

Interpretación del flujo plástico suscitado en procesos de conformado mecánico por compresión

Salas Reyes Antonio Enrique^{1*}, García Robledo Jaime Francisco¹, Rodríguez Ortiz Gabriel²

¹Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química. Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Circuito de la Investigación Científica S/N, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México, C.P. 04510, México.

²Universidad Politécnica de Juventino Rosas, Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Hidalgo 102, Comunidad de Valencia, Santa Cruz de Juventino Rosas, Guanajuato, C.P. 38253, México.

*Autor para correspondencia: enriquesalas@comunidad.unam.mx

Recibido:

22/abril/2018

Aceptado:

19/julio/2018

Palabras clave:

Procesos de conformado,
deformación plástica

Keywords:

Metal forming processes,
plastic deformation

RESUMEN

Generalmente, en los procesos de manufactura se aplican grandes fuerzas de compresión para darles forma a los materiales metálicos. Y dado que éstos son opacos, no es posible observar con facilidad los patrones de flujo tras la deformación plástica. Por lo tanto, con la finalidad de observar dichos patrones es que este trabajo se elaboraron modelos físicos para describir e interpretar el flujo plástico derivado de procesos de conformado mecánico por compresión, al emplear un material sintético blando, moldeable y de colores diversos. Así, con el material sintético fue posible observar las “bandas de deformación” y el gradiente de deformación al interior del material, mostrándose que los mayores esfuerzos se concentran hacia el centro de la pieza de trabajo y, donde los posibles defectos se originan por gradientes de energía mecánica y fricción. Finalmente, se hace evidente aplicar tratamientos térmicos para liberar tensiones internas y disminuir la acritud del material.

ABSTRACT

Generally, in manufacturing processes large compression forces are applied to give metallic materials their form. Furthermore, as metals are opaque, it is not possible to observe flow patterns after plastic deformation with facility. Hence, with the purpose to observe those flow patterns, in this work physical models were developed to describe and interpret the plastic flow derived from mechanical compression processes, using a soft synthetic material, which is moldable and with diverse colors. Thus, with the synthetic material it was possible to observe the “shear bands” and the deformation gradient inside the material, showing that the major stresses concentrate towards working piece and, where the possible defects originate by gradients of mechanical energy and friction. Finally, it is evident to apply heat treatments to release internal tensions and decrease the hardness of the material.

Introducción

Ya que el conformado mecánico de materiales metálicos es relativamente económico y tecnológicamente muy importante, el proceso de deformación plástica ha sido objeto de un extensivo estudio, tanto experimental como teórico, a lo largo de los años (Bergström, 2010). En este sentido, dos factores son considerados importantes al estudiar el conformado mecánico, por un lado se encuentra el factor del material (por ejemplo, microestructura, tamaño de grano, ductilidad, etc.) y, por otro, el factor de procesamiento (por ejemplo, la forma del material, geometría del herramental, fricción, etc.).

En general, en los procesos de conformado se aplica un esfuerzo, ya sea de compresión, de tracción o de corte, para deformar plásticamente el metal. La extrusión y la forja se incluyen en los procesos de conformado por deformación volumétrica que aplican cargas compresivas, caracterizados por presentar deformaciones significativas y cambios de forma, donde la relación entre el área superficial y el volumen de trabajo es relativamente pequeña. La forma de trabajo inicial para estos procesos incluye tochos cilíndricos y barras rectangulares (García, 2005). Los tipos de extrusión dependen básicamente de la geometría y del material a procesar. En la extrusión directa, se deposita en un recipiente un lingote en bruto llamado tocho, que será comprimido por un pistón y obligado a fluir dentro de un dado adoptando la geometría que tenga éste. En la forja abierta, la pieza de trabajo se comprime unidireccionalmente entre dos dados o matrices, ya sean planos o con forma, permitiendo que el material fluya sin restricciones en una dirección lateral con respecto a la superficie de los dados (Contreras, 2013).

Para optimizar dichos procesos es de suma importancia conocer la capacidad de flujo plástico de los materiales y, sobre todo, interpretar la componente de propiedades resultantes dependientes de la intensidad y de las condiciones de la deformación plástica durante el conformado mecánico (Knoerr et al., 1992).

Por otra parte, debido a la complejidad y riesgos que supone la experimentación en un proceso industrial, muchos de los procesos de conformado mecánico pueden ser simulados usando técnicas experimentales que emplean materiales de similar comportamiento y equipo relativamente sencillo, que cercanamente reemplacen el proceso real (Sofuoglu, 1990). Materiales tales como la plastilina, cera y polímeros son empleados para la simulación física, debido a que la producción de especímenes de prueba es fácil y de bajo costo; la fuerza requerida para la deformación es relativamente

pequeña, la observación de los patrones de flujo tras la deformación es apropiada y, sobre todo, los procedimientos experimentales son simples (Sofuoglu y Rasty, 2000). Además, los herramientas son construidos de materiales económicos.

Debido a ello, en más de 60 años, la plastilina ha sido empleada ampliamente como un material de modelado conveniente para simular la deformación plástica observada en los procesos de forja, laminación y extrusión (Kawai et al., 1975; Green, 1951).

Por otro lado, las actividades lúdicas representan ser herramientas imprescindibles en la docencia como medios de enseñanza. De esta manera, y como parte de una actividad de laboratorio de la materia de conformado mecánico, para desarrollar este trabajo se ha empleado plastilina para modelar el tocho metálico (producto semi-terminado de sección transversal cuadrada o redonda obtenido por colada continua) y dispositivos comerciales para simular los procesos de extrusión y forja. Consecuentemente, estudiantes de licenciatura con especialidad en metalurgia pueden observar, analizar y comprender el flujo plástico derivado de los procesos antes mencionados, así como identificar defectos típicos correlacionados con aquellos originados en los procesos reales, siendo el objetivo primordial de este trabajo.

Desarrollo

Para simular al tocho metálico en el proceso de extrusión se utilizó plastilina y se emplearon jeringas de volúmenes comerciales que actuaron como dado y pistón, evaluando así la capacidad de flujo plástico de la plastilina al emplear una condición sin lubricación y una lubricada.

Para ello, se elaboraron 20 bolitas de plastilina de 1 cm de diámetro; 12 bolitas de plastilina color 1 (rojo) y 6 bolitas de plastilina de color 2 (azul), con la finalidad de obtener 6 tochos. De estos 6 tochos, 3 de ellos se usaron para realizar la deformación en la condición sin lubricación (condición 1) y los 3 restantes para la condición lubricada (condición 2), usando aceite comercial para dirección hidráulica, como lubricante, impregnado sobre la pared interna del cilindro de la jeringa. La construcción de los tochos a extruir consistió en colocar las bolitas de plastilina en el orden color 1, color 2 y color 1, de tal manera que al manipularlas adecuadamente se asegure el ajuste con el diámetro interior del cilindro de la jeringa, tal y como se muestra en la figura 1. Como herramental se emplearon 3 jeringas de volúmenes comerciales con capacidad de 20, 10 y 5 ml, respectivamente. Finalmente, la fuerza empleada en la carga de presión se limitó a la generada por el brazo de una persona.

De manera general, el experimento se realizó colocando el tocho de plastilina en el interior del cilindro de la jeringa (abertura grande) y empujando manualmente el pistón (émbolo), de modo que la plastilina fluyera por la cavidad de abertura chica, que en este caso representa ser la salida del dado. El material extruido se colocó en una superficie lisa y resistente (por ejemplo, vidrio) para su observación. En seguida, se seccionó el producto extruido longitudinalmente (sentido de la deformación) con la finalidad de observar los patrones de flujo, midiéndose de esta manera la distancia entre meniscos.

En el caso del experimento usando aceite como lubricante, el impregnado se realizó sobre la pared interna del cilindro de cada jeringa. Especial cuidado se dedicó al tiempo de colocar el tocho dentro del cilindro de la jeringa para evitar atrapar aire, asegurándose de esta manera la mínima perturbación en el experimento.

En la Tabla 1 se muestran las dimensiones de las jeringas usadas para representar al dado y, en la Tabla 2 se resume la matriz de experimentos realizados por los alumnos en su práctica de laboratorio.

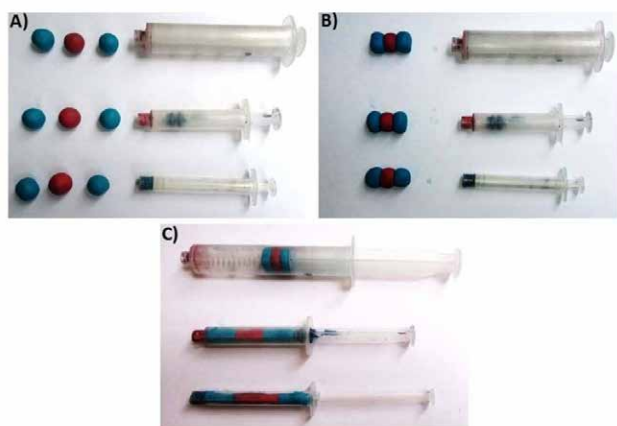


Figura 1. A. Representación del material (plastilina) y equipo de extrusión (jeringas). B. Tochos de plastilina. C. Sistemas de extrusión.

Tabla 1. Dimensiones de las jeringas comerciales.

Diámetro (cm)	Jeringa 1 (20 ml)	Jeringa 2 (10 ml)	Jeringa 3 (5 ml)
Abertura grande	1.86	1.36	0.81
Abertura chica	0.84	0.7	0.57

Tabla 2. Matriz de experimentos para el proceso de extrusión directa con plastilina.

Herramental	Diámetro interno jeringa, (cm)	Longitud inicial del tocho (cm)	
		Condición 1 (sin lubricar)	Condición 2 (lubricando)
Jeringa 1 (20 ml)	1.86	0.8	0.8
Jeringa 2 (10 ml)	1.36	1.36	1.36
Jeringa 3 (5 ml)	0.81	4.3	4.3

Para el caso de la forja abierta, primero se formaron 4 cilindros de plastilina de color 1 con dimensiones de 2 cm de espesor por 5 cm de diámetro y, además, se formaron 3 cilindros adicionales de 0.5 cm de espesor por 5 cm de diámetro de plastilina de color 2. En seguida, se encimaron uno a uno, intercambiando el orden del color, es decir, color 1, color 2, color 1, etc., hasta lograr construir un cilindro uniforme de colores alternados de plastilina. Este procedimiento se repitió para obtener 3 probetas cilíndricas, como se muestra en la figura 2. Posteriormente, dichas probetas se colocaron en una máquina universal de ensayos con capacidad máxima de carga de 20 Ton, y se ensayaron a compresión hasta alcanzar 30, 50 y 70% de reducción en su altura (ver figuras 3 a 5), respectivamente. Finalmente, las probetas de plastilina en la condición de deformación se seccionaron en su sentido longitudinal con la finalidad de observar y comparar la forma que adoptó cada capa de plastilina (cada cilindro) por efecto del flujo plástico tras la compresión.

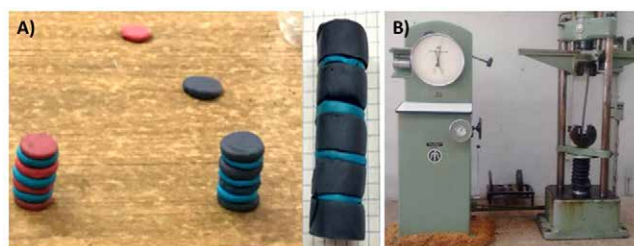


Figura 2. A. Construcción de probetas para simular el tocho de forja (condición previa a la deformación). B. Máquina de ensayos universales.

Cabe resaltar que para conservar la manejabilidad y estabilidad de las formas de plastilina, tanto las bolitas como los cilindros, e inclusive las probetas ya ensayadas, constantemente éstas se estuvieron colocando sobre hielo. De esta manera, fue posible conservar la reproducibilidad de los experimentos.

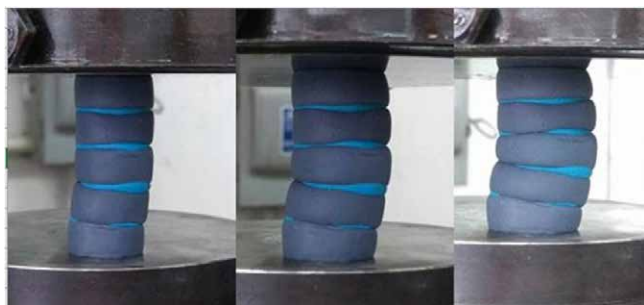


Figura 3. Secuencia de forja abierta en una condición de deformación al 30 %.



Figura 4. Secuencia de forja abierta en una condición de deformación al 50%.



Figura 5. Secuencia de forja abierta en una condición de deformación al 70%.

Resultados y discusión

Proceso de extrusión

El flujo plástico se ve reflejado en el porcentaje de alargamiento de las probetas al pasar por cada dado. En la figura 6 se muestran los detalles de los productos extruidos, tanto en la condición de deformación sin lubricante como con lubricante. A medida que aumenta el diámetro interno de la jeringa (abertura grande del cilindro) se puede observar que la longitud final del producto extruido es mayor. Adicionalmente, se puede observar que existe una simetría axial en el sentido longitudinal de la deformación, percibiéndose claramente la forma geométrica de los meniscos debido al color azul de la plastilina. Una de las consideraciones contempladas para la utilización de esta metodología, es que la plastilina conserva un comportamiento ideal, por lo que la longitud medida en el color central del perfil obtenido (color azul) es proporcional a la fuerza aplicada. También se pudo observar que al incrementarse la abertura grande de

la jeringa (diámetro del cilindro) se requiere un mayor esfuerzo para hacer fluir al material y lograr su reducción de área transversal. Por lo tanto, el hecho de aplicar lubricante sobre la pared interna del cilindro tiene un efecto positivo en el grado de flujo plástico, siendo éste más fácil; aspecto que es muy visible al comparar ambas condiciones de deformación.

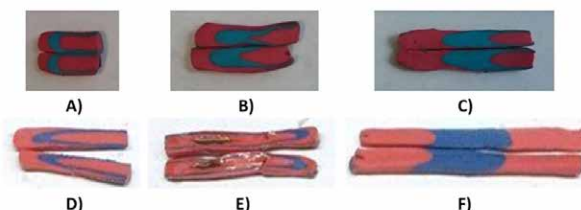


Figura 6. Productos extruidos en jeringas de 20, 10 y 3 ml, respectivamente, para la condición: (A-C) Sin lubricante y (D-F) Con lubricante.

Así, en la Tabla 3 se presentan los valores obtenidos, tanto de porcentaje de reducción de área (RA) como de alargamiento de los productos extruidos, para ambas condiciones de deformación.

Tabla 3. Valores dimensionales de los tochos después de la deformación plástica en ambas condiciones.

Herramental	Condición 1 (sin lubricar)		Condición 2 (lubricando)	
	%RA	%l	%RA	%l
Jeringa 1 (20 ml)	64	48	64	50
Jeringa 2 (10 ml)	50	9	50	11
Jeringa 3 (5 ml)	21	13	21	15

Ya que la apertura chica (dado) se mantiene constante en las condiciones de experimentación, es de esperarse que la reducción de área transversal se mantenga también constante en ambas condiciones de deformación. Sin embargo, en el caso del alargamiento final se aprecia un aumento de dos unidades en la condición 2 respecto de la condición 1. Por lo cual aparentemente se observa un efecto benéfico en el uso de lubricante, facilitándose el flujo plástico.

En la figura 7 se pueden apreciar dos tipos de defectos que se han generado bajo la presente metodología experimental para simular el proceso de extrusión. El primero de ellos (inciso A) corresponde a una

inhomogeneidad del flujo plástico en el material debido a la variación de la presión (carga) en el pistón de extrusión. El segundo de ellos (inciso B) representa una discontinuidad en la masa del material extruido, semejando rechupes internos, los cuales son llamados “Chevrone”. Finalmente, el tercero de ellos (inciso C) corresponde al agrietado superficial que se asocia al a un aumento de la velocidad de extrusión, lo cual conduce a la generación de altos gradientes de deformación, asociado con el desprendimiento de calor. Finalmente, en el inciso D se puede observar el ejemplar de un producto real presentando dicho defecto.

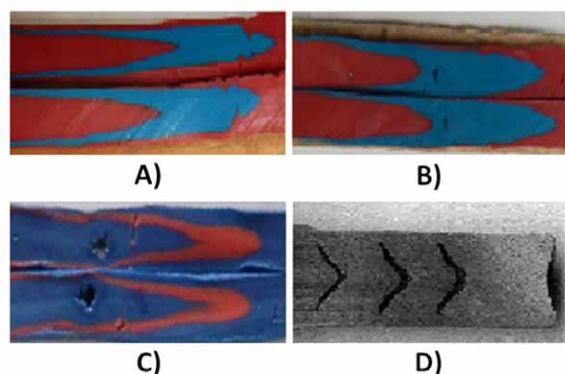


Figura 7. Tipos de defectos generados en los modelos físicos durante el proceso de extrusión: **(A)** Inhomogeneidad plástica, **(B)** Chevrone, **(C)** Agrietado interno y superficial y **(D)** Defecto Chevron real.

Es importante mencionar que la realización de este experimento utilizando plastilina como material para simular el proceso de extrusión ayuda a conceptualizar el uso y control de variables, siendo primordial mantener la velocidad de deformación uniforme. Sin embargo, esto se vuelve más complejo cuando se extruyen perfiles de secciones irregulares. Adicionalmente, la configuración de las boquillas de los dados deben de compensar los cambios volumétricos que se producen en el material, de modo que al final se obtenga el producto con las dimensiones requeridas; donde principalmente los factores que provocan cambios en el tamaño y en la forma del material son el estado de tensiones y el control de la disipación (enfriamiento) de calor por efecto del trabajo mecánico (fricción).

Proceso de forja abierta

De acuerdo con la Tabla 4, se puede observar una gran similitud entre el porcentaje de reducción de altura experimental y la calculada teóricamente, por lo que el hecho utilizar modelos de plastilina da una buena aproximación del comportamiento que tiene el material al ser trabajado por forja.

Tabla 4. Porcentajes de reducción de altura con las correspondientes lecturas de altura inicial y final.

%R (h teórica)	h_0 (cm)	$h_{f\text{teórica}}$ (cm)	$h_{f\text{real}}$ (cm)	%R (h real)
30	6	4.2	4.57	23.75
50	6	2.77	3.05	44.95
70	6	1.71	1.98	65.26

Por lo tanto, a medida que aumenta el porcentaje de reducción de altura, se genera el abarrilamiento del material, donde en el centro de la pieza se concentra el mayor esfuerzo de compresión. Esto se puede apreciar en las líneas de flujo presentadas en la figura 8. A medida que aumenta el grado de compresión se presenta una componente de fragilización por efecto del endurecimiento del material, en términos de la densidad de dislocaciones.

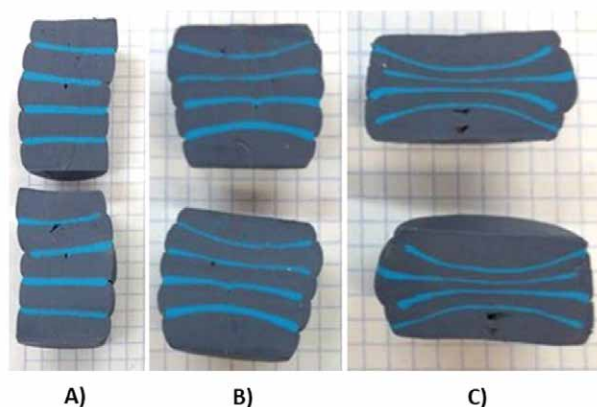


Figura 8. Modelos físicos en plastilina deformados por forja mostrando un corte longitudinal al centro de la pieza: **(A)** Deformación al 30%, **(B)** Deformación al 50% y **(C)** Deformación al 70%.

En general, muchos metales y aleaciones se pueden forjar; si bien, la facilidad de la operación varía de unos materiales a otros y en función del espesor (altura inicial). Así, la relativa forjabilidad del material la determinan los elementos químicos existentes en la aleación, es decir, cuántos más elementos de aleación hay presentes, más difícil es la forja y más rápidamente se desgastan los herramientas.

Así, al observar las regiones azules en cada pieza de trabajo, representadas a modo de “bandas de deformación”, éstas permiten observar el gradiente de deformación al interior del material. La formación de bandas de deformación durante el trabajado en frío de metales ocurre por la concentración de flujo plástico, donde éstas representan ser una de las características

microestructurales más observadas durante la deformación plástica en materiales dúctiles (Jia et al., 2012). De esta manera, se hace evidente que los mayores esfuerzos se orientan hacia el centro de pieza y, donde los posibles defectos, sobre todo en el centro, son debidos a la concentración de energía mecánica y de la misma fricción. De esto que sea necesario aplicar tratamientos térmicos para liberar las tensiones internas y disminuir el grado de acritud de los materiales.

Conclusiones

El uso de modelos físicos empleando plastilina para sustituir materiales metálicos (y de materiales similares) son de gran importancia, sobre todo con propósitos académicos, para poder simular procesos de deformación plástica, ya que por un lado, es posible estudiar los conceptos básicos que gobiernan cada uno de los procesos de conformado mecánico, así como estudiar situaciones complejas, que puede resultar en la propuesta de mejoras a nivel industrial, controlando el flujo plástico. Por lo tanto, se puede enfatizar que la simulación de los procesos de extrusión y de forja, empleando plastilina, son útiles para representar las condiciones de deformación plástica en el conformado de piezas, así como detectar defectos extrapolables a aquellos obtenidos en materiales reales.

Finalmente, la actividad en el laboratorio complementa los conocimientos teóricos y no requiere de contar con maquinaria compleja o de alta tecnología para que los estudiantes logren comprender la deformación plástica en materiales metálicos e integren varios canales de aprendizaje, tales como el visual y el kinestésico.

Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo de los alumnos de la carrera de Ingeniería Metalúrgica, FQ-UNAM, Damián Avilés de la Cruz, Diana Esquivel Hernández, Daniel Ricardo González Morales, Ángel Mauricio Peña Villanueva, Jesús Noyola Jiménez, Linda Karina González Olivares y Jorge Alejandro López Morales, por el apoyo brindado para la realización de los experimentos.

Referencias

Bergström Y. (2015). The plastic deformation process of metals - 50 years development of a dislocation based theory. Pp. 1-42. Recuperado el 3 de mayo de 2017, de: https://www.researchgate.net/publication/275583972_The_plastic_deformation_

[process_of_metals_-_50_years_development_of_a_dislocation_based_theory_A_journey_from_homogeneous_to_inhomogeneous_plastic_deformation](#)

Contreras A.E. (2013). Optimización del proceso de forja abierta para evitar defectos internos. Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León, México.

Green A.P. (1951). The use of Plasticine models to simulate the plastic flow of metals. *Philosophical Magazine*, 42: 365-73.

Kawai M., Kamishohara K. (1975). The use of Plasticine models to simulate the stress in metals under plastic deformation. *International Forging Conference*, Paris, France, 1975.

Knoerr M., Lange K., Altan T. (1992). An integrated approach to process simulation and die stress analysis in forging. *Proceedings of American Manufacturers Research Conference*, 20: 53-60.

Sofuoglu H. (1990). Physical modeling of extrusión process. MSc Thesis, Texas Tech University, USA.

Sofuoglu H., Rasty J. (2000). Flow behavior of plasticine used in physical modeling of metal forming processes. *Tribology International*, 33: 523-529.

Wang X., Zhang D., Gu C., Shen Z., Liu H. (2014). Research on the Micro Sheet Stamping Process Using Plasticine as Soft Punch. *Materials*, 7: 4118-4131.

Jia N., Eisenlohr P., Roters F., Raabe D., Zhao X. (2012). Orientation dependence of shear banding in face-centered-cubic single crystals. *Acta Materialia*, 60: 3415-3434.