



# Diseño óptimo de matrices lineales de extrusión de aleaciones de aluminio

## Optimal design of linear aluminum alloy extrusion dies

Claudia Ibeth Parra-Montero<sup>l, \*</sup>, Rolando Esteban Simeón-Monet<sup>l</sup>, Julio Cesar Pino-Tarrago<sup>ll</sup>

I. Universidad de Holguín, Centro de Estudios Cad/Cam. Holguín, Cuba

II. Universidad Estatal del Sur de Manabí, Manabí, Ecuador

\*Autor de correspondencia: [cibeth@uho.edu.cu](mailto:cibeth@uho.edu.cu)

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Recibido: 28 de agosto de 2020

Aceptado: 20 de noviembre de 2020

### Resumen

El rápido desgaste de las matrices de extrusión de aluminio, dadas las intensas condiciones de trabajo, provocan que los perfiles obtenidos no garanticen las tolerancias admisibles para toda la producción necesaria. De ahí que el objetivo de la presente investigación fue optimizar el diseño de las matrices lineales de extrusión de perfiles de aleaciones de aluminio, a partir de la geometría y las dimensiones requeridas a obtener, con vista a aumentar la vida útil de estas costosas herramientas. Para ello, se automatizó el proceso de cálculo y se incorporaron variables como: material, capacidad de extrusión según las máquinas existentes y canales de salida. Con estas variables se determinaron: la presión requerida, los espesores de la

matriz y los ángulos de entrada. Todos estos elementos fueron vinculados a un modelo de optimización mono-objetivo desarrollado en MATLAB, donde a partir de las soluciones posibles obtenidas se tomó según el criterio deseado por el diseñador la variante a diseñar y se enlazó de forma automática a la modelación con un paquete CAD profesional, lo que permitió obtener el diseño 3D de cada componente de la matriz, de forma que se cumplieron las exigencias dimensionales requeridas, enfocadas en aumentar la durabilidad de la herramienta.

**Palabras claves:** extrusión de aluminio; matrices; modelación; optimización; CAD/CAE.

### Abstract

The rapid wear of the aluminum extrusion dies, given the intense working conditions, means that the profiles obtained do not guarantee the admissible tolerances for all the necessary production. Hence, the aim of this research is to optimize the design of linear dies for the extrusion of aluminum alloy profiles, based on the geometry and dimensions required to be obtained, with a view to increasing the useful life of these costly tools. To this end, the calculation process is automated and variables such as: material, extrusion capacity according to the existing machines and exit channels are incorporated. These variables are used to determine the required pressure, die thicknesses and entry

angles. All these elements are linked in a single-objective optimization model developed in MATLAB, where, from the possible solutions obtained, the variant to be designed is chosen according to the criteria desired by the designer and is automatically linked to the modelling with a professional CAD package, which allows the 3D design of each component of the die to be obtained, so that the required dimensional requirements are met, focused on increasing the durability of the tool

**Key words:** aluminum extrusion, dies, modeling, optimization, CAD/CAE.

### Cómo citar este artículo:

Parra Montero CI, Simeón Monet RE, Pino Tarrago JC. Diseño óptimo de matrices lineales de extrusión de aleaciones de aluminio. 2021;24(1):e622. ISSN 1815-5944.

## Introducción

El perfeccionamiento del proceso de extrusión de aleaciones de aluminio posibilitó la elaboración de perfiles normalizados de dimensiones largas y de secciones transversales exactas, siendo de gran interés para los sectores del transporte, aeroespacial, comunicación y en especial la construcción.

Kalpakjian [1], en el 2008 planteó que existían muchas cuestiones del diseño de las matrices de extrusión que están sin respuesta aún, a pesar de no ser un proceso respectivamente nuevo que se generalizó en la década de 1894. Aunque en los últimos años, ha aumentado el número de estudios relacionados con la evaluación del desgaste y la vida útil de los moldes metálicos, utilizando diferentes métodos y tecnologías, son escasas las investigaciones realizadas para la obtención del diseño de las matrices de extrusión, que vinculan los resultados

de optimización con las variables de diseño aplicada en un sistema CAD. Ejemplo de estos se muestra a continuación.

En el año 2017 Chahare AS [2] utiliza el análisis de varianza para investigar el impacto de los parámetros del proceso en la angularidad de los elementos. A través del análisis obtuvo el nivel óptimo de los parámetros del proceso para una temperatura de precalentamiento de la palanquilla de 500 °C, una temperatura del contenedor de 400 °C y una velocidad del pistón de 6,0 mm/seg. Los autores también determinaron que la velocidad del ariete tiene la máxima contribución, con un 59,83 %, seguida de la temperatura del contenedor y la temperatura de precalentamiento de la palanquilla. Parte de estos resultados fueron utilizados en esta investigación.

En [3], Ramya et al. (2016) investiga sobre la predicción de la carga de extrusión, la influencia de la velocidad del pistón en los parámetros del proceso, la temperatura inicial del tocho, la sección transversal de la matriz y la tensión de extrusión. Estos autores, aunque trabajaron factores geométricos del proceso no incluyeron variables como el ángulo de entrada, canales de salida y el espesor de la matriz.

Engelhardt en el año 2019 [4], por su parte utilizó métodos de simulación para visualizar y optimizar el flujo de material durante la extrusión de un perfil de dissipador de calor con una geometría compleja, demostrando con éxito que los métodos utilizados predicen el flujo de material y, por lo tanto, podrían simplificar el proceso de diseño de herramientas; pero no incluyeron en su investigación la influencia de la fuerza de extrusión.

Existen más ejemplos con resultados similares a los analizados. En todos estos estudios se percibe que prevalece poca información sobre el tema en el campo del diseño, donde muchas particularidades y variables del proceso están siendo investigadas aún. El objetivo de la presente investigación fue optimizar el diseño de las matrices lineales de extrusión de perfiles de aleaciones de aluminio, a partir de la geometría y las dimensiones requeridas a obtener, con vista a aumentar la vida útil de estas costosas herramientas.

### Métodos y Materiales

A partir de la optimización mono-objetivo de los parámetros fundamentales, la utilización de un diseño gráfico y la disponibilidad de los softwares Matlab y Autodesk Inventor, se logró el desarrollo del diseño óptimo de la matriz de extrusión y la selección del material.

#### Configuración geométrica y selección del material

El proceso de extrusión en caliente siempre conlleva a una disminución de las dimensiones del perfil una vez enfriado, debido a la contracción térmica del metal. En la figura 1, se expone la configuración del perfil que se desea obtener, con sus cotas correspondientes y su ubicación en la matriz. Se determinó que la producción sería en una matriz lineal donde se obtuviera un perfil de forma simultánea, debido a que el máximo radio circunscrito del perfil no debe exceder a 140 mm.

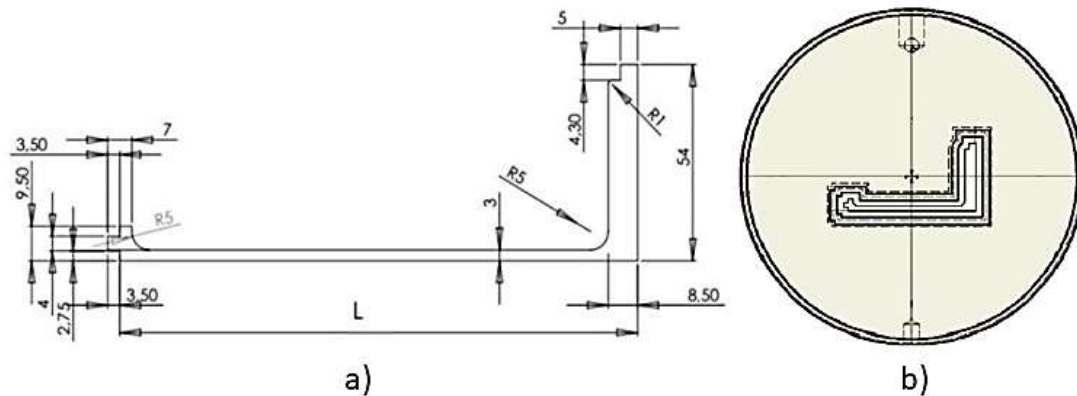


Fig. 1. a) Configuración del perfil, b) Ubicación del perfil en la matriz. Fuente: autores

Los materiales para dados de extrusión en caliente incluyen aceros de herramienta y aceros aleados [5, 6]. Las propiedades más importantes de estos materiales son alta resistencia al desgaste, alta dureza en caliente y alta conductividad térmica para remover el calor del proceso. Después de valorar varios materiales para la fabricación de matrices y herramientas como los aceros H11, H12 y H13, se determinó utilizar el mostrado en la tabla 1, por su alta tenacidad al impacto y resistencia al desgaste a temperaturas elevadas.

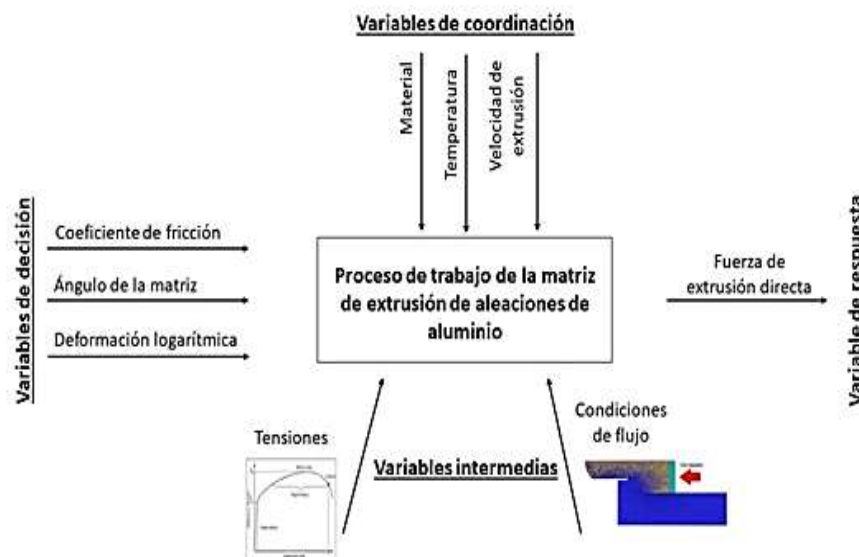
Tabla 1. Material y propiedades del herramental de matricería. Fuente: [6]

|                       | Material | Dureza (HRC) | Densidad | Módulo elástico | Coficiente de Poissons |
|-----------------------|----------|--------------|----------|-----------------|------------------------|
| Matriz y Contramatriz | H13      | 47 – 51      | 7,8 g/cc | 210 GPa         | 0,30                   |

#### Modelo de optimización mono-objetivo para el diseño de las matrices de extrusión

El análisis de sistemas inicia con considerar las magnitudes de entrada y las magnitudes de salida, se establece los principales indicadores junto con las magnitudes que representan el estado interno del sistema [7, 8]

En el caso de la tarea de diseño de la matriz de extrusión de aluminio se establecen como variables de decisión (el coeficiente de fricción, el ángulo de la matriz y la deformación logarítmica) ya que pueden modificarse para encontrar una mejor relación que caracterice la calidad de las soluciones posibles del indicador de eficiencia (fuerza de extrusión), como manera de asegurar su cumplimiento. En la figura 2, se muestra el análisis externo del proceso.



**Fig. 2.** Análisis externo del proceso de trabajo de la matriz de extrusión de aleaciones de aluminio. Fuente: autores

Una vez realizado el análisis externo se procede a realizar el análisis interno del proceso de trabajo de la matriz. La ecuación (1), muestra el modelo matemático para determinar la fuerza total de extrusión, obtenido de la investigación realizada por [9].

$$F_{tot} = A_0 \times \sigma_{f,m} \left[ \frac{2}{3} \hat{\alpha} + \left( 1 + \frac{2\mu}{\sin 2\alpha} \right) \varphi_{max} \right] + \pi \times d_0 \times l \times \mu \times \sigma_{f,0} \tag{1}$$

Dónde:

- F<sub>tot</sub>: fuerza total de extrusión
- A<sub>0</sub>: área de la sección transversal de la pieza de trabajo (tocho)
- l: largo de la pieza de trabajo (tocho)
- σ<sub>f,m</sub>: tensión de flujo para un valor máximo de deformación logarítmica
- σ<sub>f,0</sub>: tensión de flujo para un valor mínimo de deformación logarítmica
- α̂: es un valor estimado para el ángulo de la matriz
- μ: coeficiente de fricción
- φ<sub>max</sub>: deformación logarítmica máxima
- d<sub>0</sub>: diámetro inicial de la matriz

El modelo se obtiene del análisis externo, que consiste en la determinación de los indicadores que caracterizan la calidad de las soluciones posibles de la tarea, la determinación de variables intermedias de interés y la estimación inicial de las variables de decisión, paso inicial para completar la descripción del proceso. En la tabla 2, se muestran los parámetros con los rangos estimados de restricciones para las variables de decisión.

**Tabla 2.** Rango de restricciones seleccionadas. Fuente: autores

| Parámetros y restricciones  |                             |                         |
|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Deformación logarítmica (φ) | Coeficiente de fricción (μ) | Ángulo de la matriz (α) |
| [0,3, 0,5, 0,7, 0,9]        | [0,6, 0,8, 1, 1,2]          | [18°, 30°, 42°, 54°]    |

**Ángulo óptimo de la matriz**

Para determinar el ángulo óptimo de la matriz se utilizó la ecuación 2, obtenida por [10] y se estableció una relación de los parámetros geométricos con las restricciones estimadas del coeficiente de fricción y la deformación logarítmica. En la figura 3, se muestra los resultados obtenidos del análisis.

$$\alpha_{opt} = \frac{10,45 + 16,56\varphi + 98,325\mu - 165,6\varphi\mu}{0,71} \tag{2}$$

### Ángulo óptimo de la matriz para valores mínimos de fuerza

Una vez especificados los ángulos óptimos de la matriz, se procede mediante la ecuación 3, obtenida de la investigación realizada por [11] a determinar el ángulo óptimo para los valores mínimos de fuerza. Los resultados obtenidos del análisis se muestran en la figura 4.

$$\cos 2\alpha_{opt} = -3\mu \varphi_{max} \pm \sqrt{9\mu^2 \varphi_{max}^2 + 1} \tag{3}$$

### Tensión de flujo

La ecuación de Zener-Hollomon en tensiones simples, describe el efecto combinado de la velocidad de deformación y la temperatura sobre la tensión de flujo por deformación de los metales. La ecuación 4, precisa la tensión de flujo adaptada a este problema, utilizada por [12, 13], ecuación (4).

$$\sigma_f = C \times \varphi^n = 960 \times \varphi^{0.18} \tag{4}$$

Dónde,

$\sigma_f$ : tensión de flujo

C: constante

n: coeficiente de endurecimiento por deformación

$\varphi$ : deformación logarítmica

## Resultados y Discusión

### Análisis de los resultados de la optimización mono-objetivo y la simulación numérica

En la figura 3, se muestra el espacio de soluciones posibles para la selección del ángulo óptimo de la matriz.

En la figura 4, los valores obtenidos del ángulo óptimo para valores mínimos de fuerza.

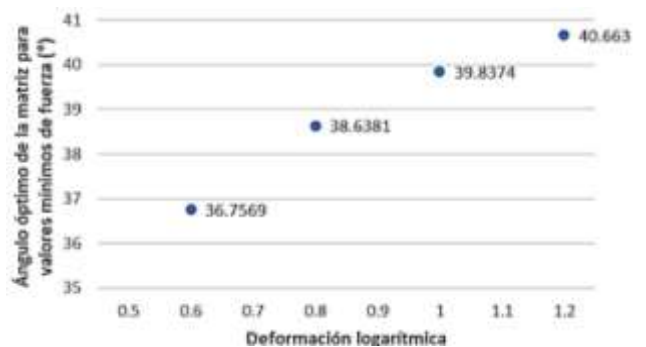
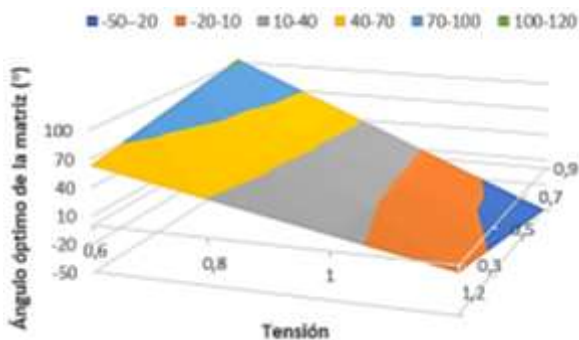


Fig. 3. Espacio de soluciones para el ángulo óptimo de la matriz. Fuente: autores

Fig. 4. Ángulo óptimo de la matriz para valores mínimo de fuerza. Fuente: autores

En la figura 5, se describe la función de la tensión de flujo obtenida en MATLAB, para las restricciones de deformación logarítmica ( $\varphi$ ) - [0,3, 0,5, 0,7, 0,9].



Fig. 5. Gráfico de tensión de flujo respecto a la deformación logarítmica. Fuente: autores

En las tablas 3 y 4, se muestran los valores óptimos de la Fuerza Total de Extrusión obtenidos mediante la optimización mono-objetivo, implementada en el software MATLAB para las prensas Shcloeman de 1600 Tn y Extral de 2500 Tn. Se creó una matriz de 4\*4\*4 que generó un total de 64 combinaciones. De manera metodológica se aplicaron las herramientas del software MATLAB para la optimización de la Fuerza Total de Extrusión. Se definieron las variables dependientes e independientes. En este caso las variables independientes se declararon como vectores fijos con los valores diferenciados que les correspondían. A partir de los valores que tomaron las variables se construyó una malla y sobre esa malla se declararon las formulaciones matemáticas.

**Tablas 3.** Valores óptimos de la Fuerza Total de Extrusión para la prensa Shcloeman. Fuente: autores

| Fuerza Total de Extrusión (kN), prensa Shcloeman |        |        |        |        |                    |        |        |        |        |
|--|--------|--------|--------|--------|--------------------|--------|--------|--------|--------|
| $\alpha= 18^\circ$                               | $\mu$  |        |        |        | $\alpha= 30^\circ$ | $\mu$  |        |        |        |
| $\varphi$  | 0,6    | 0,8    | 1      | 1,2    | $\varphi$          | 0,6    | 0,8    | 1      | 1,2    |
| 0,3  | 541,95 | 594,15 | 631,25 | 660,46 | 0,3                | 494,77 | 542,42 | 576,29 | 602,96 |
| 0,5  | 597,22 | 654,73 | 695,61 | 727,80 | 0,5                | 534,31 | 585,77 | 622,34 | 651,14 |
| 0,7  | 652,48 | 715,32 | 759,98 | 795,15 | 0,7                | 573,84 | 629,11 | 668,39 | 699,32 |
| 0,9  | 707,74 | 775,91 | 824,35 | 862,50 | 0,9                | 613,38 | 672,45 | 714,44 | 747,50 |
| $\alpha= 42^\circ$                               | $\mu$  |        |        |        | $\alpha= 54^\circ$ | $\mu$  |        |        |        |
| $\varphi$  | 0,6    | 0,8    | 1      | 1,2    | $\varphi$          | 0,6    | 0,8    | 1      | 1,2    |
| 0,3  | 591,21 | 648,15 | 688,61 | 720,48 | 0,3                | 585,29 | 641,66 | 681,72 | 713,27 |
| 0,5  | 662,89 | 726,73 | 772,11 | 807,83 | 0,5                | 655,00 | 718,08 | 762,92 | 798,22 |
| 0,7  | 734,57 | 805,32 | 855,60 | 895,19 | 0,7                | 724,71 | 794,51 | 844,11 | 883,17 |
| 0,9  | 806,25 | 883,90 | 939,09 | 982,55 | 0,9                | 794,42 | 870,93 | 925,31 | 968,13 |

**Tablas 4.** Valores óptimos de la Fuerza Total de Extrusión para la prensa Extral. Fuente: autores

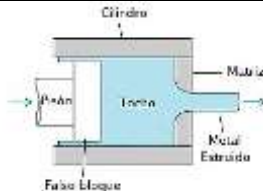
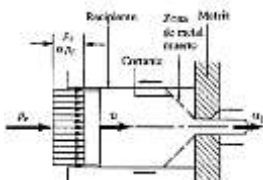
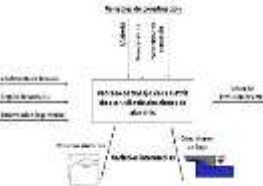
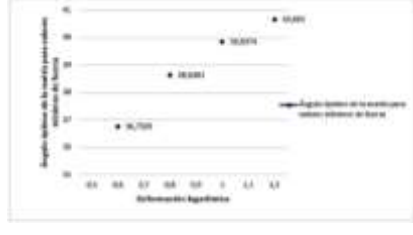

| Fuerza Total de Extrusión (kN), prensa Extral |        |        |        |        |                    |        |        |        |        |
|---|--------|--------|--------|--------|--------------------|--------|--------|--------|--------|
| $\alpha= 18^\circ$                            | $\mu$  |        |        |        | $\alpha= 30^\circ$ | $\mu$  |        |        |        |
| $\varphi$                                     | 0,6    | 0,8    | 1      | 1,2    | $\varphi$          | 0,6    | 0,8    | 1      | 1,2    |
| 0,3   | 920,7  | 1009,4 | 1072,4 | 1122,0 | 0,3                | 859,4  | 942,1  | 1000,9 | 1047,3 |
| 0,5   | 1020,1 | 1118,3 | 1188,2 | 1243,1 | 0,5                | 938,3  | 1028,6 | 1092,9 | 1143,4 |
| 0,7   | 1119,5 | 1227,3 | 1303,9 | 1364,2 | 0,7                | 1017,2 | 1115,2 | 1184,8 | 1239,6 |
| 0,9   | 1218,8 | 1336,2 | 1419,7 | 1485,3 | 0,9                | 1096,1 | 1201,7 | 1276,7 | 1335,8 |
| $\alpha= 42^\circ$                            | $\mu$  |        |        |        | $\alpha= 54^\circ$ | $\mu$  |        |        |        |
| $\varphi$                                     | 0,6    | 0,8    | 1      | 1,2    | $\varphi$          | 0,6    | 0,8    | 1      | 1,2    |
| 0,3   | 984,8  | 1079,6 | 1147,0 | 1200,1 | 0,3                | 9771,0 | 1071,2 | 1138,1 | 1190,7 |
| 0,5   | 1105,5 | 1212,0 | 1287,6 | 1347,2 | 0,5                | 1095,2 | 1200,7 | 1275,7 | 1334,7 |
| 0,7   | 1226,2 | 1344,3 | 1428,3 | 1494,4 | 0,7                | 1213,4 | 1330,3 | 1413,3 | 1478,7 |
| 0,9   | 1347,0 | 1476,7 | 1568,9 | 1641,5 | 0,9                | 1331,6 | 1459,8 | 1551,0 | 1622,7 |

El diseñador puede seleccionar en dependencia de sus intereses, ya sea dando prioridad al indicador de eficiencia u otras variables de interés. En este caso se priorizó el indicador de eficiencia (Fuerza Total de Extrusión), para así disponer de un conjunto de soluciones óptimas para el diseño de la matriz.

### Procedimiento para el diseño óptimo automatizado de matrices lineales de extrusión de aleaciones de aluminio

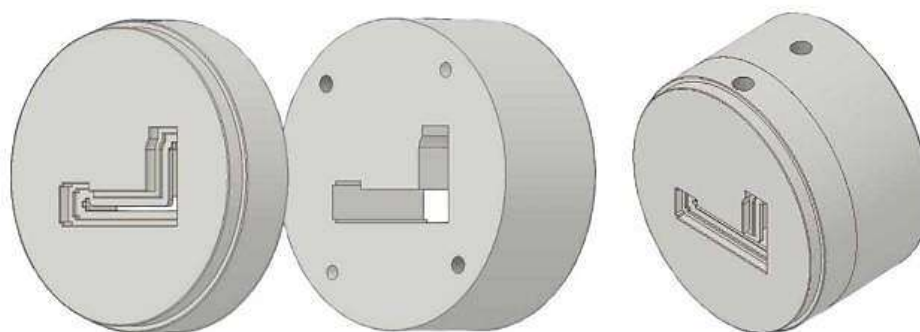
En la tabla 5, se muestra el procedimiento para el diseño óptimo de las matrices lineales de extrusión. Se basa en una secuencia definida, paso a paso, para realizar correctamente las tareas del diseño óptimo de las matrices lineales de extrusión.

**Tabla 5.** Procedimiento para el diseño óptimo de las matrices lineales. Fuente: autores

|   |  |
|---|--|
|    | <p>Análisis histórico lógico de los antecedentes y estado actual de las matrices de extrusión<br/>Fundamento de la tecnología<br/>Análisis sistémico y descripción física del proceso</p>  |
|    | <p>Modelación matemática del proceso de funcionamiento<br/>Modelo que describe el funcionamiento<br/>Determinación de las ecuaciones que describen los parámetros funcionales y dimensionales de la matriz</p>   |
|    | <p>Análisis de los modelos teóricos<br/>Modelos matemáticos del ciclo de trabajo.<br/>Aplicación del análisis y síntesis de los sistemas de ingeniería.<br/>Definición del modelo teórico asumido</p>  |
|   | <p>Modelo de optimización mono-objetivo para el diseño de la matriz<br/>Análisis del proceso como tarea de preparación y toma de decisiones<br/>Modelo matemático conceptual<br/>Determinación de la función objetivo<br/>Simulación numérica del comportamiento del indicador de eficiencia<br/>Análisis de los resultados de la optimización mono-objetivo<br/>Determinación de los parámetros óptimos para realizar el diseño</p> |
|  | <p>Diseño del herramental de matricería<br/>Determinación de los parámetros geométricos de la matriz con respecto a los parámetros óptimos<br/>Diseño de la matriz</p>   |

**Modelación CAD de los elementos que componen el herramental de matricería**

Una vez establecidos los resultados obtenidos mediante el modelo de optimización mono-objetivo del indicador de eficiencia, se procedió a realizar el diseño CAD de la matriz de extrusión de perfiles de aleaciones de aluminio para la obtención de perfiles machos, para la fabricación de formaletas. Se utilizó los valores óptimos de la deformación logarítmica y del ángulo óptimo para valores mínimos de fuerza obtenidos en la optimización.



**Fig.6.** Herramental de matricería. Fuente: autores

**Comparación con otros resultados publicados**

A modo de comparación con los resultados analizados en la literatura, se puede mencionar que los ángulos óptimos reportados por Jurković Z. et al. [14-16], son menores que los obtenidos por estos autores.

Los resultados obtenidos pueden servir de referencia para cuando se realicen los estudios de desviación estándar de la velocidad y de la temperatura.

Los valores de tolerancias y de contracción térmica del aluminio son criterios utilizados según la literatura analizada, lo cual representa la principal limitación de nuestro trabajo.

## Conclusiones

En el trabajo se obtuvo un procedimiento integrador para la obtención del diseño óptimo de las matrices lineales de extrusiones de aleaciones de aluminio. Se definieron los factores de mayor incidencia en el diseño y se expuso, a través de un modelo 3D, el diseño de la matriz para la obtención del perfil lateral macho de 100 mm a partir de la geometría y las dimensiones óptimas obtenidas.

## Referencias

- Kalpajian S, Schmid SR. *Manufactura, Ingeniería y Tecnología*. 5ta ed. México: Educación P;2008. [Citado el 2 de abril de 2020] Disponible en: <http://librosysolucionarios.net/manufactura.pdf>
- Chahare AS, Inamdar KH. Optimization of Aluminium Extrusion Process using Taguchi Method. *IOSR J Mech Civ Eng*. 2017;17(01):61-5.
- Ramya K, Sreedevi K. Modeling and Optimization of Extrusion Process Parameters of AA6061 using Taguchi Method. *Int Res J Eng Technol*. 2016;03(08):1753-6.
- Engelhardt M, Kurmajev S, Maier J, Becker C, Hora P. The application of FEA for optimization of die design. *Mater Today Proc*. 2019;10:226-33. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.10.400>
- Melian JE de la R, Rodríguez RP, Varela CAT. Predicción del desgaste de la herramienta de corte por el método de los elementos finitos. *Rev Desarro Sustentable, Negocios, Emprend y Educ*. 2020;10:10-18.
- Wang B, Zhao X, Li W, et al. Effect of nitrided-layer microstructure control on wear behavior of AISI H13 hot work die steel. *Appl Surf Sci*. 2018;431:39-43. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apsusc.2017.03.185>
- Ruiz JA. *Sistema de Ingeniería*. La Habana, Cuba: Editorial Félix Varela; 2012. [Citado el 2 de abril de 2020] Disponible en: <https://www.researchgate.net/profile/Jose-Arzola-Ruiz>
- Zhang C, Chen H, Zhao G, et al. Optimization of porthole extrusion dies with the developed algorithm based on finite volume method. *Int J Adv Manuf Technol*. 2016;85(5-8):1901-13.
- Jurkovic Z, Jurkovic M, Buljan S. Optimization of extrusion force prediction model using different techniques. *J Achiev Mater Manuf Eng*. 2006;17:353-6.
- Farzad H, Ebrahimi R. Die profile optimization of rectangular cross section extrusion in plane strain condition using upper bound analysis method and simulated annealing algorithm. *J Manuf Sci Eng Trans ASME*. 2017;139(2):20-29
- Bing S, Bozaci A. Experimental and Numerical Study on the Strength of Aluminum Extrusion Welding. *Materials (Basel)*. 2015;8:4389-99.
- Zhang C, Yang S, Zhang Q, Zhao G, Lu P, Sun W. Automatic optimization design of a feeder extrusion die with response surface methodology and mesh deformation technique. *Int J Adv Manuf Technol*. 2017;91(9-12):3181-93.
- Xue X, Vincze G, Pereira AB, et al. Assessment of metal flow balance in multi-output porthole hot extrusion of AA6060 thin-walled profile. *Metals (Basel)*. 2018;8(6):462-71.
- Jurković Z, Brezocnik M, Grizelj B, et al. Optimization of extrusion process by genetic algorithms and conventional techniques. *Teh Vjesn*. 2009;16(4):27-33.
- Zhang C, Zhao G, Chen H, et al. Numerical simulation and metal flow analysis of hot extrusion process for a complex hollow aluminum profile. *Int J Adv Manuf Technol*. 2012;60(1-4):101-10.
- Ji H, Nie H, Chen W, et al. Optimization of the extrusion die and microstructure analysis for a hollow aluminum alloy profile. *Int J Adv Manuf Technol*. 2017;93(9-12):3461-71.

### Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses

### Contribución de los autores

**Claudia Ibeth Parra Montero.** <http://orcid.org/0000-0003-1512-2978>

Participó en la búsqueda de información, en el diseño de la investigación, en la recolección de los datos, análisis de los resultados y en la revisión crítica de su contenido, así como en la redacción y aprobación del informe final.

**Rolando Esteban Simeón Monet.** <http://orcid.org/0000-0003-4561-0278>

Participó en el diseño de la investigación, apoya en la revisión del estado del arte, con la solución del modelo matemático y en la revisión crítica de su contenido, así como en la redacción y aprobación del informe final.

**Julio Cesar Pino-Tarrago.** <https://orcid.org/0000-0002-0377-4007>

Participó en el diseño de la investigación, apoya en la revisión del estado del arte y en la revisión crítica de su contenido, así como en la redacción y aprobación del informe final.