensilios y ocupa menos espacio que las intermitentes [3-5].

La mayoría de los sistemas de punzonado continuo, mostrados por las patentes y las principales empresas del mundo, apoyan sus diseños en un mecanismo de punzonado, basado en un par de rodillos que giran en sentido opuesto y a la misma velocidad en el espacio, un punzón y una matriz que se encuentran fijos a los rodillos a una distancia regulable, un par de columnas o soportes que sirven de sostén al mecanismo y engranes para servirse de la energía de la perfiladora como se muestra en la figura 1. Para lo cual necesita de sistemas automatizados de alta velocidad [6-10].



**Fig. 1 Castillo Máquina**

Su diseño está sustentado en la industria del papel y dirigido al punzonado de láminas embobinadas de pequeño espesor. En estos sistemas el punzón entra en la matriz de manera angular y de forma progresiva, por lo que disminuye la carga del punzonado con respecto al sistema convencional. Estos son sistemas parásitos que se acoplan a los trenes de laminación y adquieren la velocidad que demande el perfilado, manteniendo siempre el mismo paso entre agujeros. Actualmente se conocen dos modalidades fabricadas por USA y Alemania, respectivamente[4, 5, 11].

Existen sistemas desarrollados en otros países, los cuales están basados en tecnologías existentes en los dos países mencionados [8] siendo necesario el análisis de los mismos para una posible transferencia de tecnología que permita el desarrollo de los países del tercer mundo desde sus potencialidades locales.

En la presente investigación se demuestra, con ayuda de herramientas matemáticas, que estos mecanismos, si bien presentan una altísima productividad, se encuentran limitados por el inconveniente de que el punzón penetra de manera angular en la matriz, generando un ángulo de ataque que conlleva a limitaciones de vida en el punzón, dimensiones en el sistema, lo cual atenta contra la calidad en el punzonado y aumento de peso del sistema, producido en la búsqueda de minimizar el juego de corte o distancia requerida entre el punzón y la matriz al inicio del punzonado. De esta forma, la ampliación de dimensiones en longitud y diámetro del punzón, debe venir acompañado de un aumento de diámetro y por ende, peso y costo del rodillo del sistema de punzonado rotatorio, a fin de mantener la

calidad de punzonado y no acortar la vida de la herramienta, limitando el proceso en chapas de acero a espesores menores de 2 mm [12].

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Los sistemas diseñados más comunes están provistos de un par de rodillos de igual diámetro, el porta punzón y el porta matriz, separados a una ligera distancia que permite el paso de la lámina a punzonar. Esta distancia debe ser menor al espesor de la lámina para que los rodillos generen una presión que produzca una fuerza de arrastre capaz de desplazarla, a la vez que es punzonado. Las bobinas utilizadas en este tipo de sistema son laminadas en frío y poseen espesores de 0,3 a 2 mm. Las bobinas laminadas en caliente, no utilizables en este tipo de mecanismo, tienen espesores de 1,8 a 9,5 mm.

El rodillo superior que porta al punzón puede desplazarse verticalmente con ayuda de dos tornillos sin fin que se encuentran inmersos en sendas columnas. En el volante se coloca un nonio que permite visualizar el desplazamiento que sufre el rodillo [4, 5, 11, 13, 14].

Para representar la parte del sistema a analizar y las variables que intervienen en el mismo, durante su movimiento, se esquematizaron los elementos presentes en el mecanismo (figura 2).

El análisis de estas variables permite conocer su relación con el espacio existente entre el punzón y la matriz, al inicio de la penetración "S". La variación de los valores numéricos en esta relación muestra la posible dependencia entre las variables y el juego de corte.

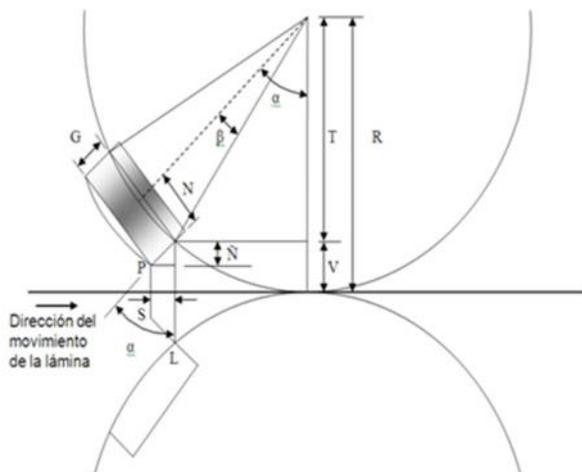
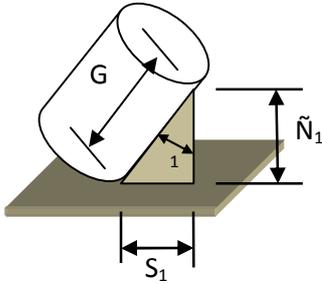


Figura 2. Variables del sistema de punzonado rotatorio

Los juegos de cortes típicos para el corte convencional fluctúan entre el 5 y el 8% según [15] y en [16] entre el 7 y el 10 % del espesor de la chapa de acero, pero en operaciones especiales que requieren bordes muy rectos como en el rasurado y el punzonado fino, el

juego de corte es solamente el 1% del espesor del material [1]. Si el juego de corte está fuera de este rango la energía y fuerza necesaria para el punzonado se acrecienta, ya que las grietas generadas a ambos lados de la pieza no se encuentran en un punto común[2, 17, 18]. Como plantea [15] en general se estima menor el porcentaje para los agujeros pequeños de precisión; en los cortes de mayores dimensiones y para mayores espesores se aumenta el porcentaje hasta alcanzar el valor máximo.



**Figura 3. Triángulo formado entre el punzón y la chapa**

En los sistemas rotatorios el punzón penetra en la matriz de manera angular, originando dificultades en el tamaño del juego de corte, que se traducen en un deterioro prematuro del punzón y de la matriz.

Para este análisis la lámina a perforar está ubicada perpendicular a la línea que une los ejes de los rodillos e impulsada por los mismos, por lo que éstos tienen constante contacto con la lámina y ejercen una ligera presión que genera el arrastre necesario.

G: altura del punzón <b>(Dato)</b>	: ángulo que ocupa el punzón en el rodillo <b>(Dato)</b>
N: Radio del punzón <b>(Dato)</b>	P: punto más bajo del punzón <b>(Ubicación)</b>
R: Radio del rodillo <b>(Dato)</b>	L: punto más alto de la matriz <b>(Ubicación)</b>
$\tilde{N}$ : componente vertical de la altura del punzón <b>(Variable)</b>	S: juego de corte entre punzón y matriz <b>(Variable)</b>
V: distancia vertical entre el punto más bajo de la intercepción entre punzón y el rodillo con la lámina <b>(Variable)</b>	: ángulo en el que el punzón se desplaza con respecto a una vertical <b>(Variable)</b>
	T: distancia entre centro de rodillo y el punto más bajo de la intercepción entre punzón y rodillo <b>(Variable)</b>

**Tabla 1. Variables y datos del sistema**

Las variables en el sistema serán “ $\alpha$ ”, “S”, “ $\tilde{N}$ ”, “V” y “T” (tabla 1); los demás valores son datos y puntos de ubicación. Los principales datos son “N”, “R” y “G”, el resto de los valores son matemáticamente dependientes de estos tres, como se demuestra en el estudio de las ecuaciones posteriores. Los datos al igual que las variables se expresan con letras, para estudiar el sistema paramétrico, comparar las respuestas obtenidas y verificar la funcionalidad del mismo bajo condiciones desiguales.

### Principales ángulos del punzón (“ $\alpha_1$ ” y “ $\alpha_2$ ”)

Se denomina “ $\alpha_1$ ” al ángulo que requiere el punzón, con respecto a una línea vertical, para que el punto “P” perteneciente a éste toque la superficie de la chapa (figura 1). Mientras que “ $\alpha_2$ ” es el ángulo que toma el punzón, con respecto a la misma línea vertical, cuando el punto “P” forma una línea horizontal con el punto más alto de la matriz, denominado “L”, el ángulo “ $\alpha_2$ ” indica el momento justo en el que se inicia la penetración del punzón en la matriz. En el instante que “P” toca la chapa se forma un triángulo rectángulo cuyos catetos son denominados “ $\tilde{N}_1$ ” y “ $S_1$ ” y la hipotenusa es la altura del punzón “G” (figura 2), mientras que “P” y “L” forman una línea horizontal se crea un triángulo rectángulo cuyos catetos son denominados “ $\tilde{N}_2$ ” y “ $S_2$ ” y la hipotenusa, como en el caso anterior, es la altura del punzón “G”.

Al tomar en consideración que la chapa aquí expuesta permanece horizontal durante su recorrido y que el punzón en su rotación desde “ $\alpha_1$ ” hasta “ $\alpha_2$ ” no penetra en la matriz, se puede afirmar que no hay corte del material pero sí deformación, lo cual puede ser expresado como la diferencia de altura de los catetos adyacentes de los triángulos rectángulos formados por “ $\alpha_1$ ” y “ $\alpha_2$ ”, es decir  $\tilde{N}_2 - \tilde{N}_1$ .

La variable “ $S_2$ ” es el juego de corte entre el punzón y la matriz al inicio del corte y su valor tiene relación directa con los ángulos “ $\alpha_1$ ” y “ $\alpha_2$ ”. El valor numérico del juego de corte expresará, comparándolo con los porcentajes de corte y punzonado experimentales, si el corte que inicia el punzón es aceptable, mientras que la diferencia entre “ $\tilde{N}_1$ ” y “ $\tilde{N}_2$ ” dará la deformación que sufre la chapa antes de generarse el punzonado.

Para iniciar los cálculos se puede decir que el punto “P” del punzón toca la chapa cuando “ $\tilde{N}$ ” se iguala con “V” (figura 1), por lo tanto:

$\tilde{N} = V$  ; Igualdad (1) (sólo cuando “P” toca la chapa); para este caso “ $\alpha$ ” se llamará “ $\alpha_1$ ”.

Las ecuaciones del (1) al (6) muestran la secuencia para obtener “ $\alpha_1$ ”:

$$\cos \alpha_1 = \frac{\tilde{N}_1}{G} \Rightarrow \tilde{N}_1 = G \cdot \cos \alpha_1 ; (1) \quad T = R \cdot \cos(\alpha_1 - \beta) ; (2) \quad V = R - T ; (3)$$

Al sustituir la ecuación (2) en la (3) se tiene:

$$V = R(1 - \cos(\alpha_1 - \beta)) ; \quad (4)$$

Al sustituir la ecuación (4) y ecuación (1) en la igualdad  $\tilde{N}=V$ , se tiene:

$$G \cdot \cos\alpha_1 = R(1 - \cos(\alpha_1 - \beta)); \quad (5)$$

De igual forma:

$$\text{sen}\beta = \frac{N}{R} ; \quad (6)$$

Así queda definida .

En la ecuación (5) la única incógnita es “  $\alpha_1$ ”, y con “  $\alpha_1$ ” se podrá determinar “ $\tilde{N}_1$ ”, pero “  $\alpha_1$ ” no es despejable en dicha ecuación. La ecuación (5) se puede reescribir como se muestra en la ecuación:

$$\cos\alpha_1 - \frac{R}{G}[1 - \cos(\alpha_1 - \beta)] = 0; \quad (7)$$

La ecuación (7) al igual que la (5) es reconocida como una ecuación no lineal, donde para encontrar la raíz se debe aplicar un algoritmo general para ecuaciones de una variable. Los siguientes métodos: bisección, Newton, secante y falsa posición, son algunos de los más empleados en aplicaciones de ingeniería, particularmente en movimientos rotacionales, para calcular las raíces reales de una ecuación dada por  $f(x) = 0$ , donde se exige al menos que la función  $f$  sea continua para garantizar la existencia de solución, teniendo un buen desempeño cuando se parte de algoritmos permitió la estimación de los eventos de diseño con relativa sencillez [19-22]. El siguiente diagrama explica su procedimiento (figura 4).

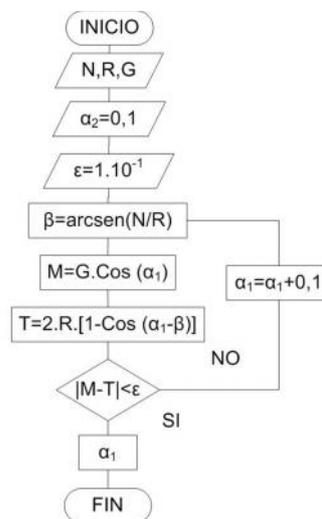


Fig. 4. Diagrama de flujo para solución de ecuación (7)

Es sabido que la ecuación (7) se puede resolver con diversas herramientas informáticas, dada la versatilidad que éstas brindan en la solución de sistemas, los cuales requieren un sin número de respuestas durante la introducción de diversas variables; de ahí su uso en la obtención de “  $\alpha_1$ ” con base a un abanico de valores disímiles de “R”, “G” y “N”, a fin de estudiar el sistema con diferentes dimensiones.

Al sustituir la ecuación (6) en la (7) y despejar “ $\alpha_1$ ” del cos se encuentra la ecuación:

$$\alpha_1 = \cos^{-1} \frac{R}{G} \mathbf{1} - \cos \alpha_1 - \operatorname{sen}^{-1} \frac{N}{R} \quad (8)$$

Esta expresión matemática (ecuación (8)) se esquematizó para graficar el comportamiento de las variables y comprender el sistema.

### **Determinación de “ $\alpha_2$ ” cuando el punto “P” y el punto “L” coinciden en una línea horizontal**

Cuando el punto “P” y el punto “L” coinciden en una línea horizontal, el punzón inicia su penetración en la matriz; la distancia horizontal entre estos dos puntos es lo que se denomina el juego de corte. Si el juego de corte excede los valores obtenidos en forma práctica el material será pellizcado, quedará con una rebaba excesiva y las grietas generadas por el punzonado no podrán encontrarse, lo que provocará una fuerza desmedida, al mismo tiempo, el punzón será sometido a una fuerza de flexión y a una fuerza de compresión, ambas originadas por el ángulo de inclinación con que el punzón penetra en la matriz.

En términos generales los punzones están sometidos sólo a fuerzas de compresión, de allí que para su diseño se tome en consideración el esfuerzo de compresión y su esbeltez. El cálculo de esbeltez se realiza para determinar la máxima longitud con la que se logre trabajar antes de que sufra pandeo y así alcance ser reafilado un mayor número de veces, aumentando su vida útil. En el punzonado continuo, el punzón penetra de manera angular generando no sólo fuerzas axiales sino también fuerzas perpendiculares al eje del punzón, las cuales varían de magnitud en relación directa con el ángulo “ $\alpha_2$ ”.

La fuerza perpendicular al eje del punzón genera esfuerzos de flexión, y el momento flector, el cual es directamente proporcional al esfuerzo de flexión, aumenta en relación directa a la longitud del punzón [23, 24]. Con el objetivo de disminuir el esfuerzo de flexión en el punzón, el ángulo “ $\alpha_2$ ” debe minimizarse, disminuyendo así el valor numérico de la fuerza perpendicular al eje del punzón. Así mismo, como es directamente proporcional a la longitud, ésta debe disminuirse buscando esfuerzos de flexión de valores bajos; ello explica por qué los punzones en estos sistemas son de corta longitud. Es decir, en el punzón que penetra de manera angular se generan esfuerzos combinados que aceleran el deterioro del mismo.

En este caso “ $\alpha_2$ ” se denominará “ $\beta$ ”, para los diferentes valores de “N”, “R” y “G”. El punto “P” del punzón coincide con el punto “L” cuando:  $\tilde{N} = 2.V$  ; Igualdad (2) (Sólo cuando “P” coincide con “L” en una línea horizontal).

Utilizando el mismo razonamiento que en el caso anterior, se tiene:

$$\cos \alpha_2 - \frac{2.R}{G} \mathbf{1} - \cos \alpha_2 - \beta = 0; \quad (10)$$

La ecuación (10) es una ecuación no lineal que permite expresar los valores de “ $\alpha_2$ ” necesarios para encontrar tanto el juego de corte entre el punzón y la matriz como el valor de “ $\tilde{N}_2$ ”, el cual es indispensable para determinar la deformación de la chapa. El diagrama de flujo de la figura 5 muestra la solución de “ $\alpha_2$ ”. Esta expresión matemática se esquematizó para graficar el comportamiento de las variables y comprender el sistema.

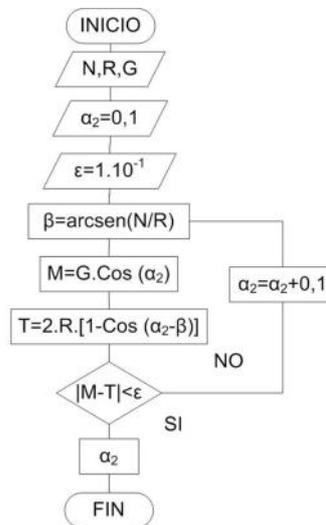


Fig. 5. Diagrama de flujo para solución de ecuación (10)

Los valores de “ $\alpha_2$ ” nos dan los posibles valores de los juegos de cortes al sustituir los ángulos en la ecuación (11), obtenida del análisis del esquema de la figura 2.

$$S_2 = G \cdot \text{sen} \alpha_2 \quad (11)$$

Es factible aplicar el diseño experimental al estudio de las variables, pero todo el proceso creado se puede desarrollar de manera virtual. “Los sistemas simulados son representaciones computacionales de sistemas reales, se definen como dinámicos debido a que evolucionan en el tiempo por medio de la ocurrencia de eventos discretos, su ventaja es que permiten analizar y experimentar evitando los costos y riesgos que tendría una intervención en un sistema real” [25]; aquí se pueden estudiar un sin número de datos creando un mallado lo más extenso posible con el fin de visualizar y analizar la mayor cantidad de respuestas y variables, para lo cual .

La teoría indica que es suficiente que el punzón penetre 1/3 del espesor de la chapa para que la separación de la lámina se genere. El modelo formado tiene en principio como objetivo punzonar una lámina de 0,5 mm de espesor; de aquí que la longitud mínima necesaria del punzón sea de 0,1667 mm. Para iniciar los cálculos se fijaron las variables “G” y “N”, asignándoles valores de 6,1667 mm de longitud y 5 mm de diámetro al punzón. Comúnmente la longitud de los punzones en las matrices excede 6 mm de lo necesario para aumentar su tiempo de vida, siempre y cuando no sobre pase los cálculos de pandeo; si se toma en cuenta la longitud mínima necesaria del punzón y su tiempo de vida se puede partir

del valor inicial de 6,1667 mm de longitud para su estudio [15]. Así mismo, en principio se fija el diámetro del punzón tomando valores bajos para visualizar el comportamiento del resto de las variables e ir aumentando progresivamente su diámetro en un nuevo mallado, hasta encontrar la relación o variación de un sistema con respecto al mallado anterior para lo cual se utilizó MATLAB debido a las ventajas para el análisis del movimiento de rotación descrita en [21].

R (mm)	N (mm)	(rad)	G (mm)	$\alpha_1$ (rad)	$\alpha_1$ (grad)	$S_1$ (mm)	$\dot{N}_1$ (mm)	$\alpha_2$ (rad)	$\alpha_2$ (grad)	$S_2$ (mm)	$\dot{N}_2$ (mm)	$\dot{N}_2 \cdot \dot{N}_1$
150	5	0,033	4,1667	0,265	15,21	1,093	4,021	0,199	11,38	0,822	4,085	0,064
200	5	0,025	4,1667	0,227	13	0,937	4,06	0,168	9,65	0,699	4,108	0,0478
250	5	0,02	4,1667	0,201	11,52	0,832	4,083	0,148	8,51	0,616	4,121	0,038
300	5	0,017	4,1667	0,182	10,44	0,755	4,098	0,134	7,68	0,557	4,129	0,0315
350	5	0,014	4,1667	0,168	9,61	0,695	4,108	0,123	7,05	0,511	4,135	0,0269
400	5	0,013	4,1667	0,156	8,94	0,648	4,116	0,114	6,55	0,475	4,14	0,0235
450	5	0,011	4,1667	0,147	8,4	0,609	4,122	0,107	6,14	0,445	4,143	0,0208
500	5	0,01	4,1667	0,139	7,94	0,576	4,127	0,101	5,79	0,42	4,145	0,0187
550	5	0,009	4,1667	0,132	7,55	0,547	4,131	0,096	5,5	0,399	4,148	0,0169
600	5	0,008	4,1667	0,126	7,21	0,523	4,134	0,092	5,24	0,381	4,149	0,0155
650	5	0,008	4,1667	0,121	6,91	0,501	4,136	0,088	5,02	0,365	4,151	0,0143
<b>700</b>	5	0,007	4,1667	0,116	6,64	0,482	4,139	0,084	4,82	<b>0,35</b>	4,152	0,0132

Tabla 2. Mallado de valores obtenidos para G = 4,1667 mm y N=5 mm

A la tercera variable "R" se le asignaron valores entre 150 y 700 mm de radio con un salto de 50 en 50 mm, es decir se analizaron rodillos desde un mínimo de 300 mm hasta un máximo de 1400 mm de diámetro (tabla 2), después de variar en rangos en extremo amplios los valores de diámetro de rodillo, diámetro de punzón y longitud de punzón.

La visualización y organización de esos datos facilitó la elaboración de diagramas donde se muestran las variaciones de los juegos de corte de los punzones en el momento del corte, para diferentes longitudes y radios de rodillos, dejando para cada gráfico generado el diámetro del punzón como valor constante (figuras 6 y 7); además facilitó la elaboración de un cuadro donde se indican las dimensiones mínimas que debe tener un sistema de punzonado continuo para perforar chapas laminadas en frío de diferentes espesores, evitando que se produzca una fuerza excesiva (tabla 3).

Punzonado rotatorio vertical

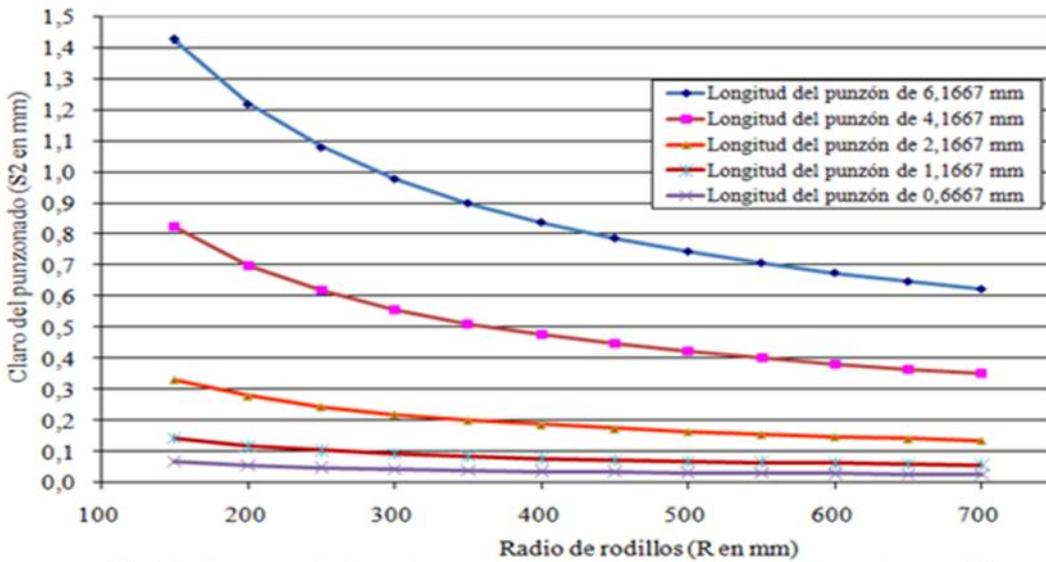


Fig. 6 Diagrama de claro de punzonado vs radio de rodillo para un punzón con diferentes longitudes pero con el mismo diámetro (N=5 mm)

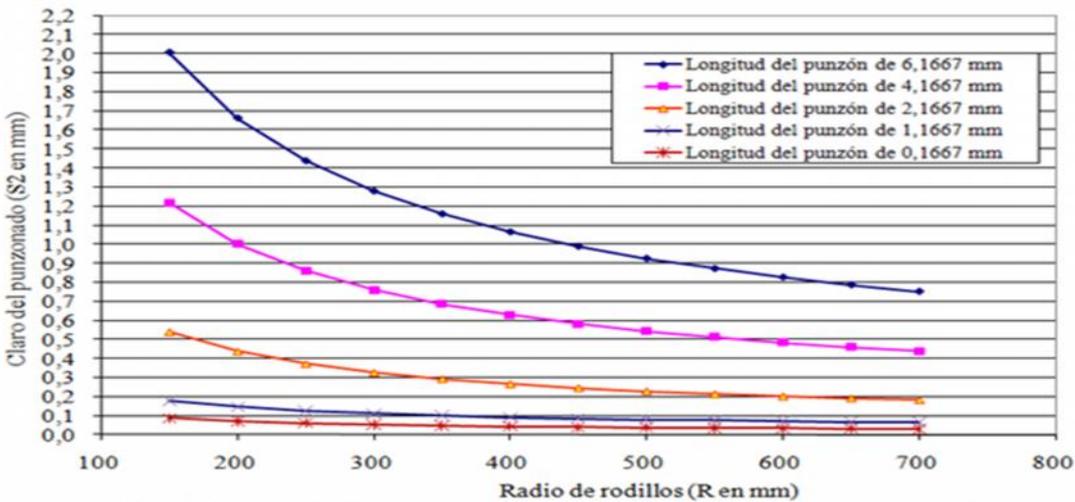


Fig. 7 Diagrama de claro de punzonado vs radio de rodillo para un punzón con diferentes longitudes pero con el mismo diámetro (N=10 mm)

(e) Espesor de lámina (mm)		0,3	0,5	1	1,5	2
S <sub>2</sub> < 8% de (e)		0,024	0,04	0,08	0,12	0,16
G=2,1667 mm	N=2,5 mm	-	-	-	-	450 mm
G=1,1667 mm	N=2,5 mm	-	-	300 mm	150 mm	100 mm
G=0,6667 mm	N=2,5 mm	650 mm	250 mm	100 mm	50 mm	50 mm
G=2,1667 mm	N=5 mm	-	-	-	-	500 mm
G=1,1667 mm	N=5 mm	-	-	-	200 mm	150 mm
G=0,667 mm	N=5 mm	-	300 mm	150 mm	150 mm	150 mm
G=2,1667 mm	N=10 mm	-	-	-	-	600 mm
G=1,1667 mm	N=10 mm	-	-	-	250 mm	200 mm
G=0,6667 mm	N=10 mm	-	450 mm	200 mm	150 mm	50 mm
G=2,1667 mm	N=20 mm	-	-	-	-	-
G=1,1667 mm	N=20 mm	-	-	-	400 mm	300 mm
G=0,6667 mm	N=20 mm	-	-	300 mm	200 mm	150 mm

**Tabla 3. Dimensiones mínimas de rodillos para un juego de corte de punzón máximo del 8% con diferentes diámetros y longitudes de punzón.**

El análisis individualizado de las curvas de la figuras 5 y 6 muestra que el aumento del diámetro de los rodillos del sistema genera un descenso progresivo en el tamaño del juego de corte. Por otro lado, la reducción de la longitud del punzón presenta un descenso brusco en las dimensiones del juego de corte, lo que arriba a la conclusión de que se producen mejores resultados al acortar la longitud del punzón que al aumentar las dimensiones del sistema (rodillos). Se puede observar que al disminuir en 32 % la longitud del punzón disminuye en un 40 % el tamaño del juego de corte, mientras que el aumento en un 50 % del tamaño de los rodillos puede generar una disminución del juego de corte solo del 23 %, lo que conduce a dimensiones en el sistema que van en contra de la ergonomía del equipo.

La tabla 3 permite una visión global de las medidas que debe tener un sistema de punzonado continuo para generar un punzonado con un juego de corte menor al 8% del espesor de la chapa, tomando en cuenta los espesores de chapa que hay en el mercado, para chapas laminadas en frío, con punzones que oscilan entre 2,5 y 20 mm de diámetro, longitudes que van desde 6,1667 hasta 0,6667 mm y rodillos con radios desde 50 mm. Los cálculos muestran que punzones con longitudes mayores a 2,1667 mm sobrepasan el valor del juego de corte de 8% de los espesores de chapa, lo que exige dimensiones de rodillos que exceden a los 450 mm de diámetro, pero sólo para chapas con 2 mm de espesor.

El análisis combinado de la diferencia numérica de las curvas presentes en la figura 5 y 6 describen claramente que el aumento de diámetro en el punzón acrecienta de forma notable el juego de corte  $S_2$ , de ahí que para evitar el rápido deterioro del punzón este no solo debe poseer poca longitud, como se nota en el análisis individualizado de cada gráfica, sino también un diámetro de pequeñas dimensiones. Por ejemplo, para  $R=200$  mm y  $G=4,1667$  mm en la figura 5 y 6, entonces  $S_2=0,7$  mm si  $N=5$ , mientras que para  $N=10$  mm  $S_2=1$  mm, lo que genera un aumento de juego de corte en más de un 40 %.

En caso de que se deseen obtener agujeros de 10 mm de diámetro a un paso fijo en una bobina de 1 mm de espesor, el sistema a utilizar debe tener un punzón con una longitud máxima de 0,6667 mm y un rodillo mayor o igual a 200 mm de diámetro, en cuyo caso el juego de corte generado, con un valor de 0,08 mm será máximo, evitando que se produzca una fuerza excesiva, un producto imperfecto y el deterioro de los elementos del sistema [15]. Todos los valores de la tabla se basan en el juego de corte máximo necesario para generar un punzonado sin originar una fuerza excesiva al inicio del corte (tabla 3).

Los valores de la tabla expresan las limitaciones del sistema ya que exige que los punzones sean de muy poca longitud o el diámetro de los rodillos excesivamente grande de

dimensiones anti ergonómicas, además que el punzonado se realice a un paso único punzonando espesores limitados de chapa y agujeros de muy pequeñas dimensiones. Muchos de estos sistemas son diseñados colocando el punzón de modo que forme parte directa del rodillo, dando por hecho que su ciclo de vida es corto y que será simplemente desechado cuando cumpla con los punzonados calculados.

## **CONCLUSIONES**

La relación entre los ángulos del sistema y el momento de penetración del punzón en la matriz, de los mecanismos, demuestra que todo punzonado rotatorio, donde el punzón se halle fijo al sistema, genera punzonado rotatorio.

Todo punzonado rotatorio mejora algunas características constructivas y tecnológicas de las punzonadoras intermitentes, pero conlleva a limitaciones de vida en el punzón, dimensionales en el sistema, y de distancia entre agujeros y de peso entre otras.

Se estableció, así mismo, una relación entre la longitud y diámetro del punzón y el radio del rodillo que permitió obtener una expresión que accede a minimizar el ángulo de ataque del punzón y regular adecuadamente el juego de corte de las punzonadoras rotativas.

La ampliación de dimensiones en longitud y diámetro del punzón, debe venir acompañado de un aumento de diámetro, y por ende peso y costo del rodillo del sistema de punzonado rotatorio para mantener la calidad de punzonado y no acortar la vida de la herramienta.

El aumento de longitud o diámetro del punzón, manteniendo constante el diámetro de los rodillos, trae un aumento del ángulo “  $\alpha$ ”, lo que se traduce en un incremento en el valor del vector que produce la flexión sobre el punzón y un aumento en el valor del juego de corte.

El aumento del valor del juego de corte acrecienta la fuerza necesaria para punzonar la lámina que sumada al aumento de ángulo, puede generar cargas en el sistema que colapsen rápidamente al punzón.

## **REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

1. Groover, M.P. *Fundamentos de manufactura moderna materiales, procesos y sistemas*. México. 1ra edition. P.-H.H. S.A. 1ra. 1997, 1086. 52,472,508 p. ISBN: 968-880-846-6.
2. Schey, J. *Procesos de Manufactura*. México McGraw-Hill. 2002, 1020. 400-409,435-446 p.
3. Paul, W. Rotary punching revisited. *Thefabricator*. 2009, vol. Disponible en Web: <http://www.thefabricator.com/article/rollforming/rotary-punching-revisited>. [consultado 4 de abril de 2010]
4. Schober USA, I. *Punching ROTATY*. 2016 septiembre 2016]; Disponible en Web: <http://www.schoberusa.com/schober.html>. [consultado en septiembre 2016]

5. Baust, *Rotaty tool and accessories*, B.S. GmbH, Editor. 2015: Langenfeld, Germany.
6. Li, J.Z. *CAD, 3D Modeling, Engineering Analysis, and Prototype Experimentation*. New York Springer. 2015, 255. 85,237 p. ISBN: ISBN 978-3-319-05920-4
7. *Rotatory die of sheet metal*. 2016, Google Patents.
8. Poliquin, R., *AN APPARATUS AND METHOD FOR MANUFACTURING A STEEL COMPONENT*. 2015, US Patent 20,150,352,680.
9. *Rotary punch device*. 2014, Google Patents.
10. Barnes, B.A., et al., *Rotary punch*. 2008, Google Patents.
11. Machinery, H.H.E.B.o.t.a.s. *Punch Rotaty*. 2010; Disponible en Web: [www.hillrotary.com](http://www.hillrotary.com).  
[consultado en
12. Bazó, R. *Diseño de una perforadora rotatoria vertical para operaciones de punzonado*. INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA, 2009.
13. Dehmani, H., et al. Experimental study of the impact of punching operations on the high cycle fatigue strength of Fe–Si thin sheets. *International Journal of Fatigue*. 2016, vol. 82, Part 3, p. 721-729. ISSN: 0142-1123. Disponible en Web: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142112315003230>. [consultado
14. Surina, M., *Rotary punching apparatus*. 2004, Google Patents.
15. Rossi, M. *ESTAMPADO EN FRIO DE LA CHAPA Estampas, Matrices, Punzones, Prensas y Máquinas*. Madrid.DOSSATA edition. DOSSATA. 1979, 24-25,259-268. 712 p.