

## VARIACIÓN DE LA DUREZA SUPERFICIAL DE LOS RODILLOS RADIALES DE TRANSPORTADORES YACOBI.

## VARIATION OF THE SUPERFICIAL HARDNESS OF THOSE RADIAL ROLLERS OF TRANSPORTERS YACOBI.

Benigno Leyva de la Cruz

Ingeniero mecánico, MSc. en electromecánica, Profesor, Departamento de Ingeniería mecánica.  
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Holguín, Cuba.

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

*(recibido/received: 21-Enero-2014; aceptado/accepted: 8-Junio-2014)*

### RESUMEN

Uno de los problemas medulares que ha afectado la productividad de las empresas en general, es el deterioro de las piezas de sus equipamientos tecnológicos por desgastes. En tal sentido, el estudio del comportamiento de la dureza superficial de dichos componentes durante su vida útil es de vital importancia, para poder recomendar una estructura eficiente, en cuanto al material y tratamiento a seleccionar. En este trabajo se realizó un estudio sobre la variación de la dureza superficial que experimentan los rodillos radiales de transportadores yacobi durante su período de explotación. Se determinó la influencia que tienen sobre la dureza el efecto combinado de la temperatura, la fuerza, el número de revoluciones, y el régimen de enfriamiento en el acero AISI 1045, laminado y templado. Se efectuó la determinación de la dureza superficial de 12 rodillos antes y después de la puesta en explotación con un durómetro portátil modelo 316 con rango de medición de 20 – 65 HRC y apreciación 1,5 puntos, asegurando la condición de normalidad para un nivel de confianza del 95 %. Los resultados obtenidos indicaron que la dureza de los rodillos son 47,5 HRC y 41,67 HRC antes y después de la explotación respectivamente. Además, el análisis de variancia efectuado refiere que existe diferencia significativa entre los valores de la dureza superficial antes y después de la puesta en explotación, lo que indicó la necesidad de realizar un análisis minucioso de las causas que están provocando dicha variación para mejorar la calidad del proceso.

**Palabras claves:** Dureza; rodillos; productividad; temperatura; normalidad.

### ABSTRACT

One of the medullary problems that has affected the productivity of the companies in general, is the deterioration of the pieces of their technological equipment for waste. In such a sense, the study of the behavior of the superficial hardness of these components during its useful life is of vital importance, to be able to recommend an efficient structure, as for the material and treatment to select. In this work was carried out a study on the variation of the superficial hardness that experiences the radial rollers of transporters yacobi during their period of exploitation. The influence was determined that have about the hardness the combined effect of the temperature, the force, the number of revolutions, and the cooling régime in the steel AISI 1045, laminate and temperate. The determination the superficial hardness of 12 rollers was made before and after the setting in exploitation with an instrument to measure hardness portable model 316 with range of mensuration of 20 - 65 HRC and appreciation 1,5 points, assuring the condition of normality for a level of trust of 95%. The results obtained indicate that the hardness of the rollers is before 47,5 HRC and 41,67 HRC and after the exploitation respectively. Also, the analysis of made variance refers that significant difference exists before among the values of the superficial hardness and after the setting in exploitation, what indicated the necessity to carry out a meticulous analysis of the causes that are causing this variation to improve the quality of the process.

**Key words:** Hardness; rollers; productivity; temperature; normality

## INTRODUCCIÓN

Mejorar la eficiencia de los equipos e instalaciones que componen las fábricas productoras de níquel es una prioridad de los dirigentes de dichas entidades y del estado cubano, debido entre otros factores a que en los últimos años la industria del níquel ha tenido un rol importante en la economía del país, constituyendo uno de los renglones que más divisas aporta a la economía cubana.

La Unidad Empresarial de Base Hornos de Reducción de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara tiene como función la reducción de los óxidos de níquel y cobalto; los óxidos de hierro se reducen hasta hierro metálico, y se considera entre las de mayor influencia en la finalidad del proceso, ya que la producción del sínter depende directamente de la magnitud del extractable logrado durante la reducción del mineral.

Los Hornos de Reducción para la obtención de Ferro Níquel, están compuestos por un cilindro metálico vertical de 15 m de altura revestido interiormente con ladrillos refractarios y exteriormente con una carcasa metálica, sistemas de alimentación, barrido, descarga y cámaras de combustión. Los hornos están provistos de 17 hogares o soleras en forma de bóvedas esféricas a través de los cuales circula la carga (mena) que, proveniente de la planta de secaderos, se le suministra al horno por la parte superior a través de un alimentador sinfín (Velásquez, 2002).

El objetivo del proceso que se realiza en la Unidad Básica Productiva Hornos de Reducción es reducir el óxido de níquel a níquel metálico, haciéndolo apto para la lixiviación amoniaca. Para ello se cuenta con la instalación de 24 hornos de reducción, 12 transportadores sinfín que, a su vez, para su funcionamiento, utilizan 12 rodillos radiales de apoyo cada uno. Estos rodillos, para mantener el rendimiento y la estabilidad en el trabajo, deben tener un acabado óptimo, sin grietas ni fisuras en toda la superficie de la pista de rodaje además de buena resistencia mecánica a la fricción y flexión (Oliveros, 2011).

Uno de los problemas medulares que afecta la productividad de la Unidad Básica Productiva Hornos de Reducción y a la empresa en general, es el deterioro de los rodillos. Según las estadísticas compiladas, el índice promedio de deterioro es de 52 rodillos al mes, lo que representa unos 624 anuales (Oliveros, 2011). Debido a las frecuentes salidas de servicios por desgaste se hace necesario sustituirlos de forma frecuentes, provocando pérdidas y afectaciones en la producción.

La problemática de la vida útil y la fiabilidad de los elementos de máquinas están relacionados con el estudio de las leyes y mecanismos del desgaste que sufren durante sus períodos de explotación (Álvarez, 1999). La necesidad del estudio de esta problemática de la vida útil y la fiabilidad de los elementos de máquinas es de vital importancia, para poder recomendar una estructura eficiente, en cuanto al material y tratamiento seleccionado (teniendo en cuenta a la hora de seleccionar los materiales las diferentes exigencias económicas, tecnológicas, de explotación e higiénicas); es de gran consideración para lograr un incremento en la vida útil de los órganos de trabajo de las máquinas y por tanto para la economía del país.

A pesar de esto no se reportan trabajos que permitan apreciar la magnitud de la variación de la dureza que se produce en dichos elementos mecánicos. Los rodillos del transportador yacobi son unas de las piezas más importantes del transportador y tienen la particularidad de ser el elemento fusible de la cadena formada por los rodillos y las yantas a las cuales les sirven de apoyo, exponiéndose a condiciones de cargas severas de temperatura, presión, velocidad, ambiente erosivo y corrosivo. Por tal motivo este trabajo tiene como objetivo determinar la magnitud de la variación de la dureza que se produce en los rodillos del transportador yacobi durante su período de vida útil.

### *Revisión bibliográfica*

En el contacto de cuerpos sólidos, además de la mecánica es necesario tener en cuenta la interacción molecular de los materiales en las superficies de separación y en las fuerzas superficiales. Como estos procesos dependen de la naturaleza física y química de las superficies en contacto, es necesario describir las correspondientes características de estas superficies (Johnson y Bower, 1989).

Los autores Tubielewicz et al., (2000), coinciden en plantear que desde el punto de vista de la física del estado sólido, la superficie de los cuerpos cristalinos es una brusca discontinuidad en la periodicidad del retículo cristalino, esta brusca discontinuidad en la red cristalina presenta las siguientes particularidades: reorientación estructural, interacción de las superficies con el medio ambiente (adsorción física y química, oxidación o formación de capas), variación en las propiedades mecánicas. Las superficies técnicas tienen particularidades complementarias debido a los procesos de elaboración, tales como: capas endurecidas mecánicamente, superficie con texturas especiales y campo de tensiones internas local.

Para describir la composición de la superficies reales, en 1936 se propuso diferenciar las capas existentes en el contacto seco, donde se identificó capas externas a las superficies formadas por impurezas, gases adsorbidos y óxidos, y las capas internas superficiales, incluyendo la capa endurecida por la deformación y el metal base. El endurecimiento por deformación aumenta la resistencia al desgaste.

La presión de contacto está representada por una serie de cargas puntuales que actúan en cada nodo de la superficie. La deflexión en cualquier punto del modelo puede ser determinada mediante la superposición de las deflexiones causadas por cada carga discreta (Cheng et al., 2000; Bower y Johnson, 1989).

La fatiga de contacto por rodadura ha sido identificada como la propagación de grietas iniciadas en la superficie, alrededor de defectos superficiales tales como asperezas o dientes. La iniciación de la grieta alrededor de tales defectos se piensa que esté controlada por el campo de los esfuerzos normales y cortantes.

El estudio de dichos fenómenos permitió establecer que la capa superficial del metal se forma como resultado de la trayectoria de la deformación plástica del metal, teniendo esto lugar en condiciones de deformaciones de signo variable y bajo el surgimiento de diferentes cargas internas inducidas no simétricas de carácter cíclico. Por ello, los parámetros del estado físico-mecánico de la capa superficial, en particular la plasticidad, deben determinarse considerando este estado complejo de las cargas actuantes (Cheng et al., 2000).

Otros autores, Álvarez (1999) y Martínez (2006) plantean que como es conocida la fuerza de fricción que obra entre superficie en reposo una con respecto a la otra, se llama fuerza de fricción estática y que la máxima fuerza de fricción estática será igual a la mínima fuerza para iniciar el movimiento.

### *Endurecimiento en frío de las capas. Acritud.*

El trabajo en frío según Moreno (2005), aumenta la cantidad de tensión necesaria para el deslizamiento. Este hecho se puede relacionar con la teoría de la dislocación, ya que la red cristalina deformada del metal impide el movimiento de las dislocaciones y la dislocación bloqueada solamente puede desplazarse si se incrementa la tensión. De esta forma, un metal endurecido por deformación se puede someter a tensiones mayores que el mismo metal recocido antes de que ocurra la deformación.

Esto es fundamental en la consolidación de los metales, tanto en los metales puros como en sus aleaciones. En el último caso, el efecto del trabajo en frío, superpuesto al efecto de endurecimiento de la fase sólida da lugar a la obtención de un metal más resistente que el que se podría producir por cualquiera de otros tratamientos (Lim, 1969 y Moya, 1996).

Se plantea que el análisis exhaustivo del desarrollo de los procesos por deformación plástica se está intentando realizar mediante el seguimiento en cada instante del continuo cambio en forma y posición de la superficie de fluencia. Un estudio aproximado de la transformación de la superficie de fluencia se puede realizar mediante los criterios del endurecimiento por deformación en frío (Mallo, 1987).

Según Sugino (2005), la tensión residual compresiva puede llegar hasta valores entre 1 000 y 1 600 MPa a una profundidad de 0,08 a 0,1 mm de la superficie. Los valores anteriores dependen del material y del proceso de elaboración. Dichas tensiones aparecen a una profundidad entre un 10 y un 50% de la profundidad de la capa endurecida.

La deformación plástica en frío de un agregado policristalino por un proceso cualquiera de conformado; laminación, estirado, trefilado, embutición, compactado de polvo, plegado, enderezado, suele traducirse en una deformación permanente. Esta tiene lugar en el interior de los cristales con la acomodación de las juntas de los granos (Pickering, 1996; Álvarez, E.A.G, 1999; Callister, 1999 y Pero- Sanz, 2000).

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 (Smelyanky et al., 1990).

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, y crean 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 (Álvarez, et al., 2004). Al someter un metal con estructura cúbica a la acción de cargas que sobrepasen el límite de fluencia, después de eliminarlas persistirá la deformación. Si se vuelve a poner al metal bajo la acción de cargas, su actitud para la deformación plástica habrá disminuido y el límite de fluencia se elevará. Esto significa que el metal se ha endurecido por acritud (Barceinas y Juárez, 2001).

Según Clauser (1985) para que pueda ser endurecido por deformación en la fase austenítica, el acero debe tener una región en forma de bahía en la parte del diagrama temperatura - tiempo que corresponde a la fase austenítica del acero (entre 425 y 540 °C aproximadamente). La austenita se deforma en la región de la bahía y luego se enfría y transforma en martensita. Los aceros que se han sometido a este esquema de deformación y transformación tienen una resistencia mayor que los que se templean y revienen en la forma convencional.

La variación de las propiedades de explotación de las piezas, como resultado de la deformación plástica superficial (DPS) tiene lugar, en gran medida, por la consolidación del metal, por el surgimiento de tensiones residuales de compresión y la formación de una rugosidad superficial con perfil adecuado (Korotcishe, 1989 y Smeliansky et al, 1990).

En la teoría de la elaboración por conformado de los metales se han formulado diferentes teorías y criterios de la deformabilidad. El análisis de la aplicabilidad de estos supuestos teóricos, la relación al cálculo del parámetro de la plasticidad, demuestra que ninguna de ellas permite descubrir las particularidades de las destrucciones de la capa de metal durante la deformación plástica. Teniendo en cuenta los defectos de "cicatrizado" de los metales durante el cambio de signo de las deformaciones.

En correspondencia con los nuevos conocimientos de la naturaleza de la fatiga de los metales, los defectos superficiales de la capa pueden, bajo la acción de las cargas actuantes durante la explotación de las piezas desarrollarse aún más, por ello la capacidad de trabajo de las piezas puede estar condicionada no solamente por el nivel de la capa endurecida y de las tensiones residuales compresivas (Odintsov 1987 y Mazein et al., 2001), sino también del grado de utilización de la capacidad plástica del metal.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### *Características de los rodillos del transportador de yacobi*

Los rodillos radiales en su conjunto, son estructuras sólidas de 200,7 kg de peso; compuestas por un cuerpo llamado propiamente rodillo. Estos son fabricados de acero 55 Г GOST o acero AISI 1045 ASTM y de 40–46 HRC de dureza en la superficie según proyecto. Van montados en dos rodamientos autoalineables N°22315, según norma SKF, para girar sobre un eje fijo de material AISI 1045, que descansa sobre dos apoyos de hierro fundido con resistencia mecánica de 240 MPa. A este eje en uno de sus extremos se le hace un agujero longitudinal de 8 mm de diámetro hasta la distancia media del mismo, agujero que se interseca con otro transversal, para mediante unas copillas lubricar la zona de los cojinetes. Como accesorios complementarios posee 2 tapas, 2 prensa estopas, 2 camisas, 2 placas de seguro, 2 discos, una junta y cordón de amianto magnesiano. Todos estos elementos fijados con 22 tornillos y 14 arandelas para hermetizar dichos rodamientos, evitando que entre polvo, agua y partículas contaminantes a las superficies de trabajo, además de poder mantener lubricada toda esa zona. Tienen unas dimensiones generales de 480 mm entre los apoyos y el diámetro del cuerpo giratorio es de 305 mm.



Figura 1: Rodillos del transportador yacobi en explotación junto a la yanta.

Estos rodillos sirven de apoyo a las yantas (Figura 1) que poseen las siguientes características: tienen una masa de 288,8 kg, se construyen de acero 55 Г (GOST) y con una dureza de 50–55 HRC, hasta una profundidad de 10 mm; las mismas trabajan en condiciones ambientales adversas y agresivas donde el polvo y el agua están siempre presentes.

*Características del régimen de explotación de los rodillos*

Las características del régimen de explotación de los rodillos que fueron objeto de estudio en el presente trabajo, se muestran a continuación en la tabla 1.

Tabla 1. Régimen de explotación de los rodillos (Prieto, 2013).

|                                 |                      |
|---------------------------------|----------------------|
| Material de los rodillos        | Acero AISI 1045      |
| Número de revoluciones          | 23,3 rev/min         |
| Temperatura                     | 250 C <sup>0</sup>   |
| Fuerza                          | 37 258,82 N          |
| Flujo de agua                   | 10 m <sup>3</sup> /h |
| % de sólido presente en el agua | 1 %                  |
| Tiempo diario de trabajo        | 24 h                 |
| Dimensiones generales           |                      |
| Diámetro exterior               | 305 mm               |
| Diámetro interior               | 150 mm               |
| Largo                           | 260 mm               |

*Características del durómetro*

Un durómetro es un aparato o equipo que mide la dureza de los materiales, existiendo varios procedimientos para efectuar esta medición. Los más utilizados son los de Rockwell, Brinell, Vickers y Microvickers. En la figura 2 se muestra el instrumento de medición portátil que se empleó en la determinación de la dureza. Para la misma se procede, aplicando una fuerza normalizada sobre un elemento penetrador, también normalizado, que produce una huella sobre el material, y en función del grado de profundidad o tamaño de la huella, se obtiene la dureza. Dentro de cada uno de estos procedimientos, hay diversas combinaciones de cargas y penetradores, que se utilizan dependiendo de la muestra a ensayar.



Figura 2. Durómetro modelo 316.

Las principales características que muestra este equipo son: un rango de medición de 20 – 65 HRC, exactitud de 1,5 puntos, longitud de 24,1 cm, ancho de 16,5 cm, una altura de 6,4 cm y un peso de 0,9 kg.

*Muestreo irrestricto aleatorio*

Este procedimiento se aplica con vistas a determinar que el tamaño de la muestra sea lo suficientemente representativa. El tamaño de la muestra se determinó tomando como referencia el siguiente modelo, tomado de Calero (1976).

$$n = \frac{\left( \frac{Z_{1-\alpha/2} \cdot S}{d} \right)^2}{1 + \frac{1}{N} \cdot \left( Z_{1-\alpha/2} \cdot \frac{S}{d} \right)^2} \quad (1)$$

Donde:

$Z_{\alpha/2}$  – es el estadístico de la distribución normal.

$\alpha$  – es el nivel de significancia.

$S$  – es la desviación típica muestral.

$d$  – es el error máximo de estimación.

$N$  – es el tamaño total de la población de referencia.

$n$  – es el tamaño de la muestra requerido.

La aleatoriedad de los resultados se asegura en este trabajo con el empleo de la tabla de números aleatorios. Se escoge el rodillo para realizar la medición de la dureza superficial por coincidencia con la serie de número aleatorio.

### *Límites de tolerancia*

Para dar información vital necesaria para resolver problemas de ingeniería, se necesita reunir datos, esos datos se deben describir y tener en cuenta para producir información resumida. Con frecuencia, las representaciones gráficas pueden ser el medio más eficaz de comunicar esa información. Para analizar los datos obtenidos durante la determinación de la dureza superficial de los rodillos, se aplicará una de estas técnicas gráficas: el diagrama para control de mediciones.

El análisis estadístico de la medida de la tendencia central se efectúa aplicando las expresiones matemáticas que se refieren a continuación (Hernández, 1986)

$$\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} X_i}{n} \quad (2)$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{i=n} (X_i - \bar{X})^2}{n - 1}} \quad (3)$$

$$LT_{m\acute{a}x} = \bar{X} + t_{\alpha/2} \cdot S \quad (4)$$

$$LT_{m\acute{i}n} = \bar{X} - t_{\alpha/2} \cdot S \quad (5)$$

Donde:

$\bar{X}$  - media aritmética de la dureza superficial de los rodillos ( $\bar{H}$ ), mm.

$t$  - estadístico de la distribución probabilística de Student, y se determina en la tabla 4 del libro Probabilidad y estadística para ingenieros (Miller et al, 2005) en función del nivel de significancia ( $\alpha$ ).

$S$  - desviación típica.

$n$  - total de observaciones.

$\alpha$  - nivel de significancia.

En caso que existan valores anormales, los mismos se pueden eliminar procediendo como se indica a continuación (Hernández, 1986).

1. Para el conjunto de valores obtenidos en la medición se calculan  $\bar{X}$  y  $S$  (teniendo en cuenta en estos cálculos incluso aquellos valores considerados sospechosos).

2. Se establece el intervalo dado por la ecuación  $LT = \bar{X} \pm t_{\alpha/2} \cdot S$  y se elimina por considerarse como anormales todos los valores que queden fuera del intervalo establecido.
3. Se realizan nuevamente los cálculos necesarios para expresar el resultado elaborado o final, sin considerar, como es lógico, los valores anormales.

Si la muestra es grande se debe cambiar el estadístico t conocido como el estadístico de probabilidad de Student por el estadístico de la distribución de Gauss. El estadístico Z se determina en tabla 3 del libro Probabilidad y estadística para ingenieros (Miller et al., 2005).

#### *Variación de la dureza superficial de los rodillos*

Las variaciones que se producen en relación con las mediciones de la dureza superficial de los rodillos considerando el antes y después de su proceso de explotación se determina a través de las siguientes expresiones:

$$\Delta H_{abs} = \bar{H}_{desp} - \bar{H}_{antes} \quad (6)$$

Donde:

$\Delta H_{abs}$  - variación absoluta de la dureza de los rodillos, HRC.

$\bar{H}_{desp}$  - dureza de los rodillos después del proceso de explotación, HRC.

$\bar{H}_{antes}$  - dureza de los rodillos antes del proceso de explotación, HRC.

$$\Delta H_{rel} = \left| \frac{\bar{H}_{desp} - \bar{H}_{antes}}{\bar{H}_{antes}} \right| \cdot 100\% \quad (7)$$

Donde:

$\Delta H_{rel}$  - variación relativa de la dureza, %.

#### *Análisis de variancia*

Este análisis se efectúa con el objetivo de determinar si las variaciones que se muestren entre los valores de la dureza superficial de los rodillos antes y después de la puesta en explotación son significativas. El criterio que se emplea en la determinación es la prueba de Fischer, la cual se basa en la comparación entre el valor del estadístico de Fischer calculado (F<sub>cál.</sub>) y el de Fischer crítico o tabulado (F<sub>crít.</sub>); si el Fischer calculada es mayor que el Fischer crítico la hipótesis nula de que no existe diferencias significativas entre las medias se rechaza.

El análisis de variancia implica el considerar los supuestos de aleatoriedad, normalidad y homogeneidad de la variancia. La aleatoriedad está referida a la obtención de resultados representativos y objetivos del comportamiento de la variable; la normalidad se refiere al control de la variabilidad en cada tratamiento, esto es que exista simetría en la distribución de las observaciones con respecto a la media, y la homogeneidad expresa la igualdad de la variancia entre cada tratamiento, las cuales van a estar determinadas por la influencia de las causas que introducen variación en los resultados.

Existen varios criterios estadísticos para verificar el cumplimiento de los supuestos para el análisis de variancia, algunas de las cuales se mencionan a continuación: la aleatoriedad se verifica analizando las cantidades de corridas que se definen entorno a la mediana, para poder aplicar dicho criterio se requiere del conocimiento del orden cronológico en el que se tomaron las observaciones, ejemplos de la aplicación de dicha prueba pueden verse en Miller et al. (2005); la normalidad se verifica utilizando el criterio de Student o de Gauss en muestra pequeñas o grandes respectivamente, también se puede

considerar el criterio de Chi- cuadrada o el de Kolmogorof, estos criterios pueden consultarse en Hernández (1986) y Miller et al. (2005) y por último, la homogeneidad de la variancia se verifica utilizando la prueba de Bartlett, la cual se sustenta en el criterio de Chi cuadrada, ejemplos de la aplicación de dicho procedimiento puede verse en Montgomery (2005).

*Procedimiento de la prueba de Fisher para el análisis de variancia.*

1. Definición de las hipótesis.

Hipótesis nula ( $H_0$ ): No existe diferencias significativas entre las medias.

Hipótesis alterna ( $H_1$ ): Existe diferencias significativas entre las medias.

2. Nivel de significancia ( $\alpha$ )

3. Criterio de rechazo de la hipótesis nula.

Se rechaza la hipótesis nula si Fisher calculado es mayor que Fisher crítico ( $F_{\text{cál.}} > F_{\text{crít.}}$ ). El valor de Fisher crítico se determina en la tabla de la distribución de Fisher (tabla 6 de Miller et al., 2005), en función del nivel de significancia y del grado de libertad. El grado de libertad para este estadístico se determina como se indica a continuación): para el numerador (k-1) y para el denominador k(n-1), donde k es la cantidad de tratamientos y n es la cantidad de observaciones en cada tratamiento.

El valor del estadístico Fischer de cálculo se determina por medio de la tabla de análisis de variancia, la cual se muestra a continuación en el paso 4 del procedimiento.

4. Cálculo.

La tabla 2 muestra las expresiones para el cálculo del estadístico que sustenta la prueba.

Tabla 2. Cálculo de F.

| Análisis de variancia            |                           |                          |
|----------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| <i>Origen de las variaciones</i> | <i>Grados de libertad</i> | <i>Suma de cuadrados</i> |
| Tratamientos                     | (k-1)                     | SS(Tr)                   |
| Error                            | k(n-1)                    | SSE                      |
|                                  | (kn-1)                    | SST                      |
| Total                            | (k-1)                     | SS(Tr)                   |

Tabla 3. Resultados del cálculo de F (Cont.)

| <i>Promedio de los cuadrados</i> | <i>F</i>                  |
|----------------------------------|---------------------------|
| SS(Tr)/k-1                       | (SS(Tr)/k-1) / SSE/k(n-1) |
| SSE/k(n-1)                       |                           |

En la tabla anterior los parámetros referidos se definen de la siguiente manera:

$$SS(Tr) = \frac{\sum_{i=1}^k T_i^2}{n} - C \tag{8}$$

SS (Tr)- es la suma de cuadrados para tratamientos.

$T_i^2$  - es el número total de n observaciones en la i-ésima muestra.

C: es un término de corrosión.

$$C = \frac{T^2}{k * n} \tag{9}$$

$T^2$  - es el gran total de las kn observaciones.

$$SST = \sum_{I=1}^K \sum_{J=1}^N Y_{ij}^2 \tag{10}$$

SST- es la suma de cuadrado total.

$Y_{ij}^2$  - es la variable que adquiere el valor de cada observaciones.

$$SSE = SST - SS(Tr) \tag{11}$$

SSE- es la suma de cuadrado del error.

### 5. Decisión.

La decisión se toma sobre la base del criterio del rechazo de la hipótesis nula, definido en el paso 3.

## ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

Este análisis se realizó para 12 rodillos como muestra, donde se ejecutaron las mediciones de la dureza superficial antes y después de la explotación para determinar el comportamiento de esta variable. A partir de dicha tarea se arribó a los resultados que se muestran a continuación en las tablas 4 y 5.

Tabla 4. Dureza superficial de los rodillos antes de explotación.

| Rodillos | Dureza (HRC) |
|----------|--------------|
| 1        | 50           |
| 2        | 45           |
| 3        | 50           |
| 4        | 50           |
| 5        | 45           |
| 6        | 45           |
| 7        | 45           |
| 8        | 50           |
| 9        | 50           |
| 10       | 45           |
| 11       | 50           |
| 12       | 45           |

Tabla 5. Dureza superficial de los rodillos después de explotación.

| Rodillos | Dureza (HRC) |
|----------|--------------|
| 1        | 45           |
| 2        | 40           |
| 3        | 40           |
| 4        | 45           |
| 5        | 40           |
| 6        | 45           |
| 7        | 40           |
| 8        | 40           |
| 9        | 40           |
| 10       | 45           |
| 11       | 40           |
| 12       | 40           |

Las mediciones con respecto a la dureza superficial fueron tomadas con un durómetro portátil modelo 316 como se expuso anteriormente.

#### *Análisis de la representatividad de la muestra*

La representatividad de la muestra se verifica considerando la ecuación 1 expuesta anteriormente y asumiendo las siguientes aproximaciones para el cálculo ( $\sigma = E$ ,  $\alpha = 0,05$  y  $Z_{\alpha/2} = 1,96$ ) puesto que no se conoce de antemano los valores de los términos involucrados en el modelo, ya que no se han realizados trabajos en este sentido; es decir un error máximo de estimación ( $E$ ) igual a la desviación típica ( $\sigma$ ) y un nivel de confianza del 95 %; se determina que el tamaño de la muestra requerido es de 4 unidades.

Esto indica el tamaño mínimo que debe tener la muestra para que los resultados sean representativos del proceso objeto de estudio. Ahora bien, debe tenerse en cuenta los criterios siguientes: Lograr un compromiso entre mayor representatividad, menor costo y mayor productividad para que el muestreo sea eficiente (Calero, 1976). Teniendo en cuenta esto último se escoge un tamaño de muestra igual a 12.

La selección de la muestra se realizó enumerando lotes de rodillos disponibles en la planta de horno de reducción de la empresa Ernesto Che Guevara. Los rodillos nuevos se escogieron aleatoriamente de un lote que contenía 45 rodillos y los rodillos viejos de un lote de 48 rodillos.

#### *Análisis del comportamiento de la dureza de los rodillos antes de explotación*

Para el análisis del comportamiento de la variable dureza superficial de los rodillos se aplicarán desde las expresiones 2 hasta la 5 expuestas anteriormente, las mismas permiten establecer los límites de normalidad. A continuación se muestra en la figura 3 el diagrama de control para las mediciones de la dureza superficial de los rodillos antes de su explotación.

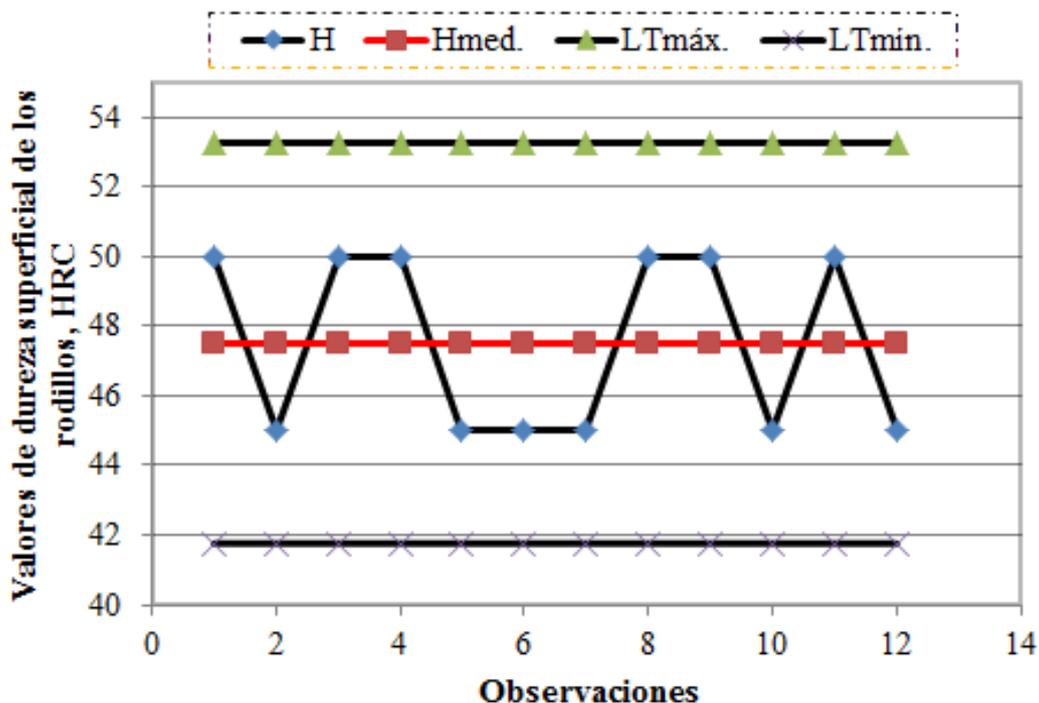


Figura 3. Diagrama de control de la dureza superficial de los rodillos antes de explotación.

La observación de la figura 3 nos identifica que el proceso está bajo control estadístico, ya que no existen puntos fuera de los límites de control; la variable muestra un comportamiento normal. Estos valores están condicionados por el nivel de confianza especificado; el cual fue de un 95 %. Los límites de tolerancia para la dureza de los rodillos son: límite mínimo de 41,76 HRC y el límite máximo de 53,24 HRC, para un nivel de confianza del 95 % ( $t_{0,025} = 2,201$  con  $\nu = n - 1 = 12 - 1 = 11$  grados de libertad) y un valor promedio para la dureza de 47,5 HRC. Esto significa que cada observación que se realice respecto a la dureza de los rodillos, bajo condiciones similares a las del muestreo realizado, tiene una probabilidad del 95 % de que su valor esté en este rango. En este caso se puede asumir con un nivel de confianza del 95 % que la dureza de los rodillos es de 47,5 HRC, pues este valor está comprendido dentro del rango determinado. La dureza que poseen los rodillos antes de la puesta en explotación esta en correspondencia con lo especificado en el plano, la cual es de 40–46 HRC.

*Análisis del comportamiento de la dureza de los rodillos después de explotación*

Una vez obtenidas las mediciones de la dureza superficial de los rodillos después d la explotación se elabora el diagrama de control para mediciones, el cual se muestra a continuación en la figura 4.

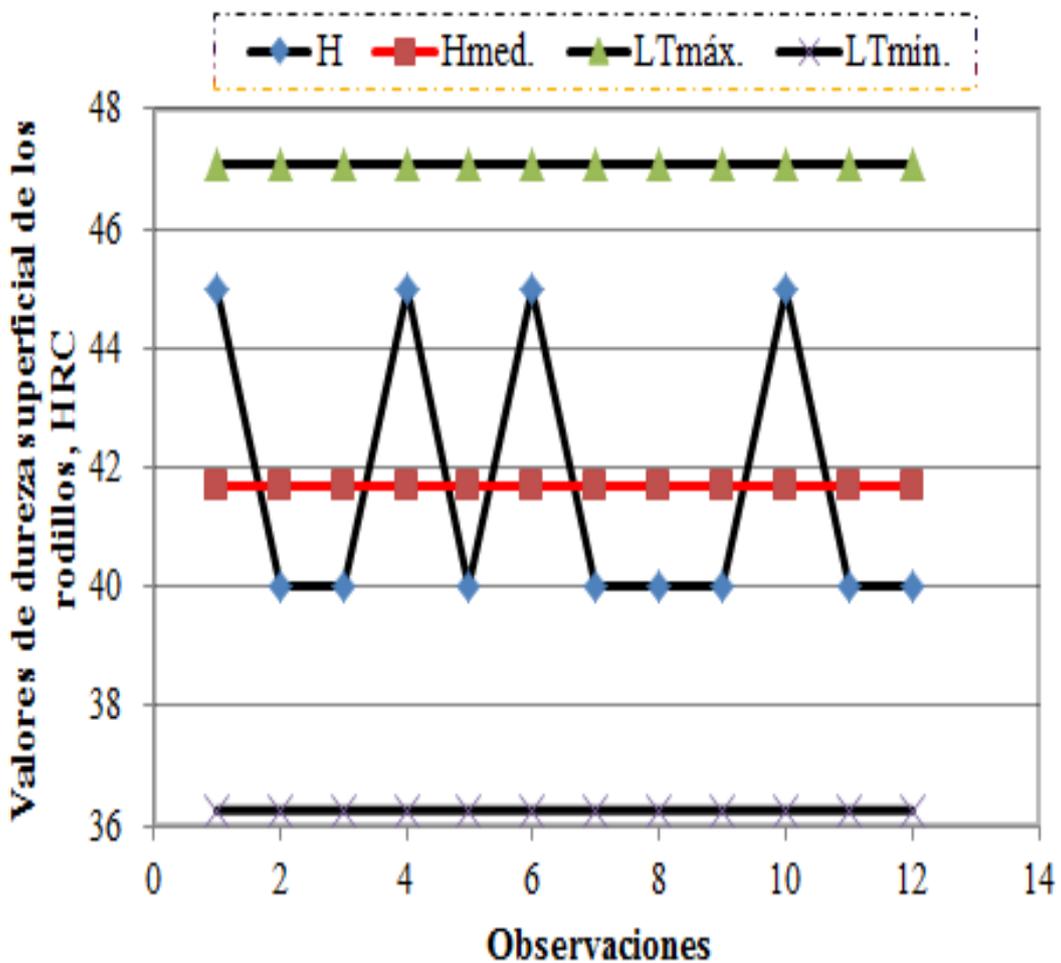


Figura 4. Diagrama de control de la dureza de los rodillos después de explotación.

La figura anterior indica que las mediciones están bajo control estadístico; la variable muestra un comportamiento normal. Los límites de tolerancia para la dureza de los rodillos son: límite mínimo de 36,26 HRC y el límite máximo de 47,08 HRC; para un nivel de confianza del 95% ( $t_{0,025} = 2,201$  con  $\nu = n - 1 = 12 - 1 = 11$  grados de libertad) y un valor promedio para la dureza de 41,67 HRC. Esto significa que cada observación que se realice respecto a la dureza de la pieza, bajo condiciones

equivalentes a las del muestreo realizado, tiene una probabilidad del 95% de que su valor esté en este rango. En este caso se puede asumir con un nivel de confianza del 95% que la dureza de los rodillos después de su explotación es de 41,67 HRC, pues este valor está comprendido dentro del rango de tolerancia.

*Análisis de variación de la dureza superficial de los rodillos*

Este análisis se realizó según las ecuaciones 6 y 7 expuestas más arriba para caracterizar las variaciones en la variable estudiada, se infiere el valor de la dureza de los rodillos, obteniéndose los resultados que se muestran en la tabla 6.

Tabla 6. Variación de la dureza superficial de los rodillos.

| <b>Ecuación</b> | <b>Parámetros</b>               | <b>Valores</b> | <b>U/M</b> |
|-----------------|---------------------------------|----------------|------------|
| 6               | Variación absoluta de la dureza | -5,83          | HRC        |
| 7               | Variación relativa de la dureza | 12,3           | %          |

La tabla 6 refiere los valores de las variaciones absolutas y relativas de la dureza superficial de los rodillos. Por lo que se plantea que existe una variación respecto a la dureza de un 12,3%. La disminución de la dureza de los rodillos puede atribuirse a la influencia de la temperatura de trabajo y el régimen de enfriamiento entre las superficies de las yantas y los rodillos, que provoca un efecto contrario al de la presión que genera la aparición de la acritud en el material.

*Análisis de la variancia*

En el caso que ocupa se asegura el cumplimiento del supuesto de aleatoriedad de las observaciones mediante el empleo de la tabla de número aleatorio, es decir de dos grandes lotes de rodillos nuevos y viejos se seleccionan muestras de tamaño 12 por coincidencia con la serie de la tabla de número aleatorio. El supuesto de normalidad y la homogeneidad de la variancia no se verifican basados en los siguientes argumentos: Miller et al, (2005) plantean que la prueba de Fischer es poco sensible a la violación de la normalidad y homogeneidad de la variancia, esto es que se obtienen resultados bastantes confiables aun violándose dichas condiciones; además, Montgomery (2002) refiere que se hace más necesario la verificación del cumplimiento de los supuesto de normalidad y homogeneidad cuando el experimento es desbalanceado, esto es cuando la cantidad de observaciones por tratamiento no es la misma.

La observación de los valores contenidos en la tabla 3 y 4 indica que el conjunto de observaciones de cada tratamiento se encuentra distribuido entorno a un valor central (la media), no apreciándose valores que evidencian extremos significativos, por lo que es razonable la suposición de la normalidad en el comportamiento de la variable. Por otra parte las observaciones fueron tomadas de rodillos que poseían características muy similares en cuanto a dimensiones, material del que están constituidos, régimen de explotación, y las mediciones fueron realizadas por el mismo operario con el mismo instrumento de medición, por lo que también es razonable suponer que no haya violación de la normalidad.

En la tabla 7 se muestran los resultados obtenidos a partir del cálculo para el desarrollo de la prueba de Fischer, utilizando las ecuaciones desde la 8 a la 11.

Tabla 7. Resultados del cálculo de F.

| Análisis de variancia            |                           |                          |
|----------------------------------|---------------------------|--------------------------|
| <i>Origen de las variaciones</i> | <i>Grados de libertad</i> | <i>Suma de cuadrados</i> |
| Tratamientos                     | 1                         | 204,17                   |
| Error                            | 22                        | 141,67                   |
| Total                            | 23                        | 345,83                   |

Tabla 8. Resultados del cálculo de F (Cont.)

| <i>Promedio de los cuadrados</i> | <i>F</i> | <i>Proba.</i> | <i>Valor Crítico para F</i> |
|----------------------------------|----------|---------------|-----------------------------|
| 204,17                           | 31,71    | 1,16E-05      | 4,30                        |
| 6,44                             |          |               |                             |

A partir de los resultados mostrados en la tabla anterior se infiere la siguiente decisión:

Puesto que el valor de Fischer calculado es mayor que el valor de Fischer crítico ( $31,71 > 4,30$ ) la hipótesis nula se rechaza, en otras palabras existe diferencias significativas entre la dureza que poseen los rodillos del transportador yacobi, antes y después de la puesta en explotación al nivel de confianza del 95 %.

## CONCLUSIONES

1. Se determina la influencia que tienen sobre la dureza superficial de los rodillos del transportador yacobi el efecto combinado de la temperatura, la fuerza, el número de revoluciones, y el régimen de enfriamiento en el acero AISI 1045, laminado en caliente y templado.
2. Se efectuó la determinación de la dureza superficial de 12 rodillos antes y después de la puesta en explotación con un durómetro portátil modelo 316 con rango de medición de 20 – 65 HRC y apreciación 1,5 puntos, asegurando la condición de normalidad para un nivel de confianza del 95 %.
3. Los resultados obtenidos indican que la dureza de los rodillos son 47,5 HRC y 41,67 HRC antes y después de la explotación respectivamente, es decir la dureza disminuye en un 12,3 %.
4. El análisis de variancia efectuado indica que la variación en la dureza superficial que experimentan los rodillos del transportador yacobi durante su periodo de explotación es significativa, al nivel de significancia del 0,05. Por lo que se requiere de un análisis minucioso de las causas que están provocando dicha variación.

## REFERENCIAS

Álvarez, E; G, M. *Máquina para el estudio del desgaste abrasivo en pares tribológicos*. Construcción de Maquinaria. UCLV. Año 20. N 2. Mayo-Agosto. 1999. p 69-76.

Álvarez, E. N, Lancestremere, J, Mareglia, J. C, Barr, J. *Fundamentos de la trafilación. Tecnología Mecánica II*. Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ingeniería, 2004.

Barceinas, S y Juárez, H. *Propiedades, Fortalecimiento y comportamiento de los Materiales*, Capítulo IV, 2001.

Bower, A F; Johnson, K L. *The Influence of Strain Hardening on Cumulative Plastic Deformation in Rolling and Sliding Line Contact*. J. Mech. Phys. Solids. Vol. 37, no. 4, pp. 471-493. 1989.

- Calero A. *Técnicas de muestreo*. Editorial pueblo y educación. Ciudad Habana. 1976. 506 p.
- Callister, W. *Materials Science and Engineering. An Introduction*. Fifth Edition. Department of Metallurgical Engineering. University of Utah. John Wiley & Sons, Inc. 1999. 8195 pp. ISBN 0-471-32013-7.
- Chen, Z; et al. (2000). *Yield surfaces of fcc crystals with crystallographic slip and mechanical twinning*. Transactions of Nonferrous Metals Society of China. Vol.10. No.1. P.34-39. Disponible en la World Wide Web.
- Clauser, H. R. *Diccionario de materiales y procesos de ingeniería*. Editorial Labor S.A. Barcelona, 1985.
- Korotcishe. L. *Procesos progresivos en la deformación plástica superficial por rodadura*. Mir. Moscú. 1989. Pág. 53-64.
- Lim, D.S. El efecto del grado de endurecimiento por deformación plástica en la fricción y el desgaste durante la abrasión. *Wear*. Vol 13: 91-97. 1969.
- Mallo, M., *Manual teórico práctico del mecánico forjador*, Editorial Pueblo y Educación, 1987, Cuba. Pág 93-121 y 145-152.
- Martínez, F. Martínez, H. *Adaptación de máquinas pulidoras para ensayos de desgaste abrasivo*. Revista construcción de maquinaria. Santa Clara. No 1: 47-55. 2006.
- Mazein, P.G., Prusakov, D.V., Tchunin, A.V., “*Modelling the residual stresses and deformation during a surface plastic deformation operations*”, *Proceeding of the Chelyabinsk Scientific Center*, Issue #1, (10). January-March 2001, Russia.
- Miller R., John E. Freun, Richar Jonson. *Probabilidad y Estadística Para Ingeniero*. Editorial Félix Varela. La Habana Cuba 2005. pp 25 – 30.
- Moreno, P. A. “*Una teoría discreta de dislocaciones en redes cristalinas "Dpto. Mecánica de medios continuos*. Universidad de Sevilla. Obtenido de la Red mundial el Lunes 28 de Febrero de 2005.
- Moya, J.C., “*Investigación teórico-experimental de la influencia del proceso de rodilado en las cualidades microgeométricas y fisico-mecánicas del acero 30XH3A*”, Trabajo de Titulación de Maestría, UCLV, 1996, Cuba.
- Montgomery. D.C. *Diseño y análisis de experimentos*. Editorial Félix Varela. La Habana. 2004. 585 p.
- Odintsov, L.G. *Fortalecimiento y acabado de las piezas mediante la deformación plástica superficial*”, Editorial CM, 1987. Pág 385-422, URSS.
- Oliveros, E. *Desgaste de los rodillos radiales de los transportadores sinfines para mineral laterítico*. Tesis presentada en opción al Título de Ingeniero Mecánico. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2011.
- Pero-Sanz, J.A. “*Ciencia de los materiales. Metalurgia Física: Estructura y Propiedades*”, Editorial DUSSAT SA, 3ra Edición. España. (2000). pp. 393-502.
- Pickering, F.B. *Proceedings of High Manganese Steel*, ASTM A 128 AB. Edited by Foct and A. Hendry, Institute of Metals. 1996. 34 p.
- Sardiñas H. *Metrología dimensional*. Editorial ISPJAE. 1986

## Benigno Leyva de la Cruz

Smelianky, V. M., Kalpin Y. G., Barinov V.V. “*Empleo de las posibilidades plásticas de los metales en la capa superficial de las piezas durante la elaboración por rodilado exterior.*” Revista “Novedades de la Construcción de Maquinarias”. Moscú. Pág. 54-58. No. 8. 1990. URSS.

Sugino Corporation, “*Superroll – Rollerburnis hing tool*”, USA, Obtenido de la Red mundial el 15 de febrero del 2005. <http://www.suginocorp.com>.

Tubielewicz, K., Jeziarski, J., Znorko, D.A., “*Calculation pressures and the contact field in the contact zone of a burnishing roller and worked material*”, Prace Naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automaty zacji Politechniki Wroclaw skiej, No. 76, 2000, Pages 93-99, Poland.

Velázquez, A. *Fragilización de la aleación HH por precipitación de fases SIGMA*. Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas. Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba. Facultad de Metalurgia y Electromecánica. 2002.



**Benigno Leyva De la cruz:** Es graduado de Ingeniero mecánico, en el Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Es Master en Ciencias Electromecánica del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Es profesor de las asignaturas mediciones técnicas y diseño estadístico de experimentos para ingenieros mecánicos con 10 años de experiencia en la docencia. Es profesor asistente del departamento de Mecánica de la misma Institución. Su área de investigación es procesos de manufacturas.