



**TLATEMOANI**  
**Revista Académica de Investigación**  
Editada por Eumed.net  
No. 18 – Abril 2015  
España  
ISSN: 19899300  
revista.tlatemoani@uaslp.mx

Fecha de recepción: 02 de junio de 2014  
Fecha de aceptación: 20 de abril de 2015

## **DADO PARA EXTRUSIONES POR MEDIO DEL PROCESO SPARK PLASMA SINTERING AND EXTRUSION**

**Jaime Espinoza Hernández**  
Universidad Autónoma de San Luis Potosí  
Campus Huasteca Sur  
E-mail: [j.espinoza1185@gmail.com](mailto:j.espinoza1185@gmail.com)  
**J. Alfredo Manzo Preciado**  
Centro de Ingeniería y Desarrollo Industrial  
E-mail: [jmanzo@cidesi.mx](mailto:jmanzo@cidesi.mx)

### **Resumen**

En el presente trabajo se realiza el diseño de un dado para el extruido de un material Al 6061, basándonos en el esfuerzo máximo que se genera durante la operación de la extrusión. Se obtiene la forma ideal del dado con la cual se va a trabajar, se calcula la fuerza máxima necesaria para realizar la extrusión, con esta fuerza se obtienen los esfuerzos generados en la pared del dado. Posteriormente se hace un análisis con el software de elemento finito ANSYS y se comparan los resultados obtenidos con el esfuerzo permisible del material del dado, se obtiene un sistema que puede soportar los esfuerzos generados en este proceso.

**Palabras clave:** Dado, extrusión, sinterizado, corriente eléctrica, SPS&E.

## **Abstract**

In the present paper, we design a die for the extrusion of a material Al6061, based on the maximum stress that is generated during the extrusion operation. We get the ideal shape of the die with which it will work, calculating the maximum force required for extrusion, this force is obtained with the stresses generated in the wall of the die. Then we analyze with the finite element software ANSYS and compared the results of two ways with the allowable stress of the material given, a system that can withstand the stresses generated in this process is obtained.

## **INTRODUCCIÓN**

El sinterizado es el proceso de compactar y calentar polvos de materiales a altas temperaturas pero por debajo de su punto de fusión para que las partículas puedan unirse.

La sinterización asistida por corriente de plasma pulsada SPS, es un proceso nuevo y en desarrollo, este hace posible la sinterización a bajas temperaturas y en periodos de tiempo más cortos mediante descargas eléctricas entre las partículas de polvo, estas descargas son generadas con la aplicación instantánea de una corriente de plasma pulsada la cual consiste en aplicar el efecto Joule para sinterizar materiales partiendo de la metalurgia de polvos de diferentes tipos. El proceso Spark Plasma Sintering and Extrusión es un nuevo proceso donde surge la necesidad de un sistema que permita realizar sinterizado del material e inmediatamente realizar la extrusión en el mismo sistema o dado.

Este trabajo consiste en encontrar la forma adecuada del dado para la cual los esfuerzos en la pared interior del mismo sean los menores que se generen durante el proceso de extrusión. Se realizan los cálculos para encontrar la máxima fuerza que se requiere para vencer la fuerza de fricción y la fuerza en la zona de deformación primaria, esta fuerza se utiliza para encontrar los esfuerzos radiales y tangenciales y con estos el esfuerzo equivalente de Von Mises. Además se realiza un análisis en ANSYS para ver cómo se distribuyen los esfuerzos en el dado.

## **ANÁLISIS Y DESARROLLO**

### **Obtención de la forma del dado**

La forma adecuada se obtiene realizando simulaciones de extrusiones a diferentes ángulos como se muestra en la Fig. 1, con la finalidad de obtener la forma en la cual los esfuerzos generados son menores.

Análisis en ANSYS

Tipo estructural, elemento plane 182, axisimétrico, material a extrudir es un Aluminio 6061 con las siguientes propiedades a una temperatura de 500°C, comportamiento no lineal, módulo de Young  $E = 2.11GPa$ , coeficiente de Poisson  $\nu = 0.4$ , módulo tangencial  $E_t = 12MPa$  y el esfuerzo de cedencia  $\sigma_c = 5MPa$ , se crea la superficie de la pared del dado y el área del material a extruir, se realiza el mallado del área a extruir y se genera un par de contacto entre el material a extrudir y la superficie de la pared del dado. Aplicando las cargas, se restringe el movimiento de la pared del dado en todas las direcciones y se aplica un desplazamiento en la dirección “Y” del material a extrudir y se resuelve para cada diferente ángulo.

De los resultados obtenidos de los análisis, se seleccionó el más adecuado, siendo los esfuerzos generados y el flujo de material los parámetros evaluados.

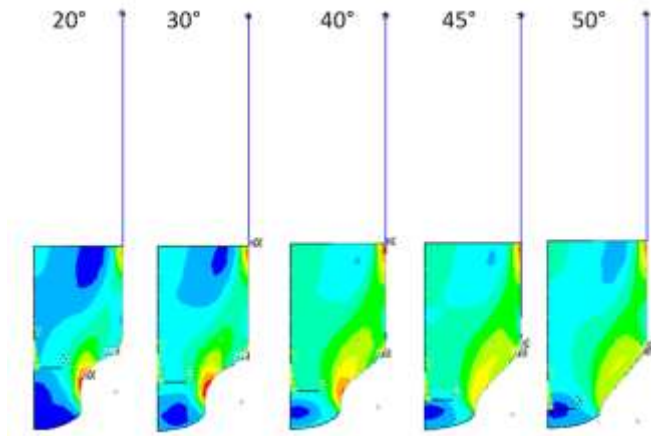


Fig. 1. Diferentes ángulos de salida del dado

**Cálculo de la fuerza máxima para realizar la extrusión**

La carga axial  $F_{st}$  que el pistón necesita para iniciar la extrusión es la suma de la carga de fricción  $F_R$  necesaria para vencer la fricción entre el tocho de aluminio a extrudir y el dado de grafito, más la carga en la zona de deformación primaria  $F_M$ .

Los datos requeridos para realizar el cálculo son los siguientes.

| Material                        | Al 99.5 |
|---------------------------------|---------|
| Diámetro del contenedor $Do$    | 20mm    |
| Diámetro inicial del tocho $Db$ | 19mm    |
| Longitud inicial del tocho $lb$ | 15mm    |
| Temperatura inicial $T$         | 500°C   |
| Velocidad de extrusión $u_{st}$ | 1mm/s   |
| Angulo de salida $\alpha$       | 45°     |

Fuerza requerida para realizar la extrusión

$$F_{st} = F_M + F_R$$

Fuerza en la zona de deformación primaria

$$F_M = C * \varphi_{g_{ges}} * \bar{k}_f * \frac{\pi * D_0^2}{4}$$

Fuerza de fricción entre el tocho y el dado

$$F_R = \pi D_o \tau_s (l_o - l_R + S_1 - S_{St})$$

La fuerza máxima es al inicio de la extrusión donde existe más área de contacto entre el tocho de aluminio y el dado por lo cual la fuerza de fricción es mayor.

$$F_{St_{max}} = 3,205.84N + 12,339.9N = 15,545.7N$$

La fuerza mínima requerida para la extrusión es cuando el pistón ha realizado casi todo el recorrido y la única fuerza que debe vencer es la fuerza en la zona de deformación primaria que es la que se forma frente al ángulo del dado.

$$F_{St_{min}} = 12,339.9N$$

### Cálculo de los esfuerzos generados en el sistema dado-camisa

Se requiere un sistema que sea capaz de soportar los esfuerzos generados por la extrusión, por lo cual es necesario colocar una camisa que genere esfuerzos, y que ayuden a reducir los en la pared interior del mismo. La figura 2 muestra el sistema dado-camisa.

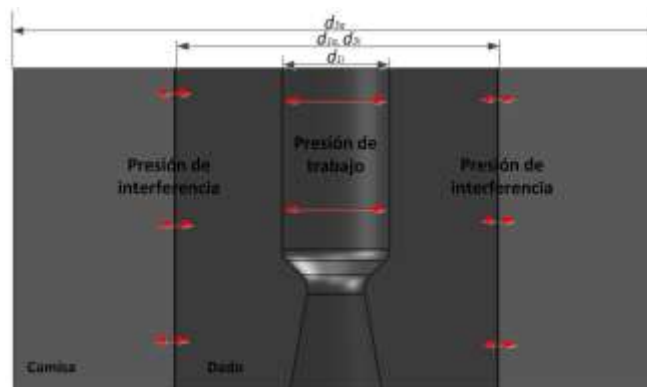


Figura 2. Sistema dado-camisa

En el sistema se generan 3 tipos de esfuerzos, pre esfuerzos por la presión de interferencia entre la camisa y el dado, esfuerzos de trabajo generados por la

presión de extrusión y esfuerzos de operación que son la combinación de los anteriores.

Para cada uno se calculan los esfuerzos radiales y tangenciales en cada una de las paredes tanto interior como exterior del dado y de la camisa.

### Cálculo de los esfuerzos generados por la presión de interferencia entre el dado y la camisa

La presión de interferencia que se genera entre el dado y la camisa se calcula de la siguiente manera.

$$P_s = \frac{E * es}{2} * \frac{(U_3^2 - 1) * (U_1^2 - 1)}{U^2 - 1}$$

Relaciones de diámetros

$$U_3 = d_{3a} / d_{3i} = 120 / 60 = 2$$

$$U_1 = d_{1a} / d_{1i} = 60 / 20 = 3$$

$$U = d_{3a} / d_{3i} = 120 / 20 = 6$$

La presión de interferencia a utilizar es de  $P_s = 10 \text{ N/mm}^2$  y el espesor de la pared de la camisa es de  $30 \text{ mm}$ , ésta presión es generada por una interferencia de  $es = 0.002297$ .

Con esta presión encontramos los esfuerzos radiales y tangenciales generados en las paredes interiores y exteriores del sistema dado-camisa.

|                       | Esfuerzo radial<br>$\sigma_r^* \text{ N/mm}^2$ | Esfuerzo tangencial<br>$\sigma_t^* \text{ N/mm}^2$ |
|-----------------------|--|--|
| Pared interior dado   | 0  | -22.5  |
| Pared exterior dado   | -10.0  | -12.5  |
| Pared interior camisa | -10.0  | 16.6667  |
| Pared exterior camisa | 0  | 6.6667   |

### Cálculo de los esfuerzos generados por la fuerza de extrusión

La fuerza necesaria para la extrusión calculada anteriormente origina una presión en el material extruido, a su vez esta presión genera una presión radial interna que ocasiona los esfuerzos radiales y tangenciales.

$$P_{ri} = 0.7 * P_{max} = 0.7 * 49.4834$$

$$P_{ri} = 34.6384 N/mm^2$$

|                              | <b>Esfuerzo radial</b><br>$\sigma_r^{**} N/mm^2$ | <b>Esfuerzo tangencial</b><br>$\sigma_t^{**} N/mm^2$ |
|------------------------------|--|--|
| <b>Pared interior dado</b>   | -34.6384   | 36.6178  |
| <b>Interface dado-camisa</b> | -2.9690  | 4.9483   |
| <b>Pared exterior camisa</b> | 0  | 1.9793   |

### Cálculo de los esfuerzos de operación

Siendo estos la combinación de los esfuerzos generados por la presión de interferencia y la presión de extrusión, son los utilizados para calcular los esfuerzos equivalentes de Von Mises.

|                              | <b>Esfuerzo radial</b><br>$\sigma_r^{***} N/mm^2$ | <b>Esfuerzo tangencial</b><br>$\sigma_t^{***} N/mm^2$ |
|------------------------------|---|---|
| <b>Pared interior dado</b>   | -34.6384  | 14.1178   |
| <b>Pared exterior dado</b>   | -12.9690  | -7.5517   |
| <b>Pared interior camisa</b> | -12.9690  | 21.6150   |
| <b>Pared exterior camisa</b> | 0   | 8.6460  |

### Cálculo de los esfuerzos equivalentes

Los esfuerzos equivalentes de Von Mises son obtenidos con los esfuerzos radiales y tangenciales resultantes en la operación de extrusión.

|              |          | Esfuerzo equivalente $\sigma_v$ N/mm <sup>2</sup> |
|--------------|----------|---|
| Pared dado   | interior | 43.4529   |
| Pared dado   | exterior | 11.2821   |
| Pared camisa | interior | 30.2610   |
| Pared camisa | exterior | 8.6460  |

El máximo esfuerzo equivalente multiplicado por un factor de seguridad de 1.25 debe ser menor al esfuerzo permisible del material del dado.

$$\sigma_v * 1.25 < \sigma_{adm}$$

$$54.3161 < 181 \text{ N/mm}^2$$

### Simulación de elemento finito con el software ANSYS

El análisis con ANSYS nos sirve para comprobar los resultados obtenidos anteriormente, ver las zonas en las cuales existe mayor concentración de esfuerzos y como es su distribución.

El procedimiento empleado es el siguiente:

Se elige el tipo de análisis como estructural, se agregan los tipos de elementos a utilizar y las propiedades de los materiales a 500°C.

Material a extrudir: aluminio 6061

Elemento plane 182, axisimétrico, comportamiento no lineal, módulo de Young  $E = 2.11 \text{ GPa}$ , coeficiente de Poisson  $\nu = 0.4$ , módulo tangencial  $E_t = 12 \text{ MPa}$  y el esfuerzo de cedencia  $\sigma_c = 5 \text{ MPa}$

## DADO PARA EXTRUSIONES POR MEDIO DEL PROCESO SPARK PLASMA SINTERING AND EXTRUSION

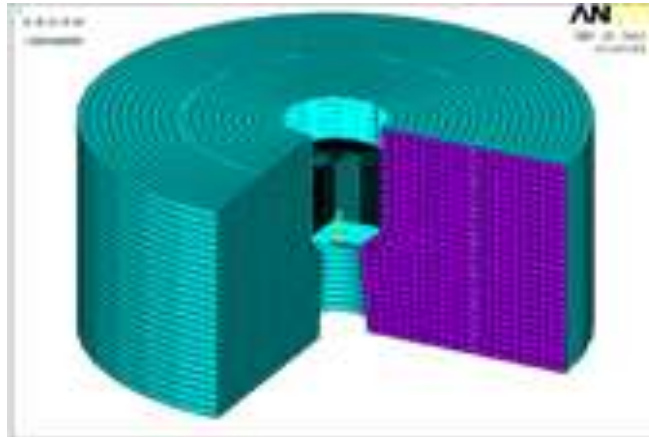
Material del dado Grafito Isotrópico

Elemento plane 183, axisimétrico, módulo de Young  $E = 12.7GPa$ , coeficiente de Poisson  $\nu = 0.2$ .

Material de la camisa Grafito Isotrópico

Elemento plane 183, axisimétrico, módulo de Young  $E = 12.7GPa$ , coeficiente de Poisson  $\nu = 0.2$ .

Se crea la geometría y se realiza el mallado como se muestra en la figura 3, cuidando de agregar las propiedades correspondientes de cada material.



**Figura 3. Malla del sistema**

Se crean dos pares de contactos, el primero entre el material a extrudir y la pared interior del dado y el segundo entre la pared exterior del dado y la pared interior de la camisa.

Se aplican las cargas correspondientes. se restringe la base del sistema dado-camisa en la dirección "Y", se aplica la presión de interferencia entre el dado y la camisa y se aplica un desplazamiento al aluminio en la dirección "Y".

La figura 4 nos muestra la distribución de esfuerzos de Von Mises en el sistema de extrusión, alcanzando un máximo valor de esfuerzo de  $45.4 N/mm^2$ .

$$\sigma_v * 1.25 < \sigma_{adm}$$

$$56.75 < 181 N/mm^2$$



## DADO PARA EXTRUSIONES POR MEDIO DEL PROCESO SPARK PLASMA SINTERING AND EXTRUSION

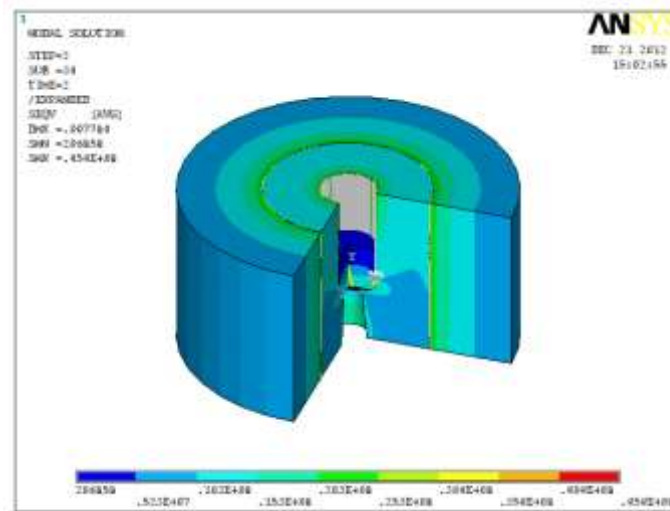


Figura 4. Esfuerzos de Von Misses

### RESULTADOS

En la siguiente tabla se observa la comparación de los resultados obtenidos de manera analítica y los obtenidos con la simulación en ANSYS, cabe notar que la diferencia es mínima y ninguno sobrepasa el valor límite del esfuerzo permisible del material.

| Dado-camisa           | Analíticamente<br>$N/mm^2$ | Simulación con<br>ANSYS $N/mm^2$ |
|-----------------------|----------------------------|----------------------------------|
| Pared interior dado   | 43.4529                    | 45.4                             |
| Pared exterior dado   | 11.2821                    | 10.3                             |
| Pared interior camisa | 30.2610                    | 20.3                             |
| Pared exterior camisa | 8.6460                     | 6.64                             |
| Valor con F.s de 1.25 | 54.3161                    | 56.75                            |
| $181 N/mm^2 >$        | Cumple                     | Cumple                           |

## CONCLUSIONES

1. Se encontró que el ángulo de salida en el dado para realizar la extrusión es de 45°.
2. La colocación de una camisa reduce los esfuerzos generados en el interior del dado y da un margen más amplio de fuerza que puede aplicarse para realizar una extrusión.
3. Los esfuerzos calculados analíticamente y mediante el software ANSYS son muy aproximados y el esfuerzo equivalente de Von Mises es menor que el esfuerzo permisible del material por lo que el dado resistirá al momento de la extrusión.
4. Este dado puede utilizarse para extrudir otros tipos de materiales, ya sea cerámicos o compuestos, siempre y cuando el esfuerzo equivalente que sea generado no sobrepase el esfuerzo admisible del dado.

## BIBLIOGRAFÍA

1. J. Butler, P. Tiernan, A.A. Gandhi, K. McNamara, and S.A.M. Tofail. December 21, 2010. "Production of Nitinol Wire from Elemental Nickel and Titanium Powders Through Spark Plasma Sintering and Extrusion".
2. J. S. GUNASEKERA, H. L. GEGEL, J. C. MALAS, S. M. DORAIVELU, and D. BARKER. "CAD/CAM of Streamlined Extrusion Dies".
3. HE You-feng, XIE Shui-sheng, CHENG Lei, HUANG Guo-jie, FU Yao. September 2009. "FEM simulation of aluminum extrusion process in porthole die with pockets".
4. S.Z. Qamar\*, A.F.M. Arif, A.K. 2004. "A new definition of shape complexity for metal extrusion". Materials Processing Technology.
5. Genick Bar–Meir, Ph. D. 2009. "Fundamentals of Die Casting Design".
6. Mikell P. Groover. "Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas".
7. Kalpakjian, Schmid. *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Prentice Hall.
8. M. Bauser, G. Sauer, K. Siegert. 2006. "Extrusion". 2006.
9. Harold F. Giles, Jr. November. 2004. "Extrusion: The Definitive Processing guide and Handbook".
10. Volumen 3. "Enciclopedia del aluminio Ediciones ".URMO.
11. Bhanu Prasad, B.V.R. Bhat, Y.R. Mhajan and P.Ramakrishman. 2006. "Effect of extrusion parameters on structure and properties of 2124 aluminum alloy matrix composites".
12. Arthur P. Boresi, Richard J. Schmidt. Wiley. "Advanced mechanics of materials".
13. Egor P. Popov. "Mecánica de sólidos".
14. F. R. Shanley. "Mecánica de materiales".

15. Tibor Kvackaj and Robert Bibulsky. 2011. "Aluminium alloys, their and applications".
16. Eugene F Megyesy. 1992. "Manual de recipientes a presión, diseño y calculo".
17. Rubio, Romero. 2011. "Metodo del elemento finito, fundamentos y aplicaciones con ANSYS".
18. Kurt Laue, Helmut Stenger. 1981. "Extrusion, Processes, Machinery, Tooling".
19. Volume 1 y 2, ASM. "Metal Handbook".
20. Hugh O. Pierson. Noyes. 1993. "Handbook of carbon, graphite, diamond and fullerene".
21. K.Morsi, El-Desouky, B. Jhonson, A. Mar and S. Lanka. 14 April 2009. "Spark plasma extrusion (SPE): prospects and potential"

### Nomenclatura

|                  |  |
|------------------|--|
| $F_{st}$         | <i>carga necesaria para iniciar la extrusión</i> |
| $F_M$            | <i>carga de deformación primaria</i>             |
| $F_R$            | <i>carga de fricción</i>                         |
| $C$              | <i>factor específico del dado</i>                |
| $\phi_{g_{ges}}$ | <i>deformación principal logarítmica</i>         |
| $\bar{k}_f$      | <i>esfuerzo de flujo</i>                         |
| $D_o$            | <i>diametro inicial del contenedor</i>           |
| $\tau_S$         | <i>esfuerzo cortante</i>                         |
| $l_o$            | <i>longitud de aplastamiento del tocho</i>       |
| $l_R$            | <i>longitud de descarga</i>                      |
| $S_1$            | <i>desplazamiento de aplastamiento</i>           |
| $S_{St}$         | <i>desplazamiento del pistón</i>                 |
| $P_s$            | <i>presión de interferencia</i>                  |
| $P_{ri}$         | <i>presión radial interna</i>                    |
| $P_{max}$        | <i>presión máxima</i>                            |
| $\sigma_r$       | <i>esfuerzo radial</i>                           |
| $\sigma_t$       | <i>esfuerzo tangencial</i>                       |
| $\sigma_v$       | <i>esfuerzo equivalente de Von Mises</i>         |
| $\sigma_{adm}$   | <i>esfuerzo admisible del material</i>           |
| $\delta$         | <i>interferencia entre el dado y camisa</i>      |
| $a$              | <i>radio interno del dado</i>                    |
| $b$              | <i>radio de contacto entre el dado y camisa</i>  |
| $c$              | <i>radio externo de la camisa</i>                |
| $E_1$            | <i>módulo de elasticidad del dado</i>            |
| $E_0$            | <i>módulo de elasticidad de la camisa</i>        |
| $\nu_0$          | <i>coeficiente de Poisson de la camisa</i>       |
| $\nu_i$          | <i>coeficiente de Poisson del dado</i>           |