

# Efecto de la torsión en muestras de acero AISI 1045 deformado por rodadura\*

**Ledennis Suárez Torres**

[lstorres@mecanica.ismm.edu.cu](mailto:lstorres@mecanica.ismm.edu.cu)

**Oney Correa Borges**

**Yamalis Machado Ramírez**

**Tomás Fernández Columbié**

[tfernandez@ismm.edu.cu](mailto:tfernandez@ismm.edu.cu)

**Eider Sánchez Olivero**

[esanchez@ismm.edu.cu](mailto:esanchez@ismm.edu.cu)

Especialidad: Ingeniería mecánica

Instituto Superior Minero Metalúrgico (Cuba).

**Resumen:** Se estableció el comportamiento microestructural y el de las tensiones en el acero AISI 1045 luego de haber sido sometido a proceso de deformación en frío con el empleo de rodillo simple y luego a torsión. Se seleccionaron nueve muestras, las cuales fueron deformadas con parámetros: fuerza de 500, 1 500 y 2 500 N; avance de 0,075; 0,125 y 0,25, así como con números de revoluciones de 27, 54 y 110 r/min. Luego del proceso se determinó que existe una disminución en el tamaño del grano desde el número 5 hasta el 10 al aplicar los máximos parámetros de deformación, de igual manera, existe un incremento de las tensiones desde 515,8 N/mm<sup>2</sup> para fuerza de 500 N, hasta 651,7 N/mm<sup>2</sup> para las muestras deformadas con fuerza de 2 500 N, con el incremento de la dureza hasta 448 HV. Se determina que las variaciones que ocurren en el acero AISI 1045, luego de los procesos combinados, es por efecto de la acritud.

**Palabras claves:** deformación en frío; torsión; microestructura; acritud; rodillo simple.

---

\* Recibido: 4 mayo 2018/ Aceptado: 12 agosto 2018.

## Effect of the torsion in samples of i steel aisi 1045 deformed for rolling

**Abstract:** The objective of the work is to establish the behaviour microestructural and that of the stress in the steel AISI 1045 after having been subjected to process of deformation in cold with the employment of simple roller and then torsion. Were selected nine samples, which were deformed with parameters of: it forces of 500, 1 500 and 2 500 N; advance of 0,075; 0,125 and 0,25, as well as with numbers of revolutions of 27, 54 and 110 r/min. after the process it was determined that a decrease exists in the size grain from the number 5 up to the 10 when applying the maximum parameters of deformation, in a same way, an increment of the stress exists from 515,8 N/mm<sup>2</sup> for force of 500 N, up to 651,7 N/mm<sup>2</sup> for the deformed samples with force of 2 500 N with the increment of the hardness up to 448 HV. It is determined that the variations that happen in the steel AISI 1045 after the combined processes, are for effect of the acrimony.

**Key word:** deformation in cold; torsion; microstructure; acrimony; simple roller.

## Introducción

Los diagramas esfuerzo-deformación de diversos materiales varían ampliamente a diferentes ensayos de tensión. Con el mismo material pueden obtenerse resultados diferentes, de acuerdo con la temperatura de la probeta y la velocidad de la carga. Sin embargo, es posible distinguir algunas características comunes en los diagramas de varios grupos de materiales y dividirlos en dos amplias categorías: materiales dúctiles y materiales frágiles.

Durante la operación de rodilado se genera un estado tensional volumétrico de compresión no uniforme, dado por la fuerza compresiva constante y por las reacciones de oposición del material ante la misma, en las otras dos direcciones (El-Khabeery, 2003). Fernández y otros investigadores (2017) demostraron que las mayores tensiones que se originan en el proceso de deformación plástica superficial, empleando rodillo simple, se localizan en la parte frontal que entra en contacto con el rodillo durante su desplazamiento, donde el resto de la pieza experimenta una mínima deformación. Las tensiones se incrementan en la medida que aumenta la fuerza, la profundidad y el diámetro de la pieza; obteniéndose un grado de compactación de los granos.

Según Moreno y demás colaboradores (2014), la fatiga superficial se relaciona fundamentalmente con estados tensionales del tipo plano; es decir, aquellos donde no existen tensiones normales a la superficie de la pieza. Los valores de tensiones en la red cristalina se verán influenciados por la magnitud de las cargas aplicadas al material y la velocidad de aplicación de dichas cargas, entre otros factores que someten el enrejado cristalino a esfuerzos de tracción y compresión (las cuales actuarán en el mismo sentido o en sentido contrario a las provocadas por los desplazamientos de los cristales) y cuyos átomos constituyen barreras u obstáculos al movimiento de las dislocaciones (Pero 2000).

Ha sido referido por Álvarez y otros investigadores (2004) que, cuando la deformación alcanza un valor crítico por encima del límite de acritud, el material se rompe por fractura frágil. Durante este proceso, las tensiones de cizalladura, producen deslizamiento en el interior de los granos cristalinos o ruptura de los mismos, creando tensiones de cizalladura que alcanzan un valor máximo en algún punto, apareciendo

deformaciones permanentes o fracturas, punto a partir del cual se inicia el fallo del material.

Según Lubliner (1986), en la teoría de las dislocaciones se conoce que, la deformación plástica en materiales dúctiles a baja temperatura, resulta del movimiento de dislocaciones por deslizamiento, bajo la acción de la tensión aplicada. Este mecanismo de deformación se define como deslizamiento cristalográfico y consiste en el deslizamiento de un plano de átomos sobre otro. Para que se produzca dicho deslizamiento, la tensión de cortadura sobre dicho plano deberá alcanzar un valor crítico, correspondiente al valor de la tensión de cortadura máxima en el ensayo de tracción y que se define como resistencia al deslizamiento.

El objetivo del trabajo es determinar el efecto de la torsión en muestras deformadas con rodillo con valores de fuerza de 500, 1 500 y 2 500 N, avances de 0,075; 0,125 y 0,25 mm/rev y números de revoluciones de 27, 54 y 110 r/min; así como su variación microestructural, en correspondencia con la deformación aplicada.

## Desarrollo experimental

### Composición química de los materiales

La composición química del material se determinó mediante análisis espectral, para ello se utilizó un espectrómetro de masa cuántico, ESPECTROLAB 230, con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón. En la Tabla 1 se muestra la composición química.

Tabla 1. Composición química del acero AISI 1945, en %

C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	Cu	Fe
0,46 %	0,65 %	0,01 %	0,019 %	0,25 %	0,40 %	0,40 %	0,10%	0,16 %	Balance

Para el proceso de deformación es más conveniente realizar el análisis en número de átomos y su volumen. En 100 átomos de la aleación hay dos átomos de carbono; 0,5 átomos de silicio y 96 átomos de hierro. Como la celda del Fe es cúbica centrada en el cuerpo Fe- $\alpha$  (2 átomos de Fe), entonces a la celda están asociados 0,041 átomos de carbono, que es la unidad del conjunto de los elementos aleantes; el 0,081 es el resto de átomos de elementos.

### Análisis microestructural

El análisis microestructural consistió en la observación de una muestra patrón del acero AISI 1045, la cual se empleará para determinar las variaciones que ocurren luego de aplicado el proceso de deformación y torsión. La Figura 1 se corresponde con esta muestra.

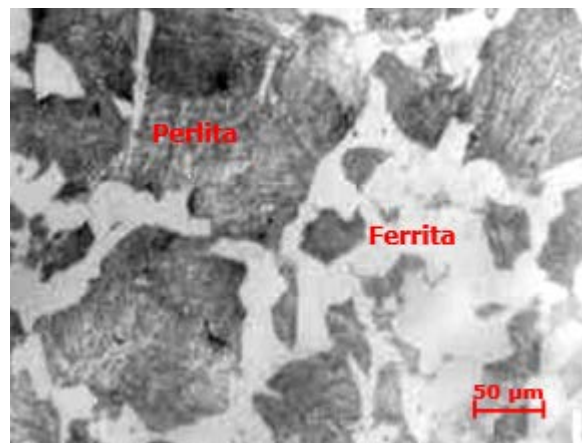


Figura 1. Microestructura del AISI 1045.

La estructura metalográfica del acero AISI 1045 está constituida por la fase de ferrita y perlita.

### Preparación de las probetas para el ensayo de torsión

El ensayo de torsión se realizó empleando una máquina CRITM DNS 200, la misma presenta una carga de 200 kN. La carga que se aplicó fue con desplazamientos hasta la rotura, a una velocidad de 1 mm/min, considerando la dureza de cada una de las muestras. A lo largo del proceso se tomaron medidas del diámetro del cuello en la sección central, con un calibre Vernier de precisión  $\pm 0,05$  mm. Para realizar el ensayo se seleccionaron 28 probetas de acero AISI 1045, con longitud de 120 mm y diámetro de 11 mm, una sin deformar y nueve deformadas por rodadura, para luego ser torsionada (Fernández *et al.*, 2013).

En la Tabla 2 se muestra el diseño de experimentos considerado para el proceso de torsión y el análisis microestructural.

Tabla 2. Matriz de planificación de experimentos

Niveles	Factores		
	n(r/min)	P (N)	S(mm/rev)
Nivel superior (+1)	110	2 500	0,25
Nivel medio ( $\Delta$ )	54	1 500	0,125
Nivel inferior (-1)	27	500	0,075
Número de ensayo			
1a	27	500	0,075
1b	27	500	0,125
1c	27	500	0,25
2a	54	1 500	0,075
2b	54	1 500	0,125
2c	54	1 500	0,25
3a	110	2 500	0,075
3b	110	2 500	0,125
3c	110	2 500	0,25

Para realizar el análisis microestructural de las nueve probetas se tuvo en cuenta las diferentes cargas a la que fueron sometidas cada una de ellas, considerando que en dependencia de cada carga existirán deformaciones diferentes.

### Preparación metalográfica de la probeta

En la preparación metalográfica se realizó un conjunto de operaciones como son: desbaste, pulido, desengrasado y lavado (ASTM E 3-95 y Norma NC 10-56: 86). En el desbaste se emplearon papeles abrasivos del tipo No. 180, 400 y 600 (ASTM E 3-95). Para el acabado se utilizó un paño de fieltro grueso, se usó como sustancia abrasiva el óxido de cromo.

Una vez pulidas las muestras se lavaron con agua destilada, secándose con papel de filtro; se volvieron a lavar con tetracloruro de carbono ( $Cl_4C$ ) para evitar cualquier vestigio de grasa y pasta de pulir. Se aplicó el ataque por inmersión de las muestras durante 5 s con el reactivo nital al 4 % (mezcla de 5 mL de ácido nítrico ( $HNO_3$ ) y 100 mL de alcohol etanol (ASTM E-262 Practice A). El análisis empleado para la medición de la dureza fue el Vickers, con tres mediciones realizadas aleatoriamente en la superficie de las muestras.

Para la observación de las probetas se empleó un microscopio óptico binocular reflexivo marca echoLAB, dotado de una cámara instalada mediante el hardware que refleja la fotografía en el computador. Mediante un programa analizador de imágenes tomadas desde la cámara se evalúan las fases, tamaño del grano, inclusiones, afectaciones en los granos; y se elabora un reporte técnico con estas características.

## Resultados y discusión

### Análisis microestructural en relación a fuerza de 500 N

El endurecimiento por deformación plástica superficial con rodillo en probetas de acero AISI 1045 se hace atendiendo al diseño de experimentos con las variables (n); (S) y (P), por tanto, se considera el análisis microestructural en relación a las tensiones de 500 N. En la Figura 2 se muestran los resultados obtenidos de este ensayo.

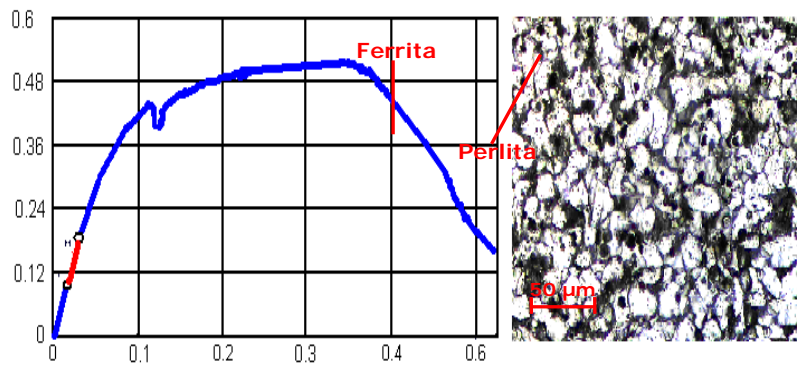


Figura 2. Deformada con fuerza de 500 N; S de 0,075 mm/rev y n de 27 r/min.

Para los parámetros de deformación iniciales considerados en el acero AISI 1045 y la muestra patrón se puede observar que la estructura sigue manteniendo las mismas fases de ferrita y perlita, con una disminución en el tamaño del grano, pero a la vez, una distorsión de la red cristalina en la dirección que se produjo el esfuerzo. La fuerza de torsión fue de 515,8 N/mm<sup>2</sup>.

La Figura 3 se relaciona con la muestra deformada con una fuerza de 500 N, un avance de 0,125 mm/rev y un número de revoluciones de 54 r/min.

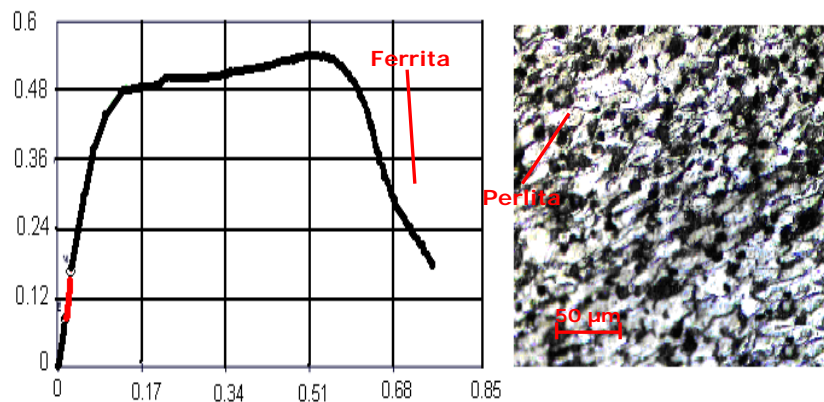


Figura 3. Deformada con fuerza de 500 N, S de 0,125 mm/rev y n de 54 r/min.

Para una fuerza de torsión empleada para lograr la rotura en esta probeta fue de 534,4 N/mm<sup>2</sup>, donde al existir mayor deformación, hay una agrupación de granos más ordenada, con la reducción promedio de los mismos, la estructura sigue siendo de ferrita-perlita.

La Figura 4 es la muestra deformada con fuerza de 500 N, avance de 0,25 mm/rev y número de revoluciones de 110 r/min.

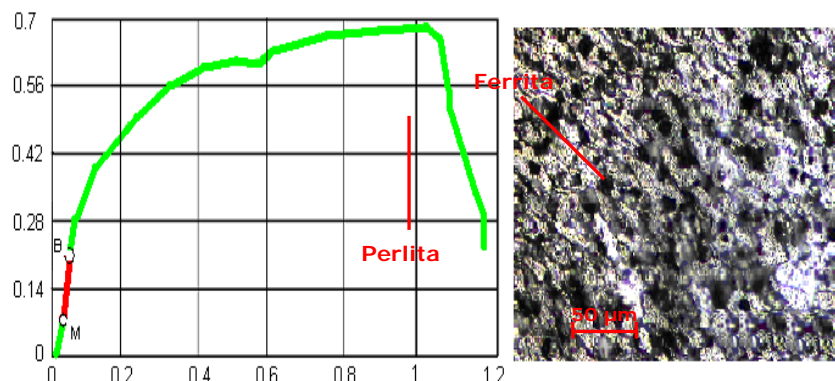


Figura 4. Deformada con fuerza de 500 N, S de 0,25 mm/rev y n de 110 r/min.

La máxima fuerza de torsión aplicada a la muestra y obtenida con mayor deformación fue de 684,056 N/mm<sup>2</sup>, aquí se aprecia una mayor deformación de la red cristalina y una orientación más definida del grano en una dirección.

Al comenzar el proceso, se observa en las Figuras 2, 3 y 4 la deformación de la red cristalina del material con el alargamiento de los granos. La capa endurecida ofrece resistencia al ser torsionada, al introducir valores de fuerza externa en el material, el mismo se va ir tensionando y endureciendo por el fenómeno de la acritud.

Las Figuras 2, 3 y 4 son las 1a, 1b y 1c según el diseño de experimentos.

### **Análisis microestructural para fuerza de 1 500 N**

En la Figura 5 se muestra el comportamiento microestructural para fuerza de 1 500 N; S de 0,125 mm/rev y números de revoluciones de 24 r/min.



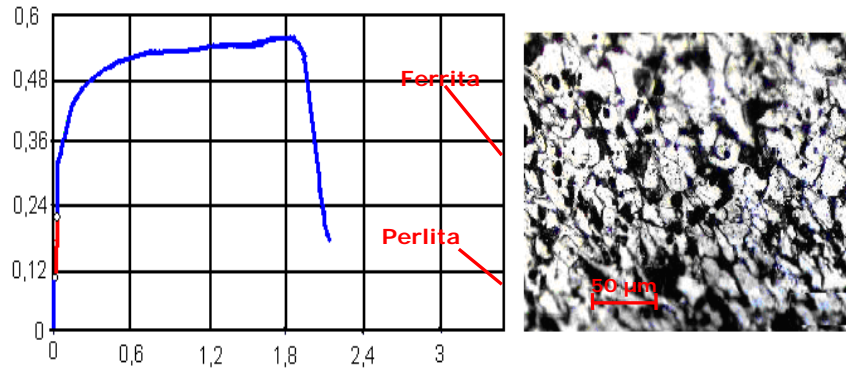


Figura 5. Deformada con fuerza de 1 500 N; S de 0,075 mm/rev y n de 27 r/min.

Al variar los parámetros de deformación y someter a torsión esta muestra se requiere una fuerza de torque de  $557,8 \text{ N/mm}^2$ . Aunque existen cambios en el tamaño de los granos, también en la dirección de los mismos, se mantiene la misma estructura cristalina, de ferrita+perlita.

La Figura 6 se corresponde con la muestra deformada con fuerza de 1 500 N; S de 0,125 mm/rev y números de revoluciones de 54 r/min.

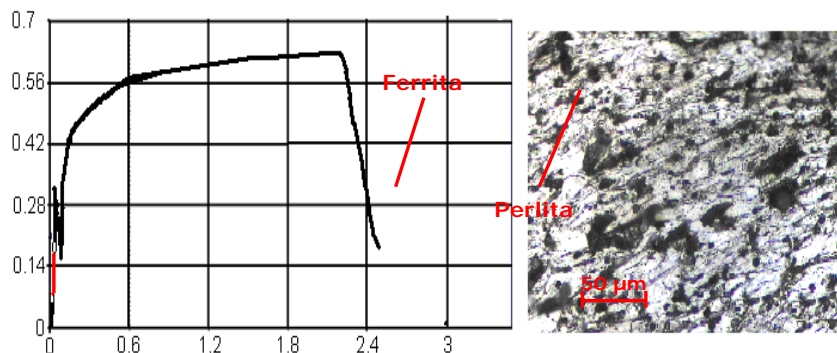


Figura 6. Deformada con fuerza de 1 500 N; S de 0,125 mm/rev y n de 54 r/min.

Con una fuerza de torque de  $627,4 \text{ N/mm}^2$  se logra la rotura en esta probeta, ya que el incremento de los parámetros de deformación es directamente proporcional con la deformación de la red cristalina del acero AISI 1045; la estructura no ha variado, sí el tamaño de los granos.

En la Figura 7 se observa la muestra deformada con fuerza de 1 500 N; avance de 0,25 mm/rev y número de revoluciones de 110 r/min.

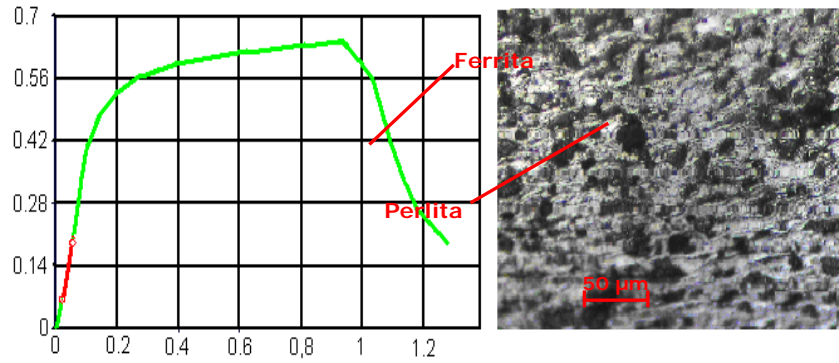


Figura 7. Deformada con fuerza de 1 500 N; S de 0,25 mm/rev y n de 110 r/min.

La acción combinada de la deformación por rodadura y el proceso de torsión generan una distorsión en los granos de la estructura, haciéndolo más pequeño hasta un tamaño número 9. Con el tamaño de grano obtenido existe mayor dureza, por lo que se requirió de una fuerza torsional de 641,5 N/mm<sup>2</sup>.

Con estos niveles de parámetros se puede apreciar una mayor agrupación de los granos, desde el número 8, en las estructuras de las Figuras 2, 3 y 4; hasta el número 9 en las Figuras 5, 6 y 7. El efecto de las texturas es más relevante en las proximidades de la zona correspondiente a la deformación.

Las Figuras 5, 6 y 7 son las 2a, 2b y 3c según el diseño de experimentos.

**Comportamiento microestructural para fuerza de 2 500 N**

En la Figura 8 se muestra el comportamiento microestructural y el de las tensiones con parámetros de deformación: fuerza de 2 500 N; S de 0,075 mm/rev y número de revoluciones de 27 r/min.

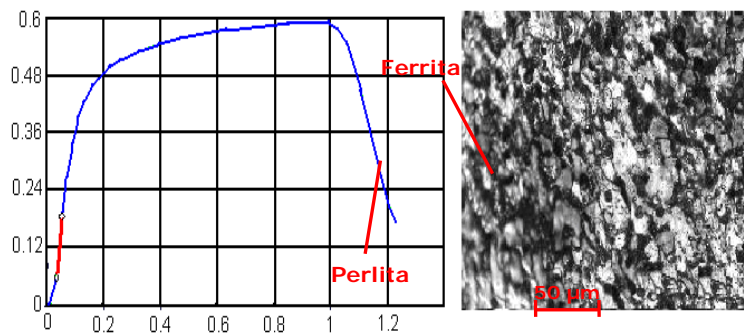


Figura 8. Deformada con fuerza de 2 500 N; S de 0,075 mm/rev y n de 27 r/min.

La fuerza máxima de torsión necesaria para llegar a la rotura en esta muestra fue de  $588,6 \text{ N/mm}^2$ . La ferrita y la perlita siguen siendo la fase presente en la estructura, la dirección de los granos es por efecto de la torsión.

La Figura 9 es la probeta deformada con fuerza de  $2\,500 \text{ N}$ ; S de  $0,125 \text{ mm/rev}$  y número de revoluciones de  $54 \text{ rev/min}$ .

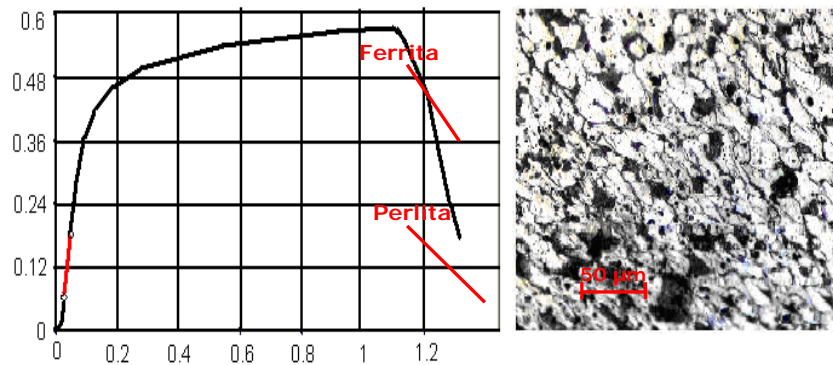


Figura 9. Deformada con fuerza de  $2\,500 \text{ N}$ ; S de  $0,125 \text{ mm/rev}$  y n de  $54 \text{ r/min}$ .

Luego del proceso de deformación y sometida a torsión, en esta muestra la fuerza de torsión necesaria para llegar a la rotura fue de  $573,4 \text{ N/mm}^2$ . La ferrita, por ser más dúctil, comienza a estirarse en dirección a la trayectoria que se aplica el esfuerzo, la perlita se ubica entre las fronteras de los granos de la ferrita.

La Figura 10 muestra el comportamiento de la muestra que fue deformada con fuerza de  $2\,500 \text{ N}$ ; S de  $0,25 \text{ mm/rev}$  y número de revoluciones de  $110 \text{ rev/min}$ .

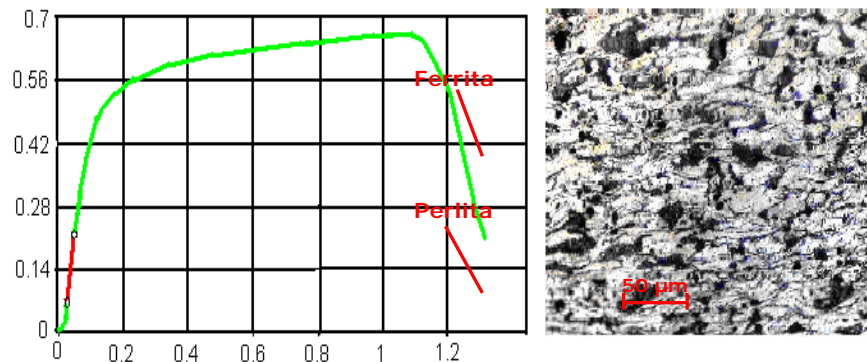


Figura 10. Deformada con fuerza de  $2\,500 \text{ N}$ ; S de  $0,25 \text{ mm/rev}$  y n de  $110 \text{ r/min}$ .

Para la máxima magnitud de los parámetros empleados y una fuerza de torsión de 651,7 N/mm<sup>2</sup> se observa que la disminución del grano es hasta el número 10; las muestras siguen manteniendo la misma composición física (ferrita+perlita).

Con fuerza de 500 N (Figuras 2, 3 y 4), la red cristalina comienza a deformarse con el alargamiento de los granos y con la agrupación del enrejado cristalino, la aleación comienza a adquirir dureza producto de las tensiones de compresión generadas por el rodillo, según ha sido reportado por Fernández y demás colaboradores (2008, 2009, 2010 y 2011).

Para fuerza de 1 500 N (Figuras 5, 6 y 7), con el incremento de las variables hay una mayor compactación de los granos en la red cristalina; la estructura se comporta con granos más homogéneos. En la medida que se introduce más deformación hay una reducción del tamaño promedio de los mismos, creándose las condiciones para provocar las dislocaciones, las cuales son las causantes de la deformación del material en frío. Con fuerza de 2 500 N y número de revoluciones de 110 r/min (Figuras 8, 9 y 10) se logra una estructura con mayor agrupación de los granos, motivado por el incremento de las variables fuerza, avance de la herramienta y número de revoluciones (Fernández *et al.*, 2008; 2009 y 2011).

En las probetas sometidas a deformación se observa una estructura bifásica de ferrita+perlita, donde existe una agrupación orientada de los granos en la superficie. Los límites de los granos se hacen más finos (desde el número 5 para la muestra patrón, hasta el número 10, para la muestra deformada con fuerza de 2 500 N), con estructura en bloque de mosaico, dividida en pequeñas proporciones y una deformación clara de la red cristalina.

### Análisis de la dureza

Luego de aplicados los procesos de deformación y el de torsión se determinó la dureza en las diferentes muestras. En la Tabla 3 se muestran los resultados.

Tabla 3. Mediciones de dureza

Número de ensayo	Salidas			Media
	HV1	HV2	HV3	HV
1a	205	210	224	213
1b	205	210	225	213
1c	204	216	224	214

2a	316	324	328	322
2b	314	326	326	322
2c	312	324	326	320
3a	416	418	427	420
3b	416	418	430	421
3c	414	448	432	431

Los resultados obtenidos en la dureza guardan relación con el comportamiento microestructural. Se puede observar que en la medida que fueron introducidas las variables Fuerza (P), avance (S) y número de revolución (n), y esta fue incrementándose, los granos del material se fueron deformando y apilándose, dando lugar a que la superficie del material se endureciera; la dureza fue incrementando desde 205 HV hasta 448 HV. El endurecimiento del material no ocurre por el cambio de fase, para un acero de red cúbica centrada en el cuerpo (BCC), como el acero AISI 1045 de medio contenido de carbono presenta buenos planos de deslizamiento puede endurecer en frío.

### Conclusiones

Para provocar la rotura en las muestras deformadas con fuerza de 500 N se requirió de una fuerza de 515,8 N/mm<sup>2</sup>, la cual se incrementó hasta 651,7 N/mm<sup>2</sup> para las muestras deformadas con fuerza de 2 500 N, lo que justifica el endurecimiento superficial con rodillo del acero AISI 1045.

Las microestructuras analizadas muestran disminución del tamaño del grano por el efecto combinado de la deformación plástica por rodillo, así como granos orientados en la dirección que se produjo la torsión, alcanzando una dureza máxima de 448 HV.

El comportamiento microestructural del acero AISI 1045 está motivado por dos causas: al ser sometido al proceso de deformación superficial por rodillo provoca la acritud por tensiones de compresión; al ser torsionada, causa la aparición de acritud, motivo de las tensiones de torsión.

### Referencias bibliográficas

ÁLVAREZ, E.; LANCESTREMERE, J., MAREGLIA, J. & BARR, J. 2004. *Fundamentos de la trafilación. Tecnología Mecánica II*. Universidad de Buenos Aires.

- EL-KHABEERY, M. 2003. Influence of orthogonal burnishing parameters on surface characteristics for various materials. *Journal of Materials Processing Technology* 132(1-3): 82-89.
- FERNÁNDEZ, T.; FERNÁNDEZ, E.; RODRÍGUEZ, I. & ALCÁNTARA, D. 2008. Procedimiento para endurecer el acero 45 mediante la deformación plástica con rodillo simple. *Ingeniería e Investigación* 28(1): 15-21.
- FERNÁNDEZ, T.; RODRÍGUEZ, I. & ALCÁNTARA, D. 2009. Tensión–Deformación durante la deformación plástica superficial con rodillo. *Revista de Ingeniería Mecánica* 12(3): 13-22.
- FERNÁNDEZ, T.; RODRÍGUEZ, I. & ALCÁNTARA, D. 2010. Variación microestructural del acero AISI 1045 endurecido por rodadura. *Minería y Geología* 26(3): 65-74.
- FERNÁNDEZ, T.; FERNÁNDEZ, E.; RODRÍGUEZ, I. & ALCÁNTARA, D. 2011. Evaluación del coeficiente de endurecimiento del acero AISI 1045 deformado por rodillo. *Revista Nexa* 24(2): 16-26.
- FERNÁNDEZ, T.; FERNÁNDEZ, E.; RODRÍGUEZ, I.; ALCÁNTARA, D. & CASTILLO, R. 2013. Comportamiento microestructural del acero AISI 1045 endurecido en frío y traccionado. *Revista de la Facultad de Ingeniería U.C.V.* 28(3): 49-54.
- FERNÁNDEZ, T.; RODRÍGUEZ, I.; ALCÁNTARA, D. & GAINZA, N. 2017. Movimiento por cicloide en la deformación en frío del acero AISI 1045 empleando rodillo. *Minería y Geología* 33(1): 76-93.
- LUBRINER, J. 1986. *Plasticity theory*. Dover publications, Inc., New York, Charter 2, p. 77-86.
- MORENO, G.; CAPO, J.; FERNÁNDEZ, T. & AYARDE, D. 2014. La emisión magnética Barkhausen en el acero AISI 1045 deformado plásticamente con rodillo. *Revista Cubana de Física* 31(1): 19-21.
- PERO, J. 2000. Metalurgia física: Estructura y propiedades. En: *Ciencia e ingeniería de materiales*. 3ra Ed. S.L. CIE Inversiones Editoriales DOSSAT-2000, España, p. 393-502.