

Análisis numérico del estado tensional en punzones de corte de chapas metálicas ante la variación de sus factores geométricos

Numerical analysis of stress state in metallic-sheet blanking punches over variation of their geometric factors

Santiago Amaury Santana-Reyes^{1,*}, Inhaudis Calzada-Pompa¹, Yusimit Karina Zamora-Hernández², Yoandrys Morales-Tamayo³

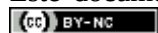
¹Universidad de Granma. Departamento de Ingeniería Mecánica. Carretera a Manzanillo, km 17 ½, Peralejo, Bayamo, Granma, Cuba.

²Universidad Técnica de Cotopaxi. Ave. Los Almendros y calle Pujili sector La Virgen, La Maná. Ecuador.

³Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad Técnica Estatal de Quevedo. Ave. Carlos J. Arosemena 38. Quevedo, Ecuador.

*Autor de correspondencia: ssantanar@udg.co.cu

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0 Internacional](#)



Recibido: 26 enero 2022 **Aceptado:** 28 mayo 2022 **Publicado:** 30 mayo 2022

Resumen

Uno de los procesos más empleados de conformado para producciones en serie es el corte de chapas metálicas. El comportamiento tensional de las herramientas de corte es una cuestión sumamente importante en el proceso antes referido. En esta investigación se simula, haciendo uso del Método de los Elementos Finitos, el corte de agujeros de 16 mm de diámetro en chapas de 2 mm de espesor. Se analizan parámetros geométricos del punzón de corte como: la variación de la geometría del radio de acuerdo y la excentricidad entre la Línea de Simetría del Punzón (LSP) y el Centro de Gravedad del Esfuerzo de Corte (CGEC), para determinar la influencia de los mismos en el estado tensional de dicha herramienta. Se evidencia que el empleo del radio de Bézier en punzones de corte de metales garantiza una reserva resistiva por sobre los punzones con radio circular. Existe un aumento en el valor de las tensiones a medida que aumenta la excentricidad entre la LSP y el CGEC; finalmente, se relacionan en un modelo matemático la influencia de esta condición geométrica en el comportamiento tensional del punzón de corte de metales, teniendo en cuenta, además la tipología geométrica del radio de acuerdo.

Palabras clave: Punzones de corte, Factores geométricos, Estado tensional, Método de Elementos Finitos

Abstract

One of the most used forming processes for series production is the cutting of metal sheets. The tensional behavior of the cutting tools is an extremely important issue in the aforementioned process. In this research, using the Finite Element Method, the cutting of 16 mm diameter holes in 2 mm thick plates is simulated. Geometric parameters of the cutting punch are analyzed, such as: the variation of geometry of agreement radius and eccentricity between Punch Symmetry Line (PSL) and Shear Force of Gravity Center (SFGC), to determine their influence in the stress state of said tool. It is evident that the use of the Bezier radius in metal cutting punches guarantees a

resistive reserve over punches with circumferential radius. There is an increase in the stress value as the eccentricity between the PSL and the SFGC increases; finally, the influence of this geometric condition on the stress behavior of metal cutting punch is related in a mathematical model, also taking into account the geometric typology of agreement radius.

Keywords: Blanking punches, Geometric factors, Stress state, Finite Element Method

1. Introducción

En la actualidad los artículos de chapas metálicas, fabricados a partir del proceso de corte, con configuraciones geométricas complejas son utilizados en diferentes campos industriales como: electrónica, automotriz y de utensilios del hogar [1]. Existen miles de productos manufacturados a partir de piezas de chapa metálica y, en casi todos, el primer paso en el conformado de dichas piezas involucra el corte de la chapa con la forma apropiada a partir del proceso físico del cizallado [2]. En la práctica industrial, los punzones empleados en el conformado en frío están sujetos a un diseño paramétrico y a frecuentes adaptaciones, lo cual hace de la configuración geométrica de los mismos un asunto de vital importancia [3]. Estas herramientas, generalmente, tienen una configuración robusta en la zona de montaje a la placa porta-punzones, la cual disminuye en la zona de corte.

Una de las aplicaciones más beneficiosas de la integración del Diseño Asistido por Computadora (CAD, por sus siglas en inglés) y la Manufactura Asistida por Computadora (CAM, por sus siglas en inglés) consiste en el maquinado de formas complejas en áreas como la manufactura de moldes, dados de estampado, matrices de forjado y de extrusión, así como rodillos de laminación, etc [4]. En ese sentido, Fan, et al. [5] demuestran la posibilidad de introducir modelos matemáticos, como el polígono de Bézier, en máquina-herramientas CNC (Control Numérico Computarizado). Por tanto, la tecnología de maquinado por arranque de virutas CNC demuestra su flexibilidad para obtener piezas de geometría especial, particularmente punzones de corte de metales.

Además de realizarse acciones encaminadas a la obtención de punzones de corte de metales con geometría favorable a la disminución de tensiones internas, es importante establecer, con cierta exactitud, el centro de gravedad de la configuración geométrica de la chapa metálica. Esta determinación tiene como objeto poder situar la estampa debajo del carro de la prensa de modo que la línea media de las guías, especificada por el eje del agujero y el mango que conecta al troquel con la prensa, coincida con el CGEC [6]. La falta de alineación entre la LSP y el CGEC en prensas de conformado de metales durante la actividad industrial, suele ser común debido a errores de fabricación y montaje de los componentes del troquel de corte. La condición geométrica antes descrita constituye una importante causa de salida de servicio de la herramienta, que frecuentemente, es ignorada de los análisis resistivos realizados para el diseño de los punzones de corte de metales.

El Método de los Elementos Finitos (MEF) es una técnica de simulación numérica que permite estudiar la influencia del comportamiento de discontinuidades geométricas en elementos mecánicos, según lo demuestran en sus investigaciones Amé, et al. [7] y Robles, et al. [8], quienes establecen la viabilidad de la simulación numérica para el análisis de la influencia de los cambios de sección en el comportamiento tensional de las piezas.

En el caso de los punzones de corte de metales cabe destacar la investigación realizada por Morales-Leslie, et al. [9], quienes particularizaron en la influencia del radio de acuerdo circular en el esfuerzo tensional de la herramienta, mediante el MEF. Los autores resaltan que los cambios bruscos en las secciones transversales pueden conllevar a zonas de alta concentración de tensiones

comprometiendo, de esta manera, el correcto funcionamiento de la herramienta. Singh, et al. [10], examinan, haciendo uso del MEF, el comportamiento de la fuerza necesaria para el corte y la deformación en los punzones, atendiendo a la configuración geométrica de la zona de corte de la herramienta. Los autores destacan el efecto negativo que tiene la excentricidad de la aplicación de la fuerza sobre la rigidez de la herramienta de conformado.

El MEF es ampliamente empleado en la simulación numérica de punzones de conformado de metales. En ese sentido existen autores como Santana-Reyes et al. [11], quienes desarrollan un procedimiento para la obtención de modelos CAD de piezas prismáticas, particularmente punzones de corte, el cual tiene como última etapa el desarrollo de análisis por el MEF para determinar el comportamiento tensional de dichas herramientas. En ese mismo sentido, Junkes, et al. [12], analizan, haciendo uso del MEF, la influencia de la variación del ángulo de corte del punzón sobre el esfuerzo de cizallamiento en la pieza en bruto. De igual manera, a partir de la utilización del método numérico antes mencionado, Avadhani et al. [13], estudian diferentes operaciones realizadas por un punzón de corte simple. Los cálculos numéricos fueron realizados para establecer: las tensiones de von Mises, ciclos de vida a fatiga, fuerza crítica de pandeo y la deformación total del referido punzón de corte.

Es importante el análisis del comportamiento tensional de los punzones de corte, pues el impacto económico de un diseño deficiente de estas herramientas puede provocar grandes costos en el proceso productivo. Los errores propios del diseño en punzones de corte suelen ser frecuentes y en muchas ocasiones prevenibles, por tanto la mejora constante en el desarrollo de las herramientas de conformado constituye un reto para el desarrollo de la tecnología de conformado de metales. El MEF ha demostrado ser una técnica que permite determinar el comportamiento resistivo de estas herramientas en una etapa previa a su manufactura, lo cual conlleva a mejoras de rendimiento en el proceso de diseño, puesto que ahorra coste de recursos materiales y disminuye el tiempo de análisis.

Así es que, se plantea como objetivo de la investigación establecer la influencia de la geometría del radio de acuerdo y la excentricidad entre LSP y el CGEC sobre el comportamiento del estado tensional en punzones de corte de agujeros circulares. Estos factores dependen íntegramente de las decisiones de diseño y del método de elaboración.

2. Materiales y Métodos

Configuración geométrica de la curva en la zona de transición de la sección transversal

En muchas situaciones típicas del diseño de máquinas, las discontinuidades geométricas inherentes son necesarias para que las piezas cumplan con su destino de servicio [14]. Tradicionalmente, se emplean geometrías circunferenciales en la construcción de las zonas de transición de la sección transversal. No obstante, con la ventaja que ofrece el maquinado CNC, es posible fabricar geometrías que permitan una menor concentración de tensiones. En este sentido la configuración geométrica con un radio de Bézier, en la zona de transición de la sección transversal en un punzón de corte de láminas de metal, es una opción altamente prometedora en función de reducir los valores tensionales.

La curva de Bézier, es un instrumento matemático para la modelización de curvas y superficies, nacieron como una aplicación concreta en el seno de la industria automovilística [15]. Una curva de Bézier pasa a través del primero y del último vértice y emplea los otros puntos de control para generar una curva combinada [16]. El polinomio de Bézier constituye una herramienta eficaz en la construcción de curvas suavizadas (Ver Figura 1).

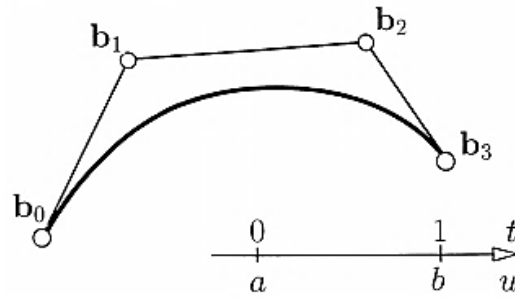


Fig.1 Polígono de Bézier en una curva cúbica [17]

La definición de la curva de Bézier sobre el intervalo $[a,b]$ se presenta en la Ecuación 1.

$$b(u(t)) = \sum_{i=0}^n b_i B_i^n(t) \quad (1)$$

Donde:

B_i^n = Polinomio de Bernstein de grado n .

b_i = Puntos de Bézier.

t = Parámetro local de b .

u = Parámetro global de b .

Modelo geométrico del punzón de corte

En la Figura 2 se muestra las dimensiones del modelo CAD del punzón circular empleado como caso de estudio, la configuración geométrica es de tres secciones, la cual es típica de este tipo de herramientas de conformado.

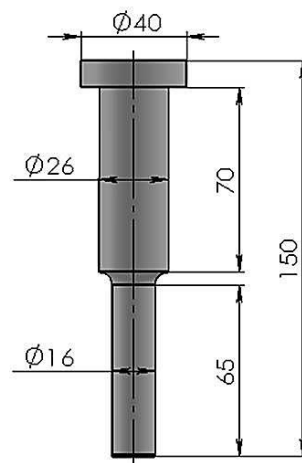


Fig.2 Modelo CAD del punzón de corte de agujeros circulares

La geometría del radio de acuerdo del punzón de corte de metales analizado en esta investigación, está definida a partir de una curva de Bézier. Se crean varios modelos CAD del punzón a partir de la variación geométrica derivada del número del polinomio de Bernstein, teniendo como referencia el arco circunferencial de un radio de 5 mm (Ver Figura 3). Por otro lado, se construye un modelo CAD de un punzón de corte con un radio de acuerdo, teniendo como tipología geométrica el arco circunferencial, el cual constituye el modelo de comparación para los valores tensionales.

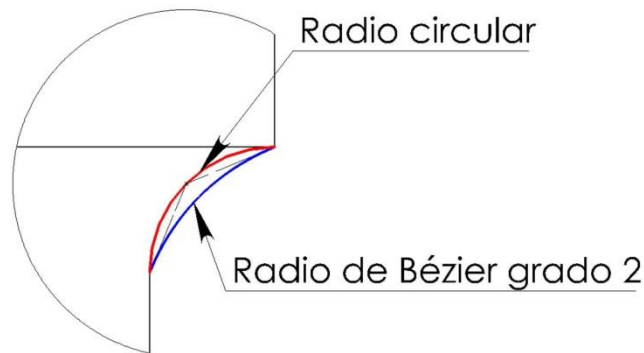


Fig.3 Configuración geométrica del radio de acuerdo en el punzón de corte de metales

Consideraciones para el análisis por el MEF del punzón de corte

El estudio realizado a partir del MEF en el punzón de corte parte de la suposición del comportamiento isotrópico elástico lineal del material del punzón. Por otro lado, la fricción entre la lámina y el punzón es despreciada, al igual que la carga de impacto que surgen sobre la herramienta de conformado. Estas simplificaciones permiten centrar el análisis tensional en el instante en el que se desarrolla la máxima fuerza de corte.

Línea de Acción de la Fuerza de Corte y restricciones del modelo CAD del punzón

Como parte de la discretización del proceso de simulación numérica en la Figura 4 se muestra la disposición de la fuerza de corte y de la restricción en el modelo CAD del punzón. En esta investigación se plantea como premisa que la excentricidad entre la LSP y la CGEC tiene un valor máximo de hasta 5 mm.

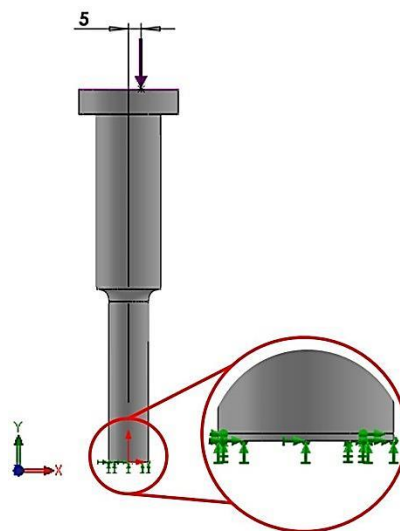


Fig.4 Acción de la fuerza de corte y la reacción en el punzón con excentricidad (las dimensiones están dadas en mm)

En el análisis estático lineal se estudia el momento en el que el punzón entra en contacto con la chapa metálica. La fuerza de corte, determinada en la Ecuación 2 propuesta por Lingaiah [18], actúa en dirección a la acción de corte a causa del desplazamiento de la prensa.

$$F_{m\acute{a}x} = P \cdot t \cdot \tau_t = 50,265 \text{ mm} \cdot 2 \text{ mm} \cdot 240 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2} = 24\,127,2 \text{ N} \quad (2)$$

Donde:

$F_{\text{máx}}$: Fuerza máxima de corte.

P: Perímetro a cortar (50,265 mm).

t: Espesor de la chapa a cortar (2 mm).

τ_t : Carga de rotura cortante del material a cortar, acero con 10% de carbono (240 N/mm^2) [18].

El tipo de restricción de movimiento aplicada es fijo, la cual no permite ningún grado de libertad de la pieza. La restricción en la herramienta se ubica en la cara frontal de corte y en la cara circular a una distancia que equivalente a la tercera parte del espesor de la chapa metálica (0,667 mm).

Material del punzón de corte

El material que se propone en la investigación para el punzón es un acero AISI D2, que de acuerdo con Surberg et al. [19] y Abdelwaheb et al. [20] es un acero altamente utilizado en la fabricación de matrices y punzones para el proceso de conformado de metales en frío. Las propiedades mecánicas se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades mecánicas del acero AISI D2 [21]

Propiedad	Valor	Unidad de medida
Límite de rotura	2 200	MPa
Módulo elástico	209	GPa
Coeficiente de Poisson	0,3	---

Mallado de los modelos CAD del punzón de corte

La malla empleada en el modelo CAD del punzón de corte es del tipo sólida de elementos tetraédricos de alto orden con 10 nodos y 3 grados de libertad por nodo. Se ha disminuido el tamaño de los elementos de la malla en la zona del cambio de sección transversal (ver Figura 5); en aras de garantizar una adecuada precisión en los resultados en esa zona de particular interés; este procedimiento es altamente recomendable y utilizado por autores como: Carro-Suárez et al. [22], Morales-Leslie et al. [9] y Almaguer et al. [23] en los modelos de análisis por el MEF propuestos por dichos autores.

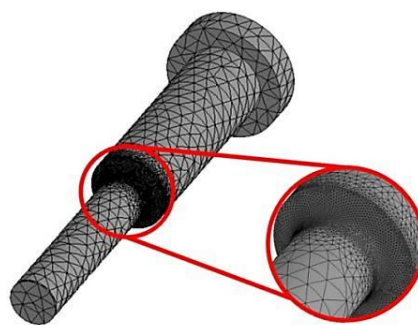


Fig.5 Mallado del modelo CAD del punzón de corte

3. Resultados y Discusión

La convergencia del valor de las tensiones, independientemente de la variación del tamaño del elemento de malla, constituye una acción imprescindible en el análisis por el MEF, como lo demuestran en sus investigaciones: Estrada-Cingualbres, et al. [24], Ramos-Botello et al. [25] y Guardia-Puebla, et al. [26]. En los casos analizados en esta investigación, se observa en la Figura 6 que a partir del elemento de malla con tamaño máximo de 4 mm y con tamaño mínimo de 0,4 mm, el valor de las tensiones se mantiene estable (el error relativo de los valores no superan el 5 %).

Este comportamiento es similar para ambas configuraciones geométricas de los punzones de corte de metal. En el estudio numérico realizado se emplea una malla con elementos de 5 mm y 0,5 mm de tamaño máximo y mínimo respectivamente.

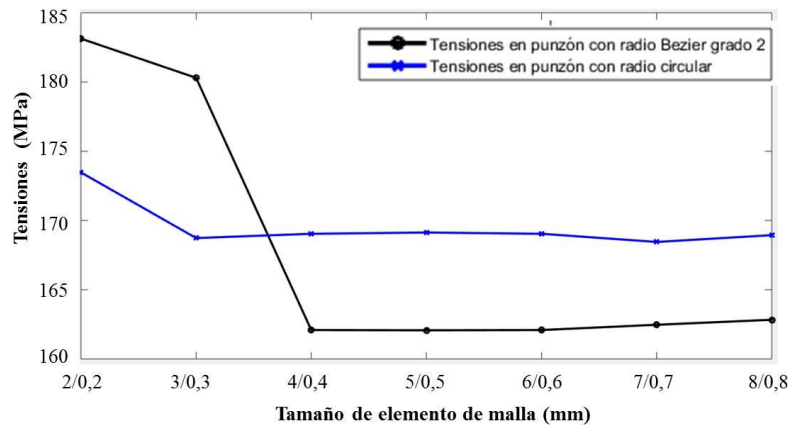


Fig.6 Sensibilidad del modelo de análisis numérico ante la variación

La distribución de los valores tensionales, de acuerdo al criterio de von Mises, se muestran en la Figura 7, para el caso de los modelos de punzones con el radio de acuerdo del tipo circunferencial y de Bézier (grado 2) sin excentricidad entre la LSP y el CGEC. Se observa una distribución homogénea de las tensiones en la zona de cambio de sección de los punzones en ambos modelos, encontrándose los valores máximos en el modelo con un radio circunferencial (169,13 MPa), mientras que el modelo con el radio Bézier (grado 2) presenta valores menores (162,7 MPa).

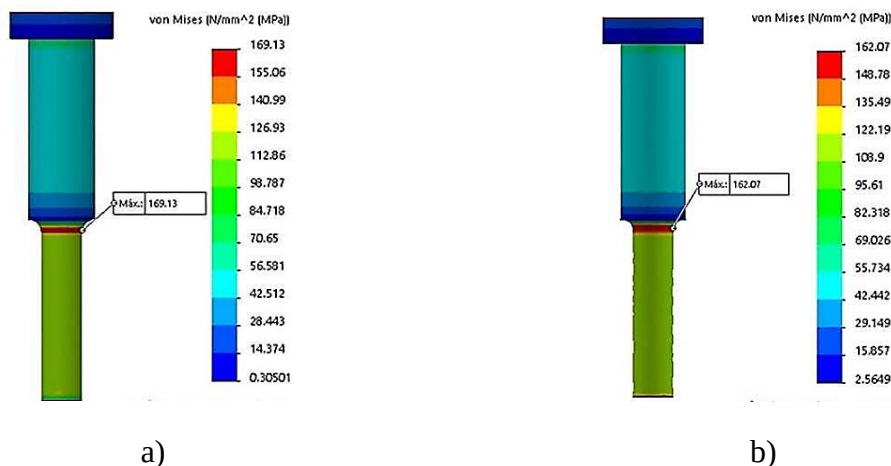


Fig.7 Distribución de las tensiones en el punzón de corte sin excentricidad entre la LSP y el CGEC; a) Punzón con radio circunferencial y b) Punzón con radio Bézier (grado 2)

Este comportamiento tensional es consistente con los resultados encontrados por Morales-Leslie et al. [9], Singh et al. [10] y Avadhani et al. [13], quienes plantean que la zona más crítica de este tipo de punzones, con geometría larga y escalonada, es la zona de cambio de sección transversal.

En la Figura 8 se muestra el comportamiento tensional de los punzones con radio circunferencial y con radio de Bézier (grado 2), que cuentan con una excentricidad máxima de 5 mm entre la LSP y el CGEC. Se observa que las máximas tensiones, de acuerdo al criterio de von Mises, se encuentran en la zona de cambio de sección con un valor de 539,94 MPa y 511,69 MPa en el modelo con radio circunferencial y de Bézier respectivamente.

En este caso, los máximos valores no superan el límite elástico del material, por lo que la pieza no se encuentra comprometida tensionalmente; sin embargo, la distribución no es homogénea pues se encuentra concentrada en la región de compresión del esfuerzo de flexión.

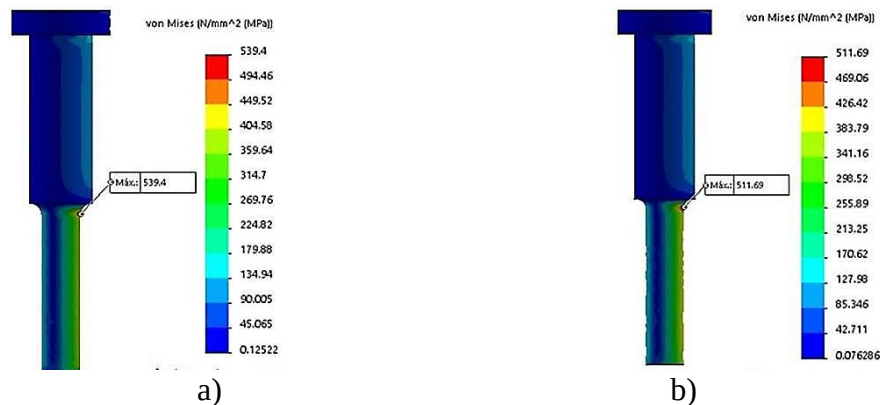


Fig.8 Distribución de las tensiones en el punzón de corte con excentricidad (5 mm) entre la LSP y el CGEC; a) Punzón con radio circunferencial y b) Punzón con radio Bézier (grado 2)

La excentricidad entre la LSP y el CGEC provoca un momento flector sobre el punzón, esta sollicitación resistiva adicional, al esfuerzo de compresión normal durante el funcionamiento de la herramienta, puede provocar su salida de servicio de manera prematura.

En la Tabla 2 se muestran los resultados obtenidos del análisis numérico del comportamiento tensional del punzón de corte de metales, obtenidos mediante el análisis numérico, y considerando la tipología de los modelos geométricos de radio: circunferencial y de Bézier; en este último caso se consideraron varios grados en el polinomio de Bernstein.

Tabla 2. Comportamiento tensional del punzón de corte de metales en relación entre la excentricidad de la LSP y el CGEC

Tensiones (MPa)	Radio circular	Radio Bézier (grado 2)	Radio Bézier (grado 12)	Radio Bézier (grado 22)	Radio Bézier (grado 32)	Radio Bézier (grado 42)	Radio Bézier (grado 52)
Excentricidad (mm)							
0	169,13	162,07	164,28	164,41	164,73	164,90	165,01
0,5	205,62	196,40	196,46	196,59	196,35	196,49	196,48
1,0	242,68	231,00	230,46	231,69	232,40	231,54	231,42
1,5	279,61	266,49	266,55	266,79	266,45	266,60	266,37
2,0	316,70	301,53	301,61	301,90	301,49	301,67	301,44
2,5	353,92	336,58	336,58	336,81	336,54	336,81	336,60
3,0	391,01	371,62	371,40	371,90	371,58	371,88	371,77
3,5	428,10	406,67	406,70	406,99	406,63	406,96	406,98
4,0	465,20	441,62	441,76	442,13	445,79	442,03	442,18
4,5	502,29	476,66	476,81	477,31	476,85	477,02	477,39
5,0	539,40	511,69	511,91	512,50	511,94	512,09	512,60

Atendiendo a los resultados encontrados, es posible afirmar que existen mayores valores de las tensiones en el punzón con radio circular que en el punzón con radio de Bézier. La máxima diferencia del valor tensional entre ambos modelos geométricos, atendiendo a la condición de mayor excentricidad, es de 26,8 MPa.

La Figura 9 muestra la comparación de los resultados de los valores tensionales, determinados por el MEF, en los punzones con radio circunferencial y radio de Bézier. Se observa que existe un

aumento en el valor de las tensiones a medida que aumenta la excentricidad entre la LSP y el CGEC.

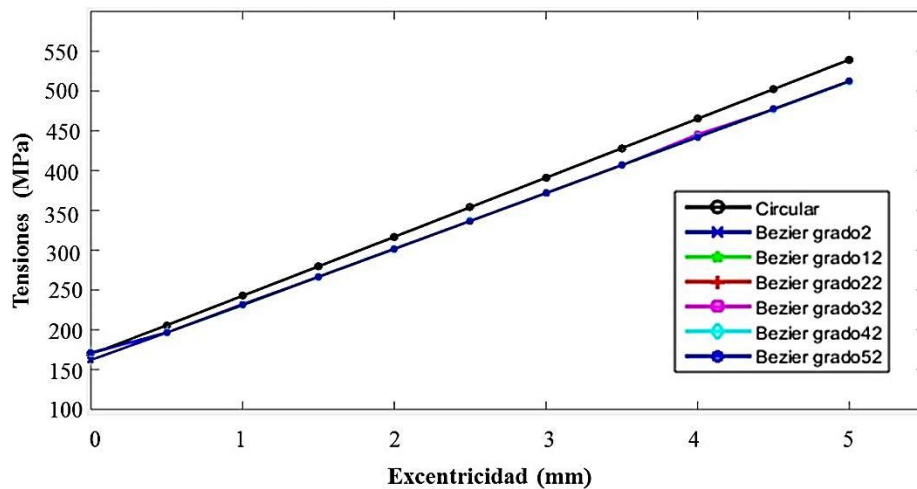


Fig.9 Comparación de los valores tensionales en los punzones con radio circular y de Bézier

De igual manera, se aprecia que la variación del grado del polinomio de Bernstein no influye, de manera significativa, en las tensiones presentes en el punzón con radio de Bézier, al encontrarse los valores tensionales muy próximos entre sí. Claramente, se evidencia que el empleo del radio de Bézier en la zona de cambio de sección transversal en los punzones de corte de metales garantiza una reserva resistiva por sobre los punzones con radio circunferencial, lo cual constituye una indudable oportunidad para el desempeño exitoso de estas herramientas de conformado, independientemente del reto tecnológico y económico de su fabricación.

Validación de los resultados numéricos

Se emplea como método de validación de los resultados: la comprobación de la estabilidad del modelo de análisis del punzón de corte, la cual muestra un equilibrio entre el valor de las cargas y las reacciones (con un error nulo). En la Tabla 3 se muestra el valor de la fuerza resultante y sus componentes presentes en la zona de las restricciones para ambas configuraciones geométricas del punzón de corte, la magnitud de la fuerza resultante es igual al valor de la fuerza de corte aplicada al modelo CAD del punzón. De esta manera, se comprueba que existe una adecuada condición resistiva en la pieza, al considerarse el modelo de análisis del punzón como un cuerpo libre, por tanto los resultados tensionales son adecuados desde el punto de vista resistivo.

Tabla 3. Valor de la fuerza resultante y sus componentes presentes en la zona de las restricciones en el modelo CAD de los punzones de corte de metal.

Componente	Punzón sin excentricidad	Punzón con excentricidad
X	0	1,5928
Y	24 127,2	24 127,19
Z	0	0
Resultante	24 127,2	24 127,2

4. Conclusiones

El análisis numérico realizado posibilitó establecer que la condición geométrica de la falta de alineación entre la LSP y el CGEC genera un aumento de los valores tensionales del punzón de corte localizados en el radio de acuerdo, independientemente de la tipología geométrica del radio de

acuerdo. A partir de los resultados del estudio de las tensiones se pudo determinar que, los punzones con radio de Bézier presentan un comportamiento más favorable que los punzones con radio circular, debido a que en esta última tipología geométrica se observan mayores valores de las mismas.

Referencias

1. Sontamino, A., Thipprakmas, S., *Cut Surface Features in Various Die-Cutting Processes*. Key Engineering Materials, 2017. **719**: p. 127-131. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.719.127>
2. Hambli, R., Guerin, F., Dumon, B., *Numerical Evaluation of the Tool Wear Influence on Metal-Punching Processes*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2003. **21**(7): p. 483-493.
3. Altan, T., *Metal forming handbook*, 1998. Berlín, Springer-Verlag. ISBN: 3-540-61185-1.
4. Fitter, H., Pandey, A., Mistry, J., Patel, D., *Comparison of Parametrically Programmed Machining with CAM System Machining for Continuity Bezier Curves Based on Various Parameters*. Procedia Engineering, 2014. **97**: p. 1167-1177. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.12.395>
5. Fan, W., Lee, C., Chen, J., Xiao, Y., *Real-time Bezier interpolation satisfying chord error constraint for CNC tool path*. Science China, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11431-015-599-2>
6. Rossi, M., *Estampado en frío de la chapa. Estampas, Matrices, Punzones, Prensas y Máquinas*. 1979. Madrid, España: Editorial Dossat S.A. ISBN: 84-273-0489-2.
7. Amé, R. M., Dasso, G. M., Lezama, D., *Tensiones localizadas producidas por discontinuidades geométricas combinadas*. Revista Cubana de Ingeniería, 2011. **2**(2).
8. Robles, S., Ortega, N., *Diseño de concentradores de tensiones en elementos mecánicos, mediante las tensiones y desplazamientos superficiales*. Mecánica Computacional, 2013. **32**: p. 3639-3650.
9. Morales-Leslie, J.F., Macías-Socarrás, I., Santana-Reyes, A.S., Jiménez-Rodríguez, R.A., *Análisis de la influencia del radio de acuerdo en las tensiones que ocurren en un punzón para el agujereado de chapa utilizando el MEF. Caso de estudio*. UTCiencia, 2017. **4**(3): p. 129-136.
10. Singh, U.P., Streppel, A.H., Kals, H.J.J., *Design study of the geometry of a punching/blanking tool*. Journal of Materials Processing Technology, 1992. **33**: p. 15.
11. Santana-Reyes, S.A., Morales-Leslie, J.F., Arias-Hidalgo, R.M., Alvarez-Cabrales, A., Ramos-Botello, Y.M., *Procedimiento para la obtención de modelos CAD de piezas prismáticas a partir de la técnica de digitalización de proyecciones ortogonales. Caso de estudio de un punzón de llaves de cerraduras*. Científica, 2021. **25**(1): p. 1-13. DOI: <https://doi.org/10.46842/ipn.cien.v25n1a02>
12. Junkes, F., Schaeffer, L., *Estudo do processo de puncionamento por punção com ângulo convexo assistido por simulação numérica*. Tecnol. Metal. Mater. Miner., 2013. **10**(3): p. 215-223. DOI: <http://dx.doi.org/10.4322/tmm.2013.031>
13. Avadhani, S. P., Phadnis, P., Nikhil, R., Patil, S., *Design and analysis of blanking and piercing die punch*. International Research Journal of Engineering and Technology, 2017. **4**(5): p. 2760-2765.
14. Mott, R., Vavrek, E. M., Wang, J., *Machine elements in mechanical design*, 2018. New York, Estados Unidos: Pearson Education. ISBN: 978-0-13-444118-4.
15. Galdames-Bravo, O., *Modelización con curvas y superficies de Bézier*. Modelling in Science Education and Learning, 2011. **4**(14): p. 181-193.
16. Kalpakjian, S., Schmid, S.R., *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*, 2008. México: Pearson Educación. ISBN: 978-970-26-1026-7.

17. Paluszny, M., Prautzsch, H., Boehm, W., *Métodos de Bézier y B-Splines*, 2005. Karlsruhe, Alemania: Springer-Verlag. ISBN: 3-937900-47-3.
18. Lingaiah, K., *Machine desing databook*, 2004. Michigan, Estados Unidos: McGraw-Hill. ISBN: 0-07-136707-1.
19. Surberg, C.H., Stratton, P., Lingenhole, K., *The effect of some heat treatment parameters on the dimensional stability of AISI D2*. Cryogenics, 2008. **48**: p. 42-47. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2007.10.002>
20. Abdelwaheb, Z., Fatma, B.S., Khaled, E.A., Hakan, A., *AISI D2 punch head damage: Fatigue and wear mechanism*. Engineering Failure Analysis, 2021. **129**: p. 1-17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105676>
21. Santana-Reyes, S., Santana-Milán, R., Guardia-Puebla, Y., Morales-Leslie, J., *Determinación de los principales factores geométricos que influyen en el desgaste de las matrices de extrusión directa empleadas en la obtención en frío de perfiles de aleaciones de aluminio*. Ingeniería Investigación y Tecnología, 2019. **20**(4): p. 1-11. DOI: <https://dx.doi.org/10.22201/fi.25940732e.2019.20n4.037>
22. Carro-Suárez, J., Flores-Salazar, F., Flores-Nava, I., *Análisis de esfuerzo de contacto en engranes rectos aplicando el criterio de Hertz con ingeniería asistida por computadora*. Científica, 2012. **16**(1): p. 25-32.
23. Almaguer, P., Zambrano, P., Estrada, R., *Evaluación numérica del estado tensional en probetas compactas simuladas y escaneadas*. Ingeniería Mecánica, 2018. **21**(1): p. 36-44.
24. Estrada-Cingualbres, R.A., Calzadilla-Dubras, H., Martínez-Grave De Peralta, J., Valera-Llanes, R., Pérez-Pupo, J.R., *Analysis and optimization of the spin beam in the CCA-5000 Cuban sugarcane harvester*. Revista Facultad de Ingeniería, **20022**(102): p. 96-107. DOI: <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20200804>
25. Ramos-Botello, Y., Arias-Hidalgo, R., Bosch-Cabrera, J., Estrada-Cingualbres, R., *Análisis numérico comparativo del comportamiento a fatiga de dos osteosíntesis utilizadas en el tratamiento de la fractura de cadera 31 Al .1*. Ingeniería Investigación y Tecnología, 2017. **18**(4): p. 445-455. DOI: <http://dx.doi.org/10.22201/fi.25940732e.2017.18n4.039>
26. Guardia-Puebla, Y., Rodríguez-Pérez, S., Pacheco-Gamboa, R., Ramos-Botello, Y., Palma-Ramírez, L., *Análisis estructural de un bioreactor anaerobio de fibrocemento por el método de los elementos finitos*. Ingeniería Mecánica, 2015. **18**: p. 7.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer al Grupo de Soluciones Ingenieriles Asistidas por Computadora (SIAC) del Departamento de Ingeniería Mecánica perteneciente a la Universidad de Granma y al Taller de Diseño de Dispositivos y Herramientales de la Empresa Mecánica Bayamo por el apoyo brindado en el desarrollo de la investigación.

Conflicto de Intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

Contribución de los autores

Santiago Amaury Santana-Reyes. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0059-0990>

Participó en el diseño de la investigación, en el análisis numérico, la recopilación e interpretación de los datos y en la redacción y edición del manuscrito.

Inhaudis Calzada-Pompa. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0977-5163>

Participó en el diseño de la investigación, la recopilación e interpretación y en la edición del manuscrito.

Yusimit Karina Zamora-Hernández. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1762-1087>

Participó en el diseño de la investigación, introducción y análisis de los resultados. Redacción del manuscrito.

Yoandrys Morales-Tamayo. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4222-6449>

Participó en el diseño de la investigación, revisión bibliográfica y análisis de los resultados.