

APLICACIÓN INDUSTRIAL DE MODELOS NUMÉRICOS DE EXTRUSIÓN DE ALUMINIO

Torres Zanardi Juan M. †, Scarabino Ana †, Bacchi Federico † y Principi Luciano ‡

†Grupo de Fluidodinámica Computacional - GFC, Universidad Nacional de La Plata, Calle 116 e/ 47 y 48, 1900 La Plata, Argentina, juanmanuel.torreszanardi@ing.unlp.edu.ar

‡MADEXA S.A., 182 Nro. 575, Lisandro Olmos, Argentina, info@madexa.com.ar, www.madexa.com.ar

Palabras clave: extrusión, matricería, viscoplasticidad, mecánica computacional

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 casos 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 [1].

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 algunos ejemplos de perfiles obtenidos con este proceso. 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.

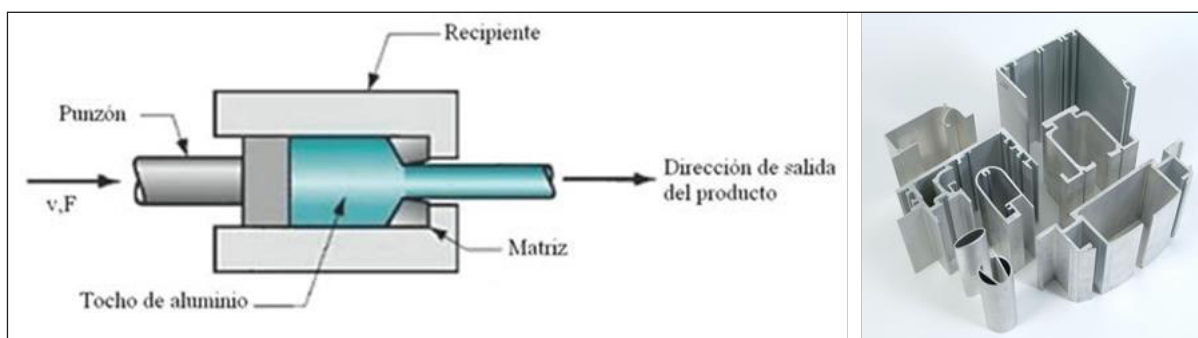


Figura 1: Izquierda, esquema de matriz de extrusión (extraída de Galmak Alüminyum). Derecha, algunos tipos de perfiles (GSH Industries, Inc)

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. Al mismo tiempo, la aplicación del método de Elementos Finitos (FEM) 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, como se ha demostrado en numerosas publicaciones [2,3].

2. METODOLOGÍA

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 utilizado y 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 [3]. 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, Altair Extrude® o QForm®, y es el que utilizamos en los resultados de este trabajo.

Las ecuaciones a resolver por el software 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.

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

En estas ecuaciones, las cantidades \mathbf{D} , P , \mathbf{I} , $\boldsymbol{\sigma}$, \mathbf{V} , T , $\dot{\gamma}$, ρ 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 la temperatura y de la magnitud de $\dot{\gamma}$, definido como

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

La relación entre tensiones, velocidad de deformación y temperatura se obtiene mediante ecuaciones de ajuste de los datos experimentales. Un modelo de uso común es el de "Seno hiperbólico inverso", cuyos parámetros se definen en la referencia [4].

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{\alpha} \sinh^{-1} \left[\left(\frac{1}{A} \dot{\gamma} e^{\left(\frac{Q}{RT} \right)^n} \right)^{\frac{1}{n}} \right]$$

La figura 2 muestra la no linealidad de la relación entre tensión, velocidad de deformación y temperatura para un aluminio AA6063, que responde adecuadamente a este modelo.

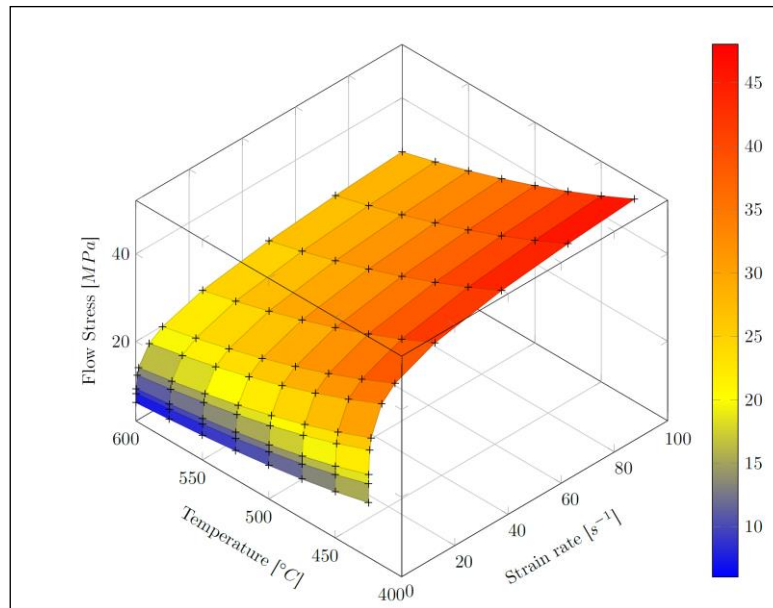


Figura 2: Relación entre tensión, velocidad de deformación y temperatura para el aluminio AA6063.

Aún cuando debido a las altas viscosidades 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.

La metodología de trabajo entre los distintos actores consta de los siguientes pasos:

- A partir del pedido del cliente (empresa productora de perfiles de aluminio), la empresa fabricante de matrices genera el diseño y la geometría en CAD de la matriz para el perfil deseado. El cliente determina parámetros tales como el diámetro de los tochos de aluminio y del contenedor, la temperatura de precalentado del mismo, la capacidad de la prensa que empuja el punzón, la velocidad de desplazamiento del mismo, etc.
- La empresa suministra el CAD. Como este está preparado para producción y no para simulación, la geometría pasa por un proceso de depuración para eliminar detalles que puedan provocar errores numéricos o problemas de convergencia.
- Se genera una malla híbrida con elementos tetraédricos, excepto en la salida del perfil, donde se utilizan prismas alineados con la dirección de extrusión.
- Se configura el solver estableciendo las relaciones constitutivas del material.
- Se resuelven las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía, con un abordaje ALE (Arbitrary-Lagrangean-Eulerian) [4].
- 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. También se puede verificar en esta etapa que las tensiones que se generan en la matriz no provoquen

deformaciones o riesgo de rotura de la misma y que la fuerza a aplicar sobre el tocho no exceda la capacidad de la prensa disponible, además de resultados adicionales de potencial interés, como distribución de tensiones, temperaturas, campo de velocidades, etc.

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.

3. EJEMPLO DE CÁLCULO

Se ilustra el trabajo con los resultados obtenidos con el programa comercial Inspire Extrude® para una matriz diseñada para producir seis perfiles iguales en cada ciclo de trabajo. En este caso, los requisitos de producción imponían que los seis perfiles tuvieran la misma orientación horizontal, de modo que su distribución radial no podía ser periódica ni simétrica.

Se observa que los resultados obtenidos con el primer diseño no son satisfactorios, ya que aparecen diferencias importantes de velocidad entre los distintos perfiles, y también localmente en cada salida. En función de estos resultados, se rediseñó la matriz, y se logró una salida mucho más homogénea, como muestra la figura 4b). Las variaciones de velocidad a la salida pasaron de -72% - $+92\%$ (con componentes laterales que producían alabeos en la sección y curvatura del eje de algunos de los perfiles) a desvíos de -3.7% - $+6.6\%$, resultados dentro del rango considerado muy aceptable.

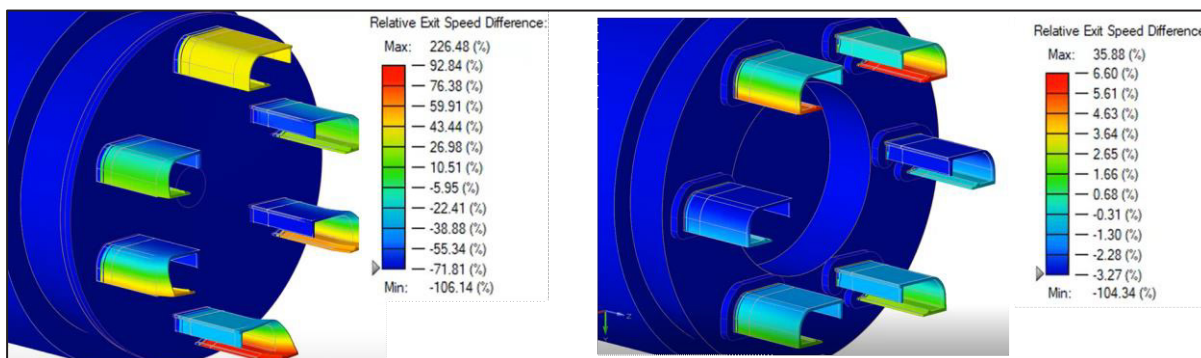


Figura 4: Resultados de extrusión de una matriz para perfiles múltiples. Izquierda: diseño original, Derecha, diseño modificado en base a los resultados obtenidos en el diseño original.

4. CONCLUSIONES

Se ha descrito el proceso de simulación del proceso de extrusión de perfiles de aluminio, con las complejidades matemáticas del modelado del metal sometido a grandes deformaciones viscoplásticas. Se ha mostrado en un ejemplo de cálculo cómo, en función de los resultados numéricos, fue posible rediseñar una matriz que mejoró significativamente la calidad de los perfiles producidos con ella. La utilización de herramientas numéricas para la evaluación y el rediseño de matrices ha probado en la práctica ser rentable para una Pyme local, al reducir los costos y tiempos asociados a la construcción, entrega, prueba y recuperación de una matriz que requiere rediseño. Adicionalmente, el diferencial en la calidad de sus productos obtenido gracias a la simulación redundante en una mayor satisfacción de los clientes y contribuye a una imagen empresarial innovadora.

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.

Este trabajo fue presentado en el VIII Congreso de Matemática Aplicada, Computacional e Industrial, MACI 2021.

REFERENCIAS

- [1] P.K. SAHA, *Aluminum Extrusion Technology*, Ch. 1, ASM International, 2000.
- [2] N. FIÉTIER, Y. KRÄHENBÜHL, M. VIALARD, *New methods for the fast simulations of the extrusion process of hot metals*, *Journal of Materials Processing Technology* 209 (2009), pp. 2244–2259.
- [3] S. LOU, G. ZHAO AND R. WANG, *Aluminum alloy profile extrusion simulation using finite volume method on nonorthogonal structured grids*, *Engineering Computations* 29-1 (2011), pp.31-47.
- [4] L. DONATI, A. SEGATORI, A. GAMBERONI, B. REGGIANI, L. TOMESANI A, *Extrusion Benchmark 2017: Effect of die design on profile quality and distortions of thin C-shaped hollow profiles*, *Materials Today: Proceedings* 10 (2019) pp. 171–184.
- [5] J. DONEA, A. HUERTA, PH. PONTHOT, AND A. RODRÍGUEZ-FERRAN, *Arbitrary Lagrangian-Eulerian methods*, *The Encyclopedia of Computational Mechanics*, Wiley, Vol. 1, Chapter 14 (2004), pp. 413-437.