Ingeniería Mecánica. Vol. 12. No.3, septiembre-diciembre de 2009, pag. 13-22 ISSN 1815-5944

Tensión- Deformación durante la deformación Plástica Superficial con rodillo

T. Fernández-Columbié, I. Rodríguez, D. Alcántara-Borges

Recibido el 12 de diciembre de 2008; aceptado el 30 de marzo de 2009

Resumen

Se establece el procedimiento para el endurecimiento del acero 45 a través de la Deformación Plástica por rodadura con el empleo de un torno marca 16 D 20 y un rodillo como elemento deformante. En el trabajo se muestra la forma de sujeción de la pieza entre plato y punto, método empleado para evitar la flexión de la pieza durante el proceso de elaboración, se muestran las variables del diseño de experimento numero de revolución, avance y fuerza, las cuales permiten realizar el procesamiento estadísticos de los datos, lo que luego son graficado para obtener el comportamiento de las curvas de fuerza contra dureza y avance contra dureza y demostrar el incremento de la dureza superficial en la medida que se incrementa el valor de las variables. Se describen los pasos para la preparación metalografica de la probeta desde el corte de la misma con el empleo de cuchilla del tipo SANVIDK, hasta el pulido para la observación metalografica, donde se determina el comportamiento de la red cristalina por el tensionamiento de los granos y el endurecimiento por acritud.

Palabras claves: deformación plástica, dureza superficial, rodadura, acritud.

Stress-deformation during the Surfaces Plastic deformation with roller.

Abstract

The procedure settles down for the hardening of the steel 45 through the Plastic Deformation for rolling with the employment of a lathe 16 D 20 and a roller like element deformante. In the work the form of subjection of the piece is shown between plate and point, method used to avoid the flexion of the piece during the trial of elaboration, the variables of the experiment design are shown I number of revolution, advance and it forces, which allow to carry out the statistical prosecution of the data, that are graph to obtain the behavior of the curves of force against hardness and advance against hardness and to demonstrate the increment of the superficial hardness in the measure that the value of the variables is increased. The steps are described for the preparation metalographyc of the test tube from the cut of the same one with the employment of kitchen knife of the type SANVIDK, until the refined one for the observation metalographyc, where the behavior of the crystalline net is determined by the stress of the grains and the hardening by acrimony.

Key words: plastic deformation, superficial Hardness, rolling, acrimony

1. Introducción.

Actualmente se admite que la dureza es uno de los parámetros más importante de los materiales. Se admite también que este parámetro es el más importante en cuanto a la influencia en la resistencia al desgaste.

El endurecimiento por deformación está relacionado con el incremento de la tensión requerida para producir deslizamiento debido a una deformación plástica anterior. En este proceso se reduce la aptitud para la deformación plástica y se eleva el límite de fluencia.

La deformación plástica superficial en frío es un método de endurecimiento de materiales que logra alta dureza, el aumento del grado de deformación está muy vinculado con la aparición del fenómeno de endurecimiento y a medida que el grado de deformación es mayor, son necesarias más tensiones para continuar deformando. Por tanto el aumento del grado de deformación en frío aumenta la resistencia del metal a la deformación, [5].

Este flujo ocurre bajo una fuerza controlada del rodillo que excede el punto de fluencia del material de la superficie de la pieza no endurecida, creándose una capa de metal consolidada que provoca el aumento de las propiedades funcionales en la superficie. Este proceso debe aplicarse preferentemente después del torneado, [15].

Plantean [7] y [10] que, los procesos por Deformación Plástica Superficial se eligen en dependencia de las dimensiones, la configuración geométrica, el material de la pieza a tratar, condiciones de producción, entre otros factores, y para la aplicación efectiva de los mismos en la producción es necesario realizar investigaciones, ensayos y experimentos previos que permitan alcanzar el efecto deseado, teniendo en consideración las condiciones concretas de explotación de las piezas a elaborar.

Considera [14] que, la Deformación Plástica Superficial por rodadura que emplea el rodillo como elemento deformante, figura 1, es un proceso de elaboración en frío en la superficie de una pieza. La pequeña deformación plástica superficial originada por esta operación consiste en el desplazamiento del material de los “picos o crestas” a los “valles o depresiones” de las microirregularidades superficiales.

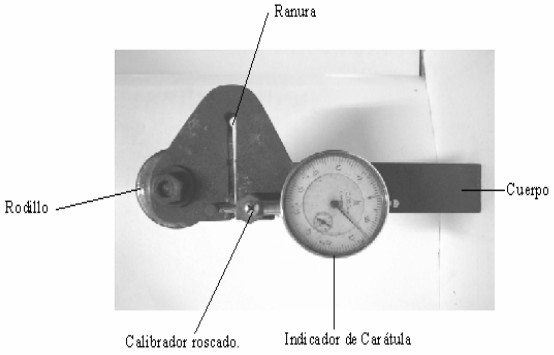

Figura 1. Herramienta empleada en la Deformación Plástica Superficial por rodillo

El trabajo en el proceso de Deformación Plástica Superficial por rodillos ha sido estudiado por muchos investigadores y el proceso también mejora las propiedades de la pieza, ejemplo: alta resistencia al desgaste [1], aumento de la dureza, [11], calidad de la superficie y un máximo incremento de la tensión residual en compresión [12]. Los parámetros que determinan la calidad superficial son: presión, avance, material del rodillo, número de pasadas, material de la pieza.

La magnitud de la deformación plástica, depende de la restricción a que es sometido el material deformado plásticamente (granos con acritud) por el metal que lo rodea, y que permanece en estado elástico (granos indicadores). El nivel de tensionamiento del metal que no ha sido deformado plásticamente, lo caracterizan según [2] y [3], las tensiones residuales de primer género.

Es por ello que la magnitud de las tensiones residuales, después de la deformación plástica, serán un indicador del estado tensional de la pieza durante la primera etapa de la destrucción denominada Período de Iniciación de la Grieta [9].

Las tensiones mecánicas ejercidas sobre la zona de la superficie de la pieza durante el rodillado, conducen a una modificación sostenida del estado de tensión residual.

La acritud es una propiedad característica del estado metálico, que no presentan los polímeros ni los materiales cerámicos. El material resultará

más duro cuanto menor sea el espesor final, es decir, cuanto mayor haya sido la reducción en frío, puede decirse que acritud es el aumento de dureza que adquiere un material por deformación en frío.

El grado de acritud que adquiere un material depende de factores externos al material metálico, naturaleza del esfuerzo y velocidad de aplicación de éste, pero sobre todo depende del grado de deformación en frío que el material experimenta y de la naturaleza del material (sistema cristalino, energía de defectos de apilamiento, tamaño de grano, pureza del metal). La acritud guarda relación con el sistema cristalino al que pertenece el metal o aleación [17].

Según [16] y [8], plantean que 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**.**

2. Materiales y Métodos.

En la parte experimental se empleó un torno 16 D 20, donde fue ubicada la probeta entre plato y punto, figura 2 y evitar de esta forma la flexión de la pieza por la fuerza a aplicar.

Figura 2. Montaje entre plato y punto de la probeta para la deformación

2.1. Diseño de experimento.

Se escogió un diseño de experimento factorial completo [6], con dos variables y tres niveles. Este método de planificación estadística de la investigación, establece el número de ensayos (N) a realizar. Se realizará el tratamiento matemático de las variables involucradas en el proceso que después de un estudio preliminar, se consideran que las más importantes son las que aparecen reflejadas en la tabla No. 1

Tabla No. 1. Parámetros de entrada del experimento.

Parámetros	Símbolo	Niveles		
		Mín.	Medio	Máximo
Fuerza (N)	P	500	1 500	2 500
Rev/min	N	27	54	110
Avance (mm/rev)	S	0,075	0,125	0,25
Dureza	H	HV	HV	HV

El número de experimento cuando intervienen k factores con tres niveles cada uno (-1, Δ y +1), se determina con un arreglo de la función exponencial: $N = 3^k$

Donde:

N = Número de experimentos.

K = Número de factores.

En este caso, se analizará la influencia de dos factores, de aquí que K =2 luego, el número de experimento sería: $N = 3^2$ por lo que

N = 9 experimentos.

La ecuación de regresión resultante tiene la forma siguiente.

$$Y_1=b_0 + b_1X_1 + b_2 X_2 + b_{12}X_{12} \quad (1)$$

Donde:

X_1.- velocidad del husillo; en rev/min.

X_2.- presión de la herramienta sobre la probeta; en MPa.

Y_1.- dureza obtenida del ensayo; en HV.

2.1.1. Cálculo de la varianza.

Al calcular los coeficientes de regresión (b_0, b_1, b_2, b_{12}), se comienza el procesamiento estadístico de los resultados determinando la varianza de reproducibilidad (error) del experimento.

$$S_y^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} S_{yi}^2}{N} \qquad (2)$$

La significación de los coeficientes de regresión se comprueba por el criterio de t de student para una probabilidad de un 95% o un intervalo de confianza de 0.05 y 15 grado de libertad (N-1)

Posteriormente se calcula la varianza con adecuación al modelo:

$$S_{aj}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n} \left(y - y^{\mathrm{mod}\ f}\right)^2}{N - K - 1} \qquad (3)$$

Donde:

N = j y K es el número de coeficientes significativos.

Se calcula el coeficiente de fisher ($F_{Cál}$) y se compara con el fisher tabulado (F_{Tab}) según los grados de libertad del numerador y del denominador:

$$F_{Cál} = \frac{S_{aj}^2}{S_y^2} \qquad (4)$$

Si el $F_{Cál} > F_{Tab}$ entonces la ecuación describe adecuadamente el campo de la experimentación.

2.1.2. Preparación metalográfica de la probeta.

Las superficies de las muestras a investigar deben ser previamente pulidas para poder realizar la observación microscópica, por lo que se propone la realización de un conjunto de operaciones que permitan lograr la calidad superficial deseada. Las operaciones se resumen en el siguiente orden, según la norma NC 10-56:86 y ASTM E3-95.

Corte. Las muestras para la observación metalográfica con diámetro 30 mm y espesor de 3 mm se prepararon según norma ASTM E 3-95. Se realizó con una cuchilla *Sandvik*, código del vástago CNGA R 25 25 M 12, con una plaquita T-MAX-CUT 12 04 12 de calidad T 025 20 [4].

La probeta se tronzó con una longitud de 10 mm al aire, con abundante refrigeración, con el objetivo de lograr una rugosidad superficial con la mejor calidad posible.

Desbaste y pulido. Se realizó con el empleo de la máquina pulidora y papeles abrasivos del tipo No 180, 400 y 600 (ISO 9001), variando la granulometría del mismo al ser aplicadas a la pieza de trabajo, desde la más gruesa a la más fina, montando la lija sobre una placa de vidrio, cambiando el sentido del lijado 90º, por último las muestras se pasaron en una pulidora metalográfica, para lograr el acabado final, en ella se utilizó un paño de fieltro grueso usando como sustancia abrasiva el óxido de cromo.

Ataque químico: Se realizó con el objetivo de resaltar la estructura obtenida después de realizado el pulido, para observar la estructura metalográfica formada después de la deformación del material bajo carga por rodadura (ASTM E-262-Practice A). Para este ataque químico se utilizó Nital al 4 %.

Análisis microestructural. Para la observación de la microestructura de la probeta patrón, la cual se empleará para la comparación de las micrografías obtenidas, se empleó un microscopio óptico binocular, este está dotado con un portaobjetos giratorio e iluminador vertical Watson. La observación se realiza empleando distintas combinaciones de objetivo y ocular para obtener las imágenes más precisas. Las probetas se montan en un dispositivo con plastilina que permite una nivelación adecuada. Para procesar la información se utilizó una cámara fotográfica digital.

3. Resultados y Discusión

Con las datas obtenidas, (los valores de las durezas de las replicas a), se modeló el comportamiento de cada uno de estos coeficientes obtenidos de los ensayos de macrodureza respecto a las variables del proceso

(P, S y H).

3.1. Análisis de regresión para las variables involucradas

Los resultados experimentales fueron procesados por el análisis de regresión lineal.

La salida muestra los resultados del ajuste a un modelo de regresión lineal múltiple para describir la relación entre H y 3 variables independientes.

La ecuación del modelo ajustado es:

H = 222,42 + 0,3127*n + 0,00333*P - 13,3333*S

Donde:

n = Número de revoluciones; rev/min.

P = Fuerza; N.

S = Avance; mm/rev

Según el modelo obtenido la relación es estadísticamente significativa entre las variables para un nivel de confianza del 95%.

3.2. Análisis factorial completo.

El diseño estadístico de experimentos contempla una amplia variedad de estrategias experimentales que son adecuadas para generar la información que se busca.

En la tabla 2, se reflejan los resultados del análisis factorial completo para las variables involucradas en el proceso de experimentación. Se realizó para obtener un pequeño números de factores que expliquen la mayoría de la variabilidad en cada una de las 4 variables.

Tabla No. 2. Resumen del análisis factorial completo.

Factor Porcentaje de acumulativo.			
Número	Autovalor	Varianza	Porcentaje
1 (H)	2,05518	51,380	51,380
2 (n)	1,7518	43,795	95,175
3 (P)	0,163876	4,097	99,272
4 (S)	0,0291367	0,728	100,000

En este caso al efectuar el análisis se extrajeron todos los factores, juntas las variables explican el 96,3116% de la variabilidad en los datos obtenidos, asumiendo que toda la variabilidad en los datos es debida a factores comunes. Esto confirma el criterio de que lo determinante en las variaciones de la dureza del acero AISI 1045, son los factores n, S y P.

3.3. Análisis de varianza

Tomando como referencia la base de datos, resultado de las mediciones de dureza realizada, se procede a la realización del análisis de varianza, según el método de Fisher, para evaluar el nivel de significación de las variaciones provocadas por los diferentes experimentos.

En cada una de probetas se realizarán 3 mediciones de dureza, la primera a una distancia de 5 mm de la cara lateral donde fue colocado el dispositivo de rodillo simple, la segunda a 30 mm de la primera, y la tercera a 30 mm de la segunda.

Para el desarrollo de la parte experimental de la investigación la probeta se somete a la acción de fricción en diferentes condiciones, a fin de evaluar la influencia de aquellos factores que pudieran tener un efecto significativo en la calidad del proceso de endurecimiento.

Para el análisis de varianza se utilizará el método de Fisher, [13], comparando los coeficientes de Fisher calculado con los tabulados (FTab) según grados de libertad.

En la tabla 3 se recogen los resultados de la varianza obtenida. (Ver al final del artículo)

Como se puede apreciar, la probabilidad para variaciones por muestras es menor de un 0.05 %, para variaciones por columnas es del 96 % y para variaciones por interacción es del 98 %. Por lo que estos resultados permiten afirmar que la probabilidad para variaciones por muestras es menor de 0.05 %, lo que indica que las diferencias provocadas por las variaciones de los factores n y P para cada experimento, son significativas en tanto que la fluctuación de estos factores tienen gran influencia en los valores de dureza que se obtengan.

Las variaciones en un 96 %, indican que las diferencias provocadas en cada experimento no son significativas, lo que muestra que las variaciones en los valores de las mediciones en cada probeta, son pequeñas y no son provocadas por las variaciones de los factores n y P (velocidad del husillo y fuerza del dispositivo sobre la probeta), sino por otros factores aleatorios.

La probabilidad para variaciones por interacción del 98 %, indica que las variaciones provocadas por los diferentes experimentos (n y P), no son significativas es decir, tienen una marcada tendencia a ser iguales. Lo confirma el criterio de que lo determinante en las variaciones de la dureza del acero AISI-1045, son los factores (n y P). Los cuales son significativos expresado en el análisis de regresión con un grado de confianza de 95%. Por otra parte se puede asegurar que la

dureza promedio para cada probeta caracteriza fielmente esta magnitud con independencia de la posición que haya sido realizada la medición.

3.4. Análisis metalográfico.

El análisis metalográfico consistió en la observación e identificación de las características de la estructura metalográfica en probetas de acero AISI 1045. El Nital al 4%, resalta los diversos constituyentes estructurales y el contorno de los granos del acero AISI 1045. Pone en manifiesto las uniones de los granos de ferrita, la perlita se ennegrece y la cementita se mantiene blanca.

Se realizó la micrografía de todas las probetas antes de aplicar la carga (figura 3) y posterior a esta.

Se analizará el comportamiento en correspondencia con el diseño de experimento, desde el valor mínimo hasta el máximo.

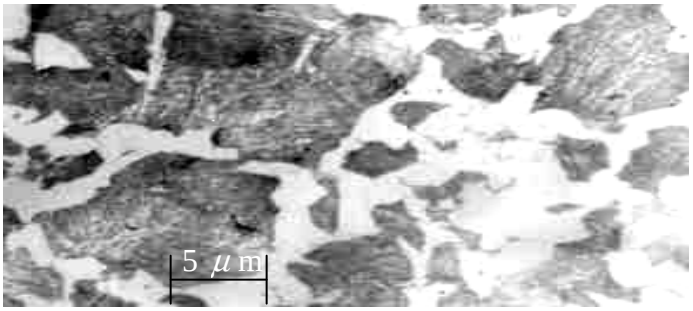

Figura 3. Muestra del centro, sin deformación y sin carga. (500x)

Al comenzar el proceso (figura 4), en nivel mínimo con valor de la fuerza de 500N, 27 rev/min y avance de 0,25 mm/rev, se observa la deformación de la red cristalina del material con el alargamiento de los granos

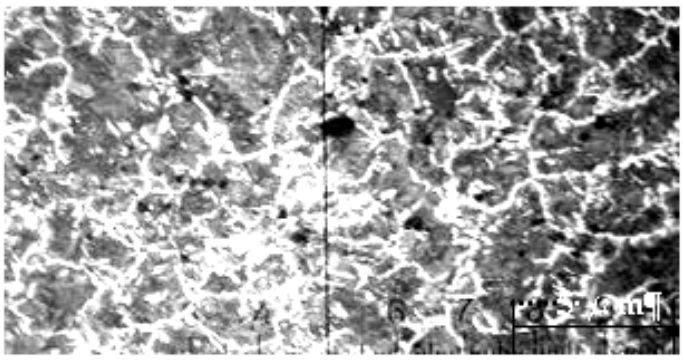

Figura 4. Muestra de los bordes, deformadas y con una fuerza aplicada de 500N. (500x)

En el nivel intermedio, en iguales condiciones de operación pero aplicando una fuerza fue de 1500N, 54 rev/min y avance de 0,125 mm/rev. Se observa mayor agrupación de los granos en la red cristalina, producto del deslizamiento (ver figura 5).

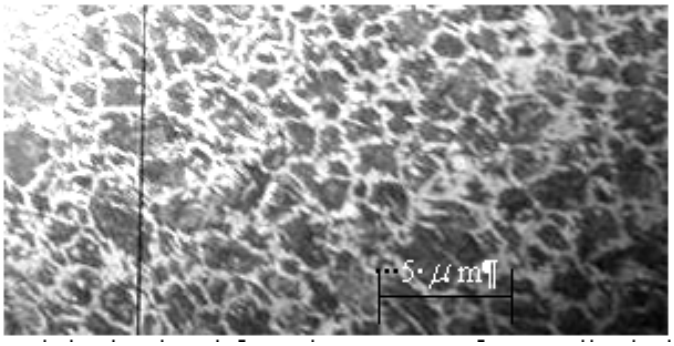

Figura 5. Muestra de los bordes, deformadas y con una fuerza aplicada de 1500N. (500x)

En el máximo nivel con valor de la fuerza de 2500N, 110 rev/min y avance de 0,125 mm/rev. (Figura 6), se caracteriza por una mayor compactación de los granos, lo cual se produce como resultado del incremento de los valores de las variables n, S y P.

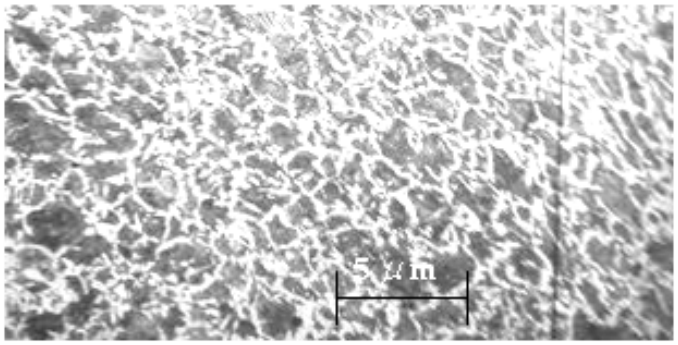

Figura 6. Muestra de los bordes, deformadas y con una fuerza aplicada de 2500N. (500x)

En las probetas sometidas a deformación, podemos observar una estructura bifásica de ferrita-perlita lo que demuestra que el endurecimiento del acero AISI 1045 por rodadura, ocurre por el fenómeno de las dislocaciones y no por el cambio de fase. Los límites de los granos se hacen más finos en la medida que se va incrementando la fuerza que se introduce a través de la herramienta de deformar, se observa el deslizamiento en los granos.

Después de someter a las probetas a la acción de cargas por rodadura, se notan vestigios de deformación plástica, con bloques de la estructura en mosaico divididos en pequeñas proporciones y una deformación clara de la red cristalina, típico del fenómeno de la acritud. Las micrografías mostradas con un aumento del microscopio (500x) corresponden a los diferentes niveles en la que fueron deformadas.

Como se aprecia, la capacidad de endurecimiento (H) tiene un comportamiento creciente en la misma medida que se incrementan los valores de las variables del proceso de experimentación (n; S, y P), al incrementar las tensiones de compresión surge un estado tensional que deforma el acero, incrementando su dureza final, de esta forma se reducen los niveles de desgaste mejorando el comportamiento del material en correspondencia con el mecanismo de endurecimiento.

3.5. Análisis de las tensiones.

Se realizó la modelación utilizando el paquete de software ANSYS V.10 como proceso del Método de Elementos Finitos, aplicando las cargas en el centro de la pieza como lugar donde existe mayor tendencia a la deformación plástica.

Los resultados de la simulación muestran que las máximas tensiones se localizan en la parte superior del cilindro que entra en contacto con el rodillo durante su desplazamiento, desde los valores máximos (color rojo), hasta valores mínimos (color azul), como se muestra en las figuras.

Haciendo una comparación entre las figuras de simulación se puede observar que los valores de 23 iones aumentan con el aumento de la fuerza y la profundidad, a medida que se va deformando.

Cuando el material comienza a deformarse los valores de las tensiones no son significativos, según va deformando toma valores significativos hasta alcanzar en el centro de la pieza los máximos valores de tensiones de deformación.

Analizando la microestructura en este punto para el nivel mínimo se obtiene la mínima compactación de los granos. Pero al incrementar los valores de las variables la compactación de los mismos también aumenta. (Figuras 7, 8 y 9)

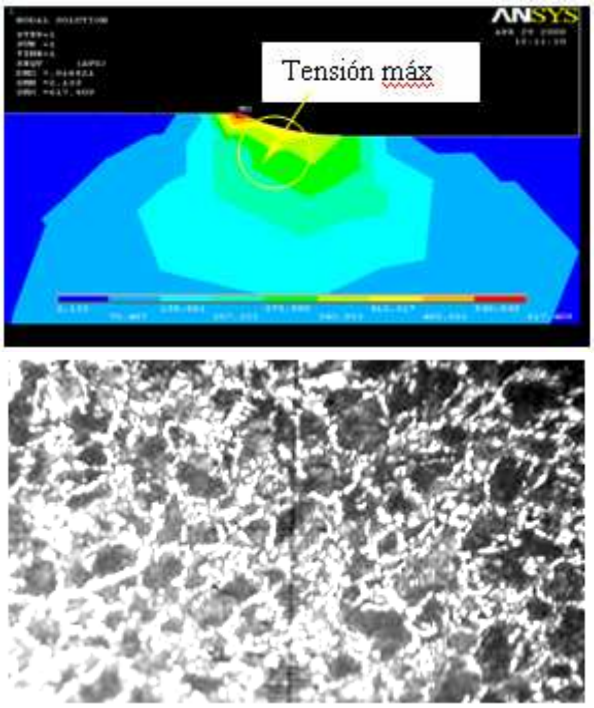

Figura 7. Distribución de tensiones con Microestructura del acero deformado (fuerza 500 N y con profundidad 0.3 mm)

Al aumentar el nivel los valores de tensiones se incrementan, en tanto en la microestructura la compactación de los granos es mayor.

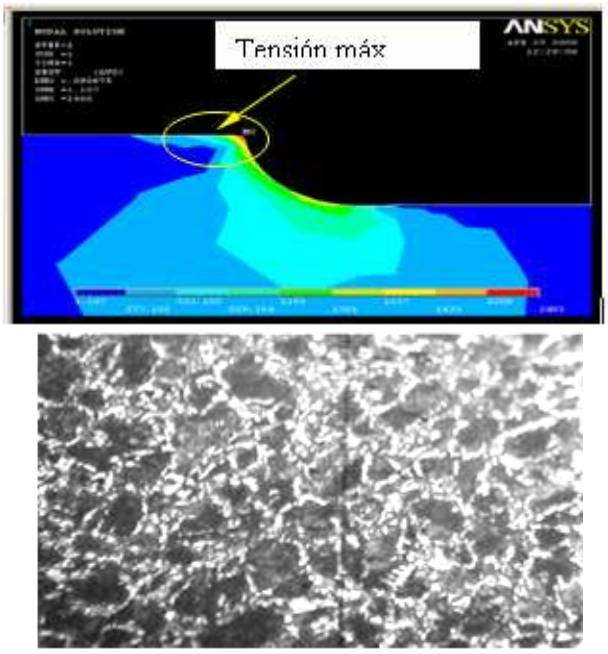

Figura 8 Distribución de las tensiones con microestructura del acero deformado con fuerza de 1500 N profundidad 1;2 mm)

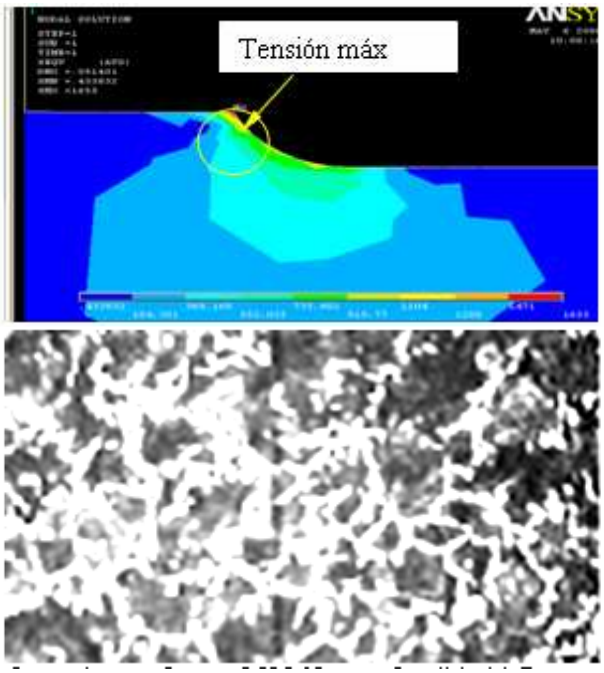

Figura 9. Distribución de tensiones con microestructura del acero deformado con fuerza 2500 N y profundidad 1.7 mm.

En el máximo nivel se observa mayor compactación de los granos, lo cual está motivado por el incremento de las variables, los mayores

valores de dureza dados según las fuerzas 210; 224 y 218 HV.

Los valores nodales de tensiones a partir de su relación con el modelo creado en MEF se corroboran con los logrados por vía experimental mediante la técnica de medición periódica de tensiones. Lo cual demuestra la relevancia de las técnicas empleadas, tanto analíticas como experimentales.

Se demuestra la validez de los resultados y la fiabilidad de métodos computacionales como son los Métodos de Elementos Finitos, al comparar los valores de tensiones obtenidos por estos métodos con los obtenidos experimentalmente (alta concordancia). Lo cual concluye que se puede valorar una tecnología desarrollada antes de llevarla a la práctica, ajustando parámetros como fuerza, profundidad, permitiendo además definir cuál proceso es el más adecuado evitando la técnica de ensayo y los posibles errores.

4. Conclusiones.

1. El endurecimiento del metal de la capa superficial de la pieza en la Deformación Plástica Superficial por rodillo se desarrolla como resultado del arrugado de las micro-irregularidades producidas por el tratamiento.
2. La capacidad de endurecimiento (H) tiene un comportamiento creciente en la misma medida que se incrementan los valores de las variables del proceso de experimentación (n; S, y P), este resultado se corresponde con que, al incrementar las tensiones de compresión surge un estado tensional que lo deforma, incrementando su dureza final, de esta forma se reducen los niveles de desgaste mejorando el comportamiento del material en correspondencia con el mecanismo de endurecimiento.
3. Los resultados del análisis metalográfico, revelan en las muestras deformadas de acero AISI 1045 una estructura de ferrita-perlitica, antes y después del tratamiento con rodadura. No se detectó la presencia de aparición de nuevas fases por el trabajo de compresión dinámica. Se comprobó la reducción del tamaño del grano.
4. La ocurrencia del endurecimiento a través del mecanismo de deslizamiento se produce a consecuencia del tensionamiento de la estructura cristalina de la red, la reducción del tamaño promedio de los granos y el aumento de la acritud.
5. Los resultados de la simulación demostraron que las mayores tensiones 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 mayor de los granos.
6. Se definió la distribución de las tensiones en el proceso de Deformación Plástica Superficial por rodadura con material acero 45 empleando el Método de Elementos Finitos; según este en la zona de interacción del rodillo con la pieza se

5. Referencias.

1. **NIBERK, A. N.** "Resistencia al desgaste de guías tratadas por rodilado". *Máquinas Herramienta*. 1987. n^0 5, p. 25-26.
2. **CULLITY, B. D.** *Elements of X–Ray Difraction.* La Habana: Ediciones Revolucionarias, 1967. Department of Metallurgical Engineering and Materials Science. University of Notre Dame.
3. **BARRET, C.** *Estructura de los metales.* 1 ed. Madrid.: Editorial Aguilar, 1957. 838 p.
4. **KOROKEY, C.** *Guía de aplicación de herramientas.* 1996. 38-43 p.
5. **ÁLVAREZ, E. G. M**. "Máquina para el estudio del desgaste abrasivo en pares tribológicos". *Construcción de Maquinaria*. UCLV. Mayo-Agosto. 1995. n^0 2, p. 69-76.
6. **GUTIERREZ, F. y DE LA VARA, R.** *Análisis y Diseño de Experimentos.* 1a ed. México: Mc Garw Hill, 2003.
7. **HERNÁNDEZ, H. G.** *Estudio del comportamiento del acero AISI 1045 mediante la deformación plástica por rodadura. Informe Técnico.* Facultad de Metalurgia y Electromecánica. ISMMMoa. 2005

8. **LUBRINER, J.** *Plasticity Theory*. University of California at Berkeley. En 1986, cap. 2, p. 77-86.
9. *Influence of Alloying Elements on Steel Microestructure*. Key to Steel Web Site. Disponible en: http://www.key-to-steel.com/
10. **KOROTCISHE, L.** *Procesos progresivos en la deformación plástica superficial por rodadura.* Moscú: Mir, 1989.
11. **LOH y AL, E.** "Statistical analyses of the effects of ball burnishing parameters on surface hardness". *Wear*. February 1989. vol. 129, nº 2, p. 235-243.
12. **FATTOUH, M.; EL-AXIR, M. H.,** *et al.* "Investigations into the burnishing of external cilyndrical surface of 70/30 Cu-Zn alloy". *Wear*. October 15 1988. vol. 127, nº 2, p. 123-137.
13. **HERNÁNDEZ, S.** *Metodología de la Investigación.* México: McGraw-Hil, 1997.
14. **ROSE, S**. "Rolling a superior finish T&P Shop Talk". *Tooling & Production Magazine*. 2000. March,
15. Disponible en: http://www.manufacturingcenter.com/tooling/archives/0300/0300tp.asp.
16. **GABB, T. P.; TELESMAN, J.,** *et al.* "Improved method being developed for surface enhancement of metallic materials". *Advanced Materials and Processes*. 2002. vol. 160, nº 1, p. 69-72.
17. **BADIOLA, V.** *Materiales Departamento. Ingenierías Mecánica, Energética y de Materiales.* España: 2004. Diseño de Máquinas I.
18. **SMELYANKY, V. M.; KALPIN, Y. G.,** *et al. "Empleo de las posibilidades plásticas de los metales en la capa superficial de las piezas durante la elaboración por rodilado exterior". Novedades de la Construcción de Maquinarias. 1990. nº 8, p. 54-58.*

T. Fernández-Columbié, I. Rodríguez, D. Alcántara-Borges.
Departamento de Ingeniería Mecánica.
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Holguín. CP 83 329. Cuba.
E-mail: tfernandez@ismm.edu.cu, irgonzalez@ismm.edu.cu, dalcantara@ismm.edu.cu