

Efecto del endurecimiento por deformación plástica sobre la microestructura en tornillos de acero SAE 1038 forjados en frío

Ramon López^a, Benjamín Vargas^{a,*}, Elizabeth Garfias^b, Irineo Zaragoza^a, Verónica Estrella^a, Laura Palacios^a

^aTecnológico Nacional de México, Instituto Tecnológico de Tlalnepantla, División de Estudios de Posgrado e Investigación, Av. Instituto Tecnológico s/n, Col. La Comunidad, Tlalnepantla de Baz, Estado de México, México, C.P 54070, Tel. 01 (55) 5565 326 1 ext.121.

^bDepartamento de Materiales, Área de Ingeniería de Materiales, División de CBI, UAM Azcapotzalco, Av. San Pablo N° 180, Col. Reynosa Tamaulipas, Azcapotzalco 02200, CDMX, México.

*benvargasa@gmail.com

Resumen

Se analizó el efecto del endurecimiento por deformación plástica sobre la evolución microestructural y mecánica de tornillos de acero SAE 1038 con diferentes pasos de forjado en frío, mediante microscopía óptica, mediciones de número de tamaño de grano ASTM (G), alargamiento de grano promedio, exponente de endurecimiento por deformación (n) y deformación plástica promedio. En el alambre recocido inicial se observó una microestructura con matriz ferrítica equiaxial de tamaño de grano mixto con presencia de partículas semi-redondas y alargadas distribuidas en bandas longitudinales y alternadas con dirección del estirado. Se encontró una evidente deformación plástica gradual conforme se aplicaron los pasos de forjado en frío (alambre enderezado, cuadro de cabeza, cabeza y roscado). La máxima deformación plástica (20% de reducción en longitud) generó una microestructura con distribución diferente y cambio de dirección a perpendicular de las bandas de partículas esferoidizadas, así como granos ferríticos deformados y alargados cuantificados con el menor número de tamaño de grano (7.4 G) representando 15% de reducción, mayor aumento en alargamiento de granos promedio (108%) y mayor incremento del exponente n (396%). Todo lo anterior, se alcanzó en el cuerpo de cabeza forjada en frío asociado con el mayor endurecimiento por deformación plástica permanente, seguido por el cuadro de cabeza y roscado, comparados con la microestructura libre de deformación del alambre recocido inicial.

Palabras clave: Exponente del endurecimiento por deformación, forjado en frío, número de tamaño de grano, tornillo automotriz.

1. Introducción

El forjado en frío es un proceso mediante deformación plástica hasta del 70%, utilizado para el conformado de aleaciones metálicas, tal como la manufactura de tornillos en acero al carbono para la industria metal-mecánica. Para facilitar el forjado, se requiere que el metal presente una condición microestructural y mecánica de recocido obtenido por tratamiento térmico, por lo general a 855°C durante 20 min con enfriamiento lento dentro del horno a 650°C, con el objetivo de generar una microestructura dúctil susceptible a la deformación plástica permanente sin agrietamiento en frío [1].

El forjado se basa en el fenómeno del endurecimiento por deformación plástica o trabajo en frío relacionado con el deslizamiento, interacción y anclaje de las dislocaciones contra obstáculos estructurales, tales como fronteras o límites de grano, impurezas, partículas de segunda fase precipitadas, engrosadas o esferoidizadas y mismas dislocaciones. La deformación plástica es mayor sobre los planos de deslizamiento de las dislocaciones, por lo que la distorsión de la red cristalina aumenta con mayor deformación. Lo anterior, se manifiesta con incremento

en la resistencia mecánica para deformaciones posteriores [2].

Cuando las dislocaciones empiezan a moverse, sus extremos permanecen anclados en partículas, por lo que los planos de deslizamiento activos no pueden librarse de sus dislocaciones, de hecho, estas se multiplican cuando el plano se desliza. Como la facilidad con que una dislocación se mueve en el plano de deslizamiento es indicación de la ductilidad, se deduce que el material puede endurecerse si se colocan obstáculos en la trayectoria de las dislocaciones, tal como intersecciones de dislocaciones en los planos de deslizamiento que se cortan, resultando el apilamiento de las dislocaciones y redes complejas de líneas de dislocación interconectadas, incrementando la resistencia. Cuando el número de dislocaciones en el metal trabajado llega a ser grande, aquellas que se mueven a lo largo de los planos de deslizamiento obstruyen a otras su movimiento. Siempre que haya distorsión de la estructura cristalina, ya sea resultado de la deformación plástica, tratamiento térmico o aleación, resulta un incremento en la resistencia y dureza del material [3].

Un material se considera trabajado en frío, si sus granos están distorsionados después de la deformación

plástica. Las propiedades de un metal dependientes de la estructura cristalina, se ven afectadas por la deformación plástica o por trabajado en frío. En el estirado, la carga de trabajo debe ser superior al punto de cedencia para lograr una deformación apreciable, sin embargo, debe ser menor a la resistencia a la tensión para evitar fracturas, así como la ductilidad sigue un comportamiento opuesto al de la dureza [2].

El endurecimiento por deformación plástica representa un factor importante en el conformado de materiales mediante deformación plástica en frío (temperatura inferior a la mitad de la de fusión). Un parámetro para caracterizar tal endurecimiento es el exponente del endurecimiento por deformación (n), que es la pendiente de la zona comprendida entre las resistencias a la cedencia y máxima a la tensión para la curva esfuerzo-deformación verdadera. En aceros de bajo carbono para piezas de geometría complicada, el valor de n es 0.22 mientras que 0.26 indica una mayor capacidad de deformación durante los procesos de conformado, sin que se produzca un adelgazamiento excesivo o fractura de la pieza [3].

Dentro de las investigaciones reportadas, se incluyen un severo endurecimiento por deformación y concentración de esfuerzos residuales generados por condiciones de maquinado, en la raíz de roscas finas en tornillos de acero aleado base Ni, así como encontraron endurecimiento superficial en el rango de 320 a 430 HV en la rosca, comparado con la dureza en acero del cuerpo de tornillo (260 HV) [4]. Un segundo estudio es la fractura en espigas de tornillo, que es un problema recurrente en ferrocarriles debido al aumento de carga transportada en los últimos años. Las causas de falla del tornillo involucran la sobrecarga durante la instalación del componente o en servicio después de varias horas bajo cargas cíclicas. Para corregir el problema utilizaron barra de acero SAE 1015 con deformación en frío para aumentar la resistencia a la tracción [5].

Una tercera investigación es referente a tornillos sub-miniatura (diámetro < 3 mm) para unir productos electrónicos y mecanismos, los cuales han sido manufacturados mediante el proceso de forjado de cabeza, seguido de roscado por rodamiento. Encontraron micro-grietas generadas en la cabeza y este defecto perjudicial aumento donde más pequeño es el tornillo [6]. En último trabajo reportan tornillos de bola en acero 55CrMo con alto sobrecalentamiento por bobinas de inducción a 1200°C en las regiones de roscado provocando grietas a lo largo de límites de grano, falta de endurecimiento a 2.5 mm de espesor en dientes de rosca y granos gruesos [7].

Sin embargo, la correlación de causas y efectos entre la deformación plástica, endurecimiento por deformación y cambios microestructurales generados durante el forjado en frío de tornillos en acero SAE 1038 ha sido reportada limitadamente. Por lo tanto, el objetivo de este estudio es caracterizar y cuantificar el endurecimiento por deformación mediante el análisis

microestructural (número de tamaño de grano ASTM y alargamiento de granos) y mecánico (exponente del endurecimiento por deformación y valores de deformación plástica) de los diferentes pasos de forjado de tornillos automotrices. La contribución de la presente investigación es complementar la metalurgia física del proceso de forjado en frío de estos tornillos.

2. Parte experimental

2.1 Materiales

Los tornillos automotrices se manufacturaron con alambre fosfatado de acero SAE1038 recocido con diámetro de 8.33 mm. El tratamiento de recocido isotérmico fue realizado por el proveedor a 855°C por 20 min seguido de enfriamiento lento y continuo hasta temperatura baja dentro del horno, para generar una microestructura dúctil y facilitar los pasos de forjado. Las muestras fueron cortadas transversal y longitudinalmente a partir de tornillos con cada uno de los cuatro pasos de forjado en frío (alambre enderezado, cuadro de cabeza, cabeza y roscado), ver figura 1.



Figura 1. Tornillos con cada paso de forjado en frío: a) alambre enderezado, b) cuadro de cabeza, c) cabeza y d) roscado.

La composición química del alambre de acero en la condición inicial, indica que es un acero al medio carbono (ver tabla 1) cumpliendo con estándar SAE 1038 [1].

Tabla 1. Composición química (% peso) del acero al medio carbono SAE 1038 recocido [1].

Material	C	Mn	Si	P	S
Acero SAE 1038	0.386	0.750	0.221	0.005	0.006

Los valores de las propiedades mecánicas bajo tensión y macro-dureza para el acero SAE 1038 en la condición inicial de recocido se enlistan en tabla 2, indicando que es un acero dúctil al medio carbono [1].

Tabla 2. Propiedades mecánicas del acero recocido SAE 1038 [1].

Material	Resistencia	Reducción	Dureza
----------	-------------	-----------	--------

	máxima a la tensión (MPa)	de área (%)	Rockwell B
Acero SAE 1038	544	25	82

2.2. Análisis microestructural

Para la caracterización microestructural de los cuatro pasos de forjado diferentes, las probetas montadas en baquelita (para mejorar manipulación) requirieron preparación metalográfica de acuerdo al estándar ASTM E3 [8], mediante el desbaste progresivo con agua y papel abrasivo de SiC con diferentes grados desde grueso hasta fino (120, 180, 240, 320, 400, 600, 1000, 1200, 1500 y 2000), pulido mediante un paño y partículas de Al₂O₃ con diámetro de 0.05 μm suspendidas en agua, sobre un disco giratorio adaptado a máquina pulidora. Además, se realizó ataque químico sobre las superficies, utilizando reactivo Nital al 2% HNO₃ en metanol [9]. Finalmente, el análisis microestructural se realizó mediante microscopio óptico Carl Zeiss Axiovert 40 MAT conectado a computadora, para revelar las diferentes características microestructurales para cada paso de forjado, resultando una serie de micrografías digitales representativas.

2.3 Numero de tamaño de grano ASTM (G) y alargamiento de grano promedio

El parámetro microestructural G se calculó de acuerdo al procedimiento de tres círculos de Abrams incluido en estándar ASTM E112 [10], a partir del conteo de intersecciones de límites de grano contra plantilla de tres círculos concéntricos (circunferencia total de 500 mm) sobre diez micrografías para cada paso de forjado en frío, ver ecuación 1.

$$P_L = P_i / (L / M) \quad (1)$$

Donde:

- P_L = Número total de intersecciones
- P_i = Número de intersecciones de tres círculos
- L = Longitud total de la línea de prueba (500 mm)
- M = Magnificación

Con el valor P_L, se calculó el número de tamaño de grano ASTM G aplicando ecuación 2, para cada una de las diez micrografías de los cuatro pasos de forjado, reportando el promedio de G para cada etapa de forjado.

$$G = (6.643856 \log_{10} P_L) - 3.288 \quad (2)$$

Donde:

- G = Número de tamaño de grano ASTM
- log₁₀ = Logaritmo base diez
- P_L = Número total de intersecciones

Una vez calculados los números G se procedió a determinar directamente el alargamiento de granos

promedio deformados plásticamente, a partir de tabla 4 en estándar ASTM E112 [10].

2.4 Exponente del endurecimiento por deformación plástica (n)

El exponente n se calculó a partir de los valores de resistencias a la cedencia y máxima a la tensión reportados en trabajo previo [11], aplicando ecuación 3 [12] para cada uno de los cuatro pasos de forjado en frío de tornillos de acero SAE 1038. Este exponente es una medida del endurecimiento por deformación.

$$n = \ln (S_u / S_y) \quad (3)$$

Donde:

- n = Exponente del endurecimiento por deformación
- ln = Logaritmo natural
- S_y = Resistencia a la cedencia (MPa)
- S_u = Resistencia máxima a la tensión (MPa)

2.5 Deformación plástica

El grado de la deformación plástica permanente (elongación) bajo compresión, medida como cambio en longitud parcial se determinó mediante ecuación 4 [13] para cada uno de los cuatro pasos de forjado en frío (alambre enderezado recocado, cuadro de cabeza, cabeza y roscado) en tornillos automotrices. La longitud inicial se consideró del alambre recocado

$$e = (h_0 - h) / h_0 \quad (4)$$

Donde:

- e = Deformación unitaria
- h₀ = Longitud inicial (mm)
- h = Longitud final (mm)

3.1 Resultados y discusión

3.1 Análisis microestructural

De las observaciones microestructurales mediante microscopía óptica realizadas sobre las muestras del alambre enderezado, cuadro de cabeza, cabeza y roscado en tornillos de acero SAE 1038 forjados en frío, se encontró una microestructura con matriz de granos ferríticos equiaxiales de tamaño mixto, conteniendo partículas ordenadas en bandas longitudinales y oscuras, ver figura 2a) para alambre enderezado. Los granos ferríticos incrementaron de tamaño y otros se alargaron, además de que las bandas alternadas de partículas cambiaron notablemente de dirección en cierto ángulo, es decir, presentaron inclinación en la dirección de la deformación. Estos cambios se atribuyeron a la deformación plástica moderada y generada por forjado del cuadro de cabeza (figura 2b). Sin embargo, del forjado de cabeza (figura 2c) resultado evidente la máxima deformación plástica generando la mayor inclinación de bandas oscuras y alternadas de partículas alineadas, junto con granos de ferrita más deformados y alargados. Finalmente, el forjado del roscado estándar sobre la superficie del alambre generó una notable deformación plástica para formar los

dientes de la rosca, también se encontraron granos ferríticos grandes y medianos, con presencia de bandas de partículas a menor ángulo, por lo que resulto menor deformación (figura 2d).

A mayor magnificación, se observó que las partículas estaban en condición de esferoidización distribuidas en bandas y otras dispersas a través de la matriz de granos ferríticos deformados. Por lo tanto, se observó una notable deformación plástica gradual conforme se aplicaron los pasos de forjado desde cuadro de cabeza, cabeza y roscado, comparados con la condición del alambre recocido inicial. La máxima deformación plástica se alcanzó en la cabeza del tornillo generando campos de deformación al centro de la misma, definidos por las bandas de partículas esferoidizadas que cambiaron a dirección perpendicular debido a la deformación [11].

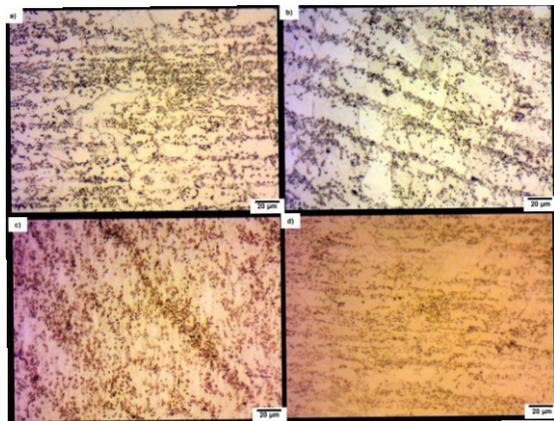


Figura 2. Micrografías ópticas de pasos de forjado en frío en tornillos de acero 1038: a) granos ferríticos equiaxiales en alambre enderezado, b) granos alargados en cuadro de cabeza, c) bandas inclinadas de partículas en cabeza, y d) granos grandes y alargados en roscado.

3.2. Número de tamaño de grano ASTM (G)

Las microestructuras deformadas plásticamente para los diferentes pasos de forjado en frío (alambre enderezado, cuadro de cabeza, cabeza y roscado) de tornillos de acero 1038, se cuantificaron mediante el número G reportado en figura 3 en función de los cuatro pasos de forjado. Se encontró que G disminuyó para el cuadro de cabeza, cabeza y roscado, comparados con el alambre enderezado, debido a la deformación microestructural permanente generada después del forjado. Entonces, el efecto de forjado sobre el número G fue una reducción gradual conforme se aplicaron los pasos de forjado. Por lo tanto, la mayor disminución del número G (15%) se encontró en la cabeza forjada asociada con la mayor deformación plástica, seguida del roscado (7%) y cuadro de cabeza (3%), con respecto al alambre enderezado.

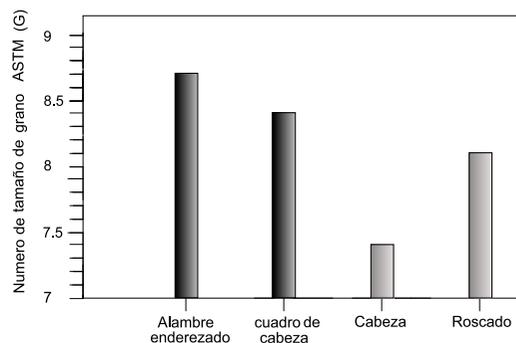


Figura 3. Numero de tamaño de grano ASTM (G) para los pasos de forjado en frío de tornillos de acero 1038.

3.3. Alargamiento de grano promedio

Se determinó el alargamiento de granos deformados plásticamente para los cuatro pasos de forjado de tornillos de acero SAE 1038 (figura 4) resultando un incremento general para los últimos tres pasos, en comparación con el alambre enderezado, lo cual se interpretó en que los granos se alargaron debido a la deformación plástica generada por el forjado en frío. Entonces, el efecto del forjado sobre el alargamiento fue un aumento considerable conforme se aplicaron los pasos, resultando que el mayor alargamiento de grano promedio se alcanzó en la cabeza (108%), seguida del cuadro de cabeza (53%) y roscado (46%), con respecto al alambre enderezado.

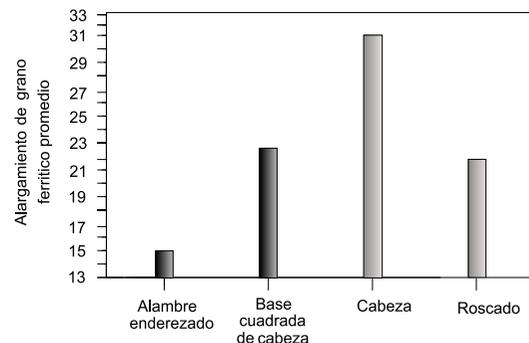


Figura 4. Alargamiento de grano promedio para los pasos de forjado en frío de tornillos de acero SAE 1038.

3.4 Exponente del endurecimiento por deformación (n)

El comportamiento del exponente n en función de los pasos de forjado de tornillos de acero SAE 1038 se muestra en figura 5, donde se observa que el efecto del forjado en frío sobre n es un notable aumento para el cuadro de cabeza, cabeza y roscado [4], en comparación con el alambre enderezado. El máximo incremento del exponente n (396%) se alcanzó en la cabeza forjada como consecuencia de la máxima deformación microestructural con granos ferríticos deformados y alargados y bandas alineadas de

partículas con la mayor inclinación (ángulo), seguida del cuadro de cabeza (92%) y roscado (28%) con menor deformación, con respecto al valor n del alambre enderezado [11].

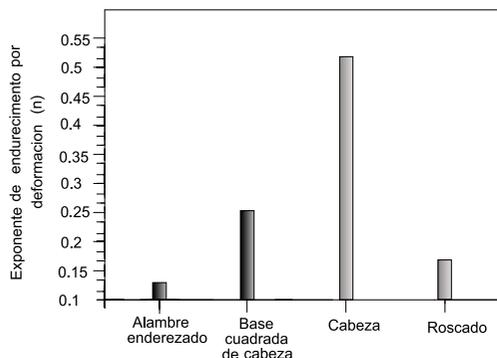


Figura 5. Exponente del endurecimiento por deformación (n) para los pasos forjado en frío de tornillos SAE 1038.

3.4 Deformación plástica

Los valores de la deformación plástica permanente para los diferentes pasos del forjado en tornillos automotrices de acero 1038 se presentan en figura 6. Se observó un comportamiento similar al del exponente n , con evidente incremento para los pasos de cuadro de cabeza, cabeza y roscado favorecido por el propio proceso de conformado de forjado en frío. La mayor deformación permanente se encontró en la cabeza forjada (20%), seguida del roscado (12%) y cuadro de cabeza (5%), en comparación con el alambre enderezado [5].

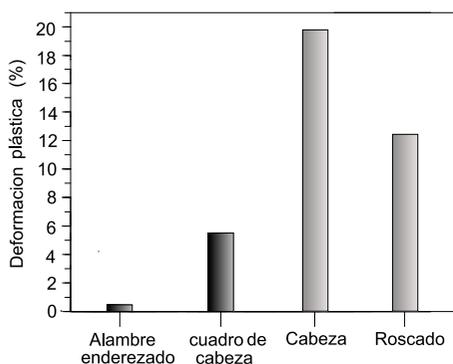


Figura 6. Deformación plástica de los pasos de forjado en frío de tornillos de acero 1038.

4. Conclusiones

El proceso de cuatro pasos de forjado en frío de tornillos automotrices de acero SAE 1038 recocido generó una microestructura deformada plásticamente con granos ferríticos alargados y grandes, con presencia de partículas dispersas y bandas alineadas de partículas esferoidizadas que cambiaron de dirección e inclinación (mayor ángulo) por la deformación permanente gradual conforme se aplicaron los pasos de forjado.

El efecto del forjado sobre el número de tamaño de grano ASTM fue una reducción conforme se aplicaban los pasos de forjado, así como un incremento considerable en el alargamiento de los granos ferríticos y aumento evidente del exponente del endurecimiento por deformación plástica, para los pasos de cuadro de cabeza, cabeza y roscado, en comparación con el alambre enderezado. El efecto del forjado sobre la deformación plástica fue un aumento para los tres últimos pasos del tornillo.

La máxima deformación plástica (20%) se alcanzó en la cabeza forjada del tornillo resultando una microestructura con el menor número de tamaño de grano ASTM con reducción del 15%, granos ferríticos con el mayor alargamiento del 108% de incremento, máximo valor del exponente del endurecimiento por deformación plástica con el mayor aumento del 396%, todo debido a la mayor fuerza aplicada de forjado, en comparación con el alambre enderezado.

5. Referencias

- Chandler, H. *Heat treater's guide: practices and procedures for irons and steels*; 2nd ed.; ASM International: USA, 1995; pp. 172-175.
- Avner, S. H. *Introducción a la metalurgia física*; 2a ed.; McGraw-Hill: México, 1988; pp. 132-136.
- Shackelford, F. J. *Introducción a la ciencia de materiales para ingenieros*; Pearson Prentice Hall: Madrid, España, 2005; pp. 183-185.
- Fetullazade, E.; Akyildiz, K. H.; Saritas, S. *Mater. Design*. 2010, 31(4), 2025-2031.
- de Faria, G. L.; Godefroid, L. B.; Candido, L. C.; Silotti, T. O. *Eng. Failure Analysis*. 2016, 66, 1-7.
- Kim J. B.; Seo, W. S.; Park, K. *Inter. J. Precision Eng. Manufacturing*. 2012, 13 (9), 1619-1624.
- Li, H.; He, L.; Gai, K.; Jhang, R.; Jiang, R.; Zhang, C.; Li, M. *Mater. Design*. 2015, 87, 863-867.
- ASTM international. *ASTM E3, Standard guide for preparation of metallographic specimens*; ASTM international: USA, 2001; pp. 1-11.
- ASTM international. *ASTM E407-07, Standard Practice for Microetching Metal and Alloys*; ASTM international: USA, 2015; pp. 14.
- ASTM international. *ASTM E112-96, Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*; ASTM international: USA, 2004; pp. 8-12.
- Gómez, R. R. *Análisis fractográfico mediante microscopía electrónica de barrido en tornillos especiales*. Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico de Tlalnepantla, Estado de México, México, Diciembre de 2015.
- Martínez, L. J.; Martínez, A. J.; Martínez, L. A.; Callejón, J. A.; Martínez, L. A. J.; Salinas, S. S. *Cálculo y diseño de máquinas: Problemas resueltos I*; 2a ed.; Editorial Universidad de Almería: España, 2018; pp. 12.
- Schey, J. A. *Procesos de manufactura*; 3a ed.; McGraw-hill: México, 2002; pp. 81, 95, 98.