

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

Procedure for Obtaining CAD Models of Prismatic Pieces from Orthogonal Projection Digitization Techniques. Lock Key Punch Study Case

Santiago Amaury **Santana-Reyes**¹, José Félix **Morales-Leslie**², René Misael **Arias-Hidalgo**³
Alexis **Álvarez-Cabrales**⁴, Yoan Manuel **Ramos-Botello**⁵

¹Universidad de Granma, CUBA

<https://orcid.org/0000-0002-0059-0990> | ssantanar@udg.co.cu

²Empresa Hidrogreen, MÉXICO

<https://orcid.org/0000-0002-9442-4394> | moralesjosefelix52@gmail.com

³Universidad de Granma, CUBA

<https://orcid.org/0000-0002-9661-1214> | rariash@udg.co.cu

⁴Universidad de Granma, CUBA

<https://orcid.org/0000-0003-4222-6449> | aalvarezc@udg.co.cu

⁵Universidad de Granma, CUBA

<https://orcid.org/0000-0001-7838-5981> | yramosb@udg.co.cu

Recibido 30-07-2020, aceptado 26-08-2020.

Resumen

Las técnicas de Diseño e Ingeniería Asistido por Computadora (CAD/CAE) han alcanzado enorme importancia en la industria mecánica, pues reducen tanto el costo económico como el tiempo de diseño de piezas, máquinas y componentes estructurales. En el proceso de conformado de metales es crucial controlar la geometría del punzón y la matriz de corte, pues los defectos geométricos en este tipo de herramientas suelen ser muy costosos. Para el análisis efectivo por el Método de Elementos Finitos (MEF) es importante determinar las características geométricas de los modelos que se analizan. En la presente investigación se presenta un procedimiento para determinar la geometría de un punzón de corte para llaves de cerraduras a partir de la técnica de digitalización de proyecciones ortogonales en la cual se hace uso de un proyector de perfiles digital de banco CPJ-3000A. Posteriormente, se importa la geometría a un programa CAD para obtener el modelo virtual de la herramienta de conformado. El modelo virtual presentó características geométricas aptas para el posterior trabajo de simulación numérica, demostrando que el procedimiento planteado constituye una alternativa viable para la digitalización 3D de piezas mecánicas de mediana complejidad.

Palabras clave: modelos CAD, punzón, digitalización, proyector de perfiles.

Abstract

The Computer Aid Design and Engineering technics (CAD/CAE) has reached enormous importance in the mechanical industry, because it reduces as much the economic cost as the design time of pieces, machines and structural components. In the metals forming process it is crucial the punch and die geometry control, since geometric defects in this type of tool are usually very expensive. For the effective analysis using the Finite Elements Method (FEM) it is important to determine the models geometric characteristics. In the present investigation, a procedure is presented to determine the blanking punch geometry for locks keys from digitization technique of orthogonal projections in which is used a digital bench profiles projector CPJ-3000A. Later, the geometry is imported to a CAD software for obtain the virtual model of forming tool. The virtual model presented capable geometric characteristics for a subsequent numerical simulation work, demonstrating that the presented procedure constitutes a viable alternative for the 3D digitization of medium complexity mechanical pieces.

Index terms: CAD models, punch, digitization, profile projector.

I. INTRODUCCIÓN

El diseño de productos mecánicos es una actividad crítica, porque se estima que el 70 % u 80 % del costo de desarrollo y manufactura de un producto está determinado por las decisiones tomadas en las etapas iniciales del diseño. Este proceso comienza con el desarrollo de un concepto de un producto original [1], para luego finalizar en la obtención de las dimensiones y la forma de las piezas (los elementos de máquina), otra cuestión importante es la selección de los materiales y procesos de manufactura adecuados, de modo que la máquina resultante ejecute sin falla la función esperada [2].

El proceso de conformación de metales juega un papel importante en la industria mecánica actual, varios artículos industriales y de uso común se obtienen con el empleo de este proceso. Los componentes de los troqueles, en especial el punzón y la matriz de corte, son elementos de particular importancia en el proceso de corte de la chapa metálica. Todo lo cual es corroborado por Kalpakjian y Schmid [1] quienes plantean que la geometría del punzón tiene gran importancia en la distribución y magnitud de la fuerza de corte necesaria.

La predicción de la vida útil de los punzones es usualmente realizada a partir de la experiencia de los diseñadores de herramientas de conformado [3]. No obstante, la simulación con el MEF es una técnica que permite determinar las variables físicas y el comportamiento de los elementos del sistema de conformado [4].

El MEF puede acercarse bastante a un buen diseño siempre y cuando se tomen en mayor número las condiciones reales [5]; así el primer paso en el análisis, generalmente, lo constituye la construcción geométrica del sistema a estudiar.

Según Vlajkov *et al.* [6] la utilización de los programas CAD contribuye a mejorar el proceso de diseño, las piezas complejas pueden ser rápidamente diseñadas y representadas visualmente todas sus características geométricas por parte del usuario. La tecnología CAD permite el desarrollo de modelos tridimensionales (3D) a partir de los cuales pueden producirse vistas ortogonales convencionales en dos dimensiones [7].

Uno de los aspectos que más tiempo consume de la creación de modelos virtuales en 3D es la generación de modelos geométricos de los objetos, en particular si el modelo virtual es derivado de una versión física de los mismos. El proceso de digitalización en 3D está compuesto por dos fases: la de toma de datos seguida por la de reconstrucción [8].

La generación de modelos digitales de piezas en programas CAD es posible de realizar haciendo uso de instrumentos convencionales de medición como: calibrador de pie de rey, micrómetro, galga de radio y ángulos, entre otros tal y como lo demuestra Arroyave *et al.* [9]. Así mismo, otro medio tradicional de generación de modelos digitales es la captura de imágenes fotográficas de las piezas, el cual es utilizado, con buenos resultados, por Alshennawy *et al.* [10] en su investigación.

La integración entre los equipos de digitalización y los sistemas CAD ha alcanzado significativa importancia. Hoy es posible pasar, en forma automática (a través de intercambio de información computacional), de la información obtenida de una máquina de medición por coordenadas (MMC) a un sistema CAD [9].

De igual manera, en los últimos años un gran número de tecnologías de escáner para la captura de la forma de un objeto físico están disponibles en el mercado. El punto de partida de todas estas tecnologías es la adquisición de un conjunto de coordenadas (X , Y , Z) en el espacio, llamados puntos de la nube, con una forma de salida apropiada a la geometría real del objeto [8]. Los digitalizadores de objetos tridimensionales permiten obtener el contorno superficial del objeto por más complicado e irregular que sea [11].

Una vez establecidas las características geométricas de las piezas, con el empleo de las técnicas CAE, el diseño de las mismas puede someterse al análisis de ingeniería e identificar problemas potenciales como: exceso de carga, deflexión e interferencia en superficies de contacto durante el ensamble [1]. El modelo geométrico de las piezas debe representar lo mejor posible la realidad, y luego aplicar métodos matemáticos para darle la forma y disposición adecuada para poder obtener resultados numéricos [12].

Varios autores han empleado técnicas de digitalización que permiten la obtención de modelos geométricos de piezas mecánicas, esculturas y estructuras anatómicas para un posterior intercambio de datos con programas CAD. Almaguer *et al.* [13], realizan el escaneo de una probeta compacta con el uso del escáner 3D Konika Minolta Range 7 como paso previo a la realización de simulaciones numéricas para determinar el estado tensional de la misma. Los autores establecen una comparación del comportamiento de las tensiones y las

deformaciones entre el modelo de la probeta escaneado y uno de una probeta ideal, esta última obtenida haciendo uso del programa SolidWorks. A pesar de no encontrar diferencias significativas entre los valores resistivos analizados, plantean que el modelo escaneado, como se acerca más a la pieza real, va a permitir juzgar mejor el comportamiento de las uniones soldadas frente a fenómenos como la fatiga y la fractura.

Una investigación interesante es la desarrollada por Borri y Grazini [14], quienes presentan los resultados del análisis por el MEF de los ensayos realizados en un modelo digital, obtenido al hacer uso de un escáner láser ISTI-CNR, de la estatua El David de Michelangelo Buonarroti. En la investigación es resaltada la importancia de la precisión del modelo geométrico como paso previo para el análisis estructural de la escultura haciendo uso del MEF.

En ese mismo orden, Acosta *et al.* [15], evalúan numerosas metodologías que permiten reproducir la geometría del rodete del compresor centrífugo de un turbo cargador HT3B satisfactoriamente, de modo que a partir del modelo virtual obtenido se pueda realizar una simulación computacional de flujo en dicho compresor; estos autores optaron por la toma de Tomografías Axiales Computarizadas (TAC) como la metodología más adecuada para la obtención de un modelo CAD en 3D.

En la investigación realizada por Bosch *et al.* [16] se propone un procedimiento para la obtención de un fémur humano utilizando tomas de TAC, lo cual permite la modelación en un ambiente CAD, en el que se puede asignar propiedades mecánicas y realizar trazos de fractura en la geometría del fémur, con el objetivo de analizar, por el MEF, el comportamiento resistivo del conjunto fémur-fijador.

De igual manera, la toma de TAC es empleada por López *et al.* [17], para la obtención de los modelos CAD de cada componente del oído medio humano, con lo cual es posible analizar numéricamente los diferentes fenómenos mecánico-acústicos que actúan sobre la estructura de este conjunto de órganos. De esta manera se corrobora la viabilidad de la TAC como el método de adecuado para la modelación CAD de estructuras anatómicas debido a su alto grado de precisión geométrica.

Los autores mencionados anteriormente resaltan la importancia de la geometría exacta de los modelos CAD simulados por el MEF, pues de esta manera se garantiza la exactitud de los resultados. Sin embargo, a pesar de la precisión de las dimensiones entre el modelo digital y la pieza real es importante resaltar el elevado costo económico por concepto de disponibilidad experimental asociado a los equipos de medición.

Los proyectores ópticos de perfiles se desarrollaron inicialmente en la década de 1940 a fin de verificar la geometría de las herramientas de corte para maquinar roscas de tornillos [1], estos dispositivos miden dimensiones y áreas, por amplificación óptica, y permiten la realización de mediciones directas sobre una pantalla de proyección. El uso más básico de un proyector de perfiles es identificar un punto o borde en la sombra de proyección del objeto de estudio y desde este punto o borde calcular una longitud [18].

Dentro de las potenciales aplicaciones de los proyectores de perfiles se encuentra la medición del desgaste en piezas, especialmente en herramientas de conformado de metales. Esta característica es utilizada por Silva y Alvares [19] quienes reportan la factibilidad de empleo del proyector de perfiles en la determinación del desgaste en una herramienta de conformado y destacan, igualmente, la precisión en las mediciones realizadas.

El objetivo de esta investigación es mostrar un procedimiento que permita obtener un modelo virtual de piezas que presenten características geométricas aptas para el posterior trabajo de simulación numérica; como una alternativa viable para la digitalización 3D de piezas mecánicas de mediana complejidad. En la consecución de este objetivo, se emplea un proyector de perfiles para el levantamiento de la geometría de la pieza, para posteriormente exportar la información geométrica a un programa CAD.

II. DESARROLLO

A. Procedimiento para la obtención de modelos CAD a partir de la técnica de digitalización de proyecciones ortogonales

En la Fig. 1 se muestra el procedimiento seguido para la obtención del modelo digital del punzón de corte que sirve para la fabricación de llaves de cerraduras; dicho modelo, con una geometría más cercana a la realidad, es exportado a un programa CAD con la finalidad de realizar futuras simulaciones numéricas. Cada paso del

procedimiento contiene una serie de operaciones que deben ser realizadas de manera precisa, sin violar el orden establecido para ello, todo lo cual repercute en la correcta consecución del modelo CAD.

4

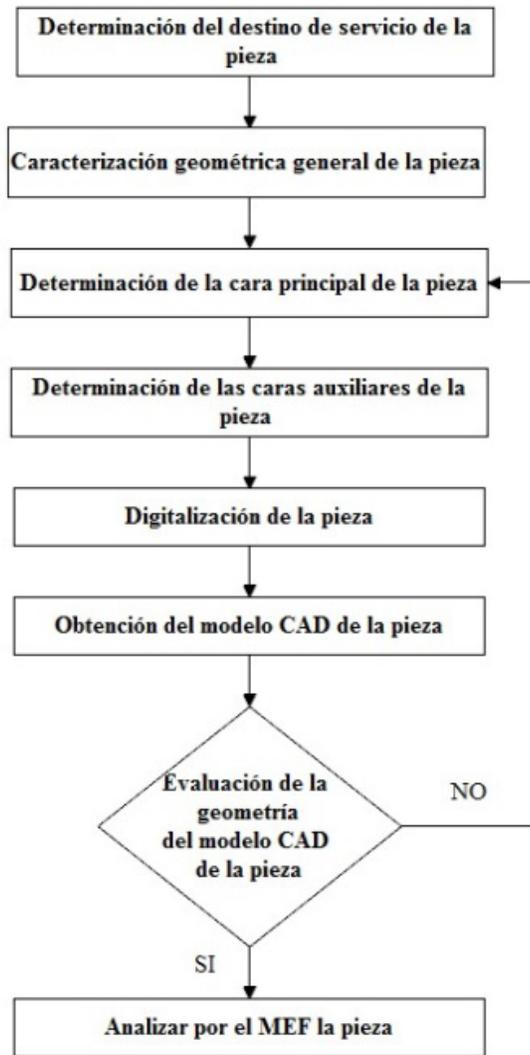


Fig. 1. Procedimiento seguido para la obtención del modelo digital del punzón de corte de llaves de cerraduras.

El análisis mediante el MEF del modelo CAD del punzón, obtenido de acuerdo con el procedimiento propuesto en esta investigación, permite determinar la influencia de la geometría real sobre el comportamiento funcional y resistivo de la herramienta de conformado.

La obtención de modelos CAD de piezas, a partir de técnicas de digitalización de proyecciones ortogonales, alcanza gran importancia a causa de la relación costo-beneficio que presenta el empleo del proyector de contornos [20].

B. Determinación del destino de servicio de la pieza

Es importante comprender el funcionamiento de la pieza en el conjunto mecánico, lo cual garantizará no obviar ninguna dimensión que pueda resultar importante para su correcto desempeño.

El troquel de corte, de acción simple, para la obtención de llaves de cerraduras se muestra en la Fig. 2, los principales elementos de este conjunto son el punzón y la matriz, lo cual está dado por el régimen de funcionamiento, a la responsabilidad geométrica que tienen en la precisión dimensional de las piezas a fabricar y a la complejidad tecnológica de la manufactura de dichas herramientas de conformado.

5

En el punzón, objeto de estudio en esta investigación, la cara de corte posee una gran importancia funcional pues su perímetro define la calidad geométrica de las llaves de cerraduras. Por tal motivo, es importante determinar detalladamente la dimensión exacta de esta zona de la herramienta.

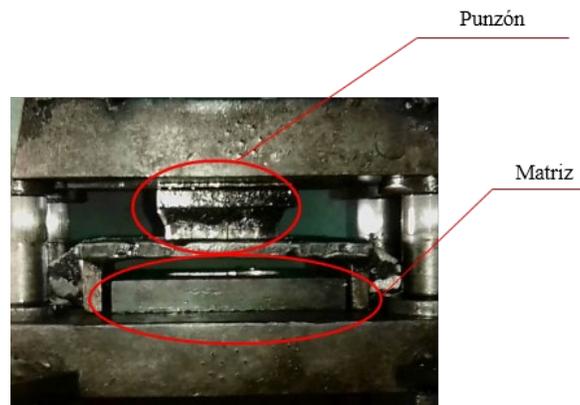


Fig. 2. Disposición del punzón y la matriz en el troquel de corte de llaves de cerraduras.

C. Caracterización geométrica general de la pieza

Resulta importante determinar las principales dimensiones geométricas de la pieza, así como los detalles de forma que particularmente la caracterizan.

El punzón de corte de llaves de cerraduras (véase Fig. 3) está constituido por dos componentes: la base de sujeción, la cual tiene una forma rectangular con cuatro agujeros y la sección de corte, la cual describe el perímetro de la pieza a lograr, la misma posee un ángulo en la zona de corte, para así garantizar un menor esfuerzo de conformado. Ambos componentes están unidos por un cordón de soldadura. Las dimensiones generales del punzón son: 26,38 mm × 49,28 mm × 60,23 mm.

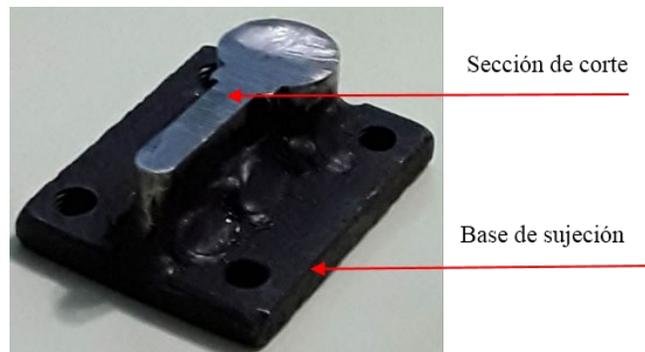


Fig. 3. Punzón de corte empleado en la fabricación de llaves de cerraduras.

El material del punzón de sus dos componentes es el acero SAE 4320 recocido, las propiedades se muestran en la Tabla 1.

TABLA 1
PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO SAE 4320 [20]

Propiedad	Valor	Unidad de medida
Límite de rotura	745	MPa
Límite de fluencia	469	MPa
Coefficiente Poisson	0,27	---
Módulo elástico	207	GPa

6

D. Determinación de la cara principal y de las caras auxiliares de la pieza

Se debe seleccionar la vista que más información geométrica brinda de la pieza, en este caso es la cara que define el perímetro de corte de la herramienta. Por otro lado, las vistas que aportan otra información geométrica relevante como: la altura, la profundidad de la pieza y el área de la sección transversal del cordón de soldadura, de igual manera deben ser tomadas en cuenta. Todo lo cual se realiza atendiendo al principio de proyecciones ortogonales de la pieza (véase Fig. 4).



Fig. 4. Proyecciones ortogonales del punzón de corte de llaves de cerraduras.

E. Digitalización de la pieza a partir del uso del proyector de contorno

Se procede al levantamiento de las dimensiones del punzón de corte de llaves de cerraduras mediante el uso de un proyector de contornos digital, lo que permite obtener un fichero digital con la información dimensional de la herramienta de conformado.

El instrumento empleado para la digitalización del punzón de corte es un proyector de contornos digital de banco CPJ-3000A. La disposición para la obtención de la geometría digital del punzón de corte se muestra en la Fig. 5.



Fig. 5. Disposición para la digitalización de la geometría del punzón de corte.

El programa informático empleado como interfaz gráfica para interactuar con el proyector de contornos es QIM1008CPJ. Este programa permite registrar las coordenadas cartesianas de la pieza en un plano (previamente definido el origen del sistema de coordenadas), igualmente permite crear entidades asociadas a la geometría de la pieza como: líneas definidas por dos puntos, líneas spline, arcos de tres puntos, ángulos, rectángulos, entre otras. Es necesario hacer uso de las entidades, antes mencionadas, pues la geometría real del punzón está compuesta por la concatenación de las mismas.

En la Fig. 6 se muestra el proceso de creación del croquis de la cara principal del punzón de corte, lo cual se hace a través de la toma de datos en la herramienta de conformado. Es importante garantizar una geometría con el contorno cerrado con el objetivo de lograr una futura operación de extrusión en la plataforma CAD que permita obtener el modelo en 3D.

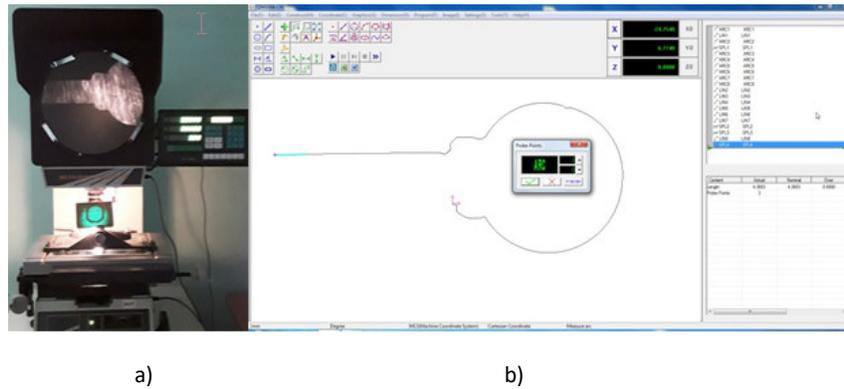


Fig. 6. Proceso de creación del croquis de la cara principal del punzón de corte; a) Toma de datos en el punzón de corte y b) Trazado de las entidades geométricas del croquis.

Para establecer la verdadera magnitud de la cara de corte del punzón se emplea un dispositivo de alineación angular, el cual garantiza que exista paralelismo entre la referida cara y la bandeja porta muestras del proyector

de contornos (véase Fig. 7). Con este proceder se garantiza que el haz óptico del proyector incida de manera perpendicular a la pieza.

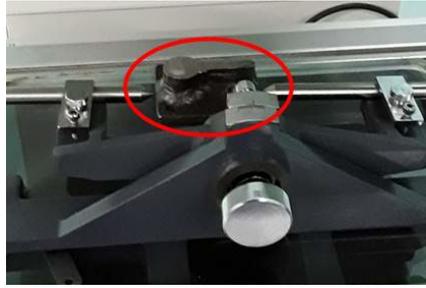


Fig. 7. Posicionamiento del punzón de corte sobre la mesa porta muestras del proyector de contornos.

F. Procedimiento para la obtención del modelo CAD del punzón de corte

La información geométrica almacenada, en los ficheros digitales (con extensión .pgm) procedentes del programa empleado como interfaz gráfica, se exporta a un archivo (con extensión .dxf) que permite la interoperabilidad entre los archivos informáticos que utilizan la tecnología CAD. En este caso, una vez realizada la exportación de las entidades al formato de archivo (con extensión .dxf), estas se visualizan en forma de croquis en el programa informático SolidWorks 2019.

En la Fig. 8a), se muestra la disposición del croquis de la vista principal del punzón de corte sobre la cara del prisma CAD, que posee las dimensiones máximas del punzón, es importante destacar que el contorno de corte debe ser cerrado y colineal con la arista que define la cara del sólido.

Una vez posicionado el croquis de la cara principal con el uso de las operaciones típicas de modelación de piezas del programa SolidWorks 2019 (Extruir en corte, Saliente/Base barrido, entre otras) es posible obtener la geometría del punzón (véase Fig. 8b)).

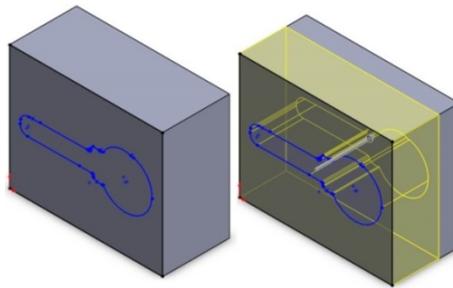


Fig. 8. Obtención del modelo CAD del punzón de corte: a) Disposición del croquis de la vista principal del punzón y b) Operación de extrusión.

III. RESULTADOS

El modelo geométrico digital del punzón de corte de llaves de cerraduras obtenido a través del procedimiento propuesto en esta investigación es plenamente funcional y modificable dentro de un entorno CAD, toda vez que se emplean operaciones propias del programa SolidWorks 2019 para la construcción de su geometría.

Las proyecciones ortogonales del modelo CAD del punzón de corte de llaves de cerraduras (véase Fig. 9) cuentan con las características geométricas de la pieza original. En la vista principal de dicha herramienta se observan las discontinuidades que presenta el perímetro de corte asociadas al método de elaboración y a su

complejidad geométrica. Mientras que, en la vista superior, un detalle importante a destacar es el desgaste presente en la sección de corte producto a su funcionamiento.

9

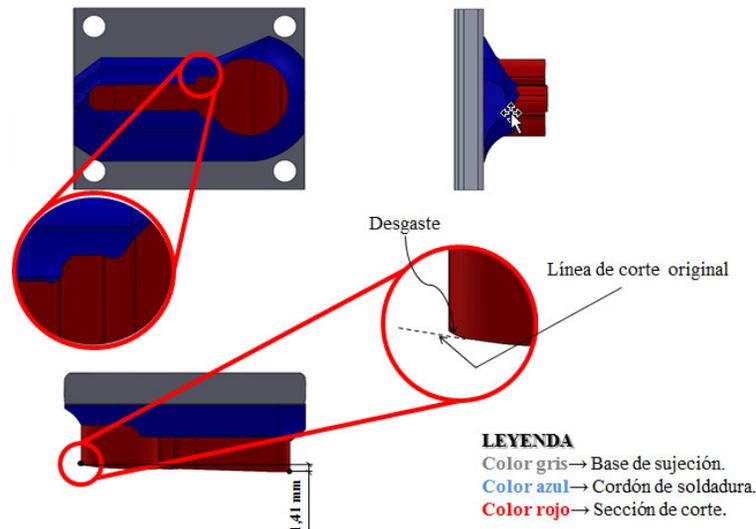


Fig. 9. Obtención del modelo CAD del punzón de corte: a) Disposición del croquis de la vista principal del punzón.

Las características geométricas antes mencionadas son importantes factores que se deben tomar en cuenta durante la simulación numérica de este tipo de herramientas de conformado, pues en gran medida influyen en el comportamiento tensional de las mismas. Si este análisis de detalle no se toma en consideración durante la simulación numérica, entonces no se garantiza que exista una adecuada precisión en los resultados, pues se parte de la premisa de basar los mismos en modelos CAD ideales.

A. Evaluación de la geometría del modelo CAD de la pieza

Se debe comprobar que en el modelo CAD no existen discontinuidades en las entidades del croquis como: aristas cortas y aristas faltantes, las cuales pueden provocar contornos abiertos y superficies con coeficiente de longitud/ancho muy elevado; estos defectos geométricos provocan la imposibilidad de realizar el proceso de mallado en dicho modelo.

Las comprobaciones antes mencionadas fueron realizadas en el modelo CAD del punzón de corte de llaves de cerraduras y al no detectarse errores geométricos fue posible realizar el proceso de mallado, utilizando el complemento Simulation del programa SolidWorks 2019; los resultados se muestran en la Fig. 10.

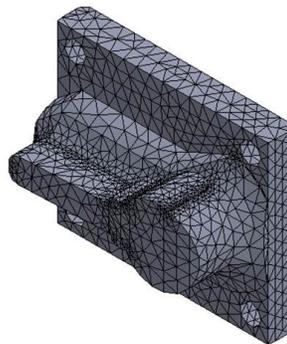


Fig. 10. Malla del modelo CAD del punzón de corte de llaves de cerraduras.

La malla del modelo CAD del punzón de corte de llaves de cerraduras cuenta como característica principal la de poseer un alto porcentaje de elementos (96,7 %) con cociente de aspecto menor a 3, lo que indica la poca distorsión de los elementos de la malla asociada a la configuración geométrica del modelo. Autores como Vera *et al.* [21] y Remache *et al.* [22] resaltan que el alto porcentaje de los elementos de malla con cociente de aspecto es fundamental en la calidad del mallado, pues la relación entre el lado más largo y el más pequeño del elemento tiene una tendencia a 1.

La Tabla 2 muestra las características de la malla del tipo sólida basada en la curvatura con elementos cuadráticos de alto orden (10 nodos), con tres grados de libertad por nodo. Este tipo de malla, a pesar de consumir más recursos computacionales, garantiza una mejor correspondencia con la geometría de la pieza, especialmente aquellas con geometría curva.

TABLA 2
PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO SAE 4320 [20]

Características	Definición	Unidad de medida
Tamaño máximo del elemento	3,5	mm
Tamaño mínimo del elemento	0,75	mm
Número de nodos	5337	---
Número de elementos	25425	---

Las características de la malla constituyen un elemento fehaciente de la viabilidad del análisis (por el MEF) de los modelos de piezas cuya geometría ha sido obtenida haciendo uso del procedimiento descrito en esta investigación. En este caso, el modelo CAD del punzón de corte de llaves de cerraduras puede ser analizado a partir del MEF.

La generación de la malla, al ser un paso sumamente importante en las simulaciones por el MEF y guardar una relación estrecha con las características geométricas de las piezas mecánicas, que se analizan a través del mencionado método, constituye un factor decisivo en la evaluación de la geometría del punzón de corte.

B. Análisis por el MEF del modelo CAD de la pieza

Entre las condiciones de fronteras del análisis estático lineal por el MEF del punzón de corte de llaves de cerraduras se encuentran las restricciones de desplazamiento del modelo, las cuales son del tipo fijo y se ubican en toda la base de sujeción y en los agujeros (véase Fig. 11a).

Mientras que, la fuerza de corte se aplica en la sección de corte del punzón, en dirección al eje Z; así mismo se asume que todo el perímetro cortante está en contacto con la lámina. Según Kalpakjian y Schmid [1] el valor de la fuerza de corte se determina de acuerdo con la ecuación 1.

$$F_C = 0,7 \cdot e \cdot P \cdot \sigma_{ETF} = 0,7 \cdot 2 \text{ mm} \cdot 126,89 \text{ mm} \cdot 1\,023,469 \text{ MPa} = 181\,815,199 \text{ N} \quad (1)$$

donde:

e Espesor de la lámina (mm).

P Perímetro de corte (mm).

σ_{ETF} Esfuerzo tensional final (MPa). Latón 70-30 recocido, de acuerdo con Kalpakjian y Schmid [1].

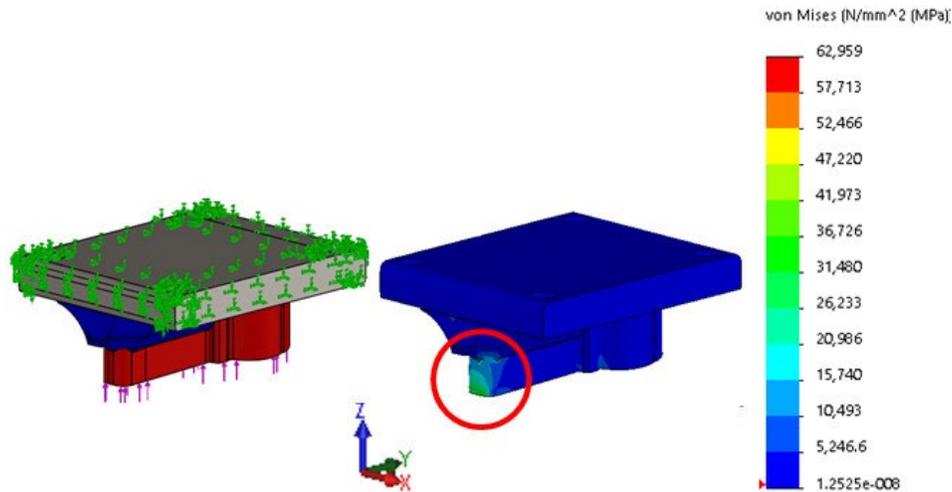


Fig. 11. Análisis por el MEF del modelo CAD del punzón de llaves de cerraduras; a) Condiciones de frontera y b) Resultados del comportamiento tensional.

Las máximas tensiones, de acuerdo con el criterio de von Mises, tienen un valor de 62,959 MPa, las mismas se encuentran ubicadas en la zona de menor área de la sección de corte (véase Fig. 11b). El límite elástico del material del punzón no es superado durante su funcionamiento, por lo que es posible afirmar que no existen deformaciones permanentes y que la herramienta de conformado cumple su destino de servicio en condiciones tensionales elásticas.

Para la validación de la precisión de los resultados tensionales se redujo el tamaño global de los elementos de la malla, declarados en la Tabla 2, a la mitad y el error relativo obtenido fue de 2,781 %. Entonces, es posible afirmar que los resultados obtenidos son válidos y razonables dado a que no existen cambios significativos asociados a la variación del tamaño del elemento de la malla.

IV. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

El análisis numérico de piezas que han sido fabricadas es tan importante como el análisis de piezas que aún están en fase de diseño, pues el primero presenta la ventaja de evaluar la influencia de las imperfecciones ocasionadas por el método de fabricación y por las condiciones de funcionamiento, pero tiene como inconveniente el costo del procedimiento de captura de los datos geométricos; mientras que, en el segundo se debe partir de la suposición de la no existencia de errores asociados al método de fabricación y no es muy común que se tomen en cuenta el efecto de las condiciones de funcionamiento (desgaste del par tribológico como es el caso del punzón objeto de esta investigación), todo lo cual puede provocar variaciones en la precisión de los resultados.

El procedimiento de digitalización de piezas, presentado en esta investigación, a través del desarrollo del modelo CAD de un punzón de corte de llaves de cerraduras, ofrece grandes ventajas económicas pues se utiliza la funcionalidad de un proyector de contornos de capturar y exportar los datos geométricos a un formato CAD.

El trabajo en el entorno CAD, con el empleo de los croquis obtenidos mediante el procedimiento descrito en esta investigación, debe partir del supuesto de que la sección transversal definida por dichos croquis es constante. Esta particularidad está dada porque el procedimiento de digitalización se basa en la obtención de los croquis a partir de las proyecciones ortogonales de la pieza.

Aunque lo antes planteado se pudiera considerar como una deficiencia es importante recalcar la alta precisión dimensional y nivel de detalle que se alcanza en la geometría de las proyecciones ortogonales, lo que hace que el error asociado a esta causa sea poco significativo.

V. CONCLUSIONES

El procedimiento propuesto permite determinar la geometría, con índices de exactitud dimensional satisfactorios, de piezas prismáticas de mediana complejidad geométrica a partir de la técnica de digitalización de proyecciones ortogonales, haciendo uso de un proyector de contornos digital de banco.

El modelo CAD del punzón de corte obtenido a través del procedimiento empleado en la investigación presenta características geométricas aptas para la simulación por el MEF.

El procedimiento presentado en esta investigación contribuye a la realización de estudios por el MEF de piezas, que se encuentran en explotación, en aras de establecer metodologías para evaluar el desempeño de futuros prototipos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer al grupo de Soluciones Ingenieriles Asistidas por Computadora (SIAC) del Departamento de Ingeniería Mecánica perteneciente a la Universidad de Granada.

REFERENCIAS

- [1] S. Kalpakjian, S. R. Schmid, *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*, 5ª ed. México: Pearson, 2008.
- [2] R. Norton, *Diseño de máquinas. Un enfoque integrado*, 4ª ed. México: Prentice Hall, 2011.
- [3] S. Kashid, S. Kumar, "Prediction of life of punches of compound die using artificial neural network," in *5th International & 26th All India Manufacturing Technology, Design and Research Conference* Guwahati, Assam, India, 12-14 diciembre, 2014, available: <https://pdfs.semanticscholar.org/a9e0/8aaae2c4071b11858b282facc3586313f1d0.pdf&ved=2ahUKewj0-oihx-LqAhXsYN8KHTdTAycQFjAAegQIBxAC&usg=AOvVaw3Msk3giPTlTFsMLSIZLK1v>
- [4] M. Wang, *Design and development of metal-forming processes and products aided by finite element simulation*, 1a ed. Gewerbestrasse, Switzerland: Springer International Publishing AG, 2017.
- [5] J. Atonal, A. Reyes, R. Vázquez, "Determinación de esfuerzos entre dos piezas en contacto utilizando el Método de Elementos Finitos," *Científica*, vol. 19, no. 1, pp. 5, 2015.
- [6] V. Vljakov, E. Desnica, I. Palinkaš, "3D modeling of casting tool using software package SolidWorks," *Annals of the Faculty of Engineering Hunedoara-International Journal of Engineering*, vol. 15, pp. 71-74, 2017, available: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=asn&AN=121771753&lang=es&site=ehost-live>
- [7] R. Budynas, K. Nisbett, *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*, 9ª ed. México: McGraw-Hill/Interamericana, 2012.
- [8] J. Stjepandić, N. Wognum, W. J. C. Verhagen, Eds., *Concurrent Engineering in the 21st Century. Foundations, Developments and Challenges*. Switzerland: Springer International Publishing Switzerland, 2015.
- [9] J. Arroyave, C. Romero, and C. Montilla, "Ingeniería inversa de un reductor de tornillo sinfin-corona," *Scientia Et Technica*, vol. XVII, pp. 204-210, 2012, available: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=84925149023>
- [10] A. A. Alshennawy, E. S. Gadelmawla, I. M. Elewa, M. M. Koura, "A new computer vision algorithm for the extraction of straight and curved features of two-dimensional products," *Journal of Engineering Manufacture*, vol. 220, pp. 1141-1150, 2006, available: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1243/09544054JEM475&ved=2ahUKewjK5uHdzOLqAhXpTN8KHWWFA0gQFjABegQIBxAC&usg=AOvVaw2Dtrz45fsxOEdEso3MO5Zx>
- [11] B. Vera, D. Vidarte, "Tecnologías informáticas utilizadas en el diseño y la fabricación de moldes y troqueles," *Informador Técnico*, vol. 65, pp. 7-12, 2002, available: http://revistas.sena.edu.co/index.php/inf_tec/article/view/893&ved=2ahUKewi5iI6rzeLqAhUknuAKHSEuC2YQFjAAegQIBhAC&usg=AOvVaw0lvK30zUwCsUeZty81-wPD
- [12] O. Rojas, L. Rojas, "Diseño asistido por computador," *Industrial Data*, vol. 9, pp. 7-15, 2006, available: <https://www.redalyc.org/pdf/816/81690102.pdf>
- [13] P. Almaguer, P. Zambrano, R. Estrada, "Evaluación numérica del estado tensional en probetas compactas simuladas y escaneadas," *Ingeniería Mecánica*, vol. 21, pp. 36-44, 2018, available: <http://www.ingenieriamecanica.cujae.edu>

- [14] A. Borri, A. Grazini, "Diagnostic analysis of the lesions and stability of Michelangelo's David," *Journal of Cultural Heritage*, vol. 7, pp. 273-285, 2006.
- [15] J. Acosta, C. Duque, C. Galeano, J. Mantilla, "Digitalización 3D del rodetes de un compresor centrífugo: un procedimiento alternativo " *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, vol. 15, pp. 236-244, 2007, available: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-33052007000300004
- [16] J. Bosch, Y. Ramos, R. Estrada, Y. Morales, R. Beltrán, "Obtención de modelos CAD personalizados de las superficies cortical y trabecular de un fémur humano a partir de imágenes tomográficas," *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica*, vol. 21, pp. 45-51, 2017, available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6064615>
- [17] A. López, D. López, H. Caicedo, A. González, M. González, "Biomodelado de los componentes del oído medio humano haciendo uso de imágenes de resonancia magnética " *Científica*, vol. 21, pp. 3-8, 2017, available: <https://www.redalyc.org/jatsRepo/614/61449593001/html/index.html>
- [18] C. Contreras, J. Meneses, "Calibración y automatización de un proyector de perfiles usado para el control de calidad en la fabricación de perfiles plásticos extruidos," *Revista Investigaciones Aplicadas*, vol. 9, pp. 7-11, 2015. available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5230979>
- [19] P. J. Silva, A. J. Alvares, "Investigation of tool wear in single point incremental sheet forming," *Journal of Engineering Manufacture*, pp. 1-19, 2019, available: <https://doi.org/10.1177/0954405419844653>
- [20] R. Mott, E. M. Vavrek, J. Wang, *Machine elements in mechanical design*, 6a ed. New York: Pearson Education, 2018.
- [21] A. Vera, D. Aguilar, J. Campos, J. Campos, A. Carrasco, H. Jaime, "Comparación estática estructural y de pandeo de dos materiales compuestos y acero inoxidable en una prótesis de miembro inferior," *Investigación en Ingeniería*, vol. 1, pp. 1-14, 2020.
- [22] Á. Remache, J. Leguisamo, E. Tamayo, "Análisis topológico mediante el Método de Elementos Finitos del chasis de una motocicleta de competencia," *Enfoque UTE*, vol. 10, pp. 81-97, 8 Sep. 2019, available: <http://scielo.senescyt.gob.ec/pdf/enfoqueute/v10n3/1390-6542-enfoqueute-10-03-00081.pdf>