

Fricción y desgaste en elementos circulares empleados en pasadores

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

Recibido el 11 de diciembre de 2008; aceptado el 4 de marzo de 2009

Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo establecer el comportamiento de los pasadores fabricados de acero 45 empleados en las esteras de los equipos de laboreo minero, los cuales por su condición de trabajo, se desgastan prematuramente producto de la fricción por rodadura, pero que a la vez, este fenómeno trae consigo el endurecimiento superficial de las capas tratadas térmicamente. Para dar cumplimiento al objetivo se utilizaron probetas de los elementos antes de su puesta en marcha y retirado después de su función. Fueron preparadas probetas de 30 x 30 mm cortadas con abundante refrigeración para comprobar su composición química con el empleo del espectrómetro cuántico de masa y su dureza inicial y final, así como probetas de 15 x 15 mm para el análisis microestructural. Se establece el comportamiento de la estructura cristalográfica del pasador tratado térmicamente antes de ser sometido a carga y la estructura después del período de vida útil. También con el trabajo se demuestra el endurecimiento del acero por acritud cuando el material es sometido a la fricción por rodadura.

Palabras claves: pasadores, fricción, rodadura, análisis microestructural, endurecimiento superficial.

Friction and waste in elements circular employees in pins.

Abstract

The present work has as objective to establish the behaviour of the fabricated pins of steel grade 45 used in the mats of mining equipment. Due to its working condition, these pieces prematurely wear away because of the rolling friction. At the same time, this phenomenon produce a superficial hardening of the outside layers thermally heat treated. To accomplish this aim some samples of non-used tubes and some used for a period of time were compared. Samples of 30 x 30 mm, cut with abundant refrigeration, were used for chemical analysis with the employment of a mass quantum spectrometer. The initial and final hardness of the different samples were also measured. Samples of 15 x 15 mm were used for microstructure analysis. The microstructure of heat treated pins before being subjected lo load and after a period of load were studied. In the research results it is also confirmed the pin hardening due to rolling friction.

Key words: aolling, analysis microestructural, superficial hardening.

1. Introducción.

Los equipos de laboreo minero en la industria cubana del níquel están expuestos a severas condiciones de trabajo, si se tiene en cuenta que la actividad que realizan es el acopio del mineral laterítico en un terreno que posee una topografía irregular trayendo consigo el desgaste progresivo en elementos indispensables para el adecuado funcionamiento de dichos equipos. Dentro de los

elementos que más se afectan por este fenómeno son los que componen las esteras, (ver figura 1), debido al régimen de trabajo anteriormente mencionado y las condiciones de diseño que no permiten la lubricación de estos elementos y que este rozamiento en seco haga que sea más notable el efecto del desgaste. El desgaste abrasivo de estos elementos provoca que las esteras pierdan el paso hasta tal punto que

queden fuera de servicio y la reparación de algunos de estos elementos o la sustitución de las esteras completas encarezca el proceso de producción industrial.

La destrucción de la pieza según [2], se produce por la transferencia de energía cinética de un cuerpo simple sobre una superficie de extensión apreciable. Este efecto produce deformación superficial y subsuperficial del material que altera su forma, sus dimensiones, y principalmente los estados tensionales a nivel de la red cristalina. Todos estos fenómenos pueden provocar la fractura por fatiga.

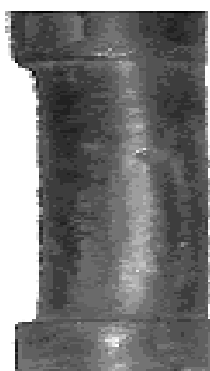


Figura 1. Pasador de las esteras en los equipos de laboreo minero deteriorado.

Considera [6] que, la durabilidad de una pieza depende de la acción repetida de las cargas. Tal es el caso de los procesos de destrucción paulatina como son: el desgaste abrasivo, la fatiga y la fluencia. Durante el proceso de fatiga por rodadura, cuando el material es deformado por encima del límite de fluencia se desarrolla una deformación plástica en la que se puede provocar la aparición de una microgrieta [9]. En la zona cercana a la misma la cantidad de metal deformado plásticamente es considerable.

En el desgaste abrasivo [10], influye la dureza y la tenacidad del material. La tenacidad es la resistencia que opone el material deformado por la acción de las partículas abrasivas, a la rotura. El desgaste depende también del coeficiente de fricción, fuerza de unión adhesiva entre partículas de la superficie del metal y las partículas abrasivas. Cuando los valores del coeficiente de fricción son elevados, se favorece el proceso de microcorte.

Plantean [2] y [3], que en los procesos deformacionales que tienen lugar en micro irregularidades de las superficies en contacto están en dependencia de las presiones que se originen en las áreas reales de contacto. Si el valor de estas presiones no alcanza el límite de fluencia del material más blando las deformaciones que predominan son elásticas y el mecanismo de desgaste predominante es el de fatiga superficial. Por otro lado, el desgaste por deslizamiento tiene una gran relevancia sobre el mecanismo de desgaste por fatiga de contacto por rodadura, ya que un aumento en el porcentaje de deslizamiento/rodadura puede causar una mayor pérdida de masa de las superficies en contacto.

Otro autor [14], considera que 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.

Cuando la deformación alcanza un valor crítico por encima del límite de acritud, [7], 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.

El desgaste metálico y abrasivo están caracterizados por el deslizamiento y arranque de la superficie metálica plantea [4], la única diferencia radica en que uno ocurre entre metales y el otro con un abrasivo metálico o no metálico. Por lo que el modo de acción será análogo en los dos casos.

Lo anterior puede provocar el efecto de endurecimiento debido a las tensiones normales y tangenciales que se crean, esto se traduce como un aumento de la acritud en las subcapas del

material [11]. 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. Revisión bibliográfica. Han sido varias las vías utilizadas para combatir el desgaste abrasivo y frenar las pérdidas que el mismo ocasiona. La resistencia al desgaste se consigue con una alta dureza superficial. En esta dirección han trabajado varios investigadores. Son diversos los métodos para el endurecimiento de los metales [6].

El desgaste por fatiga superficial generalmente se considera debido a la acción de las tensiones o esfuerzos superficiales, sin medir necesariamente otra interacción físicas entre las superficies de los cuerpos sólidos. El proceso de desgaste por fatiga está relacionado con ciclos de tensiones repetitivos en el contacto por rodadura o por deslizamiento.

El acero 45 puede lograr unificar las propiedades de resistencia al desgaste en consecuencia constituye el material idóneo para garantizar la asignación de servicio de piezas de maquinarias, ya que es un material con facilidad de conformar su costo de producción es bajo y ofrece buenas condiciones de trabajo al desgaste y la fatiga este endurece por deformación plástica, no obstante en las condiciones en que se ofertan en el mercado dichos elementos fabricados de este material, no se garantiza la dureza requerida antes de su puesta en explotación. [13].

Los aceros con una alta cantidad de austenita retenida presentan una considerable resistencia al desgaste en masa abrasiva. La mejor estructura, desde el punto de vista de la resistencia al desgaste abrasivo es la martensita o bainita, fortalecida en su matriz con elementos tales como silicio, y disperso sobre ella carburo de cromo y manganeso, los cuales se oponen a la deformación plástica de la matriz, deteniendo el movimiento de las dislocaciones [8].

2. Materiales y métodos.

Cálculo del desgaste en los pasadores.

En la práctica industrial los elementos de máquinas pueden presentar características dinámicas diferentes debido al tipo de unión, condiciones del medio y tipo de desgaste. El esquema más sencillo es el lineal en este caso el desgaste con relación al tiempo de trabajo se determina según. [10].

$$W = K \cdot t \quad (1)$$

Donde:

W: Desgaste lineal por fatiga; mm

t: Tiempo de trabajo; hr

Recorrido de fricción: Se determina generalmente cuando conocemos las dimensiones del radio medio de contacto y semiancho de la banda de contacto, [15]

$$S_f = 2 \cdot \pi \cdot r_{med} \cdot b \quad (2)$$

Donde:

r_{med} : Radio medio; mm.

b: Semiancho de la banda de contacto; mm.

Desgaste volumétrico: Este generalmente se determina partiendo del indicador lineal del desgaste.

$$W_v = W_h \cdot A_n \quad (3)$$

Intensidad volumétrica del desgaste:

$$I_v = \frac{V}{S_f \cdot A_n} \quad (4)$$

Donde:

I_v : Intensidad volumétrica del desgaste; mm

V : Volumen del material desgastado; mm³.

A_n : Área de fricción nominal; mm²

Carga: Esta entra en una unidad del largo de los cilindros cóncavos y convexos, suponiendo que aquella esta distribuida uniformemente a lo largo de la longitud del pasador.

$$q = \frac{F_n}{l} \quad (5)$$

Donde:

l : Longitud del pasador; mm

F_n : fuerza nominal que actúa sobre el pasador; N
 q : Carga que soporta el pasador; N/mm
 Los semiejes de la zona de contacto elíptica, para este contacto considera [10], se determina por medio de la fórmula.

$$b = 1.128 \sqrt{\frac{F_n R_1 R_2}{l \cdot R_2 - R_1} \left[\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right]} \quad (6)$$

Donde:

R_1 - Radio del pasador; (mm).

R_2 - Radio del casquillo; (mm).

E -Módulo de elasticidad; kgf / cm^2

μ -Coeficientes de Poisson.

Si $E_1 = E_2 = E = 2,1 \times 10^6$ y $\mu_1 = \mu_2 = 0.3$, se analiza según [6].

Tensión máxima en el centro de la zona de contacto casquillo/ pasador: A través de la estrecha relación que existe entre la fuerza que actúa y a cierta profundidad que depende de la relación que existe entre a y b (b/a) se utiliza la siguiente ecuación.

$$\sigma_{\max} = 1,5 \frac{F_n}{\pi \cdot a \cdot b} \quad (7)$$

Donde:

$\sigma_{\max}$: Tensión máxima en el centro de la zona de contacto pasador; N/mm^2

Las presiones se distribuyen irregularmente. La presión mayor, que actúa en el centro del área de roce, es 1.5 mayor que la media y se determina por la siguiente ecuación. [15]

$$P_{\max} = \frac{1.5 \cdot F_n}{\pi \cdot a^2} \quad (8)$$

Donde:

$P_{\max}$: Presión máxima de contacto; N/mm^2

a : Radio del área del Coeficiente de Poisson; mm

Del análisis del estado de tensión en los puntos característico en el caso de una zona de contacto circular, la tensión máxima en el centro de la zona de contacto se determina por:

$$\sigma_3 = -|\sigma_{\max}| = -1,5 \frac{F_n}{\pi a^2} = 0,388 \sqrt{4 F_n \frac{E_1^2 E_2^2}{(E_1 + E_2)^2} \cdot \frac{(R_1 + R_2)^2}{(R_1^2 + R_2^2)}} \quad (9)$$

Se puede considerar también calcular el valor de la tensión máxima en el centro de la zona de contacto, a partir de la siguiente ecuación según [15]

$$\sigma_3 = -P_{\max} \quad (10)$$

σ_3 : Tensión máxima en el centro de la zona de contacto se determina por; N/cm^2

En los pasadores de deslizamiento radial curvo la tensión máxima de contacto se determina por:

$$\sigma_{\max} = 0,5642 \sqrt{\frac{F_n}{l} \frac{\left(\frac{R_2 - R_1}{R_1 \cdot R_2} \right)}{\left(\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2} \right)^2}} \quad (11)$$

Donde:

$\sigma_{\max}$: Tensión máxima de contacto; N/cm^2

Se puede considerar también para calcular el valor de la Tensión máxima de contacto, por consideraciones de [5] a partir de las siguientes ecuaciones.

$$\sigma_{\max} = 0,418 \sqrt{\frac{F_n \cdot E}{l} \frac{R_2 - R_1}{R_1 \cdot R_2}} \quad (12)$$

$$\sigma_{\max} = 0.418 \cdot \sqrt{F_n \cdot E \div l \cdot R} \quad (13)$$

La existencia del microcorte que depende del grado de penetración de las asperezas o partículas abrasivas se puede determinar por la siguiente recomendación:

$$D_p = R \left(\frac{\pi \cdot HV}{2 F_n} \right)^{0.5} - \left(\frac{\pi \cdot HV}{2 F_n} R^2 - 1 \right)^{0.5} \quad (14)$$

Donde:

D_p = Grado de penetración; μm o mm.

HV = dureza del material mas blando; kg / mm^2

R - radio de la aspereza o abrasivo; μm o mm.

El microcorte se produce cuando el grado de penetración $D_p > 0,27 \mu m$

$$0.10 < D_p < 0.27$$

$D_p = 0.09$ deformación plástica por rayado.

Preparación de las probetas.

Se prepararon probetas con dimensiones de aproximadamente 30x30 mm, estas probetas se cortaron en una segueta mecánica, con

refrigeración constante y baja velocidad de corte para evitar el calentamiento excesivo de la misma. Las mediciones de la dureza se realizan por el método de Rockwell (HRC). Las muestras de los materiales se pulieron para eliminar toda suciedad superficial en la pieza. Para realizar este ensayo se utiliza un durómetro con las siguientes características:

Carga aplicable em: (N).

Previa: 98.1

Total: 588.4, 980.7 y 1 471

Tiempo de aplicación de la carga (s): 8

Tipo de penetrador: Cono de diamante

Cambio de la carga: Manual

Masa: 155 kg

En este caso se aplicó una carga de: 1 471N

2.1 Examen micrográfico.

El análisis de la composición química de las muestras preparadas con una dimensión de 30 x 30 mm, se realizó empleando un espectrómetro cuántico óptico de Masa ESPECTROLAB 230, con electrodo de carbón bajo arco sumergido en atmósfera de argón.

El examen micrográfico se realiza sobre muestra o probeta con 15 x 15 mm de material similar al del pasador desgastado y deformado después de su vida útil, y la de una muestra patrón. Se prepara una superficie que luego de ser pulida convenientemente, se ataca con reactivo químicos apropiados.

2.1.1. Ataque químico.

El ataque químico se realiza con el objetivo de resaltar la estructura obtenida después de realizado el pulido hasta alcanzar el brillo de espejo, para observar la estructura metalográfica formada después del desgaste y la deformación del pasador.

Para este ataque químico se utiliza: (Nital 4%)

Ácido Nítrico (HNO_3): 5ml

Alcohol (etanol): 100ml

2.1.2. Pulido de las probetas.

En el pulido se emplearon lijas del tipo N°- 180, 400 y 600, el pulido se llevó a cabo con papel abrasivo montado sobre una placa de vidrio,

cambiando el sentido del lijado 90° al pasar de un pliegue a otro de manera que se elimine la capa de metal distorsionado y deslizado dejado por el anterior. Para lograr una superficie lisa y pulida libre de impregnación de impurezas o ralladuras, 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.

3. Resultados y discusión

3.1. Metodología de cálculo.

Como resultado de las ecuaciones desarrolladas para determinar el desgaste superficial en elementos circulares empleados en pasadores se determinó:

El esquema más sencillo para el cálculo del desgaste por fatiga es el lineal, donde el desgaste de los pasadores ocurre en consecuencia al tiempo de trabajo 6 720 hr y el coeficiente de desgaste de 0.6, utilizando la ecuación (1).

Se determinó que el desgaste lineal por fatiga tiene un valor de:

$$W = 1.452 \times 10^7 \text{ seg}$$

La intensidad lineal del desgaste se determina conociendo las mediciones realizadas a los pasadores desgastados y el recorrido de fricción de 7.225 mm^2

Se determinó que la intensidad lineal para 9 mediciones es:

$$I_h = \frac{\begin{matrix} 0 \\ 69.209 \\ 138.418 \\ 207.626 \\ 276.835 \\ 311.44 \\ 415.253 \\ 484.462 \\ 553.671 \end{matrix}}{1 \text{ m}}$$

El radio reducido en la curvatura en la zona de contacto se determina por el radio del pasador/casquillo de 2.5 mm y 30 mm respectivamente. Lo que indica que el radio

reducido de los cuerpos en la zona de contacto sea de

$$R = 13,636 \text{ mm}$$

El semiancho de contacto b del pasador ocurre en consecuencia de la fuerza nominal de 257 250 N y el radio reducido de la curvatura de contacto del pasador/casquillo con una longitud del pasador de 240 mm y un módulo de elasticidad para acero de $2.1 \cdot 10^6 \text{ N/mm}^2$

Se tuvo como resultado del semiancho de contacto el siguiente:

$$b = 0,09 \text{ mm}$$

El recorrido de fricción se determina generalmente en zona de fricción del pasador en dependencia del radio medio de contacto que es de 12.5 mm y semiancho de la banda de contacto.

Donde se determinó que el recorrido de fricción tiene el siguiente resultado:

$$S_f = 7,225 \text{ mm}^2$$

El área nominal de contacto en cuerpos de superficies curvas para contacto entre cuerpos cilíndricos cóncavos y convexos con eje paralelos es:

$$A_n = 43,089 \text{ mm}^2$$

Radio o el semieje a para un Coeficiente de Poisson de 0.3 se determina teniendo en cuenta la fuerza nominal y el la radio de curvatura de contacto entre el pasador/ casquillo con el módulo de elasticidad.

El semieje a , da como resultado el siguiente.

$$a = 1,337 \text{ mm}$$

El resultado obtenido del desgaste volumétrico de los pasadores con 9 mediciones es:

$$W_v = \begin{pmatrix} 0 \\ 22.076 \\ 44.153 \\ 66.229 \\ 88.306 \\ 99.344 \\ 132.459 \\ 154.535 \\ 176.612 \end{pmatrix} \text{ mm}^3$$

La intensidad volumétrica del desgaste cuando el desgaste volumétrico, el área nominal y el

recorrido de la fricción se conocen en los pasadores con igual número de mediciones es:

$$I_v = \begin{pmatrix} 0 \\ 69.209 \\ 138.418 \\ 207.626 \\ 276.835 \\ 311.44 \\ 415.253 \\ 484.462 \\ 553.671 \end{pmatrix} \frac{1}{\text{m}}$$

La velocidad o razón de desgaste permite medir el ritmo del proceso de desgaste y el tiempo en que este ha tenido lugar.

La velocidad del desgaste para los pasadores para 9 mediciones es:

$$W' = \begin{pmatrix} 0 \\ 2.067 \times 10^{-11} \\ 4.134 \times 10^{-11} \\ 6.2 \times 10^{-11} \\ 8.267 \times 10^{-11} \\ 9.301 \times 10^{-11} \\ 1.24 \times 10^{-10} \\ 1.447 \times 10^{-10} \\ 1.653 \times 10^{-10} \end{pmatrix} \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

El resultado de la carga aplicada en el pasador es:

$$q = 1,072 \cdot 10^3 \text{ N/mm}$$

Se determinó el Peso nominal teniendo en cuenta la fuerza nominal y dos veces el semiancho de la banda por la longitud del pasador.

Peso nominal que resiste el pasador es:

$$P_n = 5,97 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$$

La tensión máxima de contacto que actúa sobre el pasador y el casquillo es:

$$\sigma_{\max} = 9,984 \cdot 10^5 \text{ N/mm}^2$$

La presión se distribuye irregularmente la mayor, que actúa en el centro del área de roce, es 1.5 mayor que la media correspondiente a la presencia de la fuerza normal y el semieje a , que actúa en el pasador.

La presión máxima que resiste el pasador es:

$$P_{\max} = 6,867 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2$$

Del análisis del estado de tensión en los puntos característicos en el caso de una zona de contacto circular, la tensión máxima en el centro de la zona de contacto del pasador se determina teniendo en cuenta la fuerza nominal y el semieje a , que actúa en el pasador.

La tensión máxima en el centro de la zona de contacto de los pasadores es igual a:

$$\sigma_3 = -6,867 \cdot 10^4 \text{ N/mm}^2, \text{ donde: } \sigma_3 = -p_{\max}$$

En los pasadores de deslizamiento radial curvo la tensión máxima de contacto se determina según la fuerza nominal, módulo de elasticidad, longitud y el radio de curvatura que actúa sobre el pasador.

$$\sigma_{\max c} = 5,241 \cdot 10^3 \text{ N/mm}^2$$

El grado de penetración de las asperezas o partículas abrasivas teniendo en cuenta las condiciones de trabajo del equipo y que actúa en los pasadores, el diámetro de la partícula abrasiva que actúa en los pasadores es:

$D_p = 0,6 \text{ } \mu\text{m}$, que es una deformación plástica por rayado.

3.2. Composición Química de las probetas.

La composición química se tomó como promedio de los resultados de tres chispas para sacar el de cada una de ellas. Dicha composición química del pasador deteriorado se muestra en la tabla 1. Se tomó el pasador el cuál estuvo sometido a la acción de trabajo continuo, una vez que la pieza se puso fuera de explotación por perder su configuración geométrica. Con este análisis se determinó la composición química del pasador deteriorado.

Tabla No. 1. Composición química de pasador deteriorado.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.46	0.24	0.98	0.01	0.019	0.19	0.02
Ni	Al	Co	Cu	Ti	V	W
0.06	0.005	0.01	0.16	0.0047	0.00	0.01
Pb	Sn	As	Ce	B	Zn	Fe
0.002	0.009	0.01	0.005	0.001	0.0034	97.82

Se determinó que el pasador corresponde con la composición química de un acero del tipo AISI 1045 según norma ASTM.

3.3. Análisis de la dureza de los materiales en estudio.

Para determinar la dureza de cada material se tomaron muestras de cada uno de ellos. Las mediciones de la dureza se realizaron por el método de Rockwell (HRC), y se realizaron al menos cuatro mediciones para cada muestra en diferentes lugares, las cuales aparecen en la tabla 2.

Tabla No. 2. Dureza del pasador deteriorado.

Zona	Partes	Dureza(HRC)
El centro o parte desgastada y o deformada por rodadura.	superficie	47 - 48
	Interior	12 - 14
Extremo o parte deformada por presión debido al ajuste por interferencia	superficie	39 - 40
	Interior	12 - 14

La dureza que posee el pasador en toda la longitud deformada por rodadura, está compuesta por dos capas, una relacionada con el tratamiento térmico recibido antes de su uso, que es de aproximadamente de 4 mm y luego de ser sometida por el propio trabajo al esfuerzo de rodadura, se observa una profundidad de esta capa de 1.5 mm.

Se tomó en consideración la dureza de los elementos que incidían directamente en la fricción por contacto con el pasador, para ello se tomó la dureza del buje o casquillo y del eslabón de la cadena. En las tablas 3 y 4 se muestra la composición química de ambos elementos.

Tabla No. 3. Composición química del buje o casquillo.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.40	0.34	1.15	0.015	0.019	0.27	0.01
Ni	Al	Co	Cu	Ti	V	W
0.03	0.0118	0.00	0.03	0.033	0.00	0.01
Pb	Sn	As	Ce	B	Zn	Fe
0.002	0.005	0.006	0.005	0.0014	0.0039	97.66

Tabla No. 4. Composición química del eslabón de la cadena.

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
0.45	0.26	1.54	0.016	0.011	0.22	0.02
Ni	Al	Co	Cu	Ti	V	W
0.05	0.0165	0.01	0.09	0.0024	0.00	0.01
Pb	Sn	As	Ce	B	Zn	Fe
0.002	0.011	0.007	0.005	0.001	0.0026	97.29

Después de analizada la composición química se determinó que el casquillo es AC 1540 y el eslabón es AC 1545. Esto demuestra que según la cinemática del par tribológico, se considera un par directo ya que el par de mayor dureza se mueve con respecto al más blando y además se cumple que el área nominal del más duro es menor que la del más blando.

Esto demuestra que en el par directo durante la acción de la carga, la deformación plástica del elemento de menor dureza obstaculiza el funcionamiento normal del par, motivo por el cual aumenta la fricción, aumenta el grado de deterioro de la superficie y ocurre la rotura.

3.4. Observación con microscopía óptica.

Después de pulidas y atacadas químicamente las muestras, se procede a la observación en el microscopio óptico. Se montan las muestras en la platina y se comienza la observación cambiando la combinación del ocular y objeto.

Estas observaciones se le realizaron al pasador deteriorado, en la parte desgastada y deformada por rodadura y a la parte que se deforma debido a la presión ejercida en el ajuste por interferencia. Además se observó una muestra patrón de acero de este mismo tipo sin aplicarle ningún método de endurecimiento en especial.

En cada muestra del pasador se ilustran fotografías tomadas con diferentes aumentos, a la microestructura del centro de la sección transversal del pasador, del borde y de la zona de transición entre la parte endurecida por tratamiento térmico y la zona que no se logró endurecer por este tratamiento, así como muestras de la micrografía de la probeta patrón de acero 45.

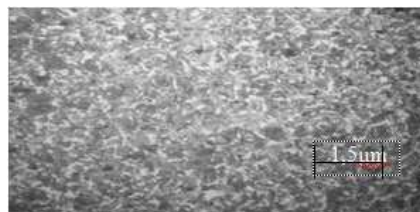
**Figura 2.** Corte transversal en la superficie del pasador tratado térmicamente. 100X.

Como se observa en la figura 2, la microestructura del pasador desgastado y deformado está compuesta por una estructura martensítica. Sin embargo, se puede apreciar una franja de aproximadamente 1,5 mm de granos de martensita más finos que disminuye su espesor a medida que se incrementa la profundidad desde la superficie hacia el núcleo.

Esta franja de pequeño espesor, donde las agujas de martensita son más finas, tiene su origen en los procesos de deformación a la que se somete la superficie del pasador durante las operaciones, lo que provoca una disminución en el tamaño de los granos y la aparición ocasional de bloques de mosaico que permiten delimitar perfectamente una zona de la otra.

**Figura 3.** Corte transversal en la superficie del pasador tratado térmicamente. 300X.

Como se aprecia en la figura 3, la microestructura de un pasador tratado térmicamente, pero sin deformar se corresponde con la martensita más austenita residual y a diferencia de la micrografía de la figura 4, la microestructura es prácticamente homogénea y no aparecen zonas superficiales deformadas.

**Figura 4.** Micrografía del corte transversal del núcleo del pasador. 150X.

Sin embargo, para esta última, en el núcleo del pasador se corresponde con una estructura compuesta por perlita más ferrita, típica del estado de normalizado, como se observa en la figura 5.

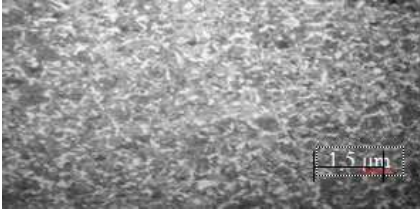


Figura 5. Corte transversal de la muestra patrón de AISI 1045 normalizado. 150 X.

3.5. Análisis de microdureza.

En la tabla 5 se muestra el comportamiento de la microdurezas realizadas en las probetas a diferentes profundidades, la dureza 1 corresponde al pasador tratado térmicamente y sin uso y la dureza 2 al pasador retirado de su vida útil deformado por la fricción por rodadura.

Tabla No. 5. Comportamiento de la microdureza (HV) en las probetas.

Dureza 1	Dureza 2	Profundidad μm
268	280	300
266	278	500
264	276	700
263	272	900
262	270	1000
260	268	1200
260	264	1300
258	256	1500

Se determino que la dureza 1 correspondiente al pasador nuevo existe una dureza adquirida por el tratamiento térmico, típica en los aceros de medio contenido de carbono y un aumento en la dureza de la probeta 2 producto de la fricción por rodadura, lo que demuestra que el desgaste por fricción por rodadura a endurecido la superficie de trabajo del pasador producto de la acritud. (Ver figura 6).

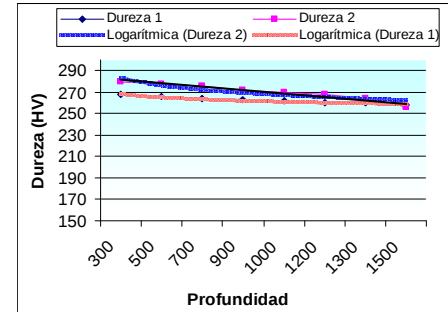


Figura 6. Comportamiento de la dureza en correspondencia con el desgaste.

El análisis estadístico para comparar el comportamiento de la dureza 1 con la dureza 2 se puede ver en la tabla 6.

Tabla No. 6. Resumen estadístico.

Resumen Estadístico		
	Dureza 1	Dureza 2
Observaciones	8	8
Media	262,625	270,5
Varianza	11,125	62,5714
Desviación típica	3,33542	7,91021
Mínimo	258,0	256,0
Máximo	268,0	280,0
Rango	10,0	24,0

Según se observa en la figura 3 existe incremento de la dureza en la medida que el desgaste incide en la capa superficial del pasador producto de la fricción, en la tabla 6 se observa diferencia estadísticamente significativa entre la dureza 1 y la dureza 2, lo que demuestra que según se profundiza el desgaste el pasador quede retirado de su función.

4. Conclusiones.

1. Los equipos de laboreo minero sufren los efectos del desgaste, principalmente en los elementos que están sometidos a rodadura en seco, como es el caso de los que componen las esteras de dichos equipos y en particular los pasadores de estas, hasta el punto de quedar fuera de servicio.
2. Los pasadores están sometidos simultáneamente a diferentes tipos de desgaste, pero los que mayor influencia tienen en su deterioro son: el desgaste por fatiga, el desgaste adhesivo y el desgaste abrasivo.
3. Aunque los pasadores poseen alta dureza, sobre ellos tiene influencia también la deformación

plástica, debido a que las superficies con las que entran en contacto poseen mayor dureza.

4. Fueron empleadas probetas de 30 x 30 mm para comprobar la dureza de los pasadores antes de su puesta en función y después de esta, así como para comprobar su composición química y probetas de 15 x 15 mm para el examen micrográfico.

5. Para realizar el análisis metalográfico y poder resaltar los constituyentes de la estructura cristalina del material, después de pulidas las probetas se empleó reactivo químico con 5 ml de ácido nítrico y con 100 ml de alcohol etanol (Nital)

6. Las micrografías de los pasadores muestran que estos poseen en su superficie, antes de su puesta en explotación, una microestructura martensítica y después de su vida útil se aprecia una variación en el tamaño de los granos de dicha superficie, lo que disminuye debido a la deformación plástica por el efecto de la rodadura.

5. Referencias.

1. **GULIAEV, A.** *Metalografía*. Moscú: Editorial Mir, 1983. vol. 1, 53-89 p.
2. **SARKAR, A. D.** *Friction and wear*. London: Academic Press Inc. LTD, 1980. 423 p.
3. **BHUSHAN, B.** *Modern Tribology Handbook*, vol. 2". *Materials, Coatings & Industrial Applications*, CRC Press, 1275-1297. vol. 10, nº 1, p. 34-39. Disponible en: <http://www.chinainfo.gov.cn/periodical/index.htm>
4. **MARTÍNEZ, F. y WIESLAW, M.** "Aspectos físico- químicos del desgaste abrasivo". *Revista Construcción de Maquinaria*. 1981, vol. 2, p. 11-35.
5. **FERNÁNDEZ, G.** *Resistencia de materiales*. Villa Clara. Cuba: 1980. vol. II.
6. **CLAUSER, H. R.** *Diccionario de materiales y procesos de ingeniería*. Barcelona: Editorial Labor S.A, 1985.
7. **LUBRINER, J.** *Plasticity Theory*. En University of California at Berkeley. 1986, 2001, cap. 2, p. 77-86.
8. **PERO-SANZ, J. A.** *Ciencia de los materiales. Metalurgia Física: Estructura y Propiedades*. 3ra ed. España: Editorial DUSSAT. S.A., 2003. 393-502 p.
9. "Influence of Alloying Elements on Steel Microstructure". *Key to Steel Web Site*. 2002, [Consultado el: 15 de julio de 2006]. Disponible en: <http://www.key-to-steel.com/>.
10. **ÁLVAREZ, L. y GONZÁLEZ, J.** "Máquina para el estudio del desgaste abrasivo en pares tribológicos". *Revista Construcción de Maquinaria*. Santa Clara. Cuba. 1995. vol. 2, p. 69-76.
11. **VERDEJA, L. y GONZÁLEZ, R.** "El Desgaste de Materiales en el Crisol de Horno Alto: conceptos Generales". *Revista de Minas*. Madrid. 1996. 13 -14, p.
12. **CLAYTON, P. y SU, X.** "Surface Initiated Fatigue of Pearlite & Bainite Steels Under Water Lubricated Rolling". *Sliding Contact, Wear*. 1996, vol. 200, p. 63-73.
13. **DÍAZ, S. y ROBERT, T.** "Efecto del bruñido por rodillo simple en el acero AISI 1045". *Tecnología y Desarrollo*. México. jul.-sep 2005. vol. 7, nº 2.
14. **SMELIANKY, V. M.; KALPIN, 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*. Moscú. URSS. 1990. vol. 8, p. 54-58.
15. **DOBROVOLSKI, Z.; MAK, R., et al.** *Elementos de maquinas*. Moscú: Editorial Mir, 1970.

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

Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa. Las Coloradas s/n, Moa, Holguín. CP 83 329. Cuba.

Teléfono: 53 24 6 4476. Fax: 53 24 6 2290

E-mail: tfernandez@ismm.edu.cu, irgonzalez@ismm.edu.cu, dalcantara@ismm.edu.cu