

## MODELADO NUMÉRICO DE LA EXTRUSIÓN DE ALUMINIO Y ANÁLISIS ESTRUCTURAL DE UNA MATRIZ ANTE DISTINTAS CONDICIONES DE OPERACIÓN

### NUMERICAL MODELING OF ALUMINIUM EXTRUSION AND STRUCTURAL ANALYSIS OF A DIE UNDER DIFFERENT OPERATING CONDITIONS.

**Juan M. Torres Zanardi, Federico A. Bacchi y Ana E. Scarabino**

*UIDET GFC Grupo de Fluidodinámica Computacional, Universidad Nacional de La Plata, Calle 116 e/47 y 48, 1900 La Plata, Argentina, [gfc@ing.unlp.edu.ar](mailto:gfc@ing.unlp.edu.ar), <http://www.gfc.ing.unlp.edu.ar>*

**Palabras clave:** Extrusión, Matricería, Viscoplasticidad, Mecánica Computacional.

**Resumen.** El presente trabajo describe por una parte el modelado numérico de un proceso de extrusión de aluminio, cuyo comportamiento viscoplástico para grandes deformaciones es modelado con las ecuaciones de un flujo de Stokes para un fluido incompresible no newtoniano con fuerte dependencia de la temperatura en sus relaciones constitutivas. Por otra parte, se determinan del estudio previo las cargas que soporta la matriz de extrusión y se realiza un estudio de tensiones y deformaciones de la misma. Se analizan distintas condiciones de operación, determinando la distribución de temperaturas, tensiones, deformaciones y fuerza neta a aplicar para la extrusión en cada caso, y se determinan las condiciones límite de temperatura y velocidad de extrusión que pueden ser aplicables con un equipo industrial determinado.

**Keywords:** Extrusion, Die, Viscoplasticity, Computational Mechanics.

**Abstract.** This work presents a numerical study for aluminum flow by extrusion. The stresses and deformations of a die due to the forces involved in this process were also computed. The viscoelastic behavior of the preheated aluminum is modeled like a Stokes flow of an incompressible non-Newtonian fluid with a strong dependence on the temperature of its constitutive relations. Results include the conforming of the extruded profiles from the original billet into the die, the stress distribution and deformations of the die, the variation of net ram force as a function of its speed and the material temperature, and the limit operating conditions applied conditions of preheat temperature and ram speed for a defined industrial equipment.

## 1 INTRODUCCIÓN

La extrusión es un proceso de deformación plástica en el que un bloque de metal (“billet” o “tocho”) es forzado por compresión a fluir a través de una abertura de sección más pequeña, produciendo uno o varios perfiles con la forma determinada por la sección de salida. Este proceso puede realizarse en frío (en el caso de trefilación, por ejemplo) o, más frecuentemente, en caliente, cuando el tocho es precalentado antes de introducirse en la matriz. El diseño de las matrices debe lograr que el material fluya a través de la sección de salida con una velocidad lo más uniforme posible, para evitar que los perfiles se curven y/o alabeen al salir de la matriz. Al mismo tiempo, la matriz debe presentar una alta rigidez estructural para no deformarse significativamente ni romperse ante las elevadas tensiones ejercidas durante el proceso [Saha, 2000].

La relación entre las secciones transversales del tocho de aluminio y los perfiles extruidos puede ser tan grande como 200 a 1 o incluso más. Las grandes deformaciones plásticas sufridas por el material durante la extrusión generan diferencias locales importantes de fricción, velocidad de deformación y generación de calor, por lo que el objetivo de diseñar una matriz que produzca una salida del material a velocidad uniforme constituye un desafío considerable, sobre todo atendiendo a la multiplicidad casi infinita de secciones de perfiles requeridos por la industria: abiertos, tubulares, mixtos, con distintos espesores, etc. La Figura 1 muestra un esquema de un sistema de extrusión, y la Figura 2, ejemplos de secciones de perfiles obtenidos mediante este proceso.

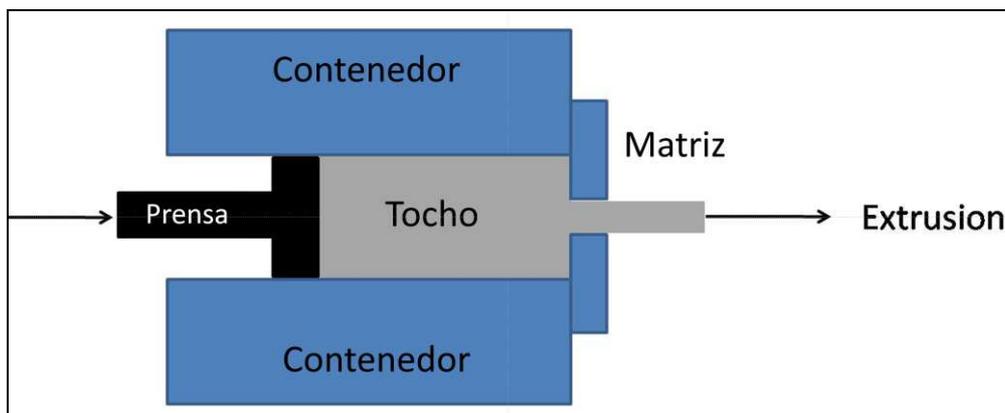


Figura 1: Esquema de un sistema de extrusión de perfiles de aluminio.

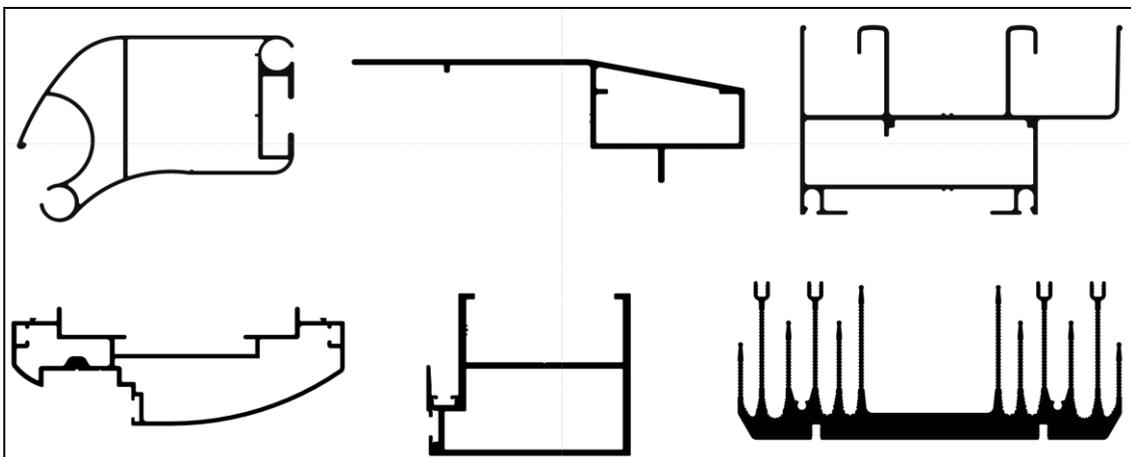


Figura 2: Ejemplos de secciones de perfiles de aluminio obtenidos mediante extrusión.

El diseño de una matriz que logre estos objetivos está fuertemente basado en la experiencia y frecuentemente se alcanza mediante un proceso de prueba y error, en el que, a partir de los perfiles generados con una primera matriz, si estos no resultan satisfactorios, se determinan las correcciones a aplicar en ella, o, en su defecto, en una segunda matriz, y así sucesivamente. Este proceso implica demoras de producción y pérdidas económicas tanto para el fabricante de matrices como para el de perfiles. En este contexto, la posibilidad de realizar una predicción numérica de la formación del perfil, detectando posibles problemas antes de iniciar la construcción de la matriz, permite reducir el tiempo de rediseño y ahorrar el material, horas-hombre y horas-máquina destinados a la modificación de la matriz existente o bien el diseño y fabricación de una matriz nueva para corregir los detalles necesarios con el fin de obtener una extrusión homogénea. Típicamente este proceso de rediseño, a partir de la detección de la necesidad de cambios en una matriz, requiere un mínimo de 3 a 5 horas-hombre de ingeniería y producción más el uso de materiales y maquinaria, para el fabricante de la matriz, y 48 a 72 horas de demora en el inicio de la producción para el fabricante de perfiles, implicando pérdidas económicas para ambos. Como ejemplo de las ventajas que brinda el estudio numérico previo a la fabricación de la matriz, en [Torres Zanardi et al, 2021](#) se presentan los resultados de la mejora en el diseño de una matriz para múltiples perfiles, en el que las variaciones de velocidad de salida del material se pudieron reducir a menos del 10% a partir de un rediseño optimizado a partir de la simulación computacional.

Al mismo tiempo, la aplicación del método de Elementos Finitos (o FEM, por “*Finite Elements Method*”) a los procesos de extrusión permite identificar la influencia de distintos parámetros, como temperatura inicial del tocho o velocidad de desplazamiento del punzón, en variables como los esfuerzos a los que se somete la matriz, temperaturas del material, distribución de tensiones y velocidades de deformación del material, etc, constituyendo una valiosa herramienta de investigación ([Fiétier et al, 2009](#)).

Si la velocidad de avance del pistón es muy alta (aumentando la tasa de deformación), o si la temperatura del material de extrusión es baja (lo que aumenta su viscosidad aparente), puede ocurrir que la fuerza requerida para la extrusión exceda la capacidad de la prensa disponible. Por otra parte, en ambos casos (alta velocidad o baja temperatura), se incrementan los esfuerzos que debe soportar la matriz, pudiendo provocar su falla estructural.

El objetivo de este trabajo es presentar un ejemplo de cálculo numérico del proceso de extrusión, que brinda la distribución de velocidades y temperaturas del material en el perfil extruido, los esfuerzos sobre la matriz de extrusión, y la influencia de la temperatura del material y velocidad de avance de la prensa en la fuerza que esta debe aplicar durante el proceso.

## 2 METODOLOGÍA

### 2.1 Modelo matemático para el material de extrusión

Para el análisis de las tensiones, deformaciones y temperaturas en el interior del material durante la extrusión, existen varios modelos disponibles. Un modelo estándar ampliamente validado es considerar que el comportamiento del material durante la extrusión en caliente es similar al de un fluido no newtoniano en el que la viscosidad aparente es función de la velocidad de deformación y de la temperatura ([Lou et al, 2011](#)). Este modelo es aplicado en módulos específicamente destinados a simular procesos de extrusión, tanto de metales como de plásticos y otros materiales, en distintos programas comerciales, como Ansys® Polyflow, QForm®, o Altair® Inspire Extrude, que es el que utilizamos en los resultados de este trabajo.

La **Figura 3** muestra la relación entre tensiones, velocidad de deformación y temperatura para un aluminio típico utilizado para extrusión. El comportamiento reológico del material suele aproximarse por expresiones de ajuste, tales como el modelo “arcoseno hiperbólico” (o “seno hiperbólico inverso”), que puede consultarse en [Donati et al, 2017](#) y fue utilizado en este trabajo.

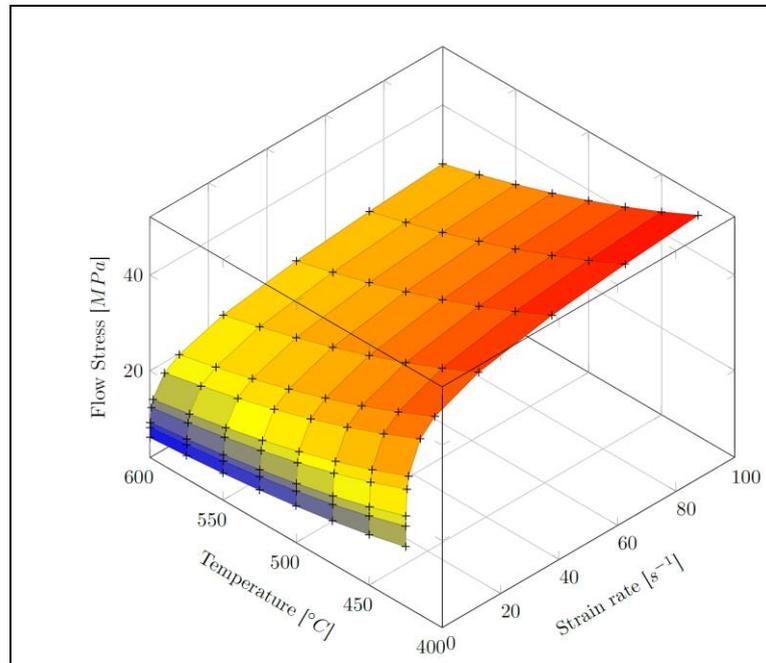


Figura 3: Relación entre tensión, velocidad de deformación y temperatura para el aluminio AA6063.

Las ecuaciones a resolver son las de conservación de masa, cantidad de movimiento para un flujo muy viscoso (Stokes) y energía, teniendo en cuenta su acoplamiento a través de la generación de calor por el trabajo de deformación y el cambio de viscosidad asociado a los cambios de temperatura y de velocidades de deformación. Aún cuando debido a las altas viscosidades, que causan que el número de Reynolds sea del orden de  $1e-5$  o menor, se desprecian los términos de aceleración convectiva en la ecuación de cantidad de movimiento (flujo de Stokes), el conjunto de ecuaciones a resolver es fuertemente no lineal y requiere formulaciones iterativas que demandan tiempos de cómputo considerables.

$$\begin{cases} \nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \\ \nabla \cdot (-P \mathbf{I} + \boldsymbol{\sigma}(\dot{\gamma}, \mathbf{D}, T)) = 0 \\ \rho C_p(T) \frac{\partial T}{\partial t} = -\rho(\mathbf{V} \cdot \nabla)T + \nabla \cdot (k \nabla T) + \boldsymbol{\sigma}(\dot{\gamma}, \mathbf{D}, T) : \mathbf{D} \end{cases} \quad (1)$$

En estas ecuaciones, las cantidades  $\mathbf{D}$ ,  $P$ ,  $\mathbf{I}$ ,  $\boldsymbol{\sigma}$ ,  $\mathbf{V}$ ,  $T$ ,  $\dot{\gamma}$ ,  $\rho$  y  $C_p$ , representan respectivamente al tensor velocidad de deformación, la presión, el tensor identidad, el tensor desviador de tensiones, el vector velocidad del flujo, la temperatura, la velocidad de deformación angular, la densidad y el calor específico del material a presión constante. Las tensiones son función de  $\mathbf{D}$ , la temperatura y de la magnitud de  $\dot{\gamma}$ , definido como

$$\dot{\gamma} = \left( \frac{2}{3} D_{ij} D_{ij} \right)^{1/2}, \quad \text{con} \quad \mathbf{D} = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{V} + \nabla \mathbf{V}^T) \quad (2)$$

## 2.2 Discretización y configuración de la simulación.

A partir del CAD que representa al contenedor y la matriz, se genera una malla para el material de extrusión (aluminio). Por simplicidad y rapidez de cálculo, y también debido a la gran diferencia de rigidez entre el tocho de aluminio precalentado y el contenedor del mismo y la matriz, ambos de acero H13, estos últimos suelen considerarse rígidos durante la extrusión, y solamente en problemas que requieren alta precisión se tiene en cuenta su deformación en el proceso. La Figura 4 muestra la matriz y el material de extrusión en su interior, coloreado según las distintas zonas que va atravesando en el proceso.

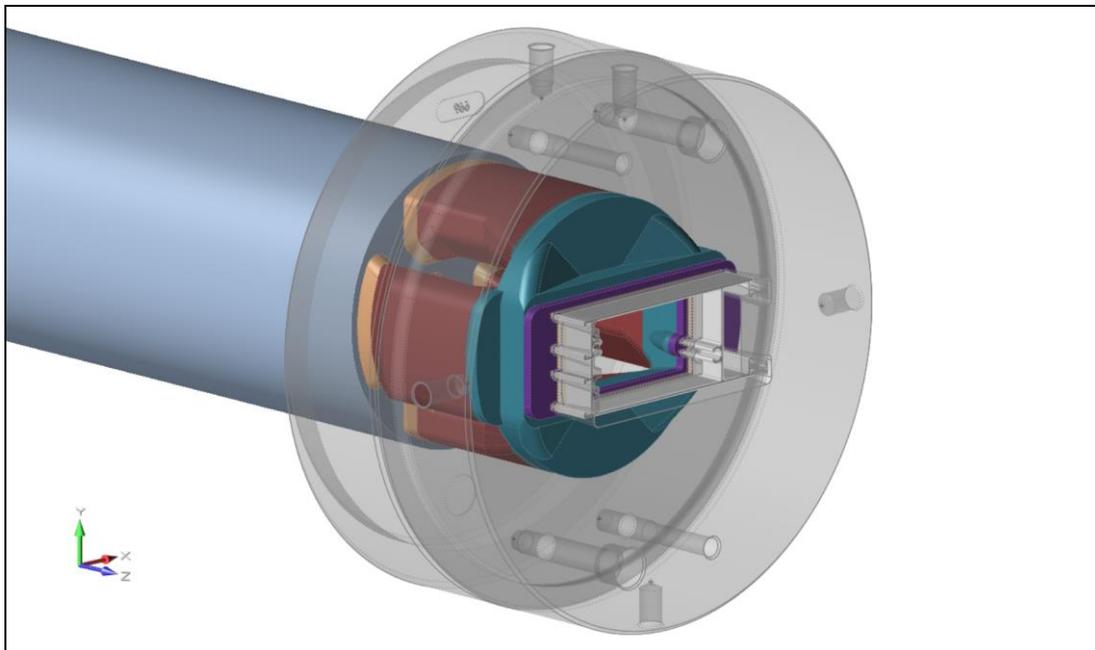


Figura 4: Matriz (semitransparente) y volumen de aluminio de extrusión.

Para el cálculo de la deformación del aluminio en la matriz se genera una malla híbrida con elementos tetraédricos, excepto en la salida del perfil, donde se utilizan prismas alineados con la dirección de extrusión. El solver se configura estableciendo las relaciones constitutivas del material, y se resuelven las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía, con un abordaje ALE (Arbitrary-Lagrangian-Eulerian) (Donea *et al.*, 2004). Las condiciones de borde típicas son la velocidad de desplazamiento del pistón en la entrada y presión atmosférica en la salida, junto con la prescripción de las temperaturas iniciales en el aluminio y el acero. La Figura 5 ilustra parte de la malla de la matriz (izquierda) y del aluminio en su interior (derecha).

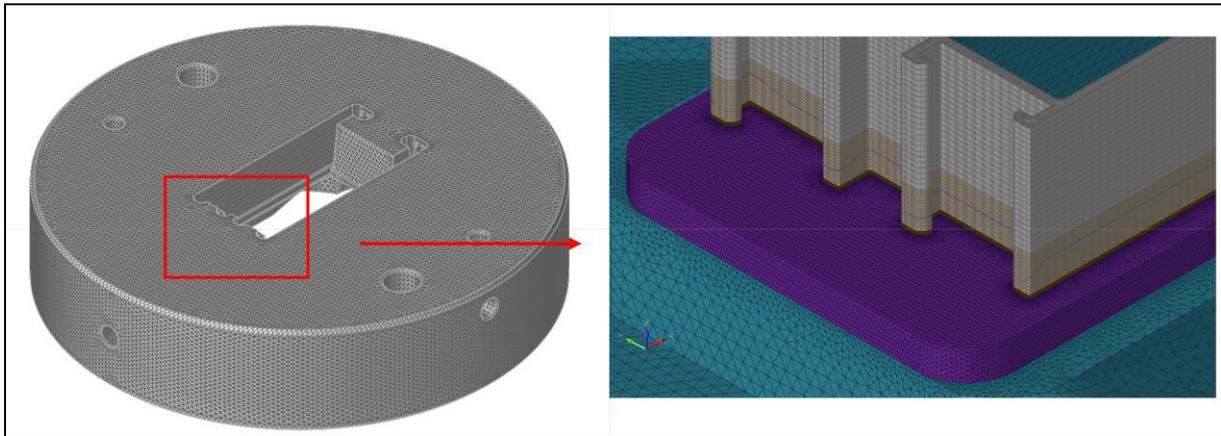


Figura 5: Malla de la matriz (izquierda) y del aluminio de extrusión (derecha).

Los resultados son postprocesados, siendo el principal elemento de control de calidad de la matriz (física) la uniformidad de la velocidad del material a través de la sección de salida y la ausencia o minimización de componentes de velocidad lateral que produzcan una curvatura de los perfiles, provocando que estos no se encuadren en las dimensiones de la geometría del plano provisto por el cliente, dentro de las tolerancias según norma [IRAM-699](#).

Las altas presiones de trabajo generan tensiones y deformaciones en la matriz. Debe verificarse que su valor no produzca defectos en la extrusión o riesgo de rotura. Entre otros resultados obtenidos en el postprocesamiento, la fuerza a aplicar sobre el tocho resulta de interés, ya que no debe exceder la capacidad de la prensa disponible. Esta se obtiene por integración de la presión a aplicar en la entrada del contenedor, que es uno de los resultados del cálculo. Una malla adecuada para la simulación de extrusión requiere en el orden de los 2-3 millones de elementos, dependiendo naturalmente de la complejidad de la matriz y los perfiles a producir. La convergencia para residuos ponderados de  $1e-4$  suele alcanzarse en cerca de 30 iteraciones no lineales, que conllevan un tiempo total de cómputo aproximado de 4 horas por millón de elementos (es decir, típicamente 8 a 12 horas) en una Workstation con 2 CPU Intel Xeon E5-2640 v3, cada uno de 8 núcleos físicos, y 64 GB de RAM.

Para el estudio de tensiones en la matriz, se realiza una discretización de la misma en elementos tetraédricos y una formulación FEM elastoplástica, teniendo en cuenta la transferencia de calor al acero y la variación de sus propiedades con la temperatura. La variación con la temperatura, tanto del módulo de elasticidad del acero como de su tensión de fluencia, hace necesario que al análisis tradicional de tensiones de von Mises deba sumarse el análisis del campo de temperatura del material, para identificar las zonas en las que las tensiones superan el límite elástico local.

En el trabajo se estudió una matriz para generar perfiles tubulares con la sección mostrada en la Figura 4. Para lograr una sección hueca, la matriz consta de dos piezas, nombradas “hembra” y “macho”. Al ingresar el material, el flujo se divide en cámaras y luego se une y se suelda debido a las fuerzas actuantes, saliendo con la forma tubular establecida.

Nuestro estudio se dividió en dos etapas. En la primera, se consideraron rígidos tanto la matriz como el contenedor, y se analizó la influencia de la velocidad de desplazamiento del pistón (“ram speed”) para dos temperaturas distintas de precalentamiento del tocho: 450 °C (la nominal de operación) y 400 °C. En estos casos, se buscó determinar a qué velocidad de desplazamiento se alcanzaría la máxima capacidad de la prensa, de 1300 tn. En la segunda parte, se seleccionaron tres combinaciones de velocidad de desplazamiento y temperatura del tocho, para realizar un análisis estructural de la matriz y determinar si se excedieron los límites de fluencia en la misma.

### 3 RESULTADOS

#### 3.1 Extrusión

La Figura 6 muestra la distribución de presiones y temperaturas sobre el material de extrusión, para la condición de extrusión nominal, con el tocho precalentado a 450 °C y una velocidad de avance del pistón de 5 mm/s. Puede verse que la presión ejercida por el pistón en la entrada al contenedor alcanza los 527 MPa, y en la entrada a la matriz se tienen valores en el orden de los 370 MPa. La fuerza necesaria a aplicar por la prensa hidráulica es la resultante de la presión en la entrada del contenedor. Por otra parte, las temperaturas del aluminio aumentan debido al trabajo de deformación hasta alcanzar los 536 C. Esta variación de temperatura produce el calentamiento y consecuente variación de propiedades mecánicas del acero de la matriz, lo que debe ser tenido en cuenta en el cálculo estructural.

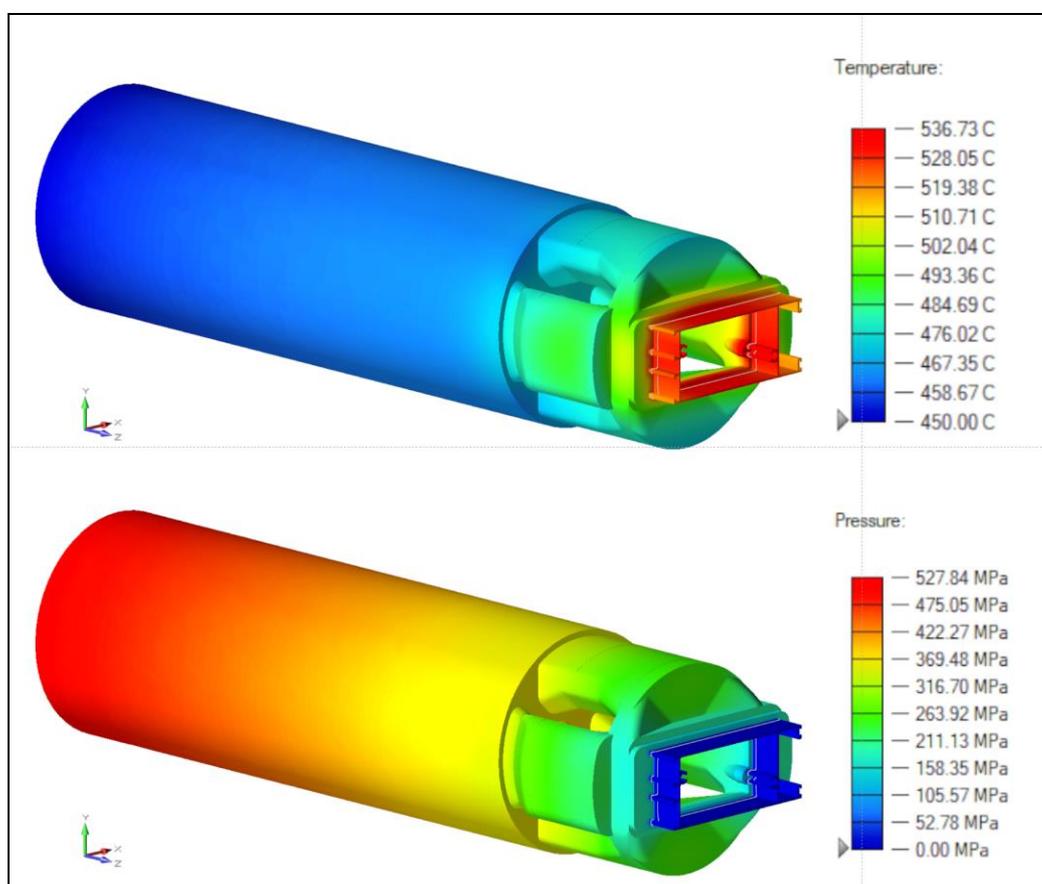


Figura 6: Distribución de temperatura (arriba) y de presión (abajo) en el aluminio en la extrusión.

#### 3.2 Fuerza del pistón

Los cálculos demostraron que manteniendo la temperatura de precalentamiento en 450 °C, la fuerza a aplicarse en la condición nominal (velocidad del pistón de 5 mm/s), fue de 1040 tn, un 80% de capacidad de la prensa, de 1300 tn. La velocidad de avance del pistón pudo aumentar hasta 50 mm/s (diez veces la velocidad típica de operación) sin que la fuerza necesaria superase ese valor. Sin embargo, cuando se realizaron simulaciones con temperatura de precalentado de 400 °C se encontró que la fuerza a aplicar a 5 mm/s ya estaba

muy cerca de la capacidad de la prensa, y esta se alcanzó con 20.3 mm/s. La Figura 7 muestra la variación de la fuerza aplicada con la velocidad de desplazamiento del pistón, para precalentamiento de 400 °C. La capacidad máxima de la prensa utilizada en este problema está indicada en el gráfico con la línea punteada roja

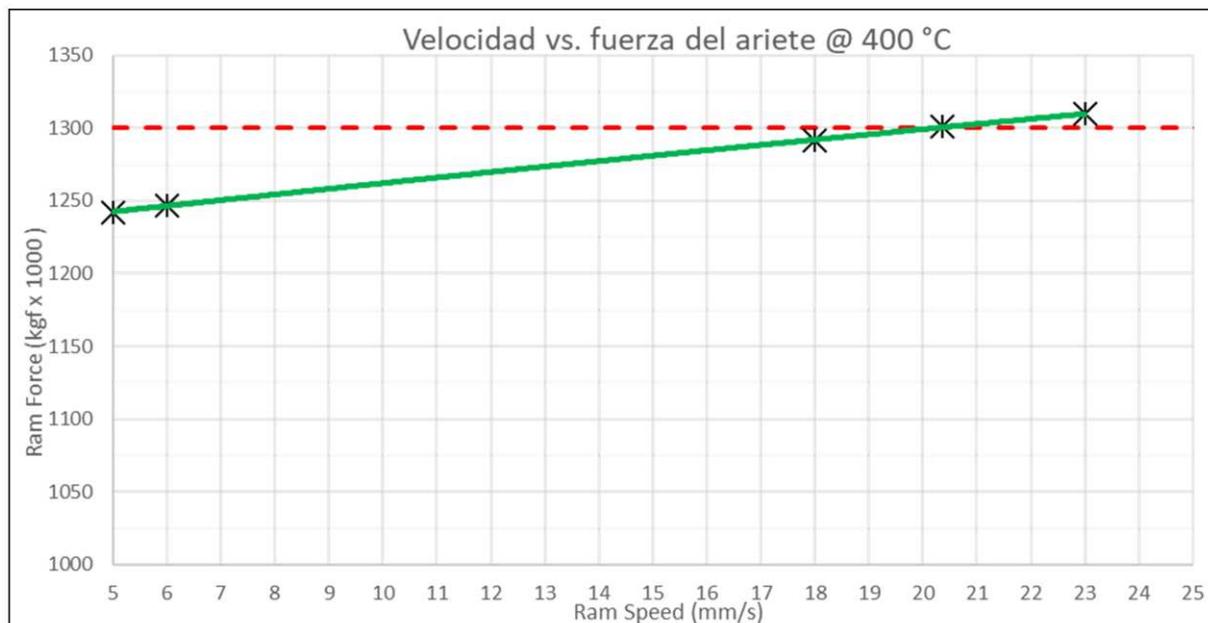


Figura 7: Fuerza de la prensa vs. Velocidad de avance del pistón, 400 °C.

### 3.3 Análisis térmico-estructural de la matriz

Se seleccionaron tres condiciones para realizar el análisis de tensiones, deformaciones y temperaturas en las matrices. El análisis de temperaturas es necesario, ya que la tensión de fluencia del material varía con la misma y se debe verificar que las tensiones no superen ese valor:

- Caso 1: T = 450 C y V = 5 mm/s
- Caso 2: T = 400 C y V = 5 mm/s
- Caso 3: T = 400 C y V = 20.3 mm/s (corresponde a una fuerza aplicada de 1300 Tn).

Para cada caso se identificaron los puntos de máximas tensiones, máximos desplazamientos y máximas temperaturas en cada elemento de la matriz, y se verificó que las tensiones no superasen el valor local de la tensión de fluencia.

La Tabla 1 muestra las propiedades del acero H13 para distintas temperaturas. La **Tabla 2** muestra para las piezas macho y hembra de la matriz y para los distintos casos estudiados, los valores de desplazamiento elastoplástico, tensión de von Mises y temperatura, en los puntos en los que se alcanzó el máximo (identificado en negrita) de cada una de estas variables.

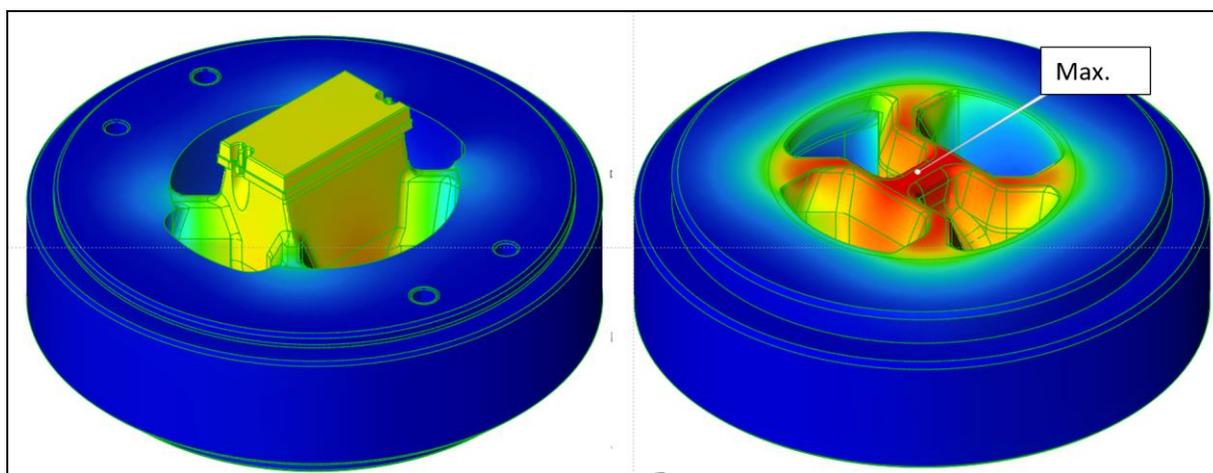
Temperatura	300 (27)	550 (277)	800 (527)	K (°C)
Módulo Elástico	210	168	126	GPa
Límite aparente de elasticidad	1050	840	630	MPa
Resistencia a la tracción	3140	2510	1880	MPa

Tabla 1: Propiedades mecánicas vs. temperatura del acero H13.

Caso	Pieza	Desplazamiento	Tensiones de von Mises	Temperatura
5 mm/s 450 C	Hembra	<b>0,05 mm</b>	158,03 MPa	527,30 °C
		0,03 mm	<b>385,48 MPa</b>	474,41 °C
		0,03 mm	120,24 MPa	<b>534,61 °C</b>
	Macho	<b>0,11 mm</b>	182,37 MPa	476,21 °C
		0,07 mm	<b>356,34 MPa</b>	423,16 °C
		0,05 mm	196,61 MPa	<b>478,02 °C</b>
Caso	Pieza	Desplazamiento	Tensiones de von Mises	Temperatura
5 mm/s 400 C	Hembra	<b>0,06 mm</b>	182,08 MPa	491,81 C
		0,03 mm	<b>436,71 MPa</b>	430,67 C
		0,03 mm	138,06 MPa	<b>501,13 C</b>
	Macho	<b>0,13 mm</b>	200,15 MPa	432,88 C
		0,08 mm	<b>420,81 MPa</b>	397,41 C
		0,05 mm	177,74 MPa	<b>435,13 C</b>
Caso	Pieza	Desplazamiento	Tensiones de von Mises	Temperatura
20.3 mm/s, 400 C	Hembra	<b>0,06 mm</b>	182,24 MPa	544,32 C
		0,03 mm	<b>443,62 MPa</b>	464,06 C
		0,03 mm	150,67 MPa	<b>553,47 C</b>
	Macho	<b>0,13 mm</b>	207,93 MPa	450,77 C
		0,08 mm	<b>433,62 MPa</b>	414,97 C
		0,05 mm	183,32 MPa	<b>473,02 C</b>

Tabla 2: Máximos valores calculados de desplazamientos, tensiones y temperatura.

Se encuentra que, si bien la hembra es la pieza que alcanza mayores tensiones, el macho experimenta los mayores desplazamientos. Si se comparan las tensiones calculadas con el límite de elasticidad a la temperatura local, se verifica que en ninguno de los casos se alcanzan tensiones de fluencia. Los desplazamientos máximos para los tres casos analizados, son de 0.13 mm, suficientemente pequeños como para no afectar la calidad de la extrusión. La Figura 8 muestra el valor absoluto de los desplazamientos en la pieza macho para la condición normal de operación y la ubicación del máximo, que en este caso fue de 0.11 mm.

Figura 8: Desplazamientos en la pieza macho de la matriz, para  $V = 5 \text{ mm/s}$  y  $T = 450 \text{ C}$ .

#### 4 CONCLUSIONES

Se analizó la matriz en condiciones nominales de operación (avance 5 mm/s, temperatura del tocho 450 °C). En esas condiciones la fuerza necesaria resultó de 1040 Tn, por debajo de la capacidad nominal de la prensa disponible. Al incrementar la velocidad de desplazamiento hasta 50 mm/s, la fuerza aumentó hasta 1175 Tn, manteniéndose por debajo de la capacidad nominal. Se realizó un análisis similar considerando la temperatura inicial del aluminio de 400 °C. En estas condiciones, una velocidad de avance de 5 mm/s requirió una fuerza aplicada de 1245 Tn, y a 20,4 mm/s se alcanzó la fuerza máxima de 1300 Tn. Como conclusión de este análisis, se destaca la necesidad de alcanzar la temperatura de precalentamiento nominal para no sobrecargar la prensa o forzarla a trabajar cerca de su capacidad máxima.

De los análisis estructurales en las condiciones seleccionadas de velocidad de desplazamiento y temperatura, observamos que en ninguno de los casos analizados se alcanzó el límite de elasticidad en ningún punto de la matriz, ni tampoco deformaciones elásticas que pudieran afectar la calidad de la extrusión, de lo que se concluye que su diseño es apto para un rango de trabajo que supera en exigencias a las condiciones nominales, incluso utilizando la prensa a su máxima capacidad.

#### AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se enmarca en un convenio de cooperación entre la empresa Madexa S.A. y el Grupo de Fluidodinámica Computacional de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de La Plata. Los autores agradecen a Diego Principi, presidente de Madexa S.A., por su iniciativa para trabajar en colaboración explorando las posibilidades de la Mecánica de Fluidos Computacional para la simulación de extrusión de perfiles de aluminio, y por toda la información brindada sobre los aspectos técnicos y comerciales de este proceso.

#### REFERENCIAS

- Donati L., Segatori A., Gamberoni, Reggiani, A. and Tomesani B. L., Extrusion Benchmark 2017: Effect of die design on profile quality and distortions of thin C-shaped hollow profiles, *Materials Today: Proceedings* 10: 171–184, 2019.
- Donea J., Huerta A., Ponthot Ph., and Rodríguez-Ferran A., Arbitrary Lagrangian-Eulerian methods, *The Encyclopedia of Computational Mechanics*, Wiley, Vol. 1, Chapter 14: 413-437, 2004.
- Fiétier N., Krähenbühl Y. and Vialard M., New methods for the fast simulations of the extrusion process of hot metals, *Journal of Materials Processing Technology* 209: 2244–2259, 2009.
- IRAM 699: Aluminio y sus aleaciones. Productos extruidos. Tolerancias dimensionales.
- Lou S., Zhao G. and Wang R., Aluminum alloy profile extrusion simulation using finite volume method on nonorthogonal structured grids, *Engineering Computations* 29-1: 31-47, 2011.
- Saha P.K., *Aluminum Extrusion Technology*, Ch. 1, ASM International, 2000.
- Torres Zanardi, J.M., Scarabino, A., Bacchi, F. and Principi, L. Aplicación industrial de modelos numéricos de extrusión de aluminio. *Actas del VIII Congreso de Matemática Aplicada, Computacional e Industrial, MACI 2021*: 489-492, La Plata, 2021.